

86



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

ANALISIS DE RIESGOS UNA MANERA DE REDUCIR CONSECUENCIAS

T E S I S

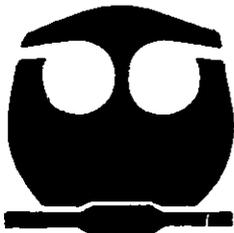
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERA QUIMICA

P R E S E N T A :

KATIA LEAL VALLECILLO

6599617



MEXICO, D. F.

2000



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

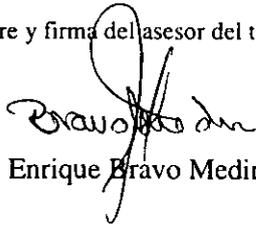
Jurado asignado:

Presidente	Prof. Enrique Bazúa Rueda
Vocal	Prof. Enrique Bravo Medina
Secretario	Prof. Eduardo Marambio Dennett
1er. Suplente	Prof. Rodolfo Torres Barrera
2o. Suplente	Prof. Victor Manuel Luna Pabello

Sitio donde se desarrolló el tema

Laboratorio 4 D Edificio A Facultad de Química

Nombre y firma del asesor del tema



Ing. Enrique Bravo Medina

Nombre y firma del sustentante



Katia Leal Vallecillo

AGRADECIMIENTOS

Gracias Señor y a tí María Auxiliadora por todo lo que soy, por la extraordinaria familia que tengo, por mis amigos, por la vida, simplemente porque puedo darles las gracias.

A mis padres, porque gracias a su esfuerzo diario e incansable me formaron como una persona de bien, con valores y principios y ahora como una profesionalista. Gracias por su paciencia y comprensión a lo largo de estos años, que dieron fruto pues hoy, ya es una realidad.

A mis hermanos, incansables amigos que siempre están al pie del cañón. Gracias Karina por escucharme y aguantarme y por todo tu cariño. Gracias Juan Carlos por tu apoyo y paciencia, así como tu perseverancia para que este trabajo fuera una realidad. Gracias nitos!. También Gracias Verito!!.

Veamos... Vicky, que te puedo decir..., solamente Gracias Amiga, pues sin tu apoyo, paciencia, cariño, tiempo y gasolina este esfuerzo no hubiera tenido todo el valor que tiene. Tu amistad es un regalo de allá arriba.

A Liliana, por todo su apoyo incondicional, su paciencia, su sabiduría y sobretodo su cariño y amistad durante casi ya 20 años.

A Diana Sanchez, mi compañera de cuarto en UNB, con quien compartí y aprendí el valor de saber escuchar sin palabras, de ser humilde, a agradecer con acciones, siempre decir que sí con una sonrisa y por convertirse en una verdadera amiga. Gracias por aguantarme!.

Así como a Siham por su valiosa y padrísima amistad de 17 años . Gracias amiga.

Gracias también a tí Karina, que aunque lejos físicamente nunca dejaste que desertara, siempre me escuchaste y aconsejaste, Gracias hasta el continente de a lado.

Al Ing. Antonio Cantú S. por su apoyo, guía, comprensión, por escucharme, por compartir conmigo todos los momentos durante el desarrollo de este trabajo, por sus sabios consejos, por confiar en mí y siempre darme ánimos para continuar, Gracias!.

Al Ing. Ricardo A. Ramírez por su total apoyo y consejos. Gracias porque DuPont es también parte de esencial de este logro.

A Eduardo Marambio, "buana", por ser como mi padre en la Facultad, por su apoyo, su guía, sus consejos y su amistad Gracias!. Por verme crecer y formar parte de ello.

A la maestra Pilar Montagut por ser como mi madre en la Facultad, siempre escuchándome y aconsejándome, así como compartiendo conmigo mis alegrías y tristezas. Gracias maestra!.

A mi asesor el Ing. Enrique Bravo, mi prof. porque creyó en que este trabajo saldría tarde o temprano, por su guía, visión a futuro y apoyo. Gracias!

A Francisco J. Ramírez, por su esfuerzo y dedicación y por los varios fines de semana de arduo trabajo y por su siempre sonrisa y ánimo positivo. Sin tu apoyo este esfuerzo no hubiera podido ser realidad. mis más sincero agradecimiento.

Gracias a todos mis amigos de la carrera, a Juan y a Jesús por crecer conmigo durante los casi 5 de años de estudio y haberme enseñado el valor del trabajo en equipo. A Flor, Wally y Laura B. porque sin su apoyo mi noveno semestre no hubiera sido lo que fué. Por supuesto a: María José, Noam, Hiromi, Axel, Abraham, Laura V, Cristina O., Sandra P., Sandra M., Claudia A. (alias Sandra), Carmina (por su jalón de orejas en polímeros II), Jorge R., Carlos S., Martha M., Cynthia, Alejandro E., por todo lo que compartí y aprendí de Ustedes.

Y si te preguntas ¿y yo qué? También quiero decirte Gracias a tí, que de alguna u otra forma contribuiste al cumplimiento de este sueño tan anhelado y eres importante parte de lo que soy hoy.

INDICE

Introducción	5
Capítulo 1 Generalidades de los Análisis de Riesgos	11
1.1 Concepto de Peligro y Riesgo.	11
1.2 Clasificación de los Riesgos.	16
1.3 Evaluación de Peligros.	16
1.4 ¿Cómo hacer una evaluación de riesgos?	21
1.5 Metodologías de Análisis de Peligros.	24
1.6 Descripción de las Metodologías de Análisis de Riesgos y de Peligros.	28
1.6.1 Inspección de Seguridad. (<i>Safety Review</i>)	28
1.6.2 Lista de Verificación. (<i>Checklist Analysis</i>)	29
1.6.3 Jerarquización Relativa.	31
1.6.4 Evaluación Preliminar de Peligros (<i>Preliminary Hazard Analysis</i>)	32
1.6.5 ¿Qué Pasa sí? (<i>What if Analysis</i>)	32
1.6.6 ¿Qué Pasa sí? / Lista de Verificación. (<i>What if Analysis / Checklist Analysis</i>).	33
1.6.7 Análisis de Operabilidad (<i>Hazop Analysis</i>)	33
1.6.8 Análisis y Efectos de Modo de Falla (FMEA)	35
1.6.9 Árbol de Fallas (<i>Fault Tree Analysis</i>)	35
1.6.10 Árbol de Eventos (<i>Event Tree Analysis</i>).	36
1.6.11 Análisis Causa–Consecuencia (<i>Cause–Consequence Analysis</i>)	36
1.6.12 Análisis de Fiabilidad Humana (<i>Human Reliability Analysis</i>).	37
1.7 Análisis Comparativo entre las Metodologías.	38

Capítulo 2. Generalidades de los Análisis de Consecuencias.	44
2.1 Clasificación de los Modelos de Estimación de Consecuencias	45
2.1.1 Modelos de Fuente	46
2.1.1.1 Estado de Agregación de la sustancia emitida.	49
2.1.1.2 Ruta Termodinámica y su situación final.	50
2.1.1.3 Tamaño del orificio	51
2.1.1.4 Duración de la emisión	51
2.1.1.5 Otros Aspectos.	51
2.1.2 Modelos de Dispersion.	52
2.1.2.1 Velocidad del Viento.	55
2.1.2.2 Estabilidad Atmosférica	55
2.1.2.3 Condiciones de la superficie o terreno.	56
2.1.2.4 Altura del punto de emisión.	57
2.1.2.5 Momentum y comportamiento del material frente al Aire.	58
2.1.3 Modelos de Fuego y Explosión	58
2.1.3.1 Tipos de Explosiones.	60
2.1.3.1.1 Explosiones de Nubes de Vapor (ENV)	61
2.1.3.1.2 Explosiones Confinadas	62
2.1.3.1.3 Explosiones por la Expansión de Líquido en Ebullición (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosions (BLEVE))	62
2.1.3.1.4 Explosiones Físicas.	63
2.1.3.2 Tipos de Fuegos/Incendios.	64
2.1.3.2.1 Flash Fire	65
2.1.3.2.2 Bola de Fuego ("Fireball")	65
2.1.3.2.3 Incendios o Fuegos de charcos ("Pool Fire")	66

2.1.3.2.4	Chorro de Fuego ("Jet Fire")	67
2.1.4	Modelos de Efecto	68
Capitulo 3. Sistema Preliminar de Estimación de Riesgos (SPER)		70
3.1	Generalidades.	70
3.2.	Objetivo de SPER	71
3.3	Areas de aplicación y Alcance de SPER	72
3.3.1	Suposiciones empleadas en SPER	73
3.3.1.1	Criterio de Fatalidad:	73
3.3.1.2	Estimación de Consecuencias	74
3.3.1.3	Estimación de la Probabilidad	75
3.3.2	Aplicación de los Resultados de SPER	75
3.4	Procedimientos utilizados en las Estimaciones de SPER	76
3.4.1	Identificación y clasificación del tipo de Actividades e Inventarios.	77
3.4.2	Estimación de consecuencias fuera de las Instalaciones (comunidad vecina) debido a Accidentes Mayores con Sustancias Químicas.	80
3.4.3	Estimación de Probabilidades de Accidentes Mayores con Sustancias Químicas en Instalaciones Industriales.	86
3.4.4	Estimación de Probabilidades de Accidentes Mayores en el Transporte de Sustancias Químicas Peligrosas.	91
3.4.5	Estimación del riesgo social y Priorización de Riesgos.	95
Capitulo 4. Resultados y Conclusiones		99
Bibliografía		102
Acrónimos		106

Introducción.

Desde la antigüedad los seres humanos y los animales han buscado la manera de satisfacer sus necesidades básicas como alimento, vestido y techo. Encontraron techo para protegerse de las inclemencias del tiempo, los seres humanos cubrieron su cuerpo para protegerse del frío y también desarrollaron instrumentos que les permitieron conseguir alimento, defenderse de sus agresores, construir sus viviendas y diversos medios de transporte. La búsqueda de la seguridad en forma de bienestar personal o social es una necesidad básica del hombre y por ésta razón siempre ha estado presente dentro de sus prioridades.

El proceso que ha llevado al hombre a ser lo que es hoy, ha sido una combinación de desarrollos filosóficos, científicos y tecnológicos. Estos últimos y los intereses económicos, políticos y sociales de las comunidades impulsaron el desafío del ser humano para transformar los bienes y recursos de la naturaleza en productos que satisficiesen sus demandas y por ende, con la revolución industrial, a la creación de centros industriales de producción.

Existe una creciente necesidad de las economías desarrolladas y no desarrolladas por asegurar que los riesgos a: la gente, la propiedad y ambiente, de las operaciones y actividades asociadas a industrias potencialmente peligrosas y contaminantes sean adecuadamente estudiadas y manejadas. La preocupación de la integración de la seguridad, salud y protección al medio ambiente y el desarrollo de los beneficios sociales y económicos para las comunidades está actualmente presente en la agenda de muchos gobiernos. Así mismo, existe la necesidad de asegurar de forma eficiente y óptima la distribución de los escasos recursos en los procesos de manejo y evaluación del riesgo. En el presente, la clasificación y la jerarquización de los diferentes riesgos de un proceso (transformación, almacenamiento, carga/descarga, etc.) para su posterior evaluación detallada, es un tema de gran importancia.

Las instalaciones industriales y los grandes corredores industriales tienen un número muy grande de actividades de naturaleza y alcance diferentes, con riesgos asociados de diferente magnitud a cada una de ellas. Dentro de las actividades consideradas riesgosas se pueden mencionar entre otras: los procesos productivos de las plantas, las terminales de almacenamiento, actividades de carga y descarga y el transporte de materiales.

Todas las actividades industriales están reglamentadas en mayor o menor grado dependiendo del país del que se trate. En México, la regulación sobre las actividades industriales y especialmente las actividades altamente riesgosas comenzó en forma desde 1988 con la publicación de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LEGEEPA) y su reforma en 1996, así como con la posterior instrumentación de los diversos reglamentos y normas oficiales mexicanas.

La LEGEEPA, en el Art. 147. dice: *“La realización de actividades industriales, comerciales o de servicios altamente riesgosas, se llevarán a cabo con apego a lo dispuesto por esta Ley, las disposiciones reglamentarias que de ella emanen y las normas oficiales mexicanas a que se refiere el artículo anterior.*

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

Como se puede observar en la cita anterior, la Ley establece la obligación de presentar dos instrumentos básicos para la administración del riesgo: el estudio de riesgo ambiental y el programa para la prevención de accidentes (PPA). Ambos documentos sirven al industrial para establecer prioridades de atención entre los

diferentes riesgos que tiene su instalación y para la implementación de programas de prevención y atención adecuada de emergencias.

En Europa, La Directiva de Seveso es la regulación que la Comunidad Económica Europea (CEE), actualmente Comunidad Europea, implementó en 1982 y actualizó en 1996. Esta directriz se desarrolló después del accidente en Seveso, Italia. La directiva requiere entre otras cosas: que ciertas industrias declaren los materiales peligrosos que se manejan en la instalación, que realicen estudios de riesgo, notifiquen a las autoridades los riesgos en la instalación, las medidas de reducción adoptadas, mantengan planes de respuesta a emergencias, etcétera.

En Estados Unidos de Norteamérica, la regulación de las actividades industriales está a cargo de la "Occupational Safety and Health Administration, OSHA" y la "Environmental Protection Agency, EPA". Las regulaciones son las siguientes: por parte de la OSHA, la regla PSM 29 CFR 1910-119 de 1992 que regula la Administración de la Seguridad de los Procesos (Process Safety Management PSM) y por parte de la EPA, la regla 40 CFR partes 9 y 68 de 1994 y 1996 respectivamente, relativas a los requerimientos de prevención de accidentes químicos.

La historia nos ha enseñado que somos vulnerables, es decir, que dependiendo de las situaciones que nos rodeen podemos o no sufrir algún tipo de accidente, pero y ¿Cuál es la definición de accidente?, ¿Qué tipos de accidentes existen?, ¿Cómo se pueden clasificar?, ¿Cuáles son las medidas de análisis y prevención de los accidentes?, ¿Cómo se pueden estimar las consecuencias de los accidentes y que herramientas existen para ello?.

Las estadísticas de 1995 – 1997 de la Dirección General de Emergencias Ambientales de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente – PROFEPA (México) indican que los accidentes en transportación (ductos, ferrocarriles, vías marítimas y carreteras) ocupan el primer lugar (67 %), seguidos de las plantas industriales (23%). El número de afectaciones ocurridas en este período como consecuencia de los accidentes registrados y reportados a la PROFEPA es de 156

defunciones, 629 lesionados, 2,352 intoxicados y 38,420 evacuados. Es importante mencionar, que los datos aquí presentados corresponden únicamente a los accidentes reportados a la autoridad ambiental, pero si pensamos más allá por un segundo, ¿cuántas personas lesionadas o muertas, qué extensión de tierra o volumen de agua está contaminados sin que la autoridad y la comunidad vecina sepan?.

Lo anterior, es una llamada de atención a todas las partes involucradas en el manejo de sustancias químicas peligrosas y a las autoridades para continuar con el esfuerzo de regular y administrar los riesgos de la mejor forma posible. La pérdida de una vida humana no debe suceder y no es aceptable, todos los accidentes son y deben prevenirse.

Algunas respuestas a las preguntas antes mencionadas se pueden encontrar en esta tesis, otras necesitarán de un estudio más profundo y minucioso para poder resolverlas, siempre teniendo en cuenta que una vez que se resuelve una duda, surgen otras más difíciles y este es un proceso de aprendizaje del ser humano.

En el capítulo 1, se explican las generalidades de los análisis de peligros y riesgos. Un peligro es la capacidad inherente a una sustancia/objeto de poder causar daño y el riesgo es la medida del daño que puede ser causado por este peligro. El riesgo es la combinación de la magnitud de la consecuencia y de la probabilidad de ocurrencia de una situación determinada.

En este capítulo, se explican las diferentes metodologías para realizar estudios de peligros y riesgos dependiendo de los resultados deseados, así mismo, las características del equipo analista y la información mínima necesaria para llevarlos a cabo con éxito.

Los análisis de riesgos proporcionan información valiosa para la toma de decisiones y ayudan entre otras cosas a:

- Decidir entre alternativas de mitigación de riesgos;

- Determinar la tolerancia de niveles de riesgos para trabajadores y/o comunidades;
- Decidir, en caso de autoridades si se emiten permisos para un proyecto (y bajo que condiciones) o no;
- Evaluar las primas y cobertura de seguros; y
- Asegurar el cumplimiento de estándares corporativos.

En el capítulo 2, se describen las generalidades de los análisis de consecuencias. Una parte importante de los análisis de riesgos es la evaluación de las consecuencias o posibles daños que pueden causar los accidentes, tales como muertes o personas lesionadas, pérdidas económicas por daños a instalaciones y daño al medio ambiente (flora y fauna).

Los accidentes o emergencias ambientales de acuerdo a la PROFEPA en el período 1995-1997 fueron: derrames o fugas (81%), incendios (10%), explosiones (5%) y otros (4%).

En este capítulo se describen los cuatro tipos de modelos para calcular las consecuencias que actualmente son utilizados por las industrias y gobiernos mismo que se mencionan a continuación: modelos de fuente, modelos de dispersión, modelos de fuego y explosión, y los modelos de efecto.

En el capítulo 3, se explica el objetivo, el alcance y los procedimientos empleados por prototipo del programa de computo "Sistema Preliminar para la Estimación de Riesgos, (SPER)", desarrollado como parte de esta tesis. SPER se basa en el "*Manual para la Clasificación y Jerarquización de Riesgos de grandes Accidentes Industriales*" que fue desarrollado por el Programa de la Agencia Internacional de Evaluación y Manejo de Riesgos Ambientales y de Salud de la Industria de la Energía y otros Sistemas Complejos (*Inter-Agency Programme on the Assessment and Management of Health and Environmental Risks from Energy and Other Complex Industrial Systems*). Este programa, tiene como objetivo promover y facilitar la implementación de sistemas de manejo y evaluación del riesgo en áreas industriales grandes. Esta iniciativa incluye: a) la recopilación de procedimientos y

métodos para la evaluación de los riesgos ambientales y de la salud pública; b) la transferencia del conocimiento y de la experiencia entre países en la aplicación de éstos procedimientos y c) la implementación de un acercamiento conjunto en el manejo del riesgo.

El programa es conducido conjuntamente por cuatro organizaciones de Naciones Unidas: La Agencia Internacional de la Energía Atómica (*International Atomic Energy Agency* (IAEA)); el Programa Ambiental de Naciones Unidas (*United Nations Environmental Programme* (UNEP)) dentro del marco del programa de Concientización y Preparación para Emergencias a Nivel Local (*Awareness and Preparedness for Emergencies at Local Level* (APELL)); la Organización del Desarrollo Industrial de las Naciones Unidas (*United Nations Industrial Development Organization* (UNIDO)) y la Organización Mundial de la Salud (*World Health Organization* (WHO)).

Este prototipo (SPER) es una herramienta para la determinación *preliminar* de los riesgos en las actividades donde se manejen sustancias químicas peligrosas, tales como la manufactura o procesamiento, almacenamiento y transporte y se basa en el estudio de los accidentes y la experiencia de varios organismos internacionales en esta materia.

SPER no es un programa de modelación matemática como lo son: el "Automated Resource for Chemical Hazard Incident Evaluation (ARCHIE), el Aerial Locations of Hazardous Atmospheres (ALOHA), los Modelos Atmosféricos para Simulación de Contaminación y Riesgos en Industrias (SCRI), el TRACER, etcétera. Por lo que SPER no emplea datos específicos de un sistema, tales como tamaño de orificio, temperatura, etcétera.

En el capítulo 4, se exponen los resultados de esta tesis y las conclusiones de la misma.

CAPITULO 1.

Generalidades de los Análisis de Riesgos

1.1 CONCEPTO DE PELIGRO Y RIESGO.

Diariamente, una gran cantidad de peligros amenazan al ser humano. Estos son percibidos consciente o inconscientemente y simplemente se sabe que son amenazantes, sin tener una idea precisa de cómo, cuándo, dónde y en qué medida pueden presentarse. En este sentido, el *Peligro* se define como una "Amenaza Potencial a Personas y/o Instalaciones", es una Pérdida Potencial no evaluada. Bajo esta definición, un peligro considera no solamente las muertes potenciales o lesiones o defunciones sino también las pérdidas financieras [7].

Considerar la probabilidad y severidad de una amenaza potencial, permite conocer mejor el peligro percibido y es entonces cuando deja de ser una Pérdida Potencial no evaluada (peligro) y se convierte en un *Riesgo*.

El manual de Seguridad en los procesos y el producto de Hanmera, 1972, define el riesgo como *una condición que en potencia puede causar daño a las personas, daño a las instalaciones y/o estructuras, pérdida de material o disminución de la capacidad de desarrollar una función preestablecida. Cuando un riesgo existe, se pueden probablemente verificar estos efectos negativos*". [1,2]

Otra interesante definición de riesgo la dió el gobierno holandés en un documento sobre seguridad de la población, dando un concepto de riesgo reformulado de acuerdo a lo sostenido por Rasmussen: "*El riesgo se define como la consecuencia indeseable de una actividad particular en relación con la probabilidad de ocurrencia de la misma*".

En el mismo documento, se definen tres tipos de riesgos: 1) riesgo individual, 2) riesgo de grupo, introducido específicamente para los seres humanos, y 3) riesgo colectivo para el ecosistema. Tales términos se han definido del siguiente modo:

- “El riesgo individual es la probabilidad de que una persona sufra un efecto nocivo como consecuencia de una exposición a un agente de riesgo (expresada en unidades de probabilidad anual o con referencia a una media al año)”.
- “El riesgo de grupo es la probabilidad referida a un año de que un grupo, caracterizado por un número mínimo de componentes, sea globalmente víctima, en un mismo momento, de un único incidente”.
- “El riesgo colectivo para ecosistemas es la probabilidad referida a un año en que un ecosistema sufra un particular efecto nocivo, como consecuencia de la exposición a un agente de riesgo o de la dispersión de una sustancia tóxica”.

En la estimación del riesgo individual se consideran los efectos estocásticos (efectos retardados que llevan a un incremento de la probabilidad de ocurrencia del daño), no necesariamente considerados en el caso del riesgo de grupo, donde no se sabe con certeza si sea adaptado al sistema de evaluación del riesgo. Esto sucederá solo en el caso que sea posible atribuir la muerte a una exposición súbita. Contrariamente, el riesgo individual se refiere al grado de peligrosidad en las cercanías del establecimiento, no importando los lugares circundantes. De hecho en la estimación de un riesgo individual en un cierto lugar, no se consideran los edificios ahí localizados, siendo esta información importante para determinar el riesgo de grupo.

Obviamente los riesgos individuales se refieren solamente al género humano. La protección de los ecosistemas en cambio, se centra en la flora y la fauna para los cuales se define el riesgo colectivo.

El riesgo de grupo debe por lo tanto indicar la probabilidad de que un cierto grupo de personas externas al establecimiento en cuestión pueda morir por efecto de un

accidente ocurrido en su interior. Este riesgo, considera obviamente las áreas vecinas. El riesgo de grupo no incluye al cálculo del riesgo de muerte individual, solo en el caso que ésta ocurra inmediatamente después de sucedido el accidente. Principalmente su objetivo es el prevenir la muerte simultánea de un grupo de personas. En la estimación del riesgo de grupo y del riesgo individual se consideran también los efectos nocivos que llevan a la muerte después de dos o tres semanas de la exposición al agente de riesgo. La exposición es comúnmente breve, al máximo pocas horas.

La palabra riesgo es frecuentemente utilizada dependiendo del tipo de consecuencia, por ejemplo, en el campo de la salud se habla del riesgo sanitario, y en el campo económico, al riesgo financiero.

En la industria, se ha evidenciado cómo el riesgo representa un para cuantificar las alternativas de cualquier decisión, de aquí que el riesgo es considerado en todos los campos donde será necesario tomar decisiones. No es correcta la percepción de algunas empresas que el riesgo es solo un parámetro de referencia para las plantas e implique exclusivamente consideraciones sobre los posibles daños a personas, instalaciones o al ambiente.

Anteriormente, se definió riesgo como “la consecuencia indeseable de una actividad particular en relación con la probabilidad de ocurrencia de la misma”, de donde se puede deducir el cálculo de riesgo (R) como el producto de la probabilidad (P) de que suceda un evento no deseado por la magnitud (M) de su consecuencia:

$$R = P * M$$

Sin embargo, en la mayor parte de los casos, la probabilidad de que se verifique un evento debe ser estimada dentro de un intervalo de tiempo prefijado por lo tanto, la ecuación anterior se puede expresar de la siguiente forma:

$$R = F * M$$

donde :

F = probabilidad que se verifique un evento dentro de un intervalo de tiempo prefijado.

M = gravedad de las consecuencias, o simplemente magnitud.

Desde el punto de vista dimensional, la variable F se expresa como el inverso del tiempo. Muchos analistas la expresan, aunque no siendo del todo correcto, como frecuencia (tiempo⁻¹).

En cambio, las unidades de la magnitud de la consecuencia no son únicas y por esta razón no son tan fáciles de determinar. Generalmente se expresan como: número de muertos, daños a las instalaciones, daños al medio ambiente y pérdidas económicas.

El cálculo del riesgo aún puede considerar un parámetro mas, llamado *factor de utilidad*, U, (factor de costo-beneficio), pero no será objeto de estudio en esta tesis debido a que es un parámetro de decisión, mismo que se deja a consideración de quien toma las decisiones.

Mediante estimaciones cuantitativas de los peligros fuera de los establecimientos industriales y en particular en la periferia de ellos, se han confrontado diversos límites de riesgo. El nivel de riesgo se ha fijado, para muchos agentes de riesgo, en el principio del 1% del máximo nivel permitido. Entre el intervalo límite y el aceptable se adopta el criterio ALARP ("As Low As Reasonably Practicable"), tan bajo como sea razonablemente posible.

Se han estimado y establecido límites aceptables para daños individuales (muertes / año) y de grupo (muertes en un único instante / año). También se han establecido estos límites para los riesgos acumulativos, que son los relativos a situaciones en las cuales las personas son expuestas a peligros derivados de

numerosas actividades con diferencias entre ellas o a actividades combinadas y en nuevas situaciones.

Es conveniente señalar que el riesgo nulo es un concepto utópico que generalmente significa completa inactividad, y a menos que se elimine la causa no es prácticamente posible reducir el riesgo sino hasta un cierto nivel, el cual depende de los recursos disponibles.

Se puede reducir el riesgo empleando las técnicas de protección o de prevención y/o su combinación. Como se muestra en la figura 1.1

En la figura 1.1 se presentan tres valores de riesgo R_1 , R_2 y R_3 , y las dos formas para reducir el riesgo, donde $R_1 > R_2 > R_3$. La *protección* consiste en la reducción de la magnitud de la consecuencia, manteniendo la frecuencia; y la *prevención*, se lleva a cabo reduciendo la frecuencia pero manteniendo la misma magnitud de consecuencia. Estos dos caminos conducen a un mismo valor numérico de riesgo, pero cada una de ellos tiene implicaciones diferentes y su génesis se deriva de un previo análisis de riesgos y toma de decisiones.

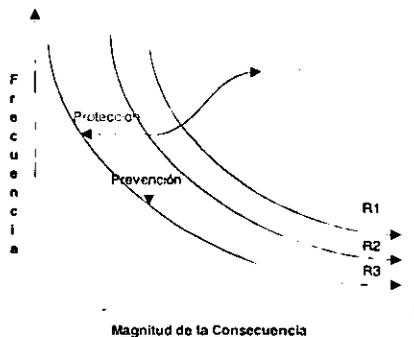


Figura 1.1 Reducción del Riesgo por acciones de protección o prevención.

1.2 CLASIFICACIÓN DE LOS RIESGOS.

Existen eventos que dañan al individuo o a la comunidad y pueden ser eventos inmediatos o retardados, con efectos no-inmediatos, inmediatos o retardados, o una combinación.

Una manera de clasificar los riesgos de una actividad industrial es la siguiente:

- **Riesgos Convencionales.** Son aquellos ligados a las actividades laborales (ej. caídas desde escaleras, accidentes por descargas eléctricas, riesgos derivados de máquinas dinámicas, etc.).
- **Riesgos Específicos.** Son los relacionados con la utilización de sustancias particulares y productos químicos, que por su naturaleza, puedan producir daños a corto y largo plazo a las personas, las instalaciones y el ambiente.
- **Grandes Riesgos Potenciales.** Son los que están ligados a accidentes anómalos, cuyas consecuencias pueden ser explosiones o emisiones de sustancias peligrosas que puedan afectar vastas áreas en el interior y exterior de la planta industrial.

1.3 EVALUACIÓN DE PELIGROS.

Conforme la tecnología de los procesos químicos avanza, el personal técnico se ve en la necesidad de entender los fundamentos y detalles de la seguridad industrial, salud y protección del medio ambiente. H.H. Fawcett dijo: "To know is to survive and to ignore fundamentals is to court disaster"¹ (Saber es sobrevivir e ignorar los fundamentos es provocar un desastre).

Algunos factores importantes a considerar en una Evaluación de Peligros son:

- La ocurrencia de grandes accidentes industriales;

- El desarrollo y evolución de modelos para el manejo de programas de seguridad por varias organizaciones e industrias;
- Legislaciones restrictivas e iniciativas de normatividad para la seguridad de los procesos;
- Ahorro económico por pago de las consecuencias de accidentes; y
- Que las industrias tuviesen una mayor relación con la comunidad y el gobierno.

La evaluación de peligros ayuda a entender porqué y como pueden ocurrir los accidentes, a prevenirlos y a reducir su frecuencia y consecuencias. También ayuda a entender el riesgo, resolviendo las tres siguientes preguntas:

1. ¿Qué se hizo mal y cómo?
2. ¿Qué probabilidad hay de que ocurra?
3. ¿Cuáles son las consecuencias?

Está plenamente demostrado que los antecedentes que desencadenan un accidente son los mismos que producen un incidente. La diferencia entre un accidente y un incidente es que en éste último no hay lesiones ni daños, mientras que el accidente ocasiona lesiones o pérdidas humanas, daños materiales o daño al medio ambiente. Sin embargo, lo que produjo el hecho es el mismo. La única diferencia entre ambos es la casualidad [8]. Accidente entonces se define como: "Una secuencia no planeada de eventos que resultan en consecuencias no deseadas".

Siempre que existe un peligro podrá ocurrir un accidente si no se toman las medidas adecuadas para evitarlo o disminuirlo. Los accidentes comienzan con un evento iniciador, continúan si las respuestas del sistema (equipos y sistemas de protección) o humanas (entrenamiento y procedimientos de emergencia) no son

¹ H.H. Fawcett and W. S. Wood, "*Safety and Accident Prevention in Chemical Operations*", 2nd ed. (N.Y. : John Wiley and Sons, 1982), p 1

satisfactorias, dando lugar a eventos intermedios, mismos que pueden ser factores propagadores o de reducción del riesgo, conduciendo finalmente a consecuencias. Éstas pueden ser nulas, mínimas, locales o sociales, y de efecto agudo o crónico. Como se muestra en la Figura 1.2.

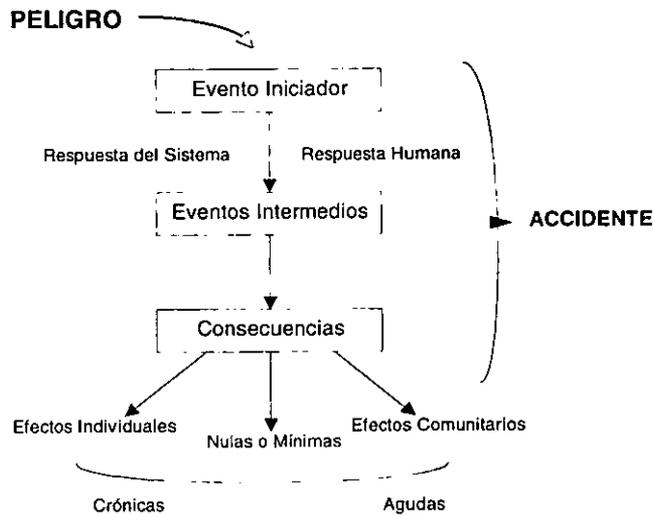


Figura 1.2 Secuencia de un Accidente.

Una peculiaridad destacable en las instalaciones de procesos, es que suele existir interrelación entre los riesgos y sus factores causales, que en función de las circunstancias desencadenantes generan diferentes niveles de peligrosidad y de gravedad de las consecuencias.

Todos los componentes deben de estar sometidos a un programa de mantenimiento preventivo y correctivo para garantizar su correcto estado y además a un mantenimiento predictivo que garantice su renovación antes de haberse agotado su vida media, establecida por el fabricante.

Evidentemente, las instalaciones son diseñadas para adecuarse a las condiciones normales de trabajo, pero deben de ser capaces de soportar alteraciones previsible, aunque sean ocasionales, sin generar daños a personas o instalaciones.

Es importante que se visualice el accidente como una secuencia de eventos, porque en teoría, cada evento individual representa una oportunidad para reducir la frecuencia o la consecuencia de un accidente.

La estimación de consecuencias puede ser de dos tipos: 1) la investigación de los efectos resultantes de cierto fenómeno físico; y 2) el estudio de los daños causados por dichos efectos sobre el área afectada y su entorno, mediante modelos de vulnerabilidad, toxicidad, efectos térmicos y efectos de explosiones.

La experiencia de los accidentes sucedidos en instalaciones industriales muestra que las causas de los mismos pueden clasificarse en tres grupos: a) Fallas de componentes, b) Desviaciones de las condiciones normales de operación y c) Errores humanos y de organización. Esta clasificación es sin considerar los agentes externos al proceso y las fuerzas naturales (proximidad a instalaciones peligrosas, viento, heladas, incendios, etc.). A continuación se mencionan ejemplos de cada uno de grupos arriba mencionados:²

a) Fallas de Componentes.

- Diseño inapropiado para la presión de operación (o presión interna), fuerzas externas (ej. vientos nivel huracán), corrosión a causa del medio ambiente y temperatura;
- Fallas de equipos de proceso tales como bombas, compresores, ventiladores, agitadores, etc.;

² Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo NTP-238 1989 "Los análisis de Peligros y de Operabilidad en instalaciones de Proceso".

- Fallas de sistemas de control (sensores de presión, temperatura, controladores de nivel, reguladores de flujos, unidades de control computarizadas, etc.);
- Fallas de sistemas específicos de seguridad (válvulas, discos de ruptura, sistema de alivio de presiones, sistemas de neutralización, etc.)

b) Desviaciones de las condiciones normales de operación

- Alteraciones incontroladas de los parámetros fundamentales del proceso (presión, temperatura, flujo, concentración);
- Fallas en los servicios, tales como:
 - Insuficiente enfriamiento para reacciones exotérmicas
 - Insuficiente suministro de vapor;
 - Corte del suministro eléctrico;
 - Ausencia de nitrógeno o agente inertizante;
 - Ausencia de aire comprimido (de instrumentación o de agitación)
- Fallas en los procedimientos de paro y arranque;
- Formación de subproductos, residuos o impurezas, causantes de reacciones colaterales indeseadas.

a) Errores humanos y de organización

- Errores de operación;
- Desconexión de sistemas de seguridad a causa de frecuentes falsas alarmas;
- Confusión en el manejo de sustancias químicas;
- Errores de comunicación;
- Incorrecta reparación o trabajos de mantenimiento mal hechos;

- Realización de trabajos no autorizados (soldadura, entrada en espacios confinados, etc.).

Los errores humanos suelen suceder entre otros, por alguno de los siguientes motivos:

1. No conocer suficientemente los riesgos y su forma de prevención;
2. Insuficiente información y adiestramiento en el trabajo;
3. Carga psíquica excesiva / Operadores enfermos que se presenten a trabajar.

1.4 ¿CÓMO HACER UNA EVALUACIÓN DE RIESGOS?

Los procedimientos de evaluación de riesgos han sido desarrollados para identificar los peligros que existen, las consecuencias que podrían ocurrir como resultado del riesgo, la probabilidad de que el evento pueda ocurrir, la posibilidad de que suceda la secuencia de eventos y la probabilidad de que los sistemas de seguridad, sistemas de prevención (mitigación), alarmas de emergencia y planes de evaluación funcionen apropiadamente y eliminen o reduzcan las consecuencias.

En síntesis, el resultado de un análisis de riesgos útil para decidir como operar con la finalidad de mantener el sistema dentro de márgenes de riesgo previamente establecidos. Ya que decidir significa escoger de una serie de opciones en presencia de incertidumbres (en ausencia de incertidumbre no existen opciones, solo comprobaciones), y la medida de una incertidumbre es la probabilidad. El riesgo es por lo tanto, un parámetro que se relaciona en forma proporcional a la ocurrencia del evento no deseado.

El objetivo principal de un Análisis de Peligros es la "Reducción del Riesgo". La clave para el éxito del análisis es usar una metodología adaptable a las circunstancias particulares y a los resultados esperados [7] y que el líder del

análisis establezca: el o los objetivos, el alcance, la programación en tiempo, calendarice las sesiones e integre al equipo adecuado para realizarlo.

El grupo de analistas debe estar conformado por expertos dependiendo del tipo de proceso u operación que se vaya a analizar, la técnica seleccionada, los objetivos del estudio y los recursos disponibles.

El grupo analista es deseable que sea multidisciplinario y deben intervenir además de los expertos de las diferentes áreas del conocimiento industrial, personal que labora en las instalaciones, ya que son ellos los que viven las operaciones normales y las fallas-soluciones de los procesos.

Algunas de las profesiones que pueden formar parte del grupo analista son: químicos; ingenieros civiles, eléctricos, ambientales, de seguridad, mecánicos, químicos y químicos metalurgistas; médicos, toxicólogos; así como operadores en su modalidad de técnicos de instrumentación y operación o supervisores de mantenimiento, de operación y transporte.

El grupo debe contar con un líder, quien debe de tener entre sus habilidades las de saber como dirigir un grupo de trabajo, motivarlo, abrir y cerrar una discusión sin ofender o favorecer a ningún miembro del grupo, ser objetivo y honesto, además de tener experiencia en el proceso y en la o las metodologías de análisis; un secretario o persona que anote todo lo que se diga y haga en las sesiones; y finalmente con los expertos.

Los analistas expertos no necesitan participar en todas las sesiones o en todo el proceso. Las sesiones deben ser planeadas por el líder, éstas deben llevarse a cabo en un lugar donde el equipo pueda trabajar sin interrupciones y no excederse de 6 horas por día. El líder debe recabar toda la información necesaria para el análisis y mandársela a los analistas, para que éstos puedan revisarla previo a cada sesión, y así puedan tener una visión más amplia del problema.

Al llevar a cabo un proyecto de Evaluación de Peligros se deben de tener presentes las siguientes limitaciones:

- a) No hay garantía de que TODAS las situaciones de accidentes potenciales, causas y efectos hayan sido considerados;
- b) Los análisis son sensibles a las diferentes suposiciones de los analistas. Aunque dos grupos posean la misma información, los resultados pueden variar;
- c) La inherente naturaleza de los procedimientos pueden hacer que los resultados sean difíciles de entender y utilizar;
- d) La experiencia del equipo de trabajo puede no ser la adecuada para desarrollar este tipo de evaluaciones; y
- e) Los analistas deben usar el juicio, basado en su experiencia, para determinar si los problemas que se vayan encontrando son importantes o no.

Existen tres métodos básicos para la evaluación de riesgos:

- a) Recurso de la Experiencia de Ingeniería.
- b) Obtener información de Bancos de Datos sobre Accidentes.
- c) Evaluación predictiva del Riesgo.

El Recurso de la Experiencia de Ingeniería es el *repetir* las buenas prácticas y consiste básicamente en observar reglas y regulaciones, así como cumplir con los requerimientos de las normas aceptadas, seguir las prácticas probadas por los años de experiencia en el mismo proceso, mantener los mismos procedimientos de operación, de mantenimiento y mantener el mismo diseño de planta con sus requerimientos.

Los Bancos de Datos sobre Accidentes son información histórica recogida a través de investigaciones de accidentes, que constantemente se están actualizando y en ellos se pueden revisar modelos que cuantifican variables de sustancias y la vulnerabilidad de personas, equipos y estructuras. Algunos ejemplos de éstos son: FACTS (Failure and Accident Technical Information System de TNO (Holanda)), WOAD (Worldwide Offshore Accident Data Bank de

Veritek (Noruega) y ACQUIM (Sistema de Base de Datos para el Manejo de Información Relacionada con Accidentes Químicos (México)).

La Evaluación Predictiva del Riesgo es un enfoque analítico que busca en el sistema: a) Nuevos Riesgos, b) Nuevos Accidentes Potenciales y c) Nuevas formas en la cual el sistema pueda responder a los accidentes. Los procedimientos predictivos pueden entregar una estimación cualitativa y cuantitativa de la probabilidad y consecuencias de un accidente. Figura 1.3.

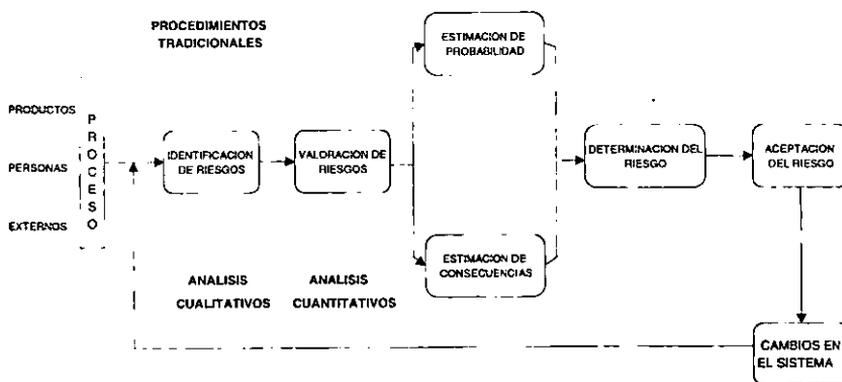


Figura 1.3 Evaluación Predictiva del Riesgo [2].

Las estimaciones cualitativas de riesgos son la evaluación de peligros, ya que su finalidad es identificarlos y proponer medidas para corregirlos; no incluyen parámetros de probabilidad, ni jerarquizan a los mismos. Existen metodologías de análisis de peligros que también pueden ser de riesgos como se verá a continuación.

1.5 METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS DE PELIGROS.

Cualesquiera que sean los métodos de análisis a emplear, éstos deberán cumplir de forma óptima los requerimientos de la tarea específica. Los diferentes métodos de análisis de peligro tienen ventajas e inconvenientes, que dependen de cómo y

dónde se usen. Se pueden diferenciar dos tipos básicos de análisis de peligro: inductivo y deductivo. El inductivo, procede desde la parte simple al todo. El método deductivo, postula que el sistema bajo investigación ha fallado realmente, y se utilizan típicamente en investigaciones de accidentes para sistemas sofisticados, o productos con modos de falla conocidos [7].

La Tabla 1.1 muestra algunas de las metodologías de análisis de peligros y riesgos, clasificadas en deductivas, inductivas, cualitativas y cuantitativas.

Si se comparan los métodos inductivos y deductivos, se podría concluir que los inductivos son apropiados para determinar las fallas posibles en el sistema. Sin embargo, los métodos deductivos se usan para determinar cómo se podría producir un modo de falla supuesto.

Las metodologías cualitativas son aquellas que identifican los peligros existentes en el sistema, analizan sus posibles causas y consecuencias, pero como su nombre lo indica, de manera cualitativa. Las metodologías cuantitativas en cambio son capaces de generar un valor de la probabilidad de ocurrencia del evento estudiado a partir de la probabilidad de los eventos básicos o primarios.

Las metodologías inductivas tienen en común la Identificación de Peligros. Ésta se lleva a cabo buscando básicamente encontrar los impactos que los peligros podrían causar a los seres humanos, al ambiente y a la economía de la empresa.

Para realizar una identificación de peligros es necesario analizar la organización de la empresa y la experiencia que tiene su personal en el proceso, así como la fase de desarrollo/tecnología del proceso de la planta industrial.

Aplicar la metodología de evaluación correcta es la parte más importante del proceso, pues de ella dependerá el tipo de resultados que se obtengan; por ello se debe dar libertad a los analistas para que elijan la más apropiada de acuerdo al alcance del estudio. [5]

Tabla 1.1 Clasificación de algunas metodologías de Análisis de Riesgos.

METODOLOGÍA	CUALITATIVA	CUANTITATIVA
Inspección de Seguridad (<i>Safety Review</i>)	√ inductiva	
Lista de Verificación (<i>Checklist Analysis</i>)	√ inductiva	
Jerarquización Relativa (<i>Relative Ranking</i>)	√ inductiva	√
Evaluación Preliminar de Peligros (<i>PHA-Preliminary Hazard Analysis</i>)	√ inductiva	
¿Que pasa sí? (<i>What if Analysis</i>)	√ inductiva	
¿Que pasa sí? / Lista de Verificación (<i>Checklist Analysis / What if Analysis</i>)	√ inductiva	
Análisis de Operabilidad (<i>HAZOP Analysis</i>)	√ inductiva	
Análisis y Efectos del Modo de Falla (<i>FMEA-Failure Mode and Effects Analysis</i>)	√	√ deductiva
Análisis de Árbol de Fallas (<i>FTA-Fault Tree Analysis</i>)	√	√ deductiva
Análisis de Árbol de Eventos (<i>ETA-Event Tree Analysis</i>)	√ inductiva	√
Análisis Causa Consecuencia (<i>CCA-Cause Consequence Analysis</i>)	√ inductiva	√ deductiva
Análisis de Fiabilidad Humana (<i>Human Reliability Analysis</i>)	√	

Existen varias causas por las que la selección de la metodología se puede ver influenciada:

- La motivación para el estudio;
- El tipo de resultados que se necesiten;
- El tipo de información disponible para realizar el estudio;
- Las características de los problemas a estudiar;
- Los riesgos asociados al proceso o actividad; y
- La preferencia, conocimiento y habilidad de los analistas.

Cada uno de las causas anteriores llevan a pensar que en la selección de la metodología se debe ver hacia el futuro, basándose en el o los objetivos establecidos, para hacer eficiente el uso del tiempo y de los recursos humanos y materiales con los que se cuente, o buscar aquellos que no se tengan. Teniendo presente el tipo de resultados deseado.

La información típica con la que se cuenta para realizar un análisis de peligros es la siguiente: Ver Tabla 1.2.

- Información de propiedades de los materiales;
- Química del proceso;
- Inventarios de Materiales;
- Experiencia similar con otros procesos;
- Diagramas de Flujo (balances de materia y energía);
- Diagramas de líneas e Instrumentación;
- Equipo existente;
- Procedimientos de Operación; y
- Experiencia de operación específica.

El nivel de detalle de la información y la necesidad de usarla, van creciendo conforme avanzan las diferentes etapas de desarrollo de la planta y del análisis de peligros cuando éste se efectúa.

Una vez que se han identificado los peligros existentes en el sistema, se valoran de modo que las recomendaciones vayan en función de la seriedad del problema, y si se tienen datos probabilísticos confiables se realiza el análisis cuantitativo, para determinar el nivel o la aceptabilidad del riesgo y finalmente hacer los cambios necesarios al sistema estudiado.

El tiempo y costo de la realización de un análisis de peligros o de riesgos con cualquiera de las metodologías, están en función del tamaño y de la complejidad del sistema, así como el grado de detalle esperado.

La figura 1.4 muestra los pasos para realizar una evaluación de peligros independientemente del tipo de metodología elegida.

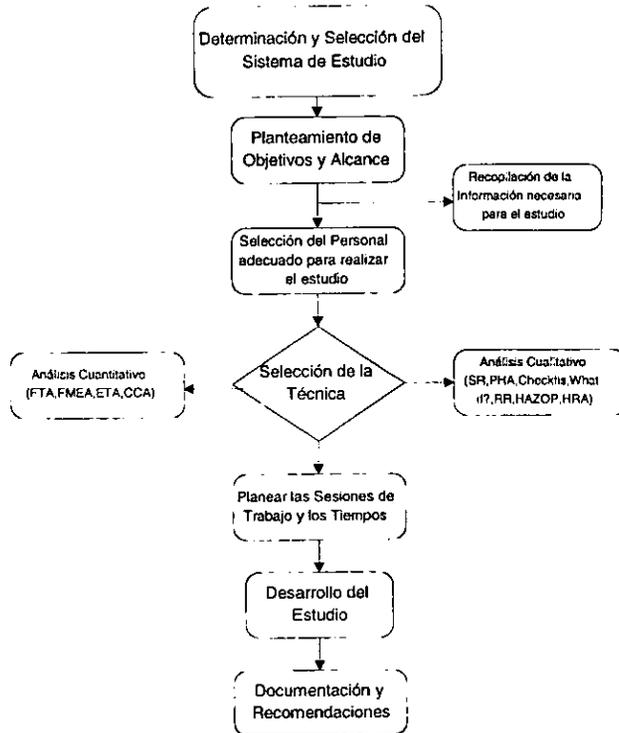


Figura 1.4. Pasos para una Evaluación de Peligros.

1.6 DESCRIPCIÓN DE LAS METODOLOGÍAS DE ANALISIS DE RIESGOS Y DE PELIGROS.

A continuación se describen las metodologías que se presentaron en la Tabla 1.2.

1.6.1 Inspección de Seguridad. (Safety Review)

Es un método que busca identificar condiciones de planta o procedimientos de operación que puedan provocar accidentes con pérdidas significativas en vidas humanas o en la propiedad y los cambios de equipo o proceso que podrían introducir nuevos peligros y riesgos.

El procedimiento mantiene a los operadores alerta de los peligros del proceso, analiza los procedimientos de operación, inicia la aplicación de nuevas tecnologías a los riesgos existentes y revisa la adecuación de las inspecciones de seguridad.

Se puede aplicar a: plantas en operación, plantas piloto, laboratorios, bodegas de almacenamiento y funciones de servicio al proceso. Para que se pueda llevar a cabo se necesita la cooperación de operadores, grupo de mantenimiento, ingenieros, administradores y el grupo de seguridad, salud y medio ambiente.

En este método, se pueden realizar dos tipos de revisiones de seguridad: formal e informal. La revisión formal se usa para procesos nuevos, cambios sustanciales a procesos existentes y procesos que necesitan una revisión de actualización. La revisión informal se utiliza para pequeños cambios a procesos existentes y procesos pequeños, piloto o laboratorios. Estas revisiones pueden ser estudios de gabinete o de campo.

1.6.2 Lista de Verificación. (Checklist Analysis)

La lista de verificación tiene como objetivo identificar riesgos comunes y asegurar que se cumplan las normas y procedimientos establecidos. Para realizar el estudio se emplea una serie de preguntas escritas sobre normas y estándares vigentes y aplicables, procedimientos establecidos, estado y funcionamiento de equipos y sustancias involucrados en el sistema, comparándolas contra la realidad del proceso. Este método, se puede aplicar en cualquier etapa de un proceso.

El grado de detalle en los puntos de la lista depende de los requerimientos del grupo analista y están sujetos directamente a la experiencia de quien la realiza. Se puede usar para familiarizar a personas sin experiencia con el sistema, haciendo la revisión comparativa de la realidad con las preguntas planteadas en el formato. Debe de ser revisada y actualizada regularmente.

Tabla 1.2. Ejemplos de Información utilizada en una Evaluación de Peligros³. Adaptado del "Guidelines for Hazard Evaluation Procedures, with worked examples"

-
- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Reacciones químicas con estequiometría para las reacciones primarias y secundarias o paralelas • Tipo y naturaleza del catalizador empleado • Datos de los materiales en cada corriente de proceso • Cinética de las reacciones importantes de proceso, incluyendo el orden, las constantes de reacción y el acercamiento al equilibrio • Límites de las variables de proceso y consecuencias si se sobrepasan de dichos límites • Diagramas de flujo y una descripción de los procesos, comenzando por el almacenamiento de materias primas hasta el almacenamiento de productos finales • Balances de materia y energía • Inventarios de materiales químicos • Discusión de las consideraciones especiales de diseño que son necesarias por las propiedades de los materiales. • Información sobre seguridad, salud y ambiente de las sustancias que intervienen en los procesos. • Normas y códigos aplicables y vigentes / Permisos y Licencias • Ubicación de edificios y equipos • Planos de instrumentación y líneas • Planos de clasificación eléctrica | <ul style="list-style-type: none"> • Hojas técnicas de equipos • Especificaciones de tuberías y servicios • Diagramas unifilares • Planos de instrumentación y Diagramas lógicos • Hojas técnicas de válvulas e instrumentos • Descripción de los sistemas de control y alarma • Diseño de los sistemas computacionales y equipos de cómputo • Procedimientos de operación (con parámetros críticos de operación) • Procedimientos de mantenimiento • Planes y procedimientos de emergencia • Bases de diseño de los sistemas de ventilación, alivio y emergencia • Bases de diseño del equipo contraincendio • Reportes de incidentes, de mantenimiento y prueba • Información meteorológica • Distribución de la población • Información hidrográfica • Estudios previos de análisis • Estándares internos y listas de verificación • Políticas corporativas de seguridad • Experiencia relevante de la industria. • Reporte de auditorías y visitas de inspección |
|--|---|
-

Los resultados de ésta metodología presentados de manera tabular, son el reconocimiento de los puntos donde las cosas se están haciendo correctamente con un SI o incorrectamente con un NO y en algunos casos NO APLICA o FALTA ESTUDIO, para de esta manera señalar los errores y peligros potenciales

³ CCPS "Guidelines for Hazard Evaluation Procedures, with worked examples" 2nd ed. AICHE 1992

dependiendo del diseño de la lista, misma que debe de ser clara, objetiva y orientada al sistema en estudio. Es una metodología rápida y económica.

1.6.3 Jerarquización Relativa.

Es una estrategia de análisis más que un método de análisis bien definido. Tiene como objetivo determinar las áreas u operaciones más significativas con relación a su peligro.

El estudio permite a los analistas la comparación de atributos de diferentes procesos o actividades para determinar si tienen características peligrosas que necesitan estudio posterior, atribuyéndoles valores numéricos (índice) que representen el grado de peligrosidad, así como la comparación de alternativas, dando información sobre la menos peligrosa. Este método puede emplearse en cualquier etapa del sistema.

Existen técnicas que se pueden aplicar dependiendo del sistema como: F&EI (Dow Fire and Explosion Index) que se emplea en sistemas donde se trabaja con sustancias explosivas o inflamables, evaluando la existencia de peligro de incendios y/o explosiones; Mond Index, que es una extensión del F&EI ya que se amplió para evaluar los peligros por la toxicidad de las sustancias; SHI (Sustance Hazard Index) que evalúa la tendencia de las sustancias para dispersarse en el aire si son liberadas, afectando personas; MHI (Material Hazard Index) que se emplea para determinar las cantidades mínimas de uso de las sustancias; CEI (Chemical Exposure Index) que analiza las posibles situaciones que una sustancia liberada puede generar; y TQP (Threshold Planning Quantity Index) que es parecido al MHI.

Si se cuenta con personal con experiencia, tiempo y recursos, se pueden generar relaciones matemáticas que sean sensibles a las variables del proceso, creando índices de riesgo que modelen el riesgo relativo en cada área, tomando en cuenta las propiedades de los materiales, las condiciones del proceso, las

características de diseño y construcción y actividades de operación así como el tipo de programa de seguridad.

1.6.4 Evaluación Preliminar de Peligros (*Preliminary Hazard Analysis*)

El propósito principal de este método es el reconocimiento temprano de los peligros (con el consiguiente ahorro de tiempo y dinero). Se realiza principalmente en las primeras fases de desarrollo de una planta y consiste en desarrollar una lista de peligros relacionados con todas las partes disponibles que constituyen el proceso. Como su nombre lo indica, es una evaluación de reconocimiento preliminar.

El grupo de analistas desarrolla y juzga los accidentes posibles y creíbles, así como sus consecuencias, para finalmente jerarquizarlos como insignificantes, marginales, críticos o catastróficos.

1.6.5 ¿Qué pasa sí? (*What If Analysis*)

Es una metodología que analiza los procesos o actividades creativamente, haciendo una lluvia de ideas comenzando con la pregunta ¿Qué pasa sí?. El éxito de su aplicación depende de la experiencia de los analistas y de la información de operación de la planta.

El objetivo es analizar cuidadosamente el resultado de eventos inesperados que podrían producir consecuencias adversas, dividiendo por áreas los sistemas de estudio y examinando sus posibles desviaciones, incluyendo las variaciones en el diseño, construcción, modificación y operación del sistema.

El resultado es una tabla que contiene las posibles y creíbles desviaciones encontradas al resolver la pregunta ¿Qué pasa sí?, así como sus consecuencias o peligros, medidas de seguridad y recomendaciones. Si se aplica por primera vez, el equipo de trabajo deberá considerar tiempo adicional para formular las preguntas y acumular información relevante.

1.6.6 ¿Qué pasa sí? / Lista de Verificación. (What If Analysis/Checklist Analysis).

Esta metodología combina la creatividad del ¿Qué pasa sí?, con el orden y estructura de la lista de verificación. Se emplea para examinar los efectos potenciales y significativos de accidentes de una manera general comparada con otras técnicas.

Esta combinación conduce a un estudio más completo, debido a que la lista de verificación permite a los analistas cubrir puntos que quizás hayan sido olvidados en las sesiones de lluvia de ideas del ¿Qué pasa sí?.

Esta técnica da como resultado una lista de las áreas con problemas dentro del proceso estudiado y una tabla que contiene las posibles y creíbles desviaciones del sistema, así como sus consecuencias o peligros, medidas de seguridad y recomendaciones.

1.6.7 Análisis de Operabilidad (Hazop Analysis)

El análisis de operabilidad busca examinar de manera sistemática toda posible desviación de las condiciones de operación, buscando las causas y posibles consecuencias de cada desviación, los cuales aunque sean o no peligrosos, pueden comprometer la capacidad de la planta para alcanzar la productividad de diseño.

Este análisis por definición tiene que ser realizado por un grupo multidisciplinario de personas con experiencia en las diferentes áreas. Considera la falla de un componente entre su correcta operación de diseño.

El estudio se centra en puntos específicos del proceso u operación, llamados "nodos de estudio" y se realiza aplicando la combinación de una serie de *palabras guía* (Tabla 1.3) más parámetros de proceso (Tabla 1.4) que sean aplicables al objeto de estudio.

<i>PALABRAS GUÍA</i>	<i>SIGNIFICADO</i>
No	Negación o ausencia de las especificaciones de diseño
Menos	Disminución cuantitativa
Más	Aumento cuantitativo
Parte de	Disminución cualitativa, sustitución parcial
Así como o mayor que	Aumento cualitativo, comportamiento análogo al de otra función
Inverso	Oposición lógica de la función deseada
De Otra forma	Sustitución completa de la función deseada

Tabla 1.3. Palabras Guías y Significado para el Análisis de Operabilidad

Flujo	Tiempo	Frecuencia	Mezclado
Presión	Composición	Viscosidad	Adición
Temperatura	pH	Voltaje	Separación
Nivel	Velocidad	Información	Reacción

Tabla 1.4 Parámetros comunes de proceso para el Análisis de Operabilidad.

El análisis de operabilidad es un procedimiento que consiste en escoger un equipo o línea del sistema a estudiar, explicar su función o intención de diseño, y aplicarle la primera palabra guía seguida de todas las desviaciones del proceso aplicables hasta agotarlas. Posteriormente se sustituye la palabra guía y se realiza la misma secuencia, hasta aplicar todas las palabras guía, para comenzar nuevamente con otro equipo o línea previamente identificado.

Los resultados se expresan de forma tabular anotando el número de identificación del equipo o línea, la desviación (palabra guía + variable de proceso), causas, consecuencias, mecanismos de protección existentes o recomendados y las acciones para corregir la falla.

1.6.8 Análisis y Efectos del Modo de Falla (FMEA)

El objetivo de esta metodología es evaluar las formas en que los equipos pueden fallar (o ser operados inadecuadamente) y sus consecuencias para el proceso, identificando las fallas individuales que pueden contribuir o conducir a un accidente.

Cada falla individual es considerada de ocurrencia independiente, sin relación con otras fallas en el sistema, excepto por los efectos posteriores que pudiesen suceder.

El analista debe elaborar una lista de todos los modos de falla que cada componente (válvulas, bombas, líneas, etc.) de los equipos descritos pudiese presentar, y considerar todos los mal funcionamientos (ruptura, incrustaciones, taponamiento, etc.) que alteren la operación normal. Debe también describir los efectos inmediatos de la falla en el lugar que suceda y los efectos predecibles sobre otro equipo y el mismo sistema o proceso.

El resultado es una tabla donde se listan los componentes y su número de identificación, su o sus posibles modos de falla, el o los efectos de la falla, los mecanismos de protección y las acciones recomendadas.

1.6.9 Árbol de Fallas (Fault Tree Analysis)

Es un modelo gráfico cuyo objetivo es describir la secuencia de una falla específica, llamada "evento tope" (TE - Top Event), con la cual se comienza el estudio. Ésta se compone por la combinación de fallas y errores que pueden ser eventos intermedios o secundarios y eventos primarios.

Falla se define como la disfunción de un componente que necesita ser reparado para poder funcionar normal otra vez, error se define como el mal funcionamiento a causa de una falla, que deja de ser si ésta se corrige.

Existen fallas y errores: primarios, secundarios y de comando. Los primarios se deben al mal funcionamiento de componentes cuando se operan en condiciones de diseño, los secundarios se deben a operaciones fuera de las condiciones de diseño, y de comando, cuando la función del componente era no deseada.

Los eventos primarios son la base del árbol, y no necesitan mayor desarrollo. Los eventos secundarios son todas aquellas combinaciones de eventos intermedios entre el TE y los primarios. Todos los eventos son relacionados entre sí, a través de puertas lógicas. La Tabla 1.5 muestra la simbología y significado de las puertas lógicas empleadas en el estudio.

1.6.10 Árbol de Eventos (*Event Tree Analysis*).

Es un proceso inductivo de razonamiento, donde el analista comienza con un evento iniciador y desarrolla las posibles secuencias de eventos que conlleven a un accidente potencial, considerando el éxito o fracaso de los mecanismos de seguridad conforme avanza el accidente.

El estudio pretende dar una secuencia lógica y cronológica de éxitos o fracasos, que expliquen el origen de una situación dada. Cada rama del árbol que se genera equivale a una posible ruta de consecuencia partiendo del mismo evento iniciador.

Una vez armado el árbol, se puede calcular su conjunto mínimo de corte, que consiste en los acontecimientos mínimos necesarios para llegar a una consecuencia.

1.6.11 Análisis Causa–Consecuencia (*Cause–Consequence Analysis*)

Esta metodología combina las características del razonamiento inductivo del análisis de eventos, con las características del razonamiento deductivo del árbol de fallas, dando como resultado una técnica gráfica que relaciona (hacia todos

los sentidos) las consecuencias específicas de un accidente con sus posibles causas.

La desventaja de éste método es que no se pueden desarrollar sistemas complejos, debido a que la combinación de diagramas es difícil de manejar.

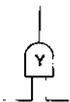
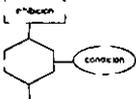
	PUERTA Y	El evento de salida ocurre solo si todos los eventos de entrada existen simultáneamente.
	PUERTA O	El evento de salida ocurre si alguno de los eventos de entrada ocurre.
	PUERTA DE INHIBICION	El evento de salida ocurre cuando el evento de entrada sucede y la condición de inhibición es cubierta.
	EVENTO INTERMEDIO	Un error que resulta de las interacciones de otros errores, que son desarrollados en el árbol.
	EVENTO BASICO	Una falla de componente que no requiere desarrollo posterior. Es la mínima resolución de un árbol de fallas.
	EVENTO NO DESARROLLADO	Una falla que no se examina mas por falta de información o su desarrollo se sale del objetivo de estudio
	TRANSFERENCIA ENTRADA SALIDA	Indica que el árbol es continuado en su correspondiente salida.

Tabla 1.5 Simbología y significado de puertas lógicas para el Árbol de Fallas.

1.6.12 Análisis de Fiabilidad Humana (Human Reliability Analysis).

El objetivo de ésta técnica es estudiar los factores que dan forma al comportamiento humano, tales como: estrés, condición emocional, capacitación, experiencia, jornada de trabajo, ambiente de trabajo, procedimientos y materiales, entre otros.

La idea de este estudio es encontrar las fallas en la interface hombre-máquina, para poder analizarlas con referencia a las necesidades, habilidades y limitaciones de las personas, y reducir la probabilidad de ocurrencia de los errores humanos.

1.7 ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LAS METODOLOGÍAS.

La evaluación de peligros es un proceso dinámico en el cual los resultados son directamente proporcionales a la metodología escogida, así como al tiempo necesario para llevar a cabo el estudio, la preparación del personal, el tipo de información empleada y el presupuesto destinado al análisis.

La Tabla 1.6 muestra las metodologías que son empleadas comúnmente, dependiendo de la etapa de desarrollo de la planta. Se puede observar en ella que, el ¿Qué pasa sí? puede ser utilizado en cualquiera de las nueve etapas de desarrollo de la planta, siendo ésta, la lista de verificación y su combinación las metodologías más versátiles. El análisis de operabilidad, los árboles de eventos y fallas, el análisis causa-consecuencia y el análisis de fiabilidad humana son aplicados a las fases de operación principalmente. Todas las metodologías pueden emplearse en la fase de expansión o modificación, dependiendo de los resultados deseados.

La Tabla 1.8 describe de manera comparativa las ventajas y desventajas de las metodologías de análisis de peligros, mostrando de cada una de ellas, los puntos importantes a considerar en la selección de las mismas como: tiempos, tipos de resultados y fase de desarrollo en la que puede ser aplicada.

La Tabla 1.7 muestra las habilidades y conocimientos que en suma forman el perfil de un analista de peligros.

ETAPA DE DESARROLLO DE LA PLANTA	SAFETY REVIEW	CHECKLIST	RELATIVE RANKING	PHA	WHAT IF ANALYSIS	WHAT IF / CHECKLIST	HAZOP	FMEA	FTA	ETA	CCA	HRA
1. Investigación y Desarrollo			●	●	●							
2. Concepto del Diseño		●	●	●	●	●						
3. Operación de Planta Piloto		●		●	●	●	●	●	●	●	●	●
4. Ingeniería de Detalle		●		●	●	●	●	●	●	●	●	●
5. Construcción y Arranque	●	●			●	●						●
6. Operación de Rutina	●	●			●	●	●	●	●	●	●	●
7. Modificaciones o Expansión	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
8. Investigación de Incidentes					●		●	●	●	●	●	●
9. Desmantelación	●	●			●	●						

● Comúnmente usados

○ Poco usados o inapropiados

Tabla 1.6. Usos más comunes para las metodologías de evaluación de peligros³.

HABILIDADES	CONOCIMIENTOS
<ul style="list-style-type: none"> • Trabajo en equipo • Capacidad de análisis subjetivo y objetivo • Capacidad analítica inductiva y deductiva • Capacidad de integración de conceptos • Para búsqueda de información e interpretación de la misma. • Manejo de Personal y relaciones inter e intra personales. • Comunicación a cualquier nivel • Para negociar (ganar – ganar – ganar) 	<ul style="list-style-type: none"> • Nociones básicas de Química y de Físicoquímica • Nociones básicas de Electricidad y Magnetismo, Mecánica y Materiales, Flujo de Fluidos, Transferencia de Calor, Procesos de Transferencia de Masa, Control de Procesos • Conceptos de Toxicología e Higiene Industrial. • Normatividad y estándares vigentes • Manejo de sistemas de computo • Conceptos de Gestión Ambiental • Nociones básicas de seguridad industrial • Inglés

Tabla 1.7. Perfil de un analista de Peligros.

³ CCPS "Guidelines for Hazard Evaluation Procedures, with worked examples" 2nd ed. AICHE 1992

Tabla 1.8 Análisis comparativo de las diferentes metodologías de análisis de riesgos y peligros.

^a Referido a la Tabla 1.6

^b Principalmente el líder y el secretario

^c h=horas, d=días, s=semanas

^d Construcción del Modelo

^e Evaluación Cualitativa

^f Referirse a la Tabla 1.3

METODOLOGÍA	ETAPA DE PROCESO ^a	TIPO DE INFORMACIÓN NECESARIA	TIEMPO ESTIMADO						PERSONAL PARA PREPARACIÓN	PERSONAL PARA EVALUACIÓN	TIPO DE RESULTADOS	OBSERVACIONES
			SISTEMAS PEQUEÑOS Y SENCILLOS			SISTEMAS GRANDES Y COMPLEJOS						
			PREPARACIÓN ^b	EVALUACIÓN	DOCUMENTACIÓN ^b	PREPARACIÓN ^b	EVALUACIÓN	DOCUMENTACIÓN ^b				
SAFETY REVIEW	5,6,7,9	General del Proceso ^f Normatividad y estándares	2 – 4h ^c	6 – 12h	4 – 8h	1 – 3d	3 – 5d	3 – 6d	Ingeniero(s) con experiencia y conocimiento del proceso, Normatividad	Con o sin experiencia, preferentemente ingenieros	Cualitativos Listado	Realiza inspecciones de campo. No detalla causas potenciales. Identifica incumplimientos.
CHECKLIST	2,3,4,5, 6,7,9	General del Proceso ^f	2 – 4h ^c	4 – 8h	4 – 8h	1 – 3d	3 – 5d	2 – 4d	Ingeniero(s) con experiencia y conocimiento del proceso	Con o sin experiencia, preferentemente ingenieros	Cualitativos Listado	Dividido por áreas. No detalla causas potenciales. Identifica fallas potenciales.
RELATIVE RANKING	1,2,7	General del Proceso ^f , detallada de sustancias químicas	2 – 4h ^c	4 – 8h	4 – 8h	1 – 3d	3 – 5d	3 – 5d	Ingeniero(s) con experiencia y conocimiento del proceso	Con conocimiento y experiencia de los índices y del sistema a analizar	Cualitativos Cuantitativos Tabular	Índices existentes y confiables. Normatividad y estándares.
PHA	1,2,3,4, 7	General del Proceso ^f	4 – 8h ^c	1 – 3d	1 – 2d	1 – 3d	4 – 7d	4 – 7d	Ingeniero(s) con experiencia y conocimiento del proceso	Ingeniero(s) con experiencia y conocimiento del proceso y de seguridad industrial	Cualitativos Tabular Jerarquizado	No detalla causas potenciales. Identifica peligros tempranamente.

METODOLOGÍA	ETAPA DE PROCESO ^a	TIPO DE INFORMACIÓN NECESARIA	TIEMPO ESTIMADO						PERSONAL PARA PREPARACIÓN	PERSONAL PARA EVALUACIÓN	TIPO DE RESULTADOS	OBSERVACIONES
			SISTEMAS PEQUEÑOS Y SENCILLOS			SISTEMAS GRANDES Y COMPLEJOS						
			PREPARACIÓN ^b	EVALUACIÓN	DOCUMENTACIÓN ^p	PREPARACIÓN ^b	EVALUACIÓN	DOCUMENTACIÓN ^p				
WHAT IF	1,2,3,4,5,6,7,8,9	General del Proceso ^f	4 – 8h ^c	4 – 8h	1 – 2d	1 – 3d	3 – 5d	1 – 3s	Grupo multidisciplinario de expertos con experiencia en el proceso	Grupo multidisciplinario de expertos con experiencia en el proceso y conocimiento en seguridad industrial	Cualitativos Listado	Creativa, y poco estructurada. No detalla causas potenciales.
WHAT IF / CHECKLIST	2,3,4,5,6,7,9	Detallada y completa del Proceso ^f	6 – 12h ^c	6 – 12h	4 – 8h	1 – 3d	4 – 7d	1 – 3s	Grupo multidisciplinario de expertos con experiencia en el proceso	Grupo multidisciplinario de expertos con experiencia en el proceso y conocimiento en seguridad industrial	Cualitativos Listado	Creatividad y estructurada. No detalla causas potenciales.
HAZOP	3,4,6,7,8	Detallada y completa del Proceso ^f	8 – 12h ^c	1 – 3h	2 – 6d	2 – 4d	1 – 3s	2 – 6s	Grupo multidisciplinario de expertos con experiencia en el proceso	Grupo multidisciplinario de expertos con experiencia en el proceso y conocimiento en seguridad industrial	Cualitativos Tabular	Uso de palabras guías. No analiza fallas simultáneas. Considera causas potenciales y consecuencias.

METODOLOGÍA	ETAPA DE PROCESO ^o	TIPO DE INFORMACIÓN NECESARIA	TIEMPO ESTIMADO						PERSONAL PARA PREPARACIÓN	PERSONAL PARA EVALUACIÓN	TIPO DE RESULTADOS	OBSERVACIONES
			SISTEMAS PEQUEÑOS Y SENCILLOS			SISTEMAS GRANDES Y COMPLEJOS						
			PREPARACIÓN ^p	EVALUACIÓN	DOCUMENTACIÓN ^p	PREPARACIÓN ^p	EVALUACIÓN	DOCUMENTACIÓN ^p				
FMEA FMECA	3,4,6,7,8	Detallada y completa del Proceso ^o	2 – 6h ^c	1 – 3d	1 – 3d	1 – 3d	1 – 3s	2 – 4s	Grupo multidisciplinario de expertos con experiencia en el proceso	Grupo multidisciplinario de expertos con experiencia en el proceso y conocimiento en seguridad industrial	Cualitativos Cuantitativos Tabular	Puede jerarquizar eventos e incluir el peor escenario Considera causas potenciales y consecuencias.
FTA	3,4,6,7,8	Detallada del sistema al que pertenece el Evento T _{ope} y hechos reales (si existen)	1 – 3d ^c 3 – 6d ^d	2 – 4d ^e	3 – 5d	4 – 6d 2 – 3s ^d	1 – 4s ^e	3 – 5s	Con experiencia y conocimiento del sistema a analizar y de la técnica	Con experiencia y conocimiento del sistema a analizar y de la técnica en su modo cuantitativo.	Cualitativos Cuantitativos Árbol	Uso de símbolos de lógica booleana. Incluye errores humanos. Puede resolverse hasta el conjunto mínimo de corte. Se centra principalmente en causas.
ETA	3,4,6,7,8	Detallada que se relacione con el accidente y hechos reales (si existen)	1 – 2d ^c 1 – 3d ^d	1 – 2d ^e	3 – 5d	4 – 6d 1 – 2s ^d	1 – 2s ^e	3 – 5s	Con experiencia y conocimiento del sistema a analizar y de la técnica	Con experiencia y conocimiento del sistema a analizar y de la técnica en su modo cuantitativo	Cualitativos Cuantitativos Diagrama	Sólo se considera éxito o fracaso en los eventos. Incluye errores humanos. Puede resolverse hasta el conjunto mínimo de corte. Considera causas potenciales y consecuencias.

METODOLOGÍA	ETAPA DE PROCESO ^a	TIPO DE INFORMACIÓN NECESARIA	TIEMPO ESTIMADO						PERSONAL PARA PREPARACIÓN	PERSONAL PARA EVALUACIÓN	TIPO DE RESULTADOS	OBSERVACIONES
			SISTEMAS PEQUEÑOS Y SENCILLOS			SISTEMAS GRANDES Y COMPLEJOS						
			PREPARACIÓN ^b	EVALUACIÓN	DOCUMENTACIÓN ^b	PREPARACIÓN ^b	EVALUACIÓN	DOCUMENTACIÓN ^b				
CCA	3,4,6,7,8	Detallada del sistema al que pertenece el Evento Tope y hechos (si existen)	1 – 2d ^c 1 – 3d ^d	1 – 3d ^b	3 – 5d	4 – 6d 1 – 2s ^d	1 – 2s ^a	3 – 5s	Con experiencia y conocimiento del sistema a analizar y de la técnica.	Con experiencia y conocimiento del sistema a analizar y de la técnica.	Cualitativos Cuantitativos Diagrama	Relaciona consecuencias específicas con sus posibles causas. NO útil en sistemas grandes y complejos.
HRA	3,4,5,6,7,8	Demográfica de los empleados, Procedimientos de operación, descripción del ambiente de trabajo, entrevistas y visitas.	4 – 8h ^e 1 – 3d ^d	1 – 2d ^a	3 – 5d	1 – 3d 1 – 2s ^d	1 – 2s ^a	1 – 3s	Con conocimiento del comportamiento humano y habilidades inter e intra personales.	Con conocimiento de ergonomía, psicología e higiene ocupacional	Cualitativos	Evaluación de factores guía del comportamiento humano. Se centra principalmente en causas.

^a Referido a la Tabla 1.6

^d Construcción del Modelo

^b Principalmente el líder y el secretario

^a Evaluación Cualitativa

^c h=horas, d=días, s=semanas

^f Referirse a la Tabla 1.3

Tabla 1.8 Análisis comparativo de las diferentes metodologías de análisis de riesgos y peligros. Adaptado del CCPS "Guidelines for Hazard Evaluation Procedures, with worked examples" 2nd ed. AICHE 1992

CAPITULO 2.

Generalidades de los Análisis de Consecuencias.

Como se explicó en el Capítulo 1, el riesgo es una combinación de la magnitud de la consecuencia por la frecuencia de ocurrencia de un evento dado. Existen metodologías cualitativas para la identificación de peligros, modelos matemáticos para la evaluación de las consecuencias de éstos y metodologías cuantitativas para la determinación del riesgo. En este capítulo se explican de forma general los tipos de consecuencias de diferentes escenarios, los modelos empleados para la estimación de consecuencias y sus resultados y la información necesaria para realizar estos análisis.

Los métodos cuantitativos y modelos matemáticos de simulación, ayudan a los analistas y a la gerencia de la instalación industrial a determinar la importancia relativa de cada uno de los eventos no deseados identificados y esto permite la toma de decisiones sobre la inversión de recursos de forma más eficiente para la reducción de riesgos.

Algunos ejemplos del uso de los análisis de consecuencias se mencionan a continuación:

- Determinación de la localización óptima de una instalación industrial o aceptabilidad del sitio;
- Determinación de los parámetros de diseño de equipo;
- Análisis comparativo de las opciones de diseño de los equipos;
- Toma de decisiones en la preparación del plan de respuesta a emergencias;
- Cumplimiento de estándares corporativos;
- Cumplimiento regulatorio.

Los accidentes en las plantas químicas o instalaciones industriales, presentan características similares como son: derrames o fugas de sustancias químicas tóxicas, inflamables o explosivas. Es importante conocer y estudiar estas características comunes para anticipar y evitar los accidentes que involucren sustancias químicas y por tanto sus consecuencias. Como un ejemplo, en la Tabla 2.1 se presentan tres de los tipos de accidentes que pueden ocurrir en Plantas Químicas.

Los accidentes comienzan con un incidente que frecuentemente resulta en la pérdida de contención de material de su proceso, ejemplos de situaciones que conllevan a la pérdida de contención son: la ruptura de una tubería, un orificio en un tanque o tubería, una reacción química fuera de control, fuego externo a los contenedores, etc. Para la estimación de las consecuencias de este y otro tipo de accidentes, se han desarrollado modelos de estimación dependiendo de los resultados que se deseen obtener.

Tipo de Accidente	Probabilidad de Ocurrencia	Potencial para matar	Potencial para pérdidas económicas
Incendio	Alta	Baja	Media
Explosión	Media	Media	Alta
Nube Tóxica	Baja	Alta	Baja

Tabla 2.1 Tres Tipos de Accidentes en Plantas Químicas⁴

2.1 CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS DE ESTIMACIÓN DE CONSECUENCIAS

Los modelos de estimación de consecuencias se clasifican de la siguiente forma:

1. Modelos de Fuente
2. Modelos de Dispersión
3. Modelos de Fuego y Explosión
4. Modelos de Efecto

Una vez que el incidente ha ocurrido, se seleccionan los modelos de fuente para describir como son descargados los materiales del proceso a la atmósfera, éstos modelos proporcionan el gasto de la descarga, la cantidad total descargada (o tiempo total de descarga) y el estado de agregación de la sustancia liberada (sólido, líquido, gas/vapor o una combinación). Un modelo de dispersión se usa posteriormente para describir el comportamiento del material a través de su trayecto en la atmósfera y la concentración del mismo en función de la distancia que recorre y el tiempo que transcurre desde que sucede la emisión. Para el caso de emisiones de sustancias inflamables, los modelos de fuego y explosión convierten la información de los modelos de fuente en energía potencial de daño como la radiación térmica y las ondas de sobrepresión. Los modelos de efecto convierten los resultados de los modelos anteriores en daños a la gente (lesiones o muertes), a las estructuras y al medio ambiente. Información complementaria puede ser proporcionada por los factores de mitigación, los cuales tienden a reducir la magnitud de las consecuencias. Ver Tabla 2.1

2.1.1 MODELOS DE FUENTE

Los modelos de fuente se utilizan para determinar cuantitativamente las consecuencias de una emisión a través de la estimación del gasto de la emisión, la cantidad total emitida o duración de la emisión, el estado de agregación de la sustancia, la fracción de sustancia que se evapora o se “flashea” de una derrame y la formación de aerosoles dependiendo del escenario.

Los modelos de fuente son modelos matemáticos obtenidos de ecuaciones fundamentales o empíricas que representan los procesos físico-químicos que suceden durante la emisión de las sustancias químicas. Para instalaciones industriales complejas, puede ser necesario la utilización de varios modelos de

⁴ Daniel A. Crowl / Joseph F. Louvar “Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications”. Prentice Hall 1990.

fuentes para describir las emisiones e incluso realizar adecuaciones a los modelos originales para representar situaciones específicas.

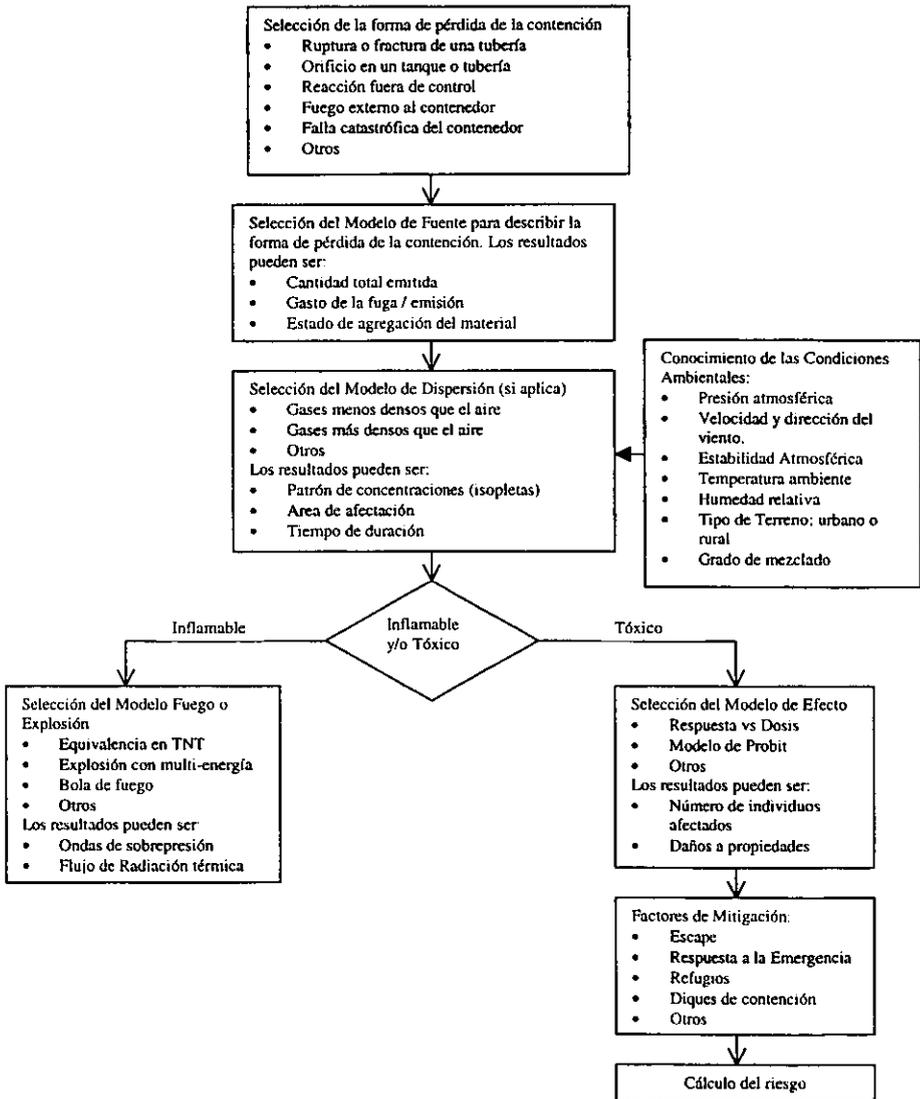


Figura 2.1 Diagrama lógico de los modelos para emisiones de sustancias peligrosas volátiles.⁵
³Adaptado de "Understanding Atmospheric Dispersion of Accidental Releases" CCPS AICHE 1995

⁵ "Guidelines for Consequence Analysis of Chemical Releases" CCPS AICHE 1999.

La aplicación de los modelos de fuente son básicamente dos tipos de emisiones: las emisiones calculadas y controladas a través de la ingeniería de diseño (ej. válvulas de seguridad) y las emisiones de emergencia o no planeadas (ruptura de tubería). La Tabla 2.2 muestra una lista de ejemplos de escenarios que pueden suceder agrupados por la fase del material que es emitido. Ver Figura 2.1

<p>Emisiones de Líquido:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Orificio en un tanque atmosférico u otro contenedor o tubería no presurizado. • Orificio en un contenedor o tubería que contiene un líquido presurizado por debajo de su temperatura normal de ebullición. <p>Emisiones de Gas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Orificio en un equipo (contenedor o tubería) conteniendo gas bajo presión. • Válvula de descarga (de vapor solamente) • Evaporación de un derrame. • Válvula de descarga del domo de un tanque de almacenamiento presurizado. • Generación de sustancias tóxicas producto de la combustión, resultado de un incendio. <p>Emisiones de dos fases:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Orificio en un contenedor o tubería que contiene un líquido presurizado por arriba de su temperatura normal de ebullición. • Válvula de descarga (debido a una reacción no controlada o espuma)
--

Tabla 2.2 Ejemplos de escenarios típicos de emisiones y su relación con la fase del material.⁵

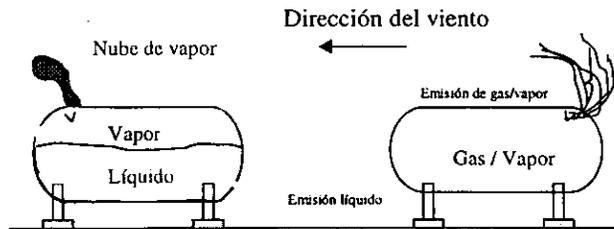


Figura 2.1 Ilustraciones de ejemplos de mecanismos de emisión.

Lo primero que se tiene que hacer para realizar una estimación con los modelos de fuente, es determinar apropiadamente el escenario y posteriormente aplicar

³ " George E. DeVaul, John A. King, et all. " Understanding Atmospheric Dispersion of Accidental Releases" CCPS AICHE 1995.

⁵ "Guidelines for Consequence Analysis of Chemical Releases" CCPS AICHE 1999.

las ecuaciones indicadas dependiendo del mismo. La información mínima necesaria para el empleo de éstos modelos se describe a continuación y es la siguiente:

- Estado de agregación de la sustancia emitida;
- Ruta termodinámica y su situación final;
- Tamaño del orificio;
- Duración de la emisión;
- Otros aspectos.

2.1.1.1 Estado de agregación de la sustancia emitida.

Los modelos de fuente (de descarga) requieren una consideración cuidadosa de la fase del material emitido. La fase en la que la sustancia es emitida es dependiente de la condición de la sustancia antes de ser emitida y del proceso de emisión. Puede ser determinado conociendo la ruta termodinámica de ésta, utilizando diagramas o datos termodinámicos y/o modelos de equilibrios líquido-vapor. El punto de partida de éste análisis está definido por la condición de la sustancia antes de ser emitida (presión, temperatura). La situación final de la ruta termodinámica es la presión final de la emisión que usualmente es una atmósfera (1 atm.). Las emisiones pueden ser en fase líquida, gas/vapor ó líquido-vapor.

Los líquidos pueden estar almacenados bajo tal presión que la temperatura de los mismos estén por arriba (supercalentados) o por debajo de la temperatura normal de ebullición, lo que puede causar que al salir del recipiente a la atmósfera se “flashen” parcialmente, formen aerosoles o una lluvia de la sustancia emitida. Para este tipo de escenarios, existen modelos para estimar la cantidad de sustancia que se “flashea” y/o se evapora del charco de sustancia que se forma en el suelo.

El grado de evaporación de una sustancia en un charco es proporcional al área del charco que se forma y a la presión de vapor del líquido. El tamaño del charco es dependiente del nivel de rugosidad y de la superficie del terreno. Estos modelos están basados en la transferencia de masa y calor, en las propiedades termodinámicas del líquido, las características del charco y las propiedades térmicas y físicas del sustrato (ej. suelo). Ver Figura 2.2

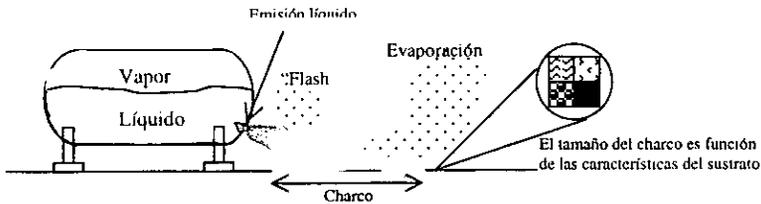


Figura 2.2. Ilustración de la formación del charco de sustancia. Si la Temperatura del líquido está por debajo de la temperatura ambiente es posible la formación de un aerosol. En caso contrario solamente se formará el charco.

2.1.1.2 Ruta termodinámica y su situación final.

La especificación de la ruta termodinámica y la situación final de ésta es información muy importante para el desarrollo del modelo de estimación y del tipo de datos necesarios para obtener resultados de éste. Si por ejemplo, un líquido en reposo es acelerado durante una emisión y su situación final es un líquido en movimiento, entonces la suposición de una ruta termodinámica isoentrópica es normalmente válida. Sin embargo, si éste mismo líquido tiene una situación final como un líquido en reposo (por ejemplo un derrame en el suelo (charco)) independientemente de cualquier aceleración, las entalpías iniciales y finales se asumirían iguales, sin que implique que la entalpía es constante durante todo el proceso.

2.1.1.3 Tamaño del orificio

Otro dato muy importante para el cálculo de la descarga, es el tamaño del orificio. El tamaño del orificio debe ser estimado o conocido, dependiendo de su ubicación y causa. No existe un consenso para la selección del tamaño del orificio, sin embargo existen varias metodologías y valores heurísticos para hacer las estimaciones, tales como usar orificios de 2 o 4 pulgadas sin importar el tamaño del tubería.

2.1.1.4 Duración de la emisión

El tiempo de duración de la emisión depende de los tiempos de detección y acción de los sistemas de seguridad y de los tiempos de respuesta de los operadores. El Departamento de Transporte de USA y en el 40 "*Code of Federal Regulations*" de USA han establecido un tiempo de 10 min. de duración de la fuga, para la estimación del peor escenario creíble. Sin embargo, el analista de consecuencias debe elegir el tiempo de duración de la emisión de acuerdo al escenario que se esté estudiando.

2.1.1.5 Otros aspectos.

Otros aspectos importantes a considerar cuando se analizan emisiones de sustancias son los siguientes:

- Tiempo de transición de la emisión, los gastos de emisión disminuyen conforme disminuye la presión.
- Reducción del flujo, válvulas, bombas u otras restricciones en la tubería que pueden reducir el gasto por debajo de lo estimado.

- Material acumulado entre las tuberías o los procesos, entre el lugar de la emisión y el equipo de emergencia.

2.1.2 MODELOS DE DISPERSION.

Los modelos de dispersión, son modelos matemáticos que describen el comportamiento de los materiales tóxicos transportados por el aire desde el lugar de la emisión o fuente (lugar del accidente) al interior de la instalación industrial y/o la comunidad vecina. Los resultados de los modelos de dispersión son: el área de afectación y la concentración de la sustancia en función del tiempo y/o la distancia.

El potencial de daño de la emisión frecuentemente se mide en función de la concentración y se obtienen isopleas (líneas o curvas de igual concentración) que se pueden graficar en diagramas o mapas de la zona del accidente. Dado que en algunas ocasiones la dirección del viento no es conocida, se estima un área circular de afectación, distancia máxima que puede alcanzar la nube a una concentración de interés, como puede ser el IDLH (Immediately Dangerous to Life and Health = Inmediatamente Peligroso para la Vida y la Salud).

Todos los peligros que conllevan los accidentes con sustancias químicas no son solamente función de la concentración de la sustancia, pueden ser también función de situaciones como las siguientes:

- Tiempo de exposición;
- Respuesta biológica del individuo, animal o vegetal, tiempo de exposición y la dosis;
- Desplazamiento del oxígeno y el potencial de asfixia;
- Límites de inflamabilidad de las sustancias y las fuentes de ignición presentes;
- Limitaciones en la visibilidad por la formación de una nube;

- Temperaturas extremas resultado de derrames de líquidos criogénicos, calientes o de reacciones químicas exotérmicas.
- Entrada de la sustancia química por los ductos de ventilación de los equipos de proceso o de las instalaciones.
- Las fuerzas de expansión de la fuga de sustancias que se “flashean”;
- Radiación térmica de sustancias que se inflamen.

Existen tres tipos de comportamientos de las nubes de gases o vapores tóxicos/inflamables y tres tipos de forma de ser emitidos:

Comportamiento de las nubes de vapor/gas frente al aire	Forma de emisión
• Gas con características de flotación neutral	• Instantánea (puff)
• Gas con características de flotación positiva (más ligero que el aire)	• Continua (pluma)
• Gas con características de flotación negativa o denso que el aire	• Continua con variaciones con el tiempo

Las emisiones que son de forma continua como la proveniente de una chimenea de proceso o de una fuga por un pequeño orificio, forman una pluma de la(s) sustancia(s) emitidas de forma larga y delgada regularmente, cuyo comportamiento está en función de las condiciones atmosféricas y de las características del gas relativas a su flotación con respecto al aire. Ver Figura 2.3.

Las emisiones que son de forma instantánea o de cierta cantidad de sustancia, tienen la forma de una sola nube de vapor/gas conocida como “puff”. Los “puffs”, como se muestra en la Figura 2.4, se mueven también en función de las condiciones atmosféricas y viajan como un solo bloque hasta su completa dilución y dispersión.

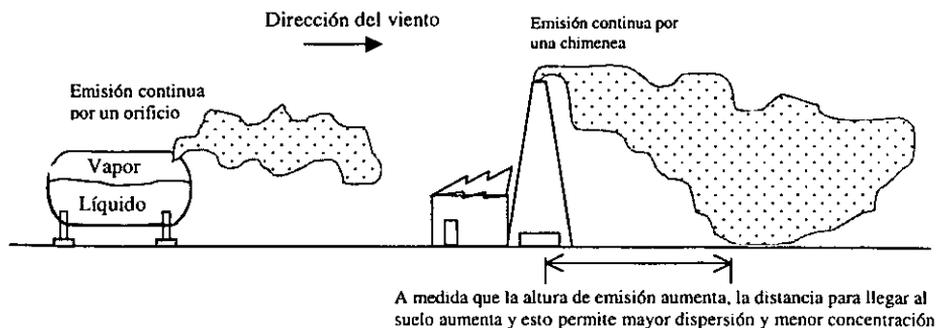


Figura 2.3 Ejemplos de emisiones continuas y esquema del efecto en la concentración de la sustancia emitida dada la altura de emisión. Adaptación del "Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications"

Los "puffs" pueden ser empleados para describir las plumas, ya que las plumas son una serie de "puffs" continuos.

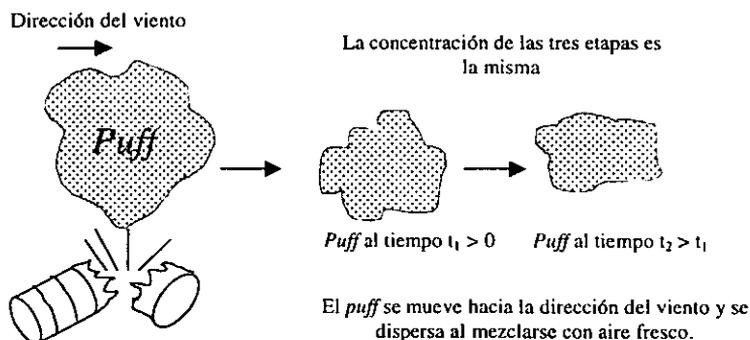


Figura 2.4 Formación de un "puff" debido a una emisión instantánea de sustancia. Adaptación de "Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications"

Las emisiones continuas con variaciones son aquellas que tienen un comportamiento intermitente y por lo regular se comportan como continuas.

Los modelos de simulación de dispersión de nubes tóxicas/inflamables necesitan como mínimo la información del gasto o la cantidad del material emitido y de las condiciones atmosféricas que afectan la dispersión. Estas condiciones se describen más adelante y son las siguientes:

- Velocidad del viento;
- Estabilidad Atmosférica (si es de día o de noche, si está nublado, parcialmente nublado o claro);
- Condiciones de la superficie o terreno (plano, con estructuras, árboles, agua, etc.);
- Altura del punto de emisión;
- Momentum y comportamiento del material frente al aire.

2.1.2.1 Velocidad del viento.

La velocidad del viento es el factor por el cual una nube de gas tóxico/inflamable puede ser trasladada y diluida. A medida que la velocidad del viento se incrementa, la sustancia es llevada con él y ésta se diluye con mayor velocidad.

La velocidad del viento normalmente es considerado para los análisis a partir de 10 metros del suelo, ya que a menor altura la velocidad del viento se ve afectada por la rugosidad del terreno.

2.1.2.2 Estabilidad Atmosférica

Las condiciones climatológicas tienen una gran influencia sobre la dispersión de las sustancias. La estabilidad atmosférica se relaciona con el mezclado vertical del aire. Durante el día la temperatura del aire disminuye rápidamente con la altura, provocando movimientos del aire verticales y en algunas ocasiones suceden inversiones térmicas.

La estabilidad atmosférica normalmente es clasificada de acuerdo al modelo de Pasquill-Grifford (no es el único), donde se establecen seis clases de estabilidad (A – F) dependiendo de la velocidad del viento y la cantidad de radiación solar. La estabilidad A se encuentra con bajas velocidades del viento y altos niveles de radiación solar; la estabilidad E y F se encuentran en las noches claras con poco viento; la estabilidad D ocurre cuando hay viento de alta velocidad y gran cantidad de nubes en el cielo. Ver Tabla 2.3.

Los datos de velocidad del viento y de radiación solar puede obtenerse de los centros meteorológicos del país o de estaciones meteorológicas ubicadas en las instalaciones o corredores industriales. En caso que falte esta información, existen dos combinaciones comunes que son utilizadas por los analistas en los estudios de consecuencias: Estabilidad: D y velocidad de viento 5 m/s / Estabilidad: F y velocidad de viento: 1.5 m/s. Estas combinaciones describen escenarios donde la turbulencia y velocidad de mezclado es baja, la dispersión de la nube de una sustancia es baja y por tanto dispersión de la misma es lenta. Lo anterior resulta regularmente en las condiciones del peor escenario, ya que se trata de una nube con una concentración peligrosa que se desplaza lentamente de acuerdo la dirección del viento.

La relación de la estabilidad atmosférica y la distancia de dispersión de la sustancia dan como resultado los coeficientes de dispersión, que representan la desviación estándar de la concentración de la sustancia en los tres ejes del espacio (x, y y z) y que son empleados en las fórmulas de dispersión de los diferentes escenarios.

2.1.2.3 Condiciones de la superficie o terreno.

Las condiciones del terreno afectan el comportamiento de mezclado del aire a diferentes alturas con respecto al suelo y por lo tanto de las nubes de gases tóxicos/inflamables. Las estructuras y árboles aumentan el mezclado, lo que

significa que nubes de gases contaminantes serán dispersadas con mayor facilidad, mientras que las áreas abiertas como un lago lo disminuyen.

Velocidad del viento (m/s)	Día			Noche	
	Radiación solar incidente			Nubosidad	
	Fuerte	Moderada	Ligera	Mayor o igual a 4/8	Menor o igual a 4/8 (calmo y claro)
< 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

- A: Condiciones extremadamente inestables
- B: Condiciones moderadamente inestables
- C: Condiciones ligeramente moderadas
- D: Condiciones neutrales
- E: Condiciones ligeramente estables
- F: Condiciones moderadamente estables

Tabla 2.3 Clases de estabilidad atmosférica del modelo de dispersión de Pasquill-Gifford

La rugosidad del terreno es un factor que puede coadyuvar a la formación de atmósferas con concentraciones peligrosas o dentro de los límites inferiores y superiores de inflamabilidad, dadas los posibles lugares de confinamiento del terreno.

2.1.2.4 Altura del punto de emisión.

La altura del punto de emisión es un factor que en combinación con la característica de flotación del gas, interviene en la cantidad de sustancia que se puede encontrar en la superficie del terreno. Es decir, a mayor altura de la emisión, mayor será la dispersión de la pluma o "puff" debido a los efectos del viento y mezclado de la atmósfera y por tanto la concentración de la sustancia en la superficie del terreno será menor. Es importante mencionar que esta altura solamente afecta la concentración de la sustancia en el suelo y no así la que se tiene en el punto de emisión. Ver Figura 2.3.

2.1.2.5 Momentum y comportamiento del material frente al aire.

Como se describió anteriormente, los gases pueden comportarse de tres diferentes formas de acuerdo a sus características de flotación. Esto es, los gases pueden ser más densos que el aire o de flotación negativa, de flotación positiva o menos densos que el aire y de flotación neutra o de densidad muy cercana a la del aire.

Los diferentes escenarios que se pueden presentar en la dispersión de una nube tóxica/inflamable, pueden ser estimados a través de una combinación de los factores anteriormente descritos. Ejemplos de estos modelos son “puffs” sin presencia de viento, emisiones continuas con o sin viento, etc.

2.1.3 MODELOS DE FUEGO Y EXPLOSIÓN

Para explicar de forma general los modelos de fuego y explosión, primero es necesario conocer algunas definiciones relacionadas con este tema y que ayudarán a la mejor comprensión de esta explicación, mismas que se describen a continuación:

Fuego: El fuego o combustión es una reacción exotérmica de oxidación de un combustible, misma que desprende energía. El combustible puede ser líquido, sólido o gaseoso. La combustión siempre sucede en fase vapor. Para la combustión o el fuego, es necesario que se cuente con tres elementos básicos: el combustible, un agente oxidante (que contiene oxígeno) y una fuente de energía o de ignición.

Límite Inferior de Inflamabilidad (LII) / Límite Superior de Inflamabilidad (LSI): Es la concentración mínima y máxima de una mezcla de combustible-aire en porcentaje de volumen de aire que puede propagar una flama. La mezcla de vapor-aire, no arderá a una concentración por debajo del LII y por arriba del LSI.

El valor del límite inferior y superior de explosividad (LIE y LSE) suelen ser equivalentes a los LII y LSI.

Flash Point: El flash point de un líquido es la temperatura más baja a la cual se produce vapor suficiente para formar una mezcla de combustible-aire que puede arder. En este punto, el vapor arderá y cesará de arder rápidamente, ya que no se genera la suficiente cantidad de vapor para mantener la combustión.

Temperatura de Autoignición: Es la temperatura a la cual, el vapor se enciende espontáneamente con la energía del medio ambiente. Esta temperatura es función de la concentración de vapor, el volumen del vapor, la presión del sistema, la presencia de catalizadores de la reacción y condiciones de flujo.

Concentración Mínima de Oxígeno (CMO): Es la concentración de oxígeno por debajo de la cual la reacción no puede generar suficiente energía requerida para propagar la flama. La CMO es expresada en porcentaje de oxígeno en la mezcla aire-combustible.

Explosión: Una explosión es la rápida expansión de gases resultando liberación de energía a alta velocidad y movimiento del aire, generando una onda de choque.

Las explosiones se clasifican como detonaciones y deflagraciones. En una detonación el frente de llamas toma la forma de una onda de golpe a una velocidad mayor que la del sonido o supersónica que precede una ola de combustión y la cantidad de presión generada puede ser hasta 20 veces la presión original. En una deflagración, se genera combustión rápida a una velocidad menor que la del sonido o subsónica de presiones excesivas de 8 a 10 veces la presión inicial.

La diferencia más significativa entre los incendios/fuegos y las explosiones es la cantidad de energía liberada. Los incendios/fuegos liberan energía lentamente, mientras que las explosiones liberan energía muy rápidamente, típicamente en

el orden de microsegundos. Los incendios pueden resultar en explosiones y las explosiones pueden resultar en incendios.

2.1.3.1 TIPOS DE EXPLOSIONES.

Las explosiones dependen de una serie de parámetros tales como: la temperatura ambiente, la presión atmosférica, la composición del material explosivo, las propiedades físicas del material explosivo, la naturaleza de la fuente de ignición (tipo, energía y duración), la geometría de los alrededores (espacios confinados o abiertos), la cantidad del material involucrado, el tiempo transcurrido antes de la ignición, el gasto de descarga, etcétera. Lo anterior, hace que el comportamiento de las explosiones no sea fácil de explicar y así los modelos matemáticos tengan ciertas incertidumbres.

Las explosiones pueden ser deflagraciones o detonaciones, la diferencia depende de la velocidad de la onda de sobrepresión emitida por la explosión. La onda de sobrepresión se debe a la expansión de los gases por la reacción. Esta expansión puede ser causada por los efectos estequiométricos (cambio en el número total de moles) o los efectos térmicos de expansión.

Los efectos de las explosiones se pueden dividir en tres: ondas de sobrepresión, proyectiles o material que es proyectado y radiación térmica.

Los tipos de explosiones que se pueden presentar son las siguientes:

1. Explosiones de nubes de vapor;
2. Explosiones confinadas;
3. Explosiones por la expansión de líquido en ebullición (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosions (BLEVE))
4. Explosiones físicas.

2.1.3.1.1 Explosiones de nubes de vapor (ENV)

Las explosiones de nubes de vapor son las más dañinas y peligrosas dentro de la industria química. Para que ocurra una explosión de nube de vapor se necesita que cuatro características estén presentes:

1. Emisión/descarga/fuga repentina de material inflamable. Esto ocurre generalmente cuando se rompe un contenedor con un líquido supercalentado y presurizado.
2. La dispersión de la sustancia y la formación de una nube de vapor, en un lapso de tiempo. El tiempo más probable para que ocurra la explosión es de 1 a 5 minutos.
3. Una fuente de ignición presente;
4. Una parte suficientemente grande de la nube vapor tiene que estar dentro del rango de inflamabilidad.

Algunos de los parámetros que afectan el comportamiento de las explosiones de nubes de vapor son los siguientes: cantidad de material emitido, fracción del material vaporizado, probabilidad de ignición de la nube, distancia de dispersión antes de la ignición, eficiencia de la explosión, etc.

Estudios cualitativos demuestran que (a) la probabilidad de ignición de la nube es proporcional a su tamaño, (b) la eficiencia de la explosión es baja, aproximadamente el 2% de la energía de combustión es transformada en ondas de choque, (c) el mezclado turbulento de la mezcla de vapor y aire y la ignición de la nube en un punto alejado del punto de emisión, aumenta el impacto de la explosión y (d) los incendios de nubes de vapor son más comunes que las explosiones.

2.1.3.1.2 Explosiones confinadas

Las explosiones confinadas ocurren en espacios confinados, tales como: contenedores o edificios. Los dos escenarios más comunes son las explosiones de vapores inflamables y polvos. Las ondas de sobrepresión y el lanzamiento de proyectiles son los peligros más sobresalientes de este tipo de explosiones.

Las explosiones de polvos se comportan de una manera muy especial. Este tipo de explosiones ocurren cuando partículas sólidas muy finamente divididas de material son dispersadas en el aire y encendidas.

Las explosiones de polvos más comunes son las de los silos de harina o semillas o en la industria minera. Una explosión inicial puede causar explosiones secundarias. En muchas ocasiones las explosiones secundarias son las más dañinas.

Para la mayoría de los polvos, el límite inferior de explosión está entre 20 y 60 gm/m³ y el límite superior de explosión entre 2 y 6 kg/m³.⁶

2.1.3.1.3 Explosiones por la expansión de líquido en ebullición (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosions (BLEVE))

BLEVE es un fenómeno que ocurre cuando se fractura o rompe un recipiente conteniendo un líquido bajo presión y a una temperatura significativamente arriba de la temperatura normal de ebullición. Conforme esto pasa, el líquido se vaporiza casi instantáneamente y se expande varios miles de veces de su volumen original con una fuerza explosiva. Ver figura 2.5

Si el BLEVE involucra un líquido inflamable o un gas inflamable licuado, la explosión (ENV) inicial estará generalmente por seguida por una ignición

⁶ W. Bartknecht, Explosion (New York: Springer-Verlag, 1981), p. 27

instantánea de los vapores emitidos, resultando en una bola de fuego masiva y aumento en la fuerza explosiva.

Existen dos mecanismos que pueden provocar un BLEVE de un contenedor presurizado. Estos mecanismos son la exposición directa del contenedor al fuego y la falla catastrófica del contenedor debido a daño o falla mecánica (ej. corrosión, defectos de manufactura, etc.). En la práctica, el primer mecanismo es el más común.

La secuencia de eventos que ocurren durante la exposición directa de fuego a un contenedor es la siguiente:

- El fuego calienta las paredes del contenedor;
- Las paredes del contenedor por debajo del nivel de líquido son enfriadas por el mismo líquido, lo que provoca un aumento en la temperatura del líquido y un aumento en la presión del tanque.
- Si las flamas alcanzan las paredes del tanque donde solamente hay vapor y no hay líquido que remueva el calor generado, la temperatura del metal del tanque aumenta hasta que éste se debilita o pierde sus propiedades estructurales.
- El tanque se rompe y se evapora explosivamente su contenido. Las válvulas de seguridad no protegen de este tipo de fenómenos, ya que usualmente la fractura del contenedor sucede a una presión menor a la presión de calibración de la válvula de seguridad.

2.1.3.1.4 Explosiones físicas.

Las explosiones físicas se relacionan con la ruptura catastrófica de un contenedor presurizado cuyo contenido es un gas. Cuando esta ruptura sucede, el resultado es la liberación de energía. La energía liberada puede producir una

onda de choque y acelerar los fragmentos de contenedor resultantes de la ruptura.

Si el contenido del tanque es una sustancia inflamable, es posible que el gas sea encendido causando efectos adicionales.

La ruptura de un tanque, puede deberse a cualquiera de las siguientes causas:

1. Falla de la regulación de la presión y del equipo de alivio de sobrepresión;
2. Reducción del espesor de las paredes del tanque debido entre otras causas a: corrosión, erosión y ataque químico;
3. Reducción de la resistencia del contenedor;
4. Reacción interna no controlada; y
5. Cualquier otro proceso que resulte en la pérdida de contención del material.



Figura 2.5 Ilustración de un BLEVE

2.1.3.2 TIPOS DE FUEGOS/INCENDIOS.

Como se puede ver en la definición de fuego, arriba mencionada, este es una reacción química que necesita de tres componentes para llevarse a cabo: combustible, comburente u oxidante y una fuente de ignición o energía.

Los tipos de escenarios que se pueden presentar debido a una fuga o derrame de una sustancia química inflamable son los siguientes:

1. "Flash Fire"
2. Bola de fuego ("Fireball")
3. Incendios o Fuegos de charcos("Pool Fire")
4. Chorro de Fuego ("Jet Fire")

2.1.3.2.1 Flash Fire

El flash fire es la combustión no explosiva de una nube de vapor resultado de una fuga de una sustancia química inflamable en un espacio abierto. El mayor riesgo de este tipo de fuego es la radiación térmica y el contacto directo de la flama con los objetos y los seres vivos.

La combustión de la nube de vapor en un "flash fire" normalmente no dura más de unas décimas de segundo. Frecuentemente la zona de efecto del fuego se estima primero haciendo una modelación de dispersión y definiendo la zona de inflamabilidad tomando como base un medio del límite inferior de inflamabilidad.

2.1.3.2.2 Bola de Fuego ("Fireball")

Las bolas de fuego se producen cuando una sustancia inflamable es liberada de forma súbita de su contenedor y es encendida. El diámetro de la bola de fuego y la duración del fuego están en función de la cantidad de sustancia fugada. Ver Figura 2.6.

El mayor peligro de este tipo de fuego es la radiación térmica y dado que el tiempo en el que se produce está en el orden de segundos, el efecto por la radiación es muy significativo.

2.1.3.2.3 Incendios o Fuegos de charcos ("Pool Fire")

Los incendios o fuegos de charco son aquellos que suceden cuando un equipo de proceso conteniendo una sustancia química inflamable pierde contención y ésta se derrama, se almacena en el suelo y se enciende. (Figura 2.7). Si la sustancia es líquida y se encontraba almacenada a una temperatura menor a la de su temperatura normal de ebullición, el material formará un charco en el suelo. La geometría del charco es función de la forma y estructura de los alrededores del punto del derrame, como se explicó en el punto 2.1.1.1.

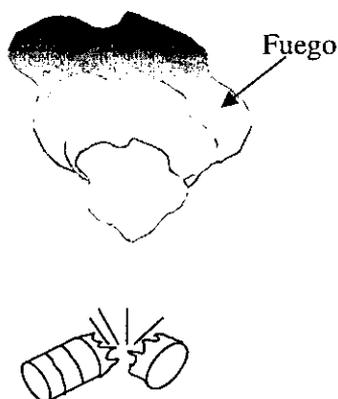


Figura 2.6 Ilustración de una bola de fuego

Si se derrama una sustancia que se encuentra almacenada a una temperatura por arriba de su temperatura de normal de ebullición, una fracción del líquido se evaporará y la fracción restante de líquido formará el charco en el suelo.

La forma en que se prende un charco de una sustancia química inflamable es a través de encender el vapor que se desprende del charco, causando inicialmente un "flash fire".

El peligro más significativo de este escenario es la radiación térmica debido a las flamas generadas por el fuego. Algunas características necesarias para

evaluar la determinación de los efectos térmicos causados por este tipo de fuego son las siguientes: tipo de sustancia, forma del charco, duración del fuego, localización de los objetos/seres vivos receptores con respecto del fuego, comportamiento del receptor ante la radiación térmica, etc..

Los modelos matemáticos para simular las características y efectos de los incendios o fuegos de charco están compuestos por varios submodelos. A continuación se mencionan algunos de los submodelos antes descritos: a) tamaño del charco; b) forma de la flama; c) capacidad de transmisión térmica de la atmósfera, etc.

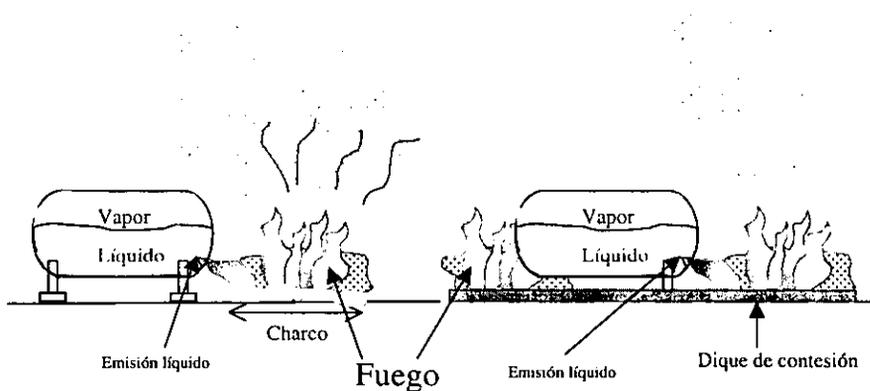


Figura 2.7 Ilustración de un "pool of fire" sin dique de contención y con dique de contención.

2.1.3.2.4 Chorro de Fuego ("Jet Fire")

El chorro de fuego se da cuando una sustancia inflamable es liberada de un recipiente (contenedor / tubería) sujeto a presión en forma de "jet" y es encendida. El mayor peligro de este tipo de fuego es la radiación térmica y depende de la distancia que alcance el "jet" y el tiempo de exposición. Ver Figura 2.8.

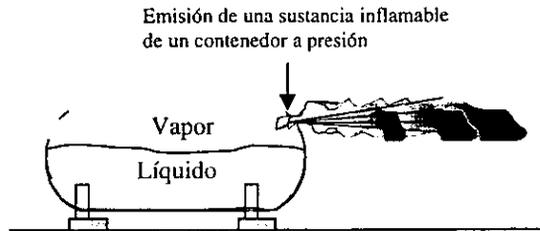


Figura 2.8 Ilustración de un chorro de fuego.

2.1.4 MODELOS DE EFECTO

Los Modelos de Efecto se utilizan para estimar las posibles consecuencias producto de los diferentes escenarios antes mencionados (emisiones puntuales o continuas, fuegos y explosiones), que se pueden presentar en un accidente que involucre una sustancia química peligrosa.

El tipo de consecuencias estudiadas depende del objetivo del analista o del gerente o responsable de una instalación industrial. Es decir, se pueden estimar las consecuencias a: 1) los seres humanos, 2) los bienes muebles e inmuebles, y 3) el medio ambiente.

Los efectos o consecuencias a los seres humanos normalmente son expresados en muertes o personas lesionadas por evento. Los daños a bienes inmuebles o muebles normalmente son expresados en pérdidas financieras o monetarias. Los efectos o daños al medio ambiente son mucho más complejos de evaluar, ya que se debe analizar el impacto a la flora, la fauna, suelo (contaminación), agua (contaminación al agua superficial o subterránea).

A través de los años de estudio y de aprender de los diversos accidentes que han ocurrido, se han desarrollado modelos matemáticos y tablas de valores que relacionan los diversos grados de consecuencias producto de explosiones

(sobrepresión o emisión de proyectiles) o de fuegos (radiación térmica), así como la relación dosis-efecto, producto de la exposición o ingestión de una sustancia química.

CAPITULO 3

Sistema Preliminar de Estimación de Riesgos (SPER)

3.1 GENERALIDADES.

El *Sistema Preliminar para la Estimación de Riesgos (SPER)*, motivo de esta tesis, se basa en el *“Manual para la Clasificación y Jerarquización de Riesgos de grandes Accidentes Industriales”* que fue desarrollado por el Programa de la Agencia Internacional de Evaluación y Manejo de Riesgos Ambientales y de Salud de la Industria de la Energía y otros Sistemas Complejos (*Inter-Agency Programme on the Assessment and Management of Health and Environmental Risks from Energy and Other Complex Industrial Systems*), basándose en la experiencia de varios países en actividades encaminadas al manejo y evaluación de los riesgos ambientales y de salud, a la prevención de accidentes mayores y a la preparación para la respuesta oportuna de emergencias. Lo anterior, para ayudar en la clasificación y jerarquización de riesgos en instalaciones industriales grandes, para que las evaluaciones siguientes puedan ser efectuadas bajo un orden de prioridad.

El documento en el cual se basa SPER, es la tercera generación de métodos de jerarquización, utiliza parte de la información técnica de los documentos anteriores y tiene varias adiciones importantes. La primera generación fue un procedimiento de inventario desarrollado por D. Van den Bran para la provincia del sur de Holanda. La segunda generación, también de Holanda, fue *“La Guía de Actividades Industriales Peligrosas”* desarrollada por la TNO Environmental and Energy Research (Investigación para el Medio Ambiente y la Energía) de Holanda.

El Sistema Preliminar de Estimación de Riesgos (SPER) permite el cálculo aproximado del número de muertes resultado de un accidente mayor en

instalaciones industriales o en el transporte de materiales peligrosos y la estimación de la probabilidad o frecuencia de ocurrencia de los mismos (número de veces que ocurre por actividad / por año). Las estimaciones se basan principalmente en la clasificación de actividades peligrosas en el área de estudio, en la forma de manejo de la sustancia y en la cantidad aproximada involucrada en el accidente.

Los resultados de la magnitud de las consecuencias y las probabilidades de ocurrencia obtenidos en SPER, pueden ser graficadas en forma matricial donde el eje de las abscisas muestre la magnitud de las consecuencias y el eje de las ordenadas la probabilidad de ocurrencia. Lo anterior, permite la categorización de los riesgos de las diferentes actividades estudiadas y la obtención de una lista de actividades en orden de prioridad, cuyos riesgos tienen que ser analizados más en detalle.

En el presente documento y en SPER, "*riesgo*" está definido en términos de las consecuencias (magnitud) y la probabilidad de que ocurran eventos no deseados (eventos peligrosos). "*Riesgo individual de muerte*" está definido como la probabilidad por año de que una persona miembro de una comunidad vecina a cierta(s) actividad(es) industrial(es) pueda morir debido a la exposición a ésta(s). "*Riesgo social*" está definido como la relación entre el número de personas muertas en un solo accidente y la probabilidad de que este número de muertes pueda ser excedido. El esquema de clasificación indicado en el método está relacionado con el concepto de riesgo social.

3.2. OBJETIVO DE SPER

El principal objetivo del Sistema Preliminar para la Estimación de Riesgos (SPER), es tener una herramienta de computo, fácil de entender y sencilla de utilizar, que ayude al industrial a clasificar y priorizar los riesgos de las instalaciones o actividades dentro de su planta. Con ésta información, el

industrial podrá decidir, de acuerdo a sus estándares o a la legislación vigente, que áreas representan un riesgo suficientemente alto que ameriten evaluaciones adicionales más detalladas; cuales ocupan un nivel medio de riesgo para las cuales la evaluación es menos urgente y que áreas representan un riesgo lo bastante bajo, que requieran evaluaciones con baja frecuencia.

3.3 AREAS DE APLICACIÓN Y ALCANCE DE SPER.

Los métodos y procedimientos utilizados en este sistema, son aplicables a los riesgos con potencial de provocar accidentes mayores en una planta con consecuencias fuera de la misma. Estos riesgos pueden identificarse en los procesos de: manejo, almacenamiento, manufactura y en el transporte de materiales peligrosos a través de: carreteras, ferrocarril, canales fluviales y tuberías. Los riesgos que son considerados en SPER son los que pueden afectar la salud pública fuera de los límites de las instalaciones tales como: incendios, explosiones y emisiones de sustancias tóxicas. No se contempla el riesgo de exposición ocupacional y el riesgo por efectos de la naturaleza como sismos, inundaciones, deslaves, huracanes, etcétera.

Debe de enfatizarse que trabajar con estimaciones gruesas, dadas las incertidumbres en el uso de criterios y suposiciones (ej. valores de LC_{50} [Concentración letal]) y la influencia de ciertos efectos dentro del área de afectación (ej. calor de radiación y ondas de sobrepresión), así como de escenarios promedio de accidentes mayores, como se hace en SPER, no puede dar respuesta a las preguntas de: máximo número de personas que pueden morir o salir lesionadas en un accidente o a la distancia máxima de afectación real. SPER, en cambio, puede ser útil para la jerarquización de acciones en la preparación para responder a emergencias, pero no así para trabajar con planes de preparación específicos de una actividad industrial seleccionada.

3.3.1 SUPOSICIONES EMPLEADAS EN SPER

La metodología de SPER emplea diferentes suposiciones para el cálculo de la probabilidad de ocurrencia y magnitud de las consecuencias de los escenarios en estudio. Solamente toma en cuenta las variables más importantes para una estimación gruesa tales como:

- Densidad de población de la posible zona afectada;
- Densidad de vehículos (automóviles, carrotaques, barcos, autotanques) circulando en el tramo de estudio;
- Frecuencia de la operación de carga y descarga de sustancias químicas;
- Volumen aproximado de la sustancia involucrada, características fisico-químicas de la misma y su forma de manejo;
- Medidas de seguridad implementadas.

Con el propósito de comparar los efectos de las sustancias tóxicas, inflamables y explosivas en el desarrollo de los cálculos de dispersión de nubes de gases tóxicos, la metodología de SPER emplea una estabilidad atmosférica de Pasquill clase D, con una velocidad de viento de 5 m/s. Esta condición atmosférica no representa el peor caso creíble, sin embargo, considera un promedio de las condiciones ambientales presentadas en diversos accidentes.

A continuación se explican las suposiciones (criterio de fatalidad, estimación de consecuencias y probabilidad) empleadas por SPER en el cálculo de las estimaciones de consecuencias y probabilidades:

3.3.1.1 Criterio de Fatalidad:

- Se asume un 100% de mortalidad en el área donde los efectos físicos o tóxicos resultan entre 50 - 100% de mortalidad;

- En el caso de incendios, se considera el 100% de las personas expuestas al fuego. El flujo de radiación térmica no es considerado (Un flujo de 5-10 kW/m² durante 30 segundos pueden ocasionar lesiones muy graves, sin embargo, solamente el 1% de las lesiones son mortales);
- En el caso de explosiones por una nube de vapor, se considera que muere el 100% de las personas envueltas por la nube incandescente; se asume el límite inferior de inflamabilidad (LII) (ej. la ignición ocurre por una concentración de vapor \geq LII). No se considera la sobrepresión;
- En el caso de sustancias explosivas, se considera que mueren el 100% de las personas en la inmediata vecindad del centro de la detonación, lo cual significa una sobrepresión de > 0.986 atm y una gran cantidad de fragmentos que se salgan volando;
- En el caso de nubes tóxicas, se considera que muere el 100% de las personas expuestas a una concentración de la sustancia mayor o igual a la concentración letal ($\geq LC_{50}$ (para humanos)) durante más de 30 min. Este criterio es una sobreestimación dentro del área de afectación establecida y una subestimación para el área fuera de área de afectación antes mencionada ya que aún pueden existir concentraciones letales;
- Fuera del área de afectación estimada, las muertes no son contadas;
- Los factores de mitigación dependen del tipo de sustancia empleada en la estimación.

3.3.1.2 Estimación de consecuencias

- Se consideran tres tipos típicos de efecto: circular (ej. explosiones), medio círculo (ej. nube pesada) y elongado (ej. dispersión);
- Se consideran distancias de afectación hasta 10,000 m;

- Las sustancias están clasificadas en: inflamables, explosivas y tóxicas. Las tóxicas a su vez, están clasificadas en niveles de toxicidad;
- Se pueden realizar cálculos para diferentes actividades relacionadas con la producción, almacenamiento y transporte de sustancias.

3.3.1.3 Estimación de la probabilidad

- La frecuencia promedio de falla se basa en experiencia histórica;
- Se consideran factores de corrección relacionados con las diferencias entre las actividades industriales;
- Se desarrolló un método con el concepto de “números de probabilidad”.

El método discrimina entre los riesgos de las diferentes actividades industriales, los cuales pueden diferir hasta en un orden de magnitud.

3.3.2 APLICACIÓN DE LOS RESULTADOS DE SPER

Como se mencionó anteriormente, SPER utiliza suposiciones para la obtención de las estimaciones de los diferentes escenarios, lo que limitan el uso de los resultados obtenidos.

Los resultados de las estimaciones hechas con SPER, se pueden usar para hacer una revisión preliminar cualitativa de forma general de los diferentes riesgos en un área industrial grande, basada en el concepto de riesgo social; y para ayudar en la jerarquización de las diferentes fuentes de riesgo de una instalación o corredor industrial para futuras evaluaciones detalladas.

Los resultados de las estimaciones hechas con SPER, no deben ser utilizados en los siguientes casos:

- Para la evaluación del riesgo de instalaciones individuales, o como base para un programa de manejo de riesgo.
- Para la toma de decisiones sobre la ubicación de instalaciones peligrosas o la planeación de rutas para el transporte de materiales peligrosos, cuyo proceso de decisión en una situación específica, dependa de un análisis más detallado.
- Para emitir juicios sobre la seguridad de una instalación o actividad en particular o en la aceptación del riesgo.
- Para comparar los valores absolutos con algún estándar o criterio de aceptabilidad del riesgo.
- Para hacer un plan de emergencia de una situación específica donde existen “riesgos” (ej. una planta en una zona deshabitada, transporte de materiales peligrosos cerca de áreas no habitadas).

3.4 PROCEDIMIENTOS UTILIZADOS EN LAS ESTIMACIONES DE SPER.

El Sistema Preliminar para la Estimación de Riesgos está dividido en cinco grandes procedimientos:

- 1) Clasificación del Tipo de Actividades e Inventarios;
- 2) Estimación de consecuencias fuera de las instalaciones (comunidad vecina) debido a accidentes mayores con sustancias químicas;
- 3) Estimación de probabilidades de accidentes mayores con sustancias químicas en Instalaciones Industriales;
- 4) Estimación de probabilidades de accidentes mayores en el Transporte de sustancias químicas peligrosas; y
- 5) Estimación del Riesgo Social y Jerarquización de Riesgos.

3.4.1 Identificación y Clasificación del Tipo de Actividades e Inventarios.

Este procedimiento ayuda a identificar y categorizar las actividades o giros industriales peligrosos que manejan sustancias químicas peligrosas para evaluar su potencial de daño a la comunidad vecina. Esta categorización no es limitativa a parques industriales, sino a toda actividad con manejo de materiales peligrosos.

Una vez que han sido identificadas las fronteras y las características generales del área a evaluar, se debe reunir información genérica de todas las instalaciones industriales peligrosas involucradas y de todas las rutas y formas de transporte de estas sustancias peligrosas (en adelante llamadas actividades peligrosas). De las actividades identificadas, solamente se deben seleccionar aquellas que puedan provocar daño al público o comunidad vecina y posteriormente obtener mayor información de ellas.

A continuación se describe el procedimiento para realizar la identificación y clasificación de actividades:

1. Establecer los límites del área a analizar. El uso de mapas a diferentes escalas son de mucha utilidad para este proceso. (ej. una empresa que maneja sustancias químicas peligrosas dentro de un corredor industrial rodeada por una zona urbana).
2. Recopilar la información suficiente de las actividades peligrosas en el área de estudio para describirla, tales como: nombre de la empresa, ubicación dentro del corredor industrial, ubicación, densidad de población constante y flotante, tipo de procesos productivos, productos, tipo de sustancias químicas empleadas como materia prima, subproductos, condiciones de almacenamiento, condiciones de seguridad implementadas, etcétera.
3. Dividir el área de estudio en instalaciones industriales, habitacionales y rutas de transporte.

4. Clasificar las actividades dentro del área de estudio por giros industriales. (SPER tiene una lista de giros industriales y actividades específicas de los mismos, que son mostrados al usuario para que éste seleccione entre ellos)

Durante el proceso de clasificación de las actividades y de definición de la zona de estudio, se deben tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

1. Excluir del estudio a las actividades peligrosas (instalaciones industriales o transporte) que no presenten daño directo a la comunidad, debido a la distancia de las zonas pobladas. Ver Tabla 3.1
2. Excluir del estudio las rutas de transporte de sustancias químicas poco frecuentes. Los criterios de selección por la densidad de tráfico se muestran en la Tabla 3.2.
3. Ignorar en el caso de transporte fluvial, el transporte de líquidos miscibles (presión de vapor $< 0.987 \text{ atm @ } 20 \text{ }^\circ\text{C}$) y el transporte de sustancias cuya masa específica sea mayor de 1 kg / dm^3 (de mayor densidad que la del agua). Se deben considerar las sustancias reactivas con el agua y la cantidad de los productos de reacción que pueden ser emitidos.
4. Dividir los tramos de carreteras / vías ferroviarias / canales fluviales / tuberías seleccionados en tramos de 1 km (las probabilidades calculadas en SPER están basadas en tramos de 1 km). Los tramos que no cumplan con los criterios de distancia de las zonas pobladas de las Tabla 3.1, pueden ser ignorados. Dentro de cada tramo, seleccione la(s) zona(s) más cercana(s) a la población. En el caso de transportación por ferrocarril y canales fluviales, se deben considerar los diferentes patios de maniobras y los diferentes puertos respectivamente.
5. Considerar el inventario de sustancias químicas peligrosas y la distribución de éstas dentro de las instalaciones en la empresa. Estimar la cantidad máxima real posible que puede generar un accidente mayor o con el potencial de participar en el mismo.

6. Considerar la cantidad del tanque de mayor capacidad para el cálculo de las estimaciones si la instalación tiene una separación física *suficiente y efectiva* entre sus tanques de almacenamiento de sustancias peligrosas. *Separación eficiente* significa que los tanques cuenten con contenedores secundarios independientes para cada tipo de sustancias incompatibles o la existencia de válvulas automáticas en las líneas de conexión de los mismos. Tanques con conexiones entre ellos y sin válvulas automáticas, no son considerados como que tengan una separación física suficiente y efectiva.

Tabla 3.1 Criterio de la Distancia de las áreas pobladas (primeras casas).

ACTIVIDAD INDUSTRIAL		DISTANCIA A LAS ZONAS POBLADAS (m)
Instalaciones estacionarias	Sustancias Inflamables y/o Explosivas Específicamente:	<1,000
	<ul style="list-style-type: none"> • Estación de Gasolina <50 • Estación de Gas Licuado a Presión <100 • Tubería con líquidos inflamables <50 • Almacenamiento de Cilindros de (25-100 kg) <100 	
	Sustancias Tóxicas Específicamente:	<10,000
	<ul style="list-style-type: none"> • Instalaciones de refrigeración <100 • Almacenamiento de pesticidas para venta al menudeo. <50 	
Transporte	GLP, por Ferrocarril / carretera <200	
	Transporte marítimo/fluval <500	
	Gasolina, por ferrocarril / carretera <50	
	Transporte marítimo/fluval <200	
	Petróleo, por Ferrocarril / carretera <25	
	Transporte marítimo/fluval <100	
	Sustancias Tóxicas por	
	Ferrocarril / carretera <3000	
	Transporte marítimo/fluval <3000	

Los valores están relacionados con las cantidades máximas posibles (y la máxima toxicidad para las sustancias tóxicas) que existen en la practica.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

ACTIVIDAD INDUSTRIAL		DENSIDAD DE TRAFICO (número de unidades/año)	
Transporte	Gas, por	Carretera	>50
		Ferrocarril	>500
		En patio de maniobras	>50
		Transporte marítimo/fluvial	>500
	Líquidos, por	Carretera	>50
		Ferrocarril	>5000
		En patios de maniobras	>50
		Transporte marítimo/fluvial	>50
	Explosivos	Carretera	>20
		Ferrocarril	>200
		En patios de maniobras	>20
		Transporte marítimo/fluvial	>20

Tabla 3.2 Criterio por densidad de Tráfico

3.4.2 Estimación de consecuencias fuera de las instalaciones (comunidad vecina) debido a accidentes mayores con sustancias químicas.

Una vez que se ha recopilado suficiente información y se ha seleccionado el giro y actividad de la empresa, se pueden calcular las consecuencias externas de accidentes mayores para cada giro seleccionado.

Como se mencionó anteriormente, SPER considera las consecuencias de un accidente con sustancias químicas fuera de las instalaciones, como el número de muertes entre la gente que vive o trabaja dentro del área vecina a la(s) instalación(es) cuyas actividades son peligrosas; o cerca de la(s) ruta(s) de transporte (carretera/ferrocarril/fluvial/tubería) de sustancias peligrosas.

La ecuación con la que SPER calcula las consecuencias externas o fuera de las instalaciones ($C_{a,s}$ numero de muertes por accidente) debido a un accidente por una sustancia química peligrosa (subíndice s) para cada actividad seleccionada (subíndice a), es la siguiente:

$$C_{a,s} = A * \delta * f_A * f_m \quad (1)$$

Donde:

A = Área afectada (hectáreas; $1 \text{ ha} = 1 \times 10^4 \text{ m}^2$);

δ = Densidad de Población en las zonas pobladas dentro del área afectada.

f_A = Factor de corrección de área afectada, por la distribución de población dentro de esta área.

f_m = Factor de corrección por los efectos de mitigación.

Durante el estudio, se debe decidir si se toma en cuenta o no a la gente que viaja o pasa por las rutas de transporte o dentro del área de afectación de la instalación industrial. Si se decide observar esta consideración en el estudio, en el caso de las rutas de transporte, se debe tener presente en el análisis el tráfico generado por el accidente.

Si en la actividad seleccionada existe más de una sustancia que pueda causar daño, por sí sola, se debe analizar cada una por separado. Si existe un grupo de sustancias que puedan actuar juntas, en un accidente, se deben considerar como una sola sustancia equivalente. Si una sustancia es tóxica e inflamable, se debe analizar los efectos de ambas características y después del análisis se podrá determinar cuál de las dos características de la sustancia tiene efectos más significativos.

A continuación se describe el procedimiento para realizar la estimación de consecuencias:

1. Seleccionar una sustancia química del listado que muestra SPER. Las sustancias internamente en SPER están clasificadas por sus características físicas y químicas generales (estado de agregación, inflamabilidad, explosividad, toxicidad, etc.), el tipo de daño que pueden ocasionar y el giro o actividad donde comúnmente se utilizan.

2. Elegir la forma de manejo de la sustancia química peligrosa (carretera/ferrocarril/tubería/fluvial/cilindros).
3. Seleccionar la cantidad de sustancia elegida que podría estar involucrada en un accidente mayor dentro de los rangos en toneladas mostrados por SPER y que son los siguientes: 0.2-1; 1-5; 5-10; 10-50; 50-200; 200-1,000; 1,000-5,000; 5,000-10,000 y más de 10,000 toneladas.

En el caso de que el manejo sea por tubería, se deberá elegir el diámetro de la tubería más grande que conduzca la sustancia en el área de estudio. SPER muestra opciones de tamaños de diámetros dependiendo de la sustancia elegida.

La combinación de la sustancia química seleccionada y la cantidad de la misma, esta relacionada internamente en SPER a una categoría de efecto. La categoría de efecto describe la forma que dibujarían las consecuencias de un accidente que involucre a la sustancia química elegida. La categoría de efecto, está formada por dos categorías de efecto primarias: la distancia máxima de afectación y el área de afectación. SPER considera que hay casos en los que la cantidad de sustancia seleccionada no sea manejada en la práctica o los efectos de la combinación sustancia-cantidad son despreciables.

El área de afectación está dividida a su vez, en tres categorías. Cada categoría representa de forma general la geometría típica del efecto que describen las consecuencias de: una explosión (I = área circular $\theta = 360^\circ$), una nube de gas pesado inflamable, que pudo haberse retrasado en la ignición, y/o una nube causada por la evaporación de un derrame grande (II = semicírculo correspondiente a $\theta = 180^\circ$ del mismo) y una nube elongada causada por la dispersión (III = un sector del círculo correspondiente a $1/10$ del área del mismo o $\theta = 36^\circ$ del mismo. Ver Figura 3.1

Cada categoría del área de afectación (I, II, III) tiene asignada un valor en hectáreas que corresponde al área de afectación estimada.

La distancia máxima de afectación está establecida dentro de los siguientes rangos: 0-25; 25-50; 50-100; 100-200; 200-500; 500-1,000; 1,000-3,000 y 3,000 a 10,000 metros. Estas distancias equivalen al radio (R) máximo del área de afectación.

4. Estimar la distribución de la población y la densidad de población (δ = número de personas / área) de las zonas más importantes, dentro de un área circular cuyo radio es la máxima distancia de afectación a partir del punto de estudio (punto de explosión, de fuego o emisión). SPER muestra opciones con valores de densidad de población correspondientes a diferentes zonas. En caso de que los valores mostrados por SPER no describan el escenario en estudio, el valor de la densidad de población puede ser ingresada por el usuario.

En el caso que el área de afectación sea circular (ej. consecuencia de una explosión), todas las poblaciones dentro de éste círculo, deben ser incluidas en la estimación.

5. Hacer la selección del porcentaje o fracción de área circular poblada o Estimación del factor de corrección del área f_A .

SPER solicita que el usuario seleccione el porcentaje del área circular de afectación que corresponde a la "fracción de área circular poblada" y a partir de éste valor obtiene el factor de corrección del área f_A de su base de datos. Este factor es la fracción del área de afectación A que está poblada (la relación entre la(s) área(s) poblada(s) afectada(s) y el área de afectación).

Para establecer la ubicación del impacto, debe conocerse la rosa de vientos y de ésta seleccionar la dirección predominante del viento en la zona de estudio.

En caso de no contar con un mapa reciente o si la delimitación de la zona poblada es compleja, el usuario puede elegir realizar el cálculo del factor de corrección del área f_A del área de afectación A. Para realizar el cálculo del factor SPER requiere los siguientes datos:

R_{final} = Distancia al final de la población más cercana ($\leq R$)

R_{inicio} = Distancia al inicio de la población más cercana ($\leq R_{\text{final}}$)

α = Angulo del círculo que comprende a la población dentro del sector afectado θ ($\alpha \leq \theta$).

Internamente, SPER calcula el factor de corrección f_A mismo que se obtiene multiplicando una fracción de área (f_r) y una fracción de ángulo (f_α). La fracción de área f_r , es la relación entre el área del anillo donde se encuentra la población y el área de afectación máxima. El área del anillo está dada por la resta del área del círculo cuyo radio es R_{final} y del círculo cuyo radio es R_{inicio} . Esta fracción debe ser menor o igual a uno. Ver figura 3.2.

La fracción f_α se calcula dividiendo el ángulo del círculo que comprende a la población dentro del sector afectado α por el ángulo θ que describe la geometría del área de afectación ($\theta = 360^\circ$, $\theta = 180^\circ$ y $\theta = 36^\circ$).

Las ecuaciones arriba descritas se muestran a continuación:

donde: $f_A = f_r \cdot f_\alpha$ (2)

$$f_r = \frac{R_{\text{final}}^2 - R_{\text{inicio}}^2}{R^2}$$
 (3)

$$f_\alpha = \alpha / \theta$$
 (4)

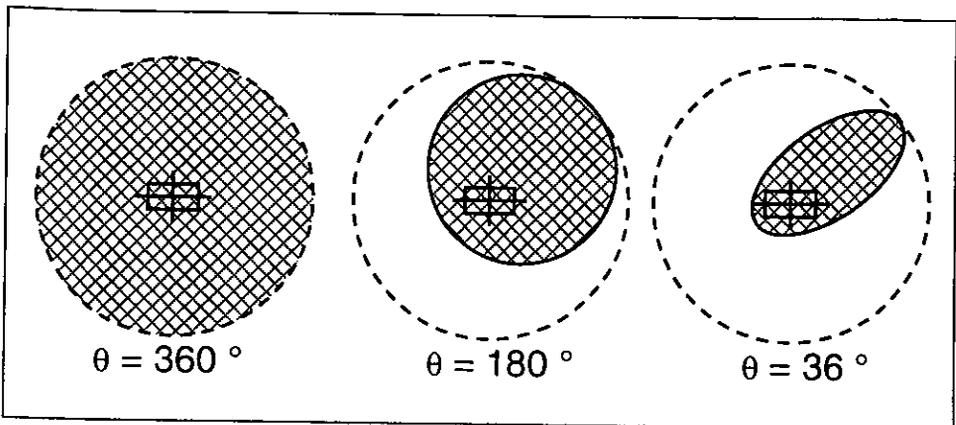


Figura 3.1 Ilustración de las categorías de las áreas de efecto.

6. Selección de SPER del factor de corrección f_m .

Este factor es obtenido por SPER internamente de su base de datos y toma en cuenta las posibles acciones que la gente puede llevar a cabo para protegerse tales como: evacuación a zonas seguras, resguardo en refugios, etc. Estas acciones, son altamente dependientes del tipo de accidente y de la sustancia química involucrada.

Por ejemplo, en el caso de una explosión, las oportunidades de migración para la mitigación de los efectos de este evento son limitadas. Una excepción a este concepto es el almacenamiento de cilindros de gases inflamables, ya que éstos pueden explotar secuencialmente y no como un todo, dando oportunidad a la gente de tomar acción y moverse del área de peligro.

En el caso de la emisión de una sustancia tóxica, el aviso de peligro por el olor o color de la nube y el tiempo que tarda la dispersión de la sustancia principalmente, permiten a las personas potencialmente expuestas a la

sustancia, tomar acciones de protección como cubrirse, huir, utilizar equipo de protección personal apropiado, etc.

7. Calcular las consecuencias externas o fuera de las instalaciones ($C_{a,s}$ numero de muertes por accidente) con la ecuación 1.
8. Repetir todos los pasos descritos anteriormente para todas las actividades estacionarias y rutas de transporte seleccionadas.

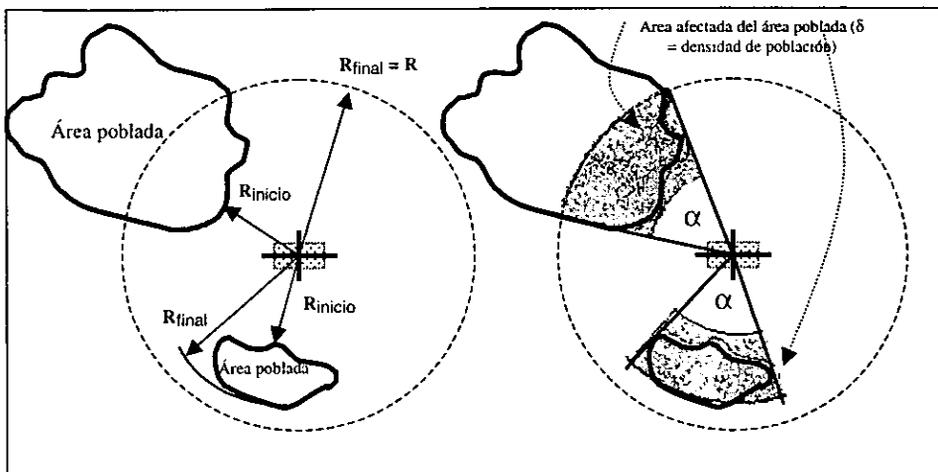


Figura 3.2 Fracción de zona de afectación poblada.

3.4.3 Estimación de probabilidades de accidentes mayores con sustancias químicas en Instalaciones Industriales.

SPER considera que dentro de las instalaciones industriales el área de almacenamiento y dentro del proceso son las dos áreas con la mayor probabilidad de ocurrencia de accidentes con sustancias químicas. Dentro de la actividad de almacenamiento SPER considera la frecuencia y medidas de seguridad con las que se realizan las operaciones de carga y descarga de las sustancias.

SPER estima la frecuencia de accidentes ($P_{i,s}$, número de accidentes / año) de las actividades que se estudien que involucran una sustancia química peligrosa (subíndice s) dentro de una instalación industrial peligrosa (subíndice i). Esta sustancia puede causar las consecuencias estimadas en la sección de “consecuencias fuera de las instalaciones debido a accidentes con sustancias químicas”.

El procedimiento que emplea SPER, utiliza un número de probabilidad promedio (que es el valor absoluto del logaritmo base diez del número de veces que ocurre ese mismo accidente para esa actividad), e incorporando algunos parámetros de corrección. Los parámetros de corrección incluyen la frecuencia de las operaciones de carga/descarga, los sistemas de seguridad asociados a las sustancias inflamables, el manejo y organización de los programas de seguridad y la probabilidad de que la dirección del viento sea hacia las zonas pobladas.

La ecuación que emplea SPER para el cálculo de la frecuencia es la siguiente:

$$N_{i,s} = N^*_{i,s} + n_1 + n_f + n_o + n_p \quad (5)$$

Donde:

$N_{i,s}$ = Número de probabilidad para la sustancia y la instalación.

$N^*_{i,s}$ = Número de probabilidad promedio para la sustancia y la instalación.

n_1 = Parámetro de corrección del número de probabilidad por la frecuencia de la operación de carga/descarga.

n_f = Parámetro de corrección del número de probabilidad por los sistemas de seguridad asociados con sustancias inflamables.

n_o = Parámetro de corrección del número de probabilidad por la administración de la seguridad en la instalación industrial.

n_p = Parámetro de corrección del número de probabilidad por la dirección del viento hacia las zonas pobladas.

En esta metodología el número de probabilidad (N) y la frecuencia (P) tienen la siguiente relación:

$$N = \lceil \log_{10} P \rceil \quad (6)$$

A continuación se describe el procedimiento para realizar la estimación de probabilidad para instalaciones industriales:

1. Seleccionar el giro industrial y actividad relacionada.
2. Seleccionar una sustancia química del listado que muestra SPER. Las sustancias internamente en SPER están clasificadas por sus características físicas y químicas generales (estado de agregación, inflamabilidad, explosividad, toxicidad, etc.), el tipo de daño que pueden ocasionar y el giro o actividad donde comúnmente se utilizan. Para efecto de esta estimación, no son consideradas las sustancias de baja, muy alta y extrema toxicidad.

Si en la actividad seleccionada existe más de una sustancia que pueda causar daño, por sí sola, se debe analizar cada una por separado. Si existe un grupo de sustancias que puedan actuar juntas, en un accidente, se deben considerar como una sola sustancia equivalente. Si una sustancia es tóxica e inflamable, se debe analizar los efectos de ambas características y después del análisis se podrá determinar cuál de las dos características de la sustancia tiene efectos más significativos.

3. Elegir la forma de manejo de la sustancia química peligrosa (tubería/cilindros/barco/almacenamiento en tanques atmosféricos, con diques, sin diques, etc.)
4. Seleccionar la cantidad de sustancia elegida que podría estar involucrada en un accidente mayor dentro de los rangos en toneladas mostrados por SPER

y que son los siguientes: 0.2-1; 1-5; 5-10; 10-50; 50-200; 200-1,000; 1,000-5,000; 5,000-10,000 y más de 10,000 toneladas. En el caso de transporte por barco se debe considerar el contenido de uno de los tanques promedio de los barcos que habitualmente cargan y descargan la sustancia química seleccionada en el puerto.

En el caso de que el manejo sea por tubería, se deberá elegir el diámetro de la tubería más grande que conduzca la sustancia en el área de estudio. SPER muestra opciones de tamaños de diámetros dependiendo de la sustancia elegida.

5. Seleccionar la forma en la que se encuentra dentro de la industria (almacenada o dentro del proceso). Con esta selección, SPER obtiene de su base de datos el valor del número de probabilidad promedio ($N_{i,s}^*$) para la sustancia peligrosa (o grupo de sustancias) seleccionadas para el análisis.
6. SPER pregunta al usuario si la instalación en estudio cuenta con muelle. En caso de que la instalación no cuente con muelle, SPER solicita el número de operaciones de carga y descarga de esta sustancia que se realizan en la instalación al año para todos los tipos de manejo con excepción del manejo por: tuberías, almacenamiento en cilindros y barcos. Con la selección del usuario, SPER obtiene el valor del parámetro de corrección del número de probabilidad n_f de su base de datos.

En el caso de que la instalación sí cuente con muelle, SPER considera la posibilidad de colisión entre barcos y solicita al usuario tres datos que se mencionan más adelante. De cada uno de los datos obtiene un valor y calcula el parámetro de corrección del número de probabilidad haciendo la suma de éstos más diez. La información solicitada es la siguiente:

- Número de barcos que pasan por el puerto al año.
- Número de operaciones de carga/descarga de los barcos al año.
- Tiempo promedio de una operación de carga/descarga.

7. Para el caso de las sustancias inflamables, SPER solicita al usuario que elija el o los sistemas de seguridad implementados en la instalación para el manejo de estas sustancias. En el caso de manejo de la sustancia por cilindros, SPER solicita el rango del número de cilindros almacenados en la instalación. Con esta selección (que puede ser de más de uno), SPER obtiene el parámetro de corrección del número de probabilidad n_f de su base de datos; en caso de que sean más de uno, los valores del parámetro se suman.
8. Seleccionar el nivel de administración de la seguridad en la instalación. Con esta selección SPER obtiene el valor del parámetro de corrección del número de probabilidad n_o de su base de datos.

Este parámetro toma en cuenta factores como: la calidad del sistema de administración de la seguridad (existencia y calidad de los procedimientos de operación, prácticas de mantenimiento, control de la documentación, etc.) la edad de las instalaciones, la existencia de planes de emergencia, etc. Se debe ser cuidadoso en esta selección, especialmente si las instalaciones no pueden ser directamente accedidas.

9. Seleccionar el porcentaje o fracción de área circular poblada considerando la dirección del viento hacia la población. (Este factor puede ser calculado con las ecuaciones 2, 3 y 4)

SPER solicita que el usuario seleccione el porcentaje del área circular de afectación que corresponde a la "fracción de área circular poblada" y a partir de éste valor obtiene el factor de corrección del número de probabilidad n_p de su base de datos. Este factor es la fracción del área de afectación A , que está poblada (la relación entre la(s) área(s) poblada(s) afectada(s) y el área de afectación) donde la dirección del viento es predominante.

Para los accidentes que causan efectos simétricos (circular) como por ejemplo las explosiones esta corrección no aplica. Para las áreas de

afectación semicircular y elongada se debe considerar el mismo valor que se consideró en el caso de la Estimación de Consecuencias fuera de las instalaciones.

Si el área de afectación no es circular, pero la población vive alrededor de las instalaciones, el parámetro es cero.

10. Calcular el número de probabilidad $N_{i,s}$ con la ecuación 5.
11. Convertir el número de probabilidad obtenido en el paso anterior a frecuencia $P_{i,s}$ (número de accidentes / año) con la ecuación 6.
12. Repetir todos los pasos anteriores para todas las actividades estacionarias seleccionadas.

3.4.4 Estimación de probabilidades de accidentes mayores en el Transporte de sustancias químicas peligrosas.

SPER estima la frecuencia de accidentes en tramos de 1 km de carretera, vía del tren, transportación fluvial y/o tubería que se esté estudiando. Obtiene un número promedio de probabilidad para cada sustancia peligrosa (o grupo de sustancias) y aplica algunos factores de corrección. Estos factores de corrección consideran: las condiciones de seguridad en los sistemas de transporte, la densidad de tráfico de vehículos de transporte y la probabilidad de que la dirección del viento sea hacia la población de las zonas afectadas.

SPER calcula para el tramo de ruta seleccionado, el tipo de transporte y la sustancia seleccionada, la frecuencia ($P_{t,s}$ número de accidentes / año) de accidentes durante el transporte (subíndice t) de sustancias peligrosas (subíndice s), que pueden causar las consecuencias estimadas en la sección de consecuencias fuera de las instalaciones debido a accidentes con sustancias químicas.

La fórmula que emplea SPER para el cálculo de la probabilidad de ocurrencia es la siguiente:

$$N_{t,s} = N^*_{t,s} + n_c + n_{t\delta} + n_p \quad (7)$$

Donde:

$N_{t,s}$ = Número de probabilidad para el transporte de la sustancia;

$N^*_{t,s}$ = Número de probabilidad promedio para el transporte de la sustancia;

n_c = Parámetro de corrección del número de probabilidad por las condiciones de seguridad en el sistema de transporte;

$n_{t\delta}$ = Parámetro de corrección del número de probabilidad por la densidad de tráfico;

n_p = Parámetro de corrección del número de probabilidad.

En esta metodología el número de probabilidad (N) y la frecuencia (P) tienen la siguiente relación:

$$N = |\log_{10} P| \quad (6)$$

A continuación se describe el procedimiento para realizar la estimación de la probabilidad en el transporte:

1. Seleccionar una ruta de transporte (carretera/ferrocarril/fluvia/tubería). De esta ruta seleccionar un tramo de 1 km considerando que dentro de éste se encuentre el lugar más peligroso debido a la desfavorable combinación de una alta densidad de población y una baja seguridad en el sistema de transporte.

En caso de que por la ruta que elegida se transporten varias sustancias químicas peligrosas, se debe analizar cada una por separado.

2. Seleccionar una sustancia química del listado que muestra SPER. Las sustancias internamente en SPER están clasificadas por sus características físicas y químicas generales (estado de agregación, inflamabilidad, explosividad, toxicidad, etc.), el tipo de daño que pueden ocasionar y el giro o actividad donde comúnmente se utilizan. Para efecto de esta estimación, no son consideradas las sustancias de baja, muy alta y extrema toxicidad.
3. Elegir la forma de manejo de la sustancia química peligrosa (tubería/cilindros/barco/etc.). Con esta selección SPER obtiene de su base de datos el valor del número de probabilidad promedio ($N^*_{t,s}$).
4. Seleccionar la cantidad de sustancia elegida que podría estar involucrada en un accidente mayor dentro de los rangos en toneladas mostrados por SPER y que son los siguientes: 0.2-1; 1-5; 5-10; 10-50; 50-200; 200-1,000; 1,000-5,000; 5,000-10,000 y más de 10,000 toneladas. En el caso de transporte por barco se debe considerar el contenido de uno de los barcos promedio de los barcos que habitualmente cargan y descargan la sustancia química seleccionada en el puerto.

En el caso de que el manejo sea por tubería, se deberá elegir el diámetro de la tubería más grande que conduzca la sustancia en el área de estudio. SPER muestra opciones de tamaños de diámetros dependiendo de la sustancia elegida.

5. Seleccionar las condiciones de seguridad en las que se encuentra el sistema de transportación estudiado. SPER da al usuario la opción de elegir entre condiciones seguras, promedio o inseguras para el caso de transportación en carretera, barco o tubería. Para el caso de transporte ferroviario, SPER da a elegir al usuario el tipo de vías de ferrocarril existentes y de los diferentes tipos de patios de maniobras. Con esta selección SPER obtiene de su base de datos el valor del parámetro de corrección del número de probabilidad por las condiciones de seguridad en el sistema de transporte n_c .

Es importante conocer las características de los tres tipos de condiciones de seguridad para elegir entre ellas. A continuación se describe el significado de cada una de las tres opciones que SPER considera:

- *Condición segura*, significa: rutas de transporte sin cruceros, de bajo o nulo tráfico, caminos bien diseñados, tuberías diseñadas e instaladas con los estándares aplicables actualizados y/o canales fluviales rectos y anchos.
 - *Condición insegura* significa: rutas donde suceden frecuentemente incidentes/accidentes; caminos con intersecciones con mucho tráfico, con pavimento resbaloso, con bifurcaciones con curvas estrechas y/o sin semáforos; canales fluviales con: curvas, cruces, que se comparten con ferries, con obstáculos como puentes y/o con amarras para transbordo; tuberías antiguas, hechas con regulaciones viejas, sin identificar y/o cuya localización no se conozca.
 - *Condición promedio*, se elige cuando las condiciones de seguridad del sistema de transportación no se ajusta a las descripciones anteriores.
6. Seleccionar la densidad de tráfico (número de unidades que transportan la sustancia química seleccionada al año o el número de carros tanque manejados en los patios de maniobras de ferrocarriles) en el tramo de la ruta de transporte en estudio. Con esta selección SPER obtiene de su base de datos el valor del parámetro de corrección del número de probabilidad por densidad de tráfico n_{t6} . Las tuberías enterradas contribuyen con un orden de magnitud a la frecuencia, ya que son usadas continuamente.

SPER solamente permite estimaciones preliminares y rápidas, si se cuenta con poca información, se sugiere que se desarrolle un análisis de la densidad de tráfico en una sección de la ruta elegida, solamente si ésta contribuye significativamente al riesgo público.

7. Seleccionar el porcentaje o fracción de área circular poblada considerando la dirección del viento hacia la población. (Este factor puede ser calculado con las ecuaciones 2, 3 y 4). Este paso del procedimiento es igual al de la estimación de la probabilidad de accidentes mayores en Instalaciones Industriales con sustancias químicas. Con esta selección SPER obtiene de su base de datos el valor parámetro de corrección del número de probabilidad por la dirección del viento hacia las zonas pobladas n_p .
8. Calcular el número de probabilidad $N_{t,s}$ con la ecuación 7.
9. Convertir el número de probabilidad obtenido en el paso anterior a frecuencia $P_{t,s}$ (número de accidentes / año) con la ecuación 6.
10. Repetir todos los pasos anteriores para todas los tramos de 1 km más peligrosos de la(s) ruta(s) seleccionadas.

3.4.5 Estimación del Riesgo Social y Jerarquización de Riesgos.

De cada actividad analizada se pueden obtener dos resultados:

- 1) Consecuencias fuera de las instalaciones (muertes /año); y
- 2) La frecuencia de accidentes mayores que resulta en el número de muertes inciso anterior.

El riesgo al público de cada actividad se obtiene combinando los valores de las consecuencias fuera de las instalaciones y la frecuencia de accidentes mayores.

A continuación se describe, dentro del marco de SPER, el procedimiento sugerido para obtener el riesgo de cada actividad:

1. Clasificar los resultados de cada actividad analizada en clases de consecuencias y de probabilidad como se muestra a continuación:

Clases de Consecuencias: [muertes/accidente]

0 – 25
26 – 50
51 – 100
101 – 250
251 – 500
> 500

Clases de Probabilidad: Cada orden de magnitud del número de accidentes por año. Ej. 1×10^{-3} , 1×10^{-4} , etc.

2. Calcular un riesgo conjunto de ambas actividades si dos o más actividades con diferentes sustancias dentro de la misma área de estudio, tienen el potencial de causar un accidente mayor de forma independiente cada una de ellas. Este riesgo conjunto se calcula agrupando las actividades estudiadas por clases de consecuencias y sumando las frecuencias por cada clase de consecuencias.
3. Colocar en una matriz de riesgo los pares de puntos obtenidos, donde el eje de las abscisas es la magnitud de las consecuencias (muertes por accidente) y el eje de las ordenadas es la frecuencia de que ocurra el accidente por año. Ver Figura 3.3

Ejemplo:

Un área ha sido analizada con las metodologías de SPER. Se han identificado dos actividades que presentan riesgo a la población en una sección de un 1 km de longitud. Estas actividades son: almacenamiento de GLP y el transporte de cuatro diferentes sustancias químicas peligrosas (identificadas como T₁, T₂, T₃, y T₄). Los valores de C (muertes por accidente) y P (número de accidentes por año) para cada actividad y sustancia transportada se muestran a continuación:

Almacenamiento de GLP:	C_{GLP}	120	Muertes / accidente
	P_{GLP}	3×10^5	Accidentes / año
Transportación por carretera:	C_{T1}	6	Muertes / accidente
	P_{T1}	1×10^{-5}	Accidentes / año
	C_{T2}	50	Muertes / accidente
	P_{T2}	3×10^{-6}	Accidentes / año
	C_{T3}	4	Muertes / accidente
	P_{T3}	1×10^{-4}	Accidentes / año
	C_{T4}	45	Muertes / accidente
	P_{T4}	1×10^{-6}	Accidentes / año

C_{T1} y C_{T3} pertenecen a la misma clase de consecuencias de 0 – 25 muertes por accidente y C_{T2} y C_{T4} pertenecen a la clase de consecuencias en el rango de 26 – 50 muertes por accidente.

Por lo tanto:

$$P_{T1} + P_{T3} \approx 1 \times 10^{-4} \text{ accidentes por año}$$

$$P_{T2} + P_{T4} \approx 4 \times 10^{-6} \text{ accidentes por año}$$

Los pares de valores anteriores se grafican en la matriz de riesgo como se muestra a continuación:

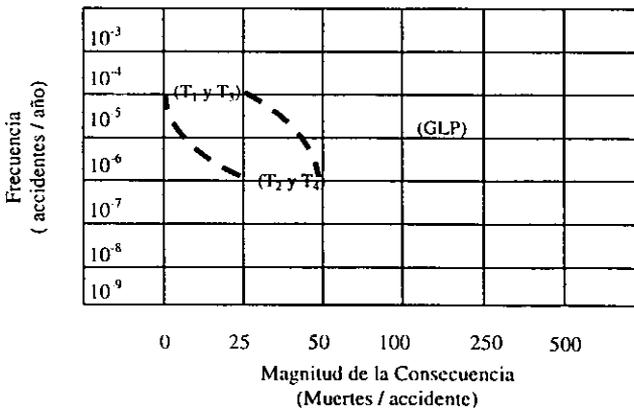


Figura 3.3 Matriz de frecuencia contra la magnitud de consecuencias para la clasificación del riesgo.

Se deben definir los criterios de aceptabilidad del riesgo social antes de llevar a cabo el estudio de las áreas de interés. Para ésto, se debe tomar en cuenta:

- 1) Que es lo acostumbrado en el tipo de industria estudiada;
- 2) Los requerimientos gubernamentales;
- 3) La tolerancia de las comunidades circundantes y el público en general. La sociedad percibe como un riesgo de mayor prioridad aquel donde las consecuencias son altas y la frecuencia baja.

Es esencial que las empresas cuyas actividades son consideradas como altamente riesgosas, trabajen con las comunidades que las rodean y el público en general para despertar una percepción y comprensión acerca del riesgo. Así mismo, de realizar Programas para la Prevención de Accidentes que sean prácticos y bien comunicados a todos las audiencias que en un momento dado puedan verse involucradas en un accidente. El entrenamiento y los simulacros de respuesta a emergencias son clave para responder adecuadamente a una contingencia.

Resultados y Conclusiones

Se desarrolló un prototipo de un programa de computo, llamado "Sistema Preliminar de Estimación de Riesgos, SPER", tomando como base el "*Manual para la Clasificación y Jerarquización de Riesgos de grandes Accidentes Industriales*" que fue desarrollado por el Programa de la Agencia Internacional de Evaluación y Manejo de Riesgos Ambientales y de Salud de la Industria de la Energía y otros Sistemas Complejos (*Inter-Agency Programme on the Assessment and Management of Health and Environmental Risks from Energy and Other Complex Industrial Systems*).

El principal objetivo de este Sistema Preliminar para la Estimación de Riesgos (SPER), es tener una herramienta de computo, fácil de entender y sencilla de utilizar, que ayude al industrial a clasificar y jerarquizar los riesgos de las instalaciones o actividades dentro de su planta. Con ésta información, el industrial podrá decidir, de acuerdo a sus estándares o a la legislación vigente, que áreas representan un riesgo suficientemente alto que ameriten evaluaciones adicionales más detalladas; cuales ocupan un nivel medio de riesgo para las cuales la evaluación es menos urgente y que áreas representan un riesgo lo bastante bajo, que requieran evaluaciones con baja frecuencia.

Los resultados de SPER pueden ser empleados para comparar los riesgos en una instalación o actividad bajo las mismas suposiciones para su posterior jerarquización y atención. Sin embargo, estos resultados no pueden ser tomados de forma absoluta, ya que como se explicó en el capítulo 3, SPER considera una serie de suposiciones tales como los criterios de fatalidad.

Este sistema (SPER), no utiliza modelos matemáticos que simulen el mecanismo de la emisión o fuga o el comportamiento de la concentración de una sustancia química en el ambiente con respecto a la distancia que viaja y el tiempo, como lo hacen algunos programas de simulación comerciales. Ejemplos de estos programas comerciales son: el "Automated Resource for Chemical

Hazard Incident Evaluation" (ARCHIE), el "Aereal Locations of Hazardous Atmospheres" (ALOHA), "Modelos Atmosféricos para Simulación de Contaminación y Riesgos en Industrias" (SCRI), entre otros.

SPER en cambio, es producto del estudio de muchos años del comportamiento de las sustancias químicas peligrosas en diversos accidentes en Europa por agencias internacionales tales como Naciones Unidas y la Organización Mundial de la Salud, entre otras.

Dado que el manual en que se basa SPER fue desarrollado evaluando los accidentes ocurridos en Europa, los parámetros que emplea este sistema corresponden a la realidad de este continente. Sin embargo, la realidad de los países no desarrollados, como los de Latinoamérica, es muy diferente. Algunos aspectos que hacen la diferencia entre las dos realidades son los siguientes: existe poco o nulo control en la ubicación de asentamientos humanos densamente poblados, existe industria Química carente de sistemas mínimos de seguridad, el personal operativo de las industrias no es entrenado adecuadamente, las operaciones riesgosas continúan siendo operadas por seres humanos y no son automatizadas, etcétera.

El desarrollo del prototipo de SPER, es la primera etapa para contar con una herramienta de estimación de consecuencias sencilla de aplicar y al alcance de todos. Por lo anterior y dado que sus parámetros de cálculo se basan en la realidad de los países de Europa, en una segunda etapa, SPER debe ser adecuado a la realidad de un país como México, a través del análisis de sus resultados simulando situaciones de empresas operando en este país, que junto con la información disponible del comportamiento de las sustancias químicas y de la experiencia de los diversos accidentes en México, pueden describir las diferencias entre los valores obtenidos y de esta forma proponer factores de corrección a los valores actuales.

SPER está construido sobre una base de datos con capacidad dinámica, de características y parámetros que pueden ser modificadas sin alterar los

procedimientos de estimación. Esta base de datos cuenta con un catálogo de sustancias clasificadas por sus características físico-químicas y su forma de manejo (contenedores presurizados o con gas licuado, transportado por tuberías, ferrocarril y autotankers), así como parámetros que relacionan las diversas actividades de manejo de sustancias con su frecuencia, seguridad de los procesos, densidad de población de las comunidades vecinas al lugar de estudio, dirección del viento y las posibilidades de mitigación de los efectos de un accidente.

Es importante mencionar que los resultados que se obtengan de SPER dependen en gran medida de la calidad de los datos que se utilicen o elijan para realizar las estimaciones; lo que brinda otro factor de incertidumbre. Así mismo, la interpretación de los resultados deberá hacerse por una persona con conocimientos y experiencia en análisis de riesgos y en el proceso industrial estudiado como mínimo.

Como todo proyecto, SPER puede ser mejorado y algunas sugerencias para hacer esto son las siguientes: (1) hacer más amigable la interfase, (2) ampliar la capacidad de selección del sistema de unidades, (3) actualizarlo con la última revisión del manual arriba mencionado, (4) la inclusión de sustancias químicas no consideradas, (5) hacer el enlace de su base de datos con una base de datos de hojas de seguridad comercial y (6) desarrollar la impresión de reportes.

BIBLIOGRAFIA

1. Piccinini, N. *"Análisis de Riesgos en Instalaciones Industriales"*, U.C.V. Valparaíso, Agosto 1992.
2. *"Análisis de Riesgos en Instalaciones Industriales"*
RIESG_1.DOC/26/08/95/LAS
3. H.H. Fawcett and W. S. Wood, *"Safety and Accident Prevention in Chemical Operations"*, 2nd ed. (N.Y. : John Wiley and Sons, 1982), p 1
4. Daniel A. Crowl / Joseph F. Louvar *"Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications"*. Prentice Hall 1990.
5. *"Guidelines for Hazard Evaluation Procedures, with worked examples"* 2nd ed. CCPS AICHE 1992
6. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo NTP-238 1989 *"Los análisis de Peligros y de Operabilidad en instalaciones de Proceso"*.
7. GRUPO ZURICH - SEGUROS Risk Engineering *"Breve Introducción al Método de Análisis de Peligros – Zurich"*
8. Jorge Letayf, Carlos González *"Seguridad, Higiene y Control Ambiental"* McGraw-Hill México 1994.
9. Ian Barraclough and Annick Camino *"Safety Culture, Keys for Sustaining Progress"* IAEA BULLETIN, 40/2/1998.
10. W. Bartknecht, *Explosion* (New York: Springer-Verlag, 1981), p. 27
11. *"International Conference and Workshop on Modeling and mitigating the Consequences of Accidental Releases of Hazardous Materials"* CCPS AICHE, 1995

12. Code of Federal Regulations, 29 CFR Parte 1910, "Process Safety Management of Highly Hazardous Chemicals; Explosives and Blasting Agents"; Final Rule. OSHA, 1992.
13. Code of Federal Regulations, 40 CFR Partes y 68 "Accidental Release Prevention Requirements: Risk Management Programs Under the Clean Air Act, Section 112 @ (7), EPA, 1996.
14. Directiva 82/501/CEE (Seveso), Relativa al control del peligro de los accidentes relevantes relacionados con ciertas sustancias peligrosas, Gaceta Oficial de la Comunidad Económica Europea, 1996.
15. Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente. D.O.F. 28 de Enero de 1988.
16. "Control de Riesgos de Accidentes Mayores- Manual práctico" Organización Internacional del Trabajo, Basilea, Suiza 1990.
17. "*Understanding Atmospheric Dispersion of Accidental Releases*" CCPS, AICHE, 1995.
18. "*Guidelines for Consequence Analysis of Chemical Releases*", CCPS AICHE 1999.
19. "*Manual for the classification and prioritization of risks due to major accidents in process and related industries*" IAEA-TECDOC-727., 1992.
20. "Perry's Chemical Engineers' Handbook" 7^{ma} edición. McGraw-Hill International Editions 1998.
21. Manual del usuario ARCHIE version 1.0. USA
22. Manual del usuario SCRI, version 3.0 México
23. "*North American Emergency Response Guidebook*", DOT, 1996

24. Rao V. Kolluru, Steven M. Bartell, Robin M. Pitblado "Manual de Evaluacion y Administracion de Riesgos" Mc Graw Hill 1a edicion 1998.
25. Instituto Nacional de Ecología "Promoción de la Prevención de Accidentes Química", Octubre, 1999.
26. Eleanor W. Jordan and Jefry J. Machesly. "*Systems Development, Requirements, Evaluation, Design and Implementation*". PWS-KENT Publising Company USA, 1989.
27. A.L. Capron "Systems Analysis & Design" the Benjamin/ Cummings Publishing Company. Inc, USA, 1986.
28. Winblad, Edwards, King "*Object-Oriented Software*" Addison-Wesley P.C., In. USA 1990.
29. Timothy Budd "*An introduction to Object Oriented Programming*" Addison-Wesley Publishing Company, USA, 1991

Páginas electrónicas consultadas:

<http://www.ine.gob.mx>
<http://www.profepa.gob.mx>
<http://www.epa.gov.com>
<http://www.osha.gov/>
<http://www.oecd.org/>
<http://www.cdc.gov/niosh/homepage.html>
<http://www.rolac.unep.mx/>
<http://undcp.or.at/unlinks.html>
<http://www.bhopal.com/index.html>
<http://www.dot.gov/>
<http://smn.cna.gob.mx/SMN.html>

<http://sis.nlm.nih.gov/index.cfm>

<http://www.chemsafety.gov/>

<http://www.atsdr.cdc.gov/toxfaq.html>

<http://www.aiche.org/>

<http://www.iaea.org/worldatom/>

ACRONIMOS

ACQUIM	Sistema de Base de Datos para el manejo de Información relacionada con Accidentes Químicos
ALARP	As Low as Reasonable Practicable
ALOHA	Aereal Locations of Hazardous Atmospheres
APELL	Awareness and Preparedness for Emergencies at Local Level
ARCHIE	Automated Resource for Chemical Hazard Incident Evaluation
BLEVE	Boiling Liquid Expanding Vapor Explosions
CCA	Consequence-Cause Analysis
CEE	Comunidad Económica Europea
CEI	Chemical Exposure Index
CFR	Code of Federal Regulations
CMO	Concentración Mínima de Oxígeno
ENV	Explosiones de nubes de vapor
EPA	Environmental Protection Agency
ETA	Event Tree Analysis
F&EI	Fire and Explosion Index
FACTS	Failure and Accident Technical Information System
FMEA	Failure Mode and Efect Analysis
FTA	Fault Tree Analysis
GLP	Gas Licuado a Presión
HAZOP	Hazard Operability Analysis
HRA	Human Realibility Analysis

IDLH	Immediately Dangerous to Life and Health
LC ₅₀	Letal Concentration 50
LEGEEPA	Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente
LIE	Límite Inferior de Explosividad
LII	Límite Inferior de Inflamabilidad
LSE	Límite Superior de Explosividad
LSI	Limite Superior de Inflamabilidad
MHI	Material Hazard Index
OSHA	Occupational Safety & Health Administration
PHA	Process Hazard Analysis
PPA	Programa para la Prevención de Accidentes
PROFEPA	Procuraduría Federal de Protección al Ambiente
PSM	Process Safety Management
RR	Relative Ranking
SCRI	Modelos Atmosféricos para Simulación de Contaminación y Riesgos en Industrias
SHI	Sustance Hazard Index
SPER	Sistema Preliminar de Estimación de Riesgos
TE	Top Event
TPQ	Threshold Planning Quantity Index
UNEP	United Nations Environmental Programme
UNIDO	United Nations Industrial Development Organization
USA	United States of America

WHO World Health Organization

WOAD Worldwide Offshore Accident Data Bank