

9.
25



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN**

**EVALUACION CUANTITATIVA DE
RIESGOS EN PLANTAS DE PROCESO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERIA QUIMICA

P R E S E N T A:

BLANCA MIRIAM ESPINOSA BARRON

DIRECTOR DE TESIS
ING. RAFAEL GARCIA NAVA

COASESOR DE TESIS
ING. RAYMUNDO ALEJANDRO LOERA HERNANDEZ.

CUAUTITLAN IZCALLI, ESTADO DE MEXICO

1999

271623

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

PASINACIJA

DISCONTINUA



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN
PRESENTE

ATN: Q. Ma. del Carmen García Mijares
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS: TITULADA
Evaluación Cuantitativa de Riesgos en Plantas de Proceso.

que presenta la pasante: Bianca Miriam Espinosa Barrón
con número de cuenta: 8415330-0 para obtener el TÍTULO de:
Ingeniera Química.

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXÁMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO

ATENTAMENTE.
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx., a 21 de Octubre de 199 8

PRESIDENTE	<u>I. Q. Rafael García Nava</u>	
VOCAL	<u>I. Q. Fernando Orozco Ferreyra</u>	
SECRETARIO	<u>I. Q. I. Alvaro Leo Ramírez</u>	
PRIMER SUPLENTE	<u>M. en C. Eliqio Pastor Rivero Martínez</u>	
SEGUNDO SUPLENTE	<u>M. en C. Ricardo P. Hernández García.</u>	

*Señor:
Tú que has llenado mi vida de bendiciones,
Tú que me has mostrado cada día tu grandeza,
ayúdame para que los conocimientos que me has dado sirvan para hacer de mí una
persona de bien, que sepa reconocer con humildad mis fallas y que no me detenga
hasta corregirlas.*

*Gracias por llevarme siempre en tus brazos, por acordarte de mí cada día y por
perdonarme mis errores.*

INDICE

OBJETIVO	1
INTRODUCCION	1
CAPITULO I	
ANÁLISIS DE RIESGOS	3
1.1 ¿ QUE ES UN ANALISIS DE RIESGOS ?	4
1.2 ESQUEMA COMUN DE LAS METODOLOGIAS DE ANALISIS DE RIESGOS	5
1.3 CONCLUSION DEL CAPITULO	14
CAPITULO II	
DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS PROCEDIMIENTOS DE EVALUACIÓN DE RIESGOS	16
2.1 SELECCION DE LOS PROCEDIMIENTOS DE EVALUACION DE RIESGOS	16
2.2 DESCRIPCION DE LOS PROCEDIMIENTOS DE EVALUACION	18
2.2.1 LISTAS DE VERIFICACION DE PROCESOISISTEMA	19
2.2.2 REVISION DE SEGURIDAD	22
2.2.3 INDICES DOW Y MOND	25
2.2.4 ANALISIS DE RIESGOS PRELIMINAR (PHA)	29
2.2.5 ANALISIS " QUE PASA SI.."	31
2.2.6 ESTUDIOS DE RIESGO Y OPERABILIDAD (HAZOP)	36
2.2.7 ANALISIS DE MODO Y EFECTO (FMECA)	43
2.2.8 ANALISIS DE ARBOL DE FALLAS (FTA)	47
2.2.9 ARBOL DE EVENTOS (ETA)	54
2.2.10 ANALISIS CAUSA - CONSECUENCIA	59
2.2.11 ANALISIS DE ERRORES HUMANOS	62
CAPITULO III	
DEFLAGRACIÓN Y DETONACIÓN DE NUBES INFLAMABLES	66
3.1 DEFLAGRACION Y DETONACION	66
3.2 FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA FORMACION DE NUBES INFLAMABLES	69
3.2.1 PROPIEDADES DEL MATERIAL	70
3.2.2 CONDICIONES METEOROLÓGICAS	71
3.2.3 CARACTERÍSTICAS DE ALMACENAMIENTO, PROCESO Y TRANSPORTE	71

3.3 DETONACION DE NUBES INFLAMABLES	72
3.3.1 EXPLOSIONES DE NUBES DE VAPOR CONFINADAS	72
3.3.2 EXPLOSIONES DE NUBES DE VAPOR NO CONFINADAS	72
3.3.3 EXPLOSIONES DE POLVO	73
CAPITULO IV	
EVALUACIÓN DE CONSECUENCIAS DE LOS RIESGOS	
4.1 METODOS DE ESTIMACION DE DAÑOS DE UNA NUBE INFLAMABLE	82
4.2 ESTIMACION DE DAÑOS DE UNA NUBE INFLAMABLE *METODO CONSERVADOR*	83
4.2.1 SUPOSICIONES	84
4.2.2 MÉTODO DE CALCULO	85
4.2.3 USO DEL MÉTODO DE CALCULO	92
4.3 ESTIMACION DE DAÑOS DE NUBES INFLAMABLES 'METODO COMPLEMENTADO'	93
4.4. EJEMPLO COMPARATIVO	100
4.4.1 CRITERIOS	101
4.4.2 EVALUACION CUANTITATIVA "METODO CONSERVADOR"	102
4.4.3 EVALUACION CUANTITATIVA "METODO COMPLEMENTADO"	104
CONCLUSIONES	116
APENDICE 1	119
APENDICE 11	125
BIBLOGRAFIA	131

EVALUACION CUANTITATIVA DE RIESGOS EN PLANTAS DE PROCESO

OBJETIVO

Determinar una metodología de evaluación de consecuencias en detonaciones de nubes inflamables en plantas químicas a partir de la selección de un análisis de riesgos y la posterior medida de manejo o prevención.

INTRODUCCION

En diferentes partes del mundo han sucedido explosiones de grandes o pequeñas dimensiones dentro de la Industria Química, provocadas por la falta de un análisis de riesgos previo al diseño de la planta y a su vez de sistemas óptimos de seguridad. Grandes pérdidas materiales y humanas han sido causadas por detonaciones o deflagraciones de nubes inflamables. Las pérdidas han sido cuantiosas en producción, equipo e inmuebles, sin mencionar que muchas veces las explosiones abarcan zonas circunvecinas y si se habla de pérdidas humanas el daño se vuelve irreparable. En octubre de 1989 explotó la PEPCON (Pacific Engineering and Production Co.); la fuerza de la explosión fue tal que rompió los sistemas de agua⁽³²⁾.

México no se ha visto libre de estos acontecimientos. En noviembre de 1984 explotaron las instalaciones de gas de San Juan Ixhuatepec, Edo. México. Su acción devastadora la ha hecho inolvidable, al igual que la sucedida en abril de 1992 al explotar vapor de gasolina dentro del drenaje municipal de Guadalajara, Jalisco.

Los antecedentes de este tipo no sólo implican una serie de costos que van desde la reparación o sustitución del equipo dañado, reconstrucción de la instalación y hasta la pérdida total de la planta. También implican la elaboración de nuevas legislaciones y requerimientos en el diseño y construcción de nuevas plantas o en la operación y mantenimiento de plantas ya existentes, que ayuden a evitar situaciones de riesgo. Todo lo anterior demuestra que una pobre o mala preparación tiene múltiples efectos cuando sucede una emergencia.

Entiendase pues, que la importancia de las consecuencias de las explosiones no sólo se limita a la población nacional sino también a la internacional. Por ello es necesario hacer un análisis de riesgos y posteriormente de consecuencias a fin de desarrollar los métodos de protección adecuados. Existen diversas metodologías de análisis de riesgos utilizables de acuerdo a cada situación; en el presente estudio se hará énfasis sobre el más adecuado en casos de detonaciones o deflagraciones de nubes inflamables, seguido del establecimiento de una metodología de evaluación de consecuencias.

CAPITULO I

ANALISIS DE RIESGOS

En la Industria Química existen diversos factores que pueden llevar a accidentes de pequeñas o grandes magnitudes como el caso de una catástrofe. En un esfuerzo por prevenir y/o controlar dichos accidentes, es necesario realizar un Análisis de Riesgos, el cual, estudiando la información de ingeniería, determinará si se justifica la inversión en un sistema sofisticado de seguridad automático o si se deben desarrollar instructivos de operación específicos para el caso, o una combinación de ambos, de cualquier manera la acción final tendrá como meta obtener la Seguridad.

El objetivo de este capítulo es explicar de manera general qué es un análisis de riesgos, cuál es su propósito, cuál es el esquema de elaboración más común y cuál es el paso siguiente una vez que se tiene el análisis de riesgos. Para ello se ha de iniciar por comprender qué es un riesgo y cómo es que se llega a él.

El término riesgo⁽¹⁾ tiende a usarse de muchas y diferentes maneras; es usualmente definido como una función entre la probabilidad y la consecuencia refiriéndose a la posibilidad de que se produzcan resultados distintos a lo deseado, sobre todo, la posibilidad de que haya pérdidas. Un riesgo es un conjunto de condiciones que tienen el potencial para causar efectos adversos en la salud humana, el medio ambiente e instalaciones.

Comúnmente es utilizada la palabra Peligro⁽²⁾ cuando se está hablando en realidad de riesgo. Peligro es una condición para que suceda algún mal a una persona, población o al ambiente. El riesgo está asociado con el peligro dependiendo de qué tan probable sea y de la gravedad de sus consecuencias. Supóngase el siguiente escenario: un individuo se encuentra frente a una vibora de cascabel, teniendo las siguientes probabilidades:

Peligro:	Vibora de cascabel
----------	--------------------

Consecuencia:	Muerte por envenenamiento
Riesgo:	Mordedura de la víbora de cascabel.
Probabilidad:	Si la víbora se encuentra libre y en el mismo lugar que el individuo la probabilidad de riesgo será casi 100%. Si la víbora se encuentra en cautiverio la probabilidad de riesgo será casi 0%.

Dado que la consecuencia es grave y la probabilidad es muy cercana al 100% entonces existe un riesgo mayor. Por el contrario, si la consecuencia es grave, pero la posibilidad de mordedura es prácticamente nula, entonces el riesgo es menor o no existe.

En el caso de la Industria química se puede razonar en lo siguiente : ¿qué hace peligroso a un material ?, que sea tóxico, inflamable, corrosivo o reactivo; ¿qué hace peligroso un proceso? las condiciones de operación como alta temperatura y presión, en cada uno de estos casos se tiene una característica peligrosa pero nunca un riesgo⁽⁴⁾, éste se dará cuando exista la exposición; y la evaluación de la gravedad de dicho riesgo, será una función de la probabilidad de que éste ocurra y de la magnitud de su consecuencia, como lo muestra la figura 1.1



Fig. 1.1 Factores que determinan la existencia de un RIESGO. ⁽⁴⁾

1.1 ¿ QUE ES UN ANALISIS DE RIESGOS ?

Es un análisis para identificar los posibles accidentes y estimar su frecuencia y consecuencias; esto es, daños serios de salud y de la seguridad de los empleados de la planta así como de la población vecina y/o causar serias pérdidas económicas. ⁽¹⁾

Para este propósito, un accidente es definido como una secuencia no planeada de eventos que tienen una consecuencia no deseada. Es importante ver el accidente como una secuencia de eventos porque en teoría, cada evento individual representa una oportunidad para reducir la frecuencia o las consecuencias del accidente.

1.2 ESQUEMA COMUN DE LAS METODOLOGIAS DE ANALISIS DE RIESGOS⁽³²⁾.

La metodología de evaluación de riesgos juega un papel muy importante en la *politica de seguridad*. Existen dos métodos generales para la evaluación y control de riesgos que son comúnmente utilizados:

- Apego a una buena conducta

- Evaluación Predictiva

El **Apego a una Buena Práctica** consiste en observar las normas y reglamentos contenidos en códigos de estándares aceptados, así como la práctica que proporcione mejoría al diseño, operación y mantenimiento de la planta.

Los códigos usados con mayor frecuencia son de las siguientes Sociedades:

** Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (**ASME**). El código de calentadores y recipientes a presión es el más universalmente aceptado con las bases de construcción para cada equipo.

** Instituto Americano del Petróleo (**API**). Tiene estándares para el arreglo de equipo mecánico común y para el uso de instrumentación.

** Sociedad de Instrumentación de América (**ISA**). Tiene estándares para la manufactura, calibración y aplicación de procesos de instrumentación.

** Código Nacional Eléctrico (**NEC**). Proporciona estándares para diferentes clasificaciones de equipo eléctrico y cuándo es utilizable cada clase.

** Asociación Nacional de Protección contra el Fuego (**NFPA**). Tiene numerosos estándares dirigidos a un establecimiento de sistemas de seguridad contra el fuego apropiados para evitar pérdidas de vida y propiedades.

Otros grupos son:

** Asociación de Manufacturas Químicas (**CMA**).

** Sociedad Americana de Materiales de Prueba (**ASTM**).

** Asociación Mexicana de Higiene y Seguridad A.C (**AMHSAC**).

** Secretaría del Trabajo y Previsión Social (**STPS**) en colaboración con el Instituto Mexicano del Seguro Social (**IMSS**)⁽⁴⁰⁾.

Estas dos últimas organizaciones han realizado el Reglamento General de Seguridad e Higiene en el Trabajo en México, así como instructivos que se expiden de manera gratuita a quien lo solicite.⁽⁴⁸⁾

** Secretaría de Comercio y Fomento Industrial (**SECOFI**) en conjunción con la Dirección General de Normas (**DGN**). Proporcionan las Normas Oficiales Mexicanas (**NOM**) de seguridad e higiene en los centros de trabajo, del Reglamento General de Seguridad.⁽⁴⁰⁾

La Evaluación Predictiva de Riesgos es una serie de pasos que llevan a anticipar "en el papel" la ocurrencia de riesgos en una planta o proceso. Esta Evaluación y Administración de Riesgos consiste de cuatros fases⁽⁴⁰⁾:



A) COLECCION Y REVISION DE DATOS ⁽³²⁾.

Consiste de la recopilación de datos tales como:

- ⇒ Características generales y de peligrosidad de los materiales.
- ⇒ Variables de operación del proceso.
- ⇒ Condiciones meteorológicas de la zona de estudio.
- ⇒ Documentación del proceso (diagramas, procedimientos, instructivos, etc.).

B) EVALUACION DE RIESGOS ⁽³⁾.

Consta básicamente de los cuatro siguientes pasos:

- 1.- Identificación de riesgo.
- 2.- Evaluación de consecuencias.
- 3.- Cálculo de probabilidades.
- 4.- Evaluación del riesgo.

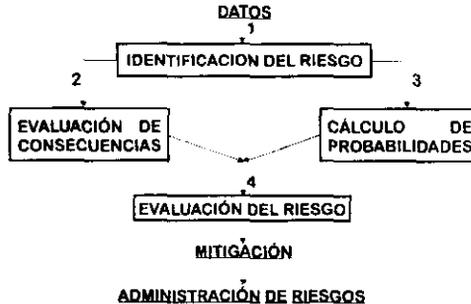


Fig. 1.2 DIAGRAMA DE EVALUACION Y ADMINISTRACION DE RIESGOS.

1. Identificación de Riesgo⁽³⁾.

En la existencia de riesgos se requiere la presencia de un evento no deseado, el cual por definición es " repentino, fuera del programa y con capacidad destructiva"⁽⁴⁶⁾.

Los términos "Repentino y Fuera del programa" indican que el evento es considerado como inevitable, y que no puede ser precisado en un tiempo

determinado.

Así mismo "Capacidad destructiva" indica que el incidente ocasiona una pérdida máxima potencial (**PMP**), que se refiere a los daños a equipo, instalaciones, personal y área circunvecina.

Los tipos de riesgo que se encuentran normalmente en las Industrias de Proceso Químico (**IPQ**) se pueden clasificar como sigue:

1. Fallas Primarias.- Son las fallas que sufren los equipos y/o componentes durante la operación normal. En términos generales indican la incapacidad del equipo para soportar las condiciones especificadas en el diseño y fabricación, ya sea por que no se diseñó correctamente, la fabricación fue defectuosa o bien por deterioro en servicio. Las fallas primarias se subdividen en :

a) Fallas de Recipientes. Es el tipo de fallas en las cuales se riega el contenido de un equipo debido a grietas o ruptura del recipiente.

b) Fallas Mecánicas. Son aquellas que afectan el funcionamiento correcto del equipo mecánico y se presentan como ruptura de los rodamientos o de una flecha, etc.

c) Fallas Eléctricas. Se refiere a fallas en equipo eléctrico o bien a la alimentación eléctrica, tal es el caso de transformadores, capacitores, etc.

2. Fallas Secundarias.- Resultan de sobrecargas debidas al ambiente, o a fenómenos naturales. Se debe distinguir bien entre Fallas Primarias y Secundarias; por ejemplo, si se diseña una estructura para resistir vientos de 140 km/h y falla a 125 Km/h, es una falla primaria; pero si la falla se presenta con vientos de 170 km/h, entonces la falla será secundaria.

Al hablar de fallas secundarias se deben tomar en cuenta eventos como los que muestra la tabla 1.1.

La identificación de riesgos y su probabilidad se puede auxiliar de: experiencias con unidades similares, reportes de plantas y accidentes, seminarios y reuniones, así como de publicaciones ; de esta forma se aprende de la experiencia ajena y se prevé en los diseños nuevos con la esperanza de que no suceda nuevamente. ⁽¹⁾

2. Evaluación de Consecuencias⁽²⁾.

Una vez que el paso de identificación de peligros es terminado, entonces se está listo para evaluar las consecuencias de varios escenarios de accidentes. La tabla 1.2 muestra una pequeña lista de los tipos de consecuencias adversas que pueden necesitarse para la evaluación. Se deben resaltar dos puntos particularmente para la evaluación de consecuencias:

a) Hay muchos y diferentes procesos físicos que pueden ser evaluados. Una persona no puede ser un experto en fuego, mecánica estructural, mecánica de fractura, dispersión de aire, explosiones y toxicología; mas bien, la evaluación de riesgos es un esfuerzo interdisciplinario que muestra el talento de muchas personas.

b) La evaluación de un aspecto mayor involucra muchos subcasos relacionados. Por ejemplo, la ruptura de una tubería puede llevar al fuego, o bien a una explosión de nubes de vapor confinado o no confinado. El caso final de la ruptura de la tubería dependerá de la localización, la hora del día y la química involucrada. Cada subcaso puede necesitar una exploración detallada antes de que el caso final pueda ser establecido.

3. Cálculo de Probabilidades⁽²⁾.

Dos tipos de datos son necesarios para el cálculo de probabilidades:

a) La razón de falla del equipo e instrumentación con respecto a la reparación.

b) La probabilidad de errores humanos y la probabilidad de recobrase.

La evaluación de probabilidad de errores humanos (PEH) es en muchos casos, más difícil que la evaluación de fallas del equipo. La PEH es definida como el número de errores dividido entre el número de posibilidades de error; esto es, la probabilidad de que un error será cometido dado que una labor es realizada.

4. Características del Riesgo⁽³⁾.

En las características del riesgo, la probabilidad de que éste ocurra y los datos de consecuencia son combinados para obtener una expresión de riesgo cualitativa y cuantitativa. Una estimación de riesgo indica la probabilidad de que ocurran diferentes tipos de efectos en la salud y medio ambiente de poblaciones expuestas así como de planta y equipo.

C) MITIGACION

La mitigación consistirá en el control inmediato del evento inicial a fin de minimizar el riesgo mientras se toma una decisión de acuerdo al análisis de costos sobre los sistemas de seguridad. Dicha decisión será tomada en la Administración de Riesgos.

TABLA No. 1.1

Lista parcial de eventos externos por considerar en una evaluación de riesgos de procesos químicos ⁽²⁾.

Evento	Notas y Comentarios
Impacto de una aeronave	Localización a 3 millas desde el aeropuerto que tiene altas frecuencias
Avalancha	Puede excluirse en muchos sitios
Erosión Costera	También se refiere a desbordamiento
Sequia	Puede afectar en la disponibilidad de agua fría para la localización de la planta
Desbordamiento	Considerar impacto de ríos, lagos, arroyos y temporales de agua
Vientos Extremos	En sitios específicos, vientos extremos pueden aventar objetos de tal forma que se comporten como proyectiles
Fuego	Revisar la localización de sistemas contenedores de flamables cerca de la planta, almacenamiento de gasolina, LPG, aceite combustible, etc
Neblina	Puede incrementar la frecuencia de accidentes
Fuego Forestal	Revisar la localización de la planta en relación a grandes áreas boscosas
Heladas	Las heladas pueden dañar principalmente las estructuras de la planta
Granizada	El granizo se comporta como un proyectil que puede impactarse sobre la planta
Marea alta, alto nivel del lago o alto nivel del río	Se refiere a una revisión externa de desbordamientos
Alta temperatura de verano	Revisar el impacto sobre la presión de vapor de químicos en sistemas de almacenamiento
Huracanes	Sitios específicos; incluye impacto bajo oleaje de temporal y vientos extremos

D) ADMINISTRACION DE RIESGOS.

El proceso de decisión no es parte de un análisis de riesgos. El propósito primario de evaluar el riesgo es apoyar la elección de una modificación para mejorar alguna operación. Al sopesar la probabilidad de un riesgo determinado contra las consecuencias de seguridad y financieras, se pueden identificar los principales contribuyentes para un riesgo particular y recomendar métodos para reducir dicho riesgo. Estas recomendaciones, resultantes de la evaluación de riesgos; pueden documentarse para la optimización costo/seguridad de un sistema, y esto es propiamente lo que se llama administración de riesgos.

La administración no elimina el peligro porque esto es imposible, pero lo reduce a un plano socialmente aceptable⁽³⁾.

Un riesgo es aceptable si la pérdida de la propiedad y de la producción es aceptable. ¿ Cuándo es aceptable la pérdida de propiedad y de producción ?. Cuando el riesgo involucra pérdida de vidas entonces no debe ser aceptado⁽⁴⁾.

En relación al costo; la EXXON Co. publicó un estudio para determinar el nivel de inversión debido a consideraciones de seguridad, mediante un análisis de datos del sistema de información de pérdidas por peligros de EXXON (HLIS Hazard Loss Information System). Este banco de datos contiene la información en cantidad masiva acerca de incendios y explosiones en los que la pérdida de propiedad y bienes excedió los 2000 USD en el momento de ocurrir.

EXXON preparó una curva donde el daño en propiedad está sobre el eje de las X, y la probabilidad de ocurrencia por año, está en el eje de las Y.

El costo anual de pérdidas representa la pérdida anual promedio que puede esperarse por exposición al riesgo.

TABLA No.1.2

Lista parcial de posibles consecuencias de accidentes en procesos químicos ⁽²⁾.

Consecuencia	Notas y Comentarios
Calentamiento del líquido, expansión y explosión de vapor	Puede ocurrir en algún líquido almacenado bajo presión cerca de su punto de ebullición (LPG)
Contaminación de una estructura o construcción	
Explosión de nubes de vapor confinado	La destrucción total de una estructura cerrada es posible con la liberación de sólo un poco de material flamable.
Envenenamiento de peces	Contaminación ambiental que puede dar como resultado multas substanciales y sanciones.
Descarga de sólidos	El magnesio y el aluminio son potencialmente flamables.
Proyectiles	Objetos como autos pueden ser arrojados a los alrededores durante un huracán o un tornado, explosiones de recipientes frecuentemente producen muchos proyectiles.
Sobrecarga del incinerador, llamarada o sistemas de relevo	Una reacción puede generar agitación térmica de materiales, los cuales pueden sobrepasar las especificaciones de los sistemas de seguridad, lo que requiere de una verificación adecuada del diseño.
Estanque de fuego	Se debe ser cauteloso con los tanques de almacenamiento de flamables con escape de material al fondo (dren).
Ruptura de tubería	Grandes liberaciones de materiales han ocurrido en el pasado; por lo que se deben verificar los sistemas y planes de emergencia.
Descarga de material	Algunos químicos tienen ignición pirofórico-instantánea al contacto con el aire.
Liberación de vapores tóxicos	La dispersión puede herir y en caso extremo envenenar a muchas personas.
Liberación de líquidos tóxicos	Verificar derrames del contenedor
Explosión de nubes de vapor no confinado	Los efectos pueden dañar estructuras a muchas millas desde el centro de la explosión
Ruptura de recipiente	Son posibles fracturas a bajas temperaturas y simples sobrepresiones.

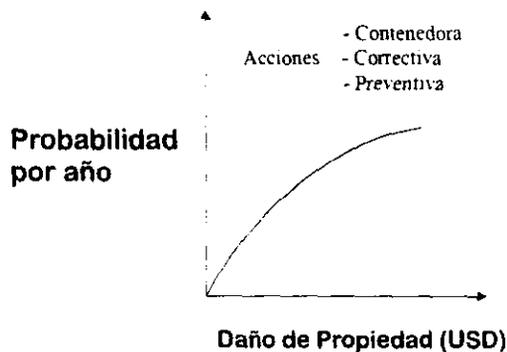


Fig. 1.3 COSTO ANUAL DE PÉRDIDAS Y EXPOSICIÓN AL RIESGO (EXXON Co.).

Es recomendable que cada compañía elabore un historial de riesgos y consecuencias a lo largo de la vida de la planta. Dentro del cual es necesario incluir la gráfica de costo de daño vs probabilidad por año. Esto ayudará a la administración de riesgos para ubicar a la planta dentro de un plano de riesgo aceptable.

En esta lista se deberá adicionar las acciones contenedoras, correctivas y preventivas para cada caso que se haya presentado.

1.3 CONCLUSION DEL CAPITULO.

El apego a una buena práctica (seguimiento de normas y reglamentos) así como una evaluación predictiva conforman lo que se llama un esquema de análisis de riesgos que a pesar de que no es el único sí puede ser una buena base.

Toda la información recopilada acerca del proyecto/sistema servirá para identificar aquellas variables que pueden llevar a un evento no deseado; es decir, un riesgo. Con una evaluación de consecuencias de dicho riesgo y el cálculo de probabilidades de que éste ocurra, se determinará o calificará si es o no aceptable. Todo lo anterior auxiliará para decidir las medidas de prevención y control en caso de que ocurra el riesgo de tal forma que las consecuencias no sean de gravedad.

La información de este capítulo ha mostrado la importancia que tiene un Análisis de Riesgos social y económicamente. Social, dado que se evitan daños a la comunidad interna y vecinal de la instalación así como al medio ambiente y económica, porque evita altos costos por daños a la propiedad.

CAPITULO II**DESCRIPCION GENERAL DE LOS
PROCEDIMIENTOS DE EVALUACION DE RIESGOS**

El capítulo anterior mostró la importancia que tiene un Análisis de Riesgos y las partes que lo constituyen primordialmente, sin embargo; debido al crecimiento de la industria y por consiguiente de las necesidades de la misma, se han desarrollado diferentes metodologías de análisis. Estas metodologías no se pueden utilizar por igual; se debe realizar una cuidadosa selección de la metodología a ocupar, dependiendo de su aplicabilidad y las necesidades de la planta/sistema.

Este capítulo tiene como finalidad en primera instancia, el indicar cuales factores se deben tomar en cuenta al realizar dicha selección y posteriormente describe de manera general algunas metodologías incluyendo su propósito, cuándo y dónde se utilizan, cómo se elaboran y qué se puede esperar de ellas.

Tomando en cuenta el objetivo de la tesis, se ha puesto mayor atención a aquellas metodologías que tienen como base la evaluación de consecuencias.

**2.1 FACTORES QUE AFECTAN LA SELECCION DEL PROCEDIMIENTO DE
EVALUACION DE RIESGO**

Existen diferentes métodos de análisis de riesgos y cada uno tiene su propósito en particular, sus requerimientos, etc. por lo que antes de elegir cualquier método se deben tomar en cuenta los siguientes factores:

- a- Fase de Desarrollo de la Planta o Proceso.
- b- Propósito de la Evaluación.
- c- Nivel de Consecuencia Potencial.
- d- Complejidad del Proceso o Planta.
- e- Familiaridad con los procedimientos.
- f- Información y datos requeridos.
- g- Tiempo y costo requeridos.

A. Fase de Desarrollo de la Planta o Proceso.

1. Cada fase de desarrollo de la planta o proceso ya sea diseño, arranque - operación normal, etc., tiene sus prioridades de evaluación de riesgos y éstas deben ser consideradas para lograr una identificación oportuna del riesgo evitando rediseños o modificaciones de construcción costosos y evitar duplicación de esfuerzos.

B. Propósito de la Evaluación.

Es necesario que él, o los analistas, tengan una idea del propósito de evaluación, ya que hay métodos que sólo son aplicables en ciertos casos, o bien, que pueden ser auxiliados de otros métodos, como se muestra en la tabla 2.5 (Procedimientos de Evaluación de Riesgos).

C. Nivel de Consecuencia Potencial.

Se debe considerar el peor de los niveles de gravedad de las consecuencias que pueden influir en la selección del procedimiento de evaluación. Una gran liberación de materiales tóxicos puede justificar una investigación más completa y detallada para eventos y combinaciones de eventos que podrían causar dicha liberación. Por el contrario, si hay certidumbre de un nivel bajo de riesgo, una investigación exhaustiva de las causas puede ser inadecuada.

D. Complejidad del Proceso.

Una planta compleja que incorpora diferentes planos de protección a través de muchos controles, sistemas de seguridad, sistemas de mitigación, etc., necesita un procedimiento de evaluación que pueda identificar, evaluar y presentar la variedad de eventos accidentales que sea posible dentro del proceso.

E. Familiaridad con los Procedimientos.

La familiaridad del grupo de evaluación (o analistas) con ciertos procedimientos de análisis de riesgos, es un buen argumento para usar cierto método dado que las limitaciones del mismo están completamente comprendidas.

F. Información y Datos Requeridos.

Algunos procedimientos descritos en este documento requieren más datos e información que otros. Si la información no está disponible en su totalidad, entonces no se justificaría el uso de ciertos procedimientos. No hay tanto problema cuando los procedimientos son usados para proveer resultados cualitativos pero sí cuando se requiere de resultados cuantitativos.

G. Tiempo y Costo Requeridos.

El tiempo para realizar un análisis de riesgos y el costo de evaluación no deben ser un factor absoluto al escoger el procedimiento de evaluación. Sin embargo, debe ser comparado con la necesidad de reducir de inmediato el riesgo que podría ser obvia, y de no ser así optar por un análisis de riesgos menos costoso.

Oportunidades para reducir el riesgo.

Los costos del análisis de riesgos deben ser siempre comparados con el costo de los métodos de reducción del riesgo. El costo del análisis realizado por analistas experimentados sería pequeño comparado con muchas reducciones del riesgo, pero elegir compañías con poca experiencia en evaluación de riesgos puede en algunas circunstancias, resultar contraproducente, ya que si se obtienen resultados erróneos, el costo por reducción del riesgo se incrementaría o bien, al no introducir métodos adecuados de reducción del riesgo, (dado que supuestamente no son necesarios) se origine un costo mayor.

2.2 DESCRIPCION GENERAL DE LOS PROCEDIMIENTOS DE EVALUACION.

A continuación se enlistan algunos procedimientos de evaluación y, posteriormente, se explicará cual es su propósito, cómo se elaboran, etc.

- 1. Listas de Verificación Proceso/Sistema.**
- 2. Revisión de Seguridad.**

3. **Indíces Dow y Mond.**
4. **Análisis de Riesgos Preliminar (PHA).**
5. **Análisis "Qué pasa si...".**
6. **Estudios de Riesgo y Operabilidad (HazOp).**
7. **Análisis de Modo y Efecto Falla e Índice Crítico (FMECA).**
8. **Modelo de Fallas, Efectos y Análisis de Índice Crítico.**
9. **Análisis de Arbol de Fallas (FTA).**
10. **Análisis de Arbol de Eventos (ETA).**
11. **Análisis Causa-Consecuencia.**
12. **Análisis de Errores Humanos (HEA).**

2.2.1 LISTAS DE VERIFICACION DE PROCESO/SISTEMA ⁽¹⁾.

*** PROPOSITO Y APLICABILIDAD.**

Las Listas de verificación son comúnmente usadas para identificar los tipos de riesgos asociados con el proceso ayudando a concordar la práctica con los estándares industriales. Esta técnica compara diferentes aspectos de un proceso/sistema de acuerdo a una lista de determinados puntos con los que debe cumplir el mismo, y de esta forma descubrir y documentar las posibles deficiencias.

Estos puntos deben basarse sobre características de sistemas similares, estándares de compañías, prácticas comunes de la industria o experiencias. La calidad del análisis depende mucho de lo relevante que sean dichos puntos y cómo las personas complementan las listas de chequeo.

Una lista de verificación es cómoda para usarse y puede ser aplicada para cada fase de desarrollo del proyecto de una planta.

*** RECURSOS NECESARIOS.**

- a. - Una lista de verificación preparada por experiencias anteriores.
- b. - Manual de procedimientos estándares.
- c. - Conocimiento del sistema de la planta.

*** ELABORACION (FASE DE VIDA DE LA PLANTA).**

El análisis puede hacerse para las diferentes fases de desarrollo de la planta : tales como Diseño, Construcción, Arranque, Operación, Paro. Y para cada una de ellas se deben analizar los siguientes aspectos :

Materiales, Equipo, Procedimiento

Materiales.

Se refiere a la revisión de las características de todos los materiales de proceso, es decir; materias primas, catalizadores, productos intermedios y producto final. Obtener datos detallados sobre estos materiales tales como:

- ⇒ Flamabilidad.
- ⇒ Explosividad.
- ⇒ Toxicidad.
- ⇒ Corrosividad y Compatibilidad.
- ⇒ Disposición de Desechos.
- ⇒ Almacenamiento.
- ⇒ Electricidad Estática.
- ⇒ Reactividad.

Equipo.

Se debe revisar el diagrama de flujo de proceso o lista de equipo para identificar los riesgos asociados con cada pieza del equipo, por ejemplo:

- ⇒ Especificaciones de diseño.
- ⇒ Alivio de presión.
- ⇒ Arreglo de la planta.
- ⇒ Equipo eléctrico.

Procedimiento.

Durante el transcurso del diseño, deben revisarse los procedimientos que se proponen para arranque, paro o situaciones de emergencia. El análisis de construcción, arranque, operación y paro de la planta/sistema se elabora de la misma forma que para el diseño; es decir, tomando en cuenta materiales, equipo y procedimiento.

* EJEMPLO.

Para dar una mejor idea del procedimiento de Listas de Verificación, se tomará el siguiente sistema :

Producción de Fosfato de diamonio a partir de ácido fosfórico y amoniaco según el diagrama.

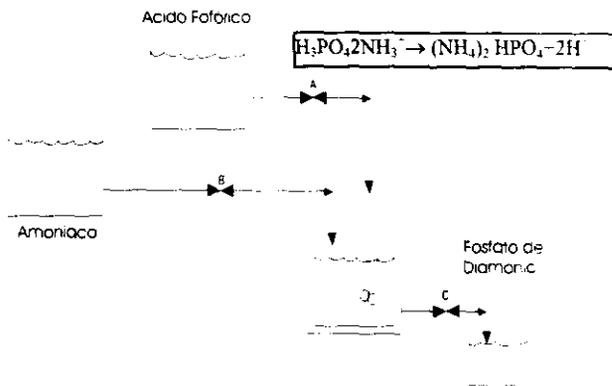


Fig. 2.1 PRODUCCIÓN DE FOSFATO DE DIAMONIO

Fase de vida de la Planta : ARRANQUE.**Materiales.**

¿Se tiene una planeación de materia prima. (amoníaco y ácido fosfórico), y servicio de abastecimiento para simplificar algún requerimiento durante el arranque?

- ⇒ ¿Se tiene todo el abastecimiento de H_3PO_4 y NH_3 , etc., requerido según el plan de arranque?
- ⇒ ¿Se tienen planes de contingencia para disposición del material?

Equipo.

- ⇒ ¿Se tiene todo el equipo purgado de aire (si se requiere)?
- ⇒ ¿Se quitaron todos los obstáculos?
- ⇒ ¿Están las válvulas A y B en posición correcta?

Procedimiento.

- ⇒ ¿Se tienen procedimientos de arranque y paro totalmente preparados?
- ⇒ ¿El operador tiene las instrucciones completas?

Esta es sólo una parte de lo que se puede revisar dado que cada fase de vida de la planta tiene otra forma de operar, normalizaciones dentro de la misma, diferentes operadores, etc.

2.2.2 REVISION DE SEGURIDAD.*** PROPOSITO Y APLICABILIDAD.**

Este programa es creado para identificar las condiciones de la planta o procedimientos de operación que llevarían a un accidente y a pérdidas significativas en vidas y propiedad. Mientras esta técnica es comúnmente aplicada en la operación de plantas de proceso, también es aplicable para plantas piloto, laboratorios y almacenaje. La revisión de seguridad incluye entrevistas con muchas personas en la planta: operadores, mantenimiento, ingenieros, administradores, grupo de seguridad y otros, dependiendo de la organización de la planta.

*** RECURSOS NECESARIOS.**

Para una revisión de seguridad completa, el equipo de analistas requiere el acceso a códigos aplicables y estándares, también necesita una descripción detallada de la planta, es decir; *diagramas de tubería e instrumentación, diagramas de flujo, procedimientos para arranque, paro, operación normal y emergencias, reportes de personal lastimado, reportes de incidentes peligrosos, mantenimiento, verificación de instrumentación crítica y características de material de proceso (esto es; toxicidad, e información de reactividad, etc).*

*** PERSONAL REQUERIDO.**

El personal asignado para inspecciones de "Revisión de Seguridad" necesita estar muy *familiarizado con los procedimientos y estándares de seguridad. Los técnicos especializados son auxiliares para evaluar la instrumentación, sistemas eléctricos, recipientes a presión, materiales de proceso y otros aspectos de énfasis especial.*

*** ELABORACION.**

La inspección debe comenzar con un recorrido de orientación general de la planta, para luego proponer *entrevistas específicas. Las entrevistas con individuos específicos deben ser programadas junto con el director de la planta.*

Los equipos de inspección obtienen y revisan correctamente las copias de los planos de la planta y procedimientos de operación, mantenimiento y emergencia. La observación de las personas en su actividad cotidiana proporciona evidencia del conocimiento de procedimientos y su cumplimiento. La información puede ser beneficiada conduciendo uno o más simulacros de emergencias en los cuales todo el personal pregunte y responda *qué harían en una emergencia real.*

Algunas compañías revisan las plantas de alto riesgo frecuentemente (cada 2 o 3 años), mientras que para compañías de bajo riesgo los intervalos pueden ser de 5 a 10 años.

Un reporte del trabajo y algunas recomendaciones es el producto final del equipo de inspección, pero la implementación de acciones correctivas debe quedar como responsabilidad del director o administrador de la planta.

***EJEMPLO.**

Si se toma el proceso de la sección anterior para la obtención de Fosfato de diamonio pero utilizando el método de Revisión de Seguridad, se tiene lo siguiente:

De acuerdo a preguntas específicas y con ayuda de los procedimientos, diagramas (fig 2.2) y demás información el grupo de analistas encontró que:

- ⇒ La capacidad unitaria se incrementó y las válvulas y controles de seguridad no se habían cambiado.
- ⇒ La instrumentación de algunas unidades eran las originales desde el diseño de la planta.
- ⇒ Algunos equipos no tenían el espacio adecuado según los nuevos estándares. (fig 2.3)

Una vez que se hubo determinado el riesgo se procedió a implementar medidas de seguridad tales como:

- ⇒ Las válvulas fueron redimensionadas.
- ⇒ Se implementó un moderno sistema de control.
- ⇒ El espacio entre equipos fue difícil pues no se podían hacer cambios debido a las unidades adyacentes pero se consideró para nuevas construcciones.

2.2.3 INDICES MOND Y DOW.

* PROPOSITO Y APLICABILIDAD.

Los índices Mond y Dow proveen de un método directo y fácil para proporcionar un rango relativo de la gravedad del riesgo en plantas de proceso químico. Este método asigna sanciones y créditos basados en las características de la planta. Las sanciones son asignadas para los materiales de proceso y condiciones que pueden contribuir a un accidente. Los créditos son asignados a plantas con características de seguridad que pueden mitigar los efectos de un accidente. Estos créditos y sanciones son combinados para derivar un índice que es un rango relativo del riesgo de la planta.

* RECURSOS NECESARIOS.

Los índices Dow y Mond requiere de lo siguiente:

- a. Plano correcto de distribución de la planta.
- b. Completo entendimiento del flujo de proceso y sus condiciones.
- c. Otros requerimientos.
 - ⇒ Índice de fuego y explosión.
 - ⇒ Revisar el trabajo diario.
 - ⇒ Datos de costo para el equipo de proceso.

* ELABORACION⁽⁵⁾.

Los métodos de rango relativo consisten de 7 pasos :

1. Identificar sobre el plano de localización las unidades de proceso que puedan resultar de mayor interés.
2. Determinar el Factor Material (MF).
3. Evaluar apropiadamente los factores que contribuyen al riesgo.
4. Calcular el Factor de Riesgo.
5. Determinar el Índice de Fuego y Explosión del área de estudio.
6. Calcular el Daño Máximo.
7. Evaluar los días que excedieron el tiempo establecido.

1. Identificar sobre el plano de localización aquellas "unidades de proceso" que tendrían grandes efectos o contribuirían más al fuego, a la explosión o a la liberación de material tóxico.

Una unidad de proceso es definida como un componente fundamental del equipo de proceso, tal como una bomba, reactor, compresor o tanque de almacenamiento.

2. Determinar el Factor Material (MF) para cada unidad.

El Factor Material (MF); es una medida de la intensidad de energía liberada por un componente químico, o una mezcla de componentes o sustancias. El MF es determinado considerando dos peligros del material: flamabilidad y reactividad denotados por NF y Nr respectivamente. El MF está clasificado por un número del 1 al 40. Los componentes se encuentran en la "Guía Dow"⁽⁵⁾

Esta guía valora 300 materiales más instrucciones para la determinación de materiales no incluidos en la lista. La Guía Dow también proporciona los procedimientos necesarios para incluir la toxicidad del material.

3. Evaluar apropiadamente los factores que contribuyen al riesgo considerando fuego, explosión y toxicidad. El área de contribución de riesgos es de dos tipos : riesgos de proceso general, y riesgos de proceso especial.

Los riesgos de proceso general incrementan la magnitud del incidente y los riesgos de proceso especial incrementan la probabilidad del accidente. Los primeros (designados como "F₁") incluyen reacciones exotérmicas y reacciones endotérmicas. Los riesgos de proceso especial (designados como "F₂") incluyen la temperatura de proceso, baja presión, operaciones en/o cerca del rango flamable, explosión de polvo, alivio de presión, corrosión y erosión, fuga, etc.

Los riesgos de proceso general y especial son la suma de todas las sanciones por cada categoría más un factor base de 1.0.

4. Calcular el Factor de Riesgo de la unidad y el Factor de Daño para cada unidad.

El Factor de riesgo de la unidad (F3) es el producto de los riesgos general y especial (F1 y F2) identificados en el paso anterior. El factor de riesgo de la unidad se combina con el factor material (del paso 2) para determinar el factor de daño. La Guía Dow⁽⁵⁾ proporciona una gráfica que permite determinar fácilmente el factor de daño que es una medida de la exposición al daño relativamente probable.

5. Determinar el Índice de Fuego y Explosión (FIEI) y el área de exposición para cada unidad.

El índice de fuego y explosión es calculado como el producto del Factor de riesgo de la unidad por el Factor material y está relacionado al área de exposición. El área de exposición es definida como un área circular alrededor de la unidad de proceso. La Guía Dow proporciona una gráfica que permite determinar fácilmente el radio de este círculo a partir del (FIEI). El índice de fuego y explosión, puede usarse como una regla general para especificar el grado de riesgo en la unidad, como lo muestra la Tabla 2.1:

TABLA 2.1
RANGO DOW

Rango Dow	Grado de riesgo
- 60	Ligero
- 96	Moderado
- 127	Intermedio
127 - 158	Alto
159 -	Severo

6. Calcular el Daño máximo probable de propiedad base y actual (MPPD).

El MPPD base, es calculado de la sustitución del valor del equipo en el Area de Exposición (paso 5). El cálculo es basado sobre el costo del equipo original.

El MPPD actual se deriva del MPPD base aplicando factores de credibilidad del control de pérdida, y contabiliza la mitigación de los efectos del diseño básico de seguridad característicos de la planta. El procedimiento define 3 categorías :

- a. Controles de proceso tales como planta de emergencia, control de explosión, paro de emergencia, control computarizado y revisión de los reactivos químicos (C1).
- b. Accesorios e instrumentación de aislamiento tales como válvulas de control remoto , ensamble (C2).
- c. Protección contra el fuego como detección de fuga, acero estructural, abastecimiento de agua, tanques enterrados y protección de cables (C3).

El factor de credibilidad para cada categoría es el producto de los créditos para cada artículo dentro de la categoría, y el total de créditos es obtenido de una gráfica usando el producto de los créditos de las 3 categorías. El MPPD actual es calculado como el producto del total de créditos y el MPPD base, mediante una gráfica que también proporciona la guía Dow.

7. Evaluar los días de tiempo excedido máximo probable (MPDO).

La consecuencia de un incidente puede ser estimada por los días de tiempo excedidos máximos probables (MPDO). Este cálculo considera:

- a. Costo de reparación o reemplazo del equipo dañado.
- b. Pérdida de producción tomado como el valor del producto manufacturado (VPM).

La guía Dow también proporciona una gráfica donde se obtiene el valor de MPDO a partir del MPPD actual.

2.2.4 ANALISIS DE RIESGOS PRELIMINAR (PHA).

* PROPOSITO Y APLICABILIDAD⁽⁷⁾.

El propósito de este análisis es reconocer los riesgos oportunamente ahorrando tiempo y costo el cual resulta mayor en plantas rediseñadas si los riesgos son descubiertos en una fase atrasada.

El PHA consiste de la formulación de un listado de riesgos relacionados a :

- ⇒ Materia prima, intermedia y producto final y su reactividad.
- ⇒ Equipo de planta.
- ⇒ Interfase entre sistemas componentes.
- ⇒ Desarrollo operativo.
- ⇒ Operaciones (prueba, mantenimiento, etc.).
- ⇒ Facilidad .
- ⇒ Equipo de Seguridad.

El PHA es elaborado para usarse sólo en la fase preliminar de desarrollo de la planta.

* RECURSOS NECESARIOS.

El criterio del diseño de planta disponible, especificaciones de equipo, especificaciones de materia prima , intermedia y producto terminado.

* ELABORACION.

Consiste de los siguientes pasos:

1. Obtener la información necesaria.
2. Desarrollar el Análisis preliminar de riesgos.
3. Lista de resultados.

1. Obtener la información necesaria.

Se requiere acumular, antes que todo, información disponible sobre la planta o sistema, e información relevante de experiencias pasadas con una planta similar o plano de una planta en la cual se tienen diferentes procesos pero usan equipo y materiales similares.

2. Desarrollar el Análisis Preliminar de Riesgos.

El proceso para completar el PHA, es identificar el riesgo, y eventos que podrían dar como resultado una consecuencia no deseada. El análisis debe también identificar el criterio de diseño o alternativas que pueden eliminar o reducir aquellos riesgos que llevan a un plano de riesgo excesivo. Deben considerarse los siguientes aspectos :

- a. Riesgos en el equipo y materiales de la planta.
- b. Seguridad relacionada a fases entre equipo de planta y materiales.
- c. Factores ambientales que podrían influir sobre el equipo y materiales de la planta (sismos, temperatura extrema, descargas eléctricas y humedad).
- d. Operación, prueba, mantenimiento y procedimientos de emergencia.
- e. Equipo relacionado a seguridad (sistemas de mitigación, supresión de fuego y equipo de protección personal).

3. Lista de Resultados.

Los resultados son convenientemente dispuestos de tal forma que se identifique el riesgo, la causa y la consecuencia. Los resultados incluyen recomendaciones para reducir o eliminar riesgos en la fase de diseño subsecuente.

*** EJEMPLO.**

Para ejemplificar el Análisis de Riesgos Preliminar (PHA); se analiza un tanque de almacenamiento de ácido sulfúrico.

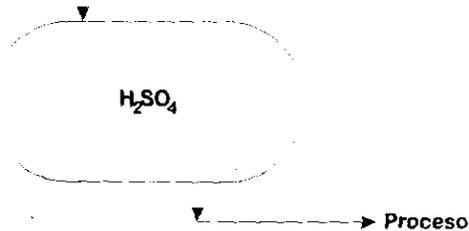


Fig 2.4 TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE ÁCIDO SULFÚRICO.

Peligro	Causa(s)	Efectos Mayores	Prevención
Liberación de tóxicos.	1) Grieta en cilindro de almacenamiento de ácido sulfúrico.	Fatalidades por liberación mayor.	a) Proveer de sistemas de advertencia. b) Minimizar el almacenamiento. c) Desarrollar procedimientos de inspección.
	2) Acido Sulfúrico no usado en el proceso.		a) Diseñar un sistema colector de exceso y quemador. b) Diseño de sistemas de control para detección de exceso y detención del proceso

2.2.5 ANALISIS " QUE PASA SI.."

* PROPOSITO Y APLICABILIDAD⁽⁷⁾.

El propósito de este análisis es considerar cuidadosamente los resultados de eventos que no se cuenta que podrían producir consecuencias adversas. El método involucra el análisis de posibles desviaciones al diseño, construcción, modificación u operación aplicando un sistema de pregunta-respuesta que inicia con " ¿qué pasa si..."

y son divididas en las áreas específicas de investigación tales como seguridad eléctrica, protección al fuego o seguridad del personal.

Cada área es dirigida por 2 o 3 expertos. Las preguntas son formuladas en base a experiencias previas y aplicadas de acuerdo a diagramas disponibles. Por la respuesta a estas preguntas, el equipo identifica los riesgos potenciales y sugiere los caminos para promover la seguridad.

Un uso muy común es examinar los cambios propuestos para una planta ya existente.

*** RECURSOS NECESARIOS.**

Documentación detallada de la planta y el proceso, procedimientos de operación y posibles entrevistas con el personal que opera la planta.

*** ELABORACION.**

El Análisis " Qué pasa si..." incluye los siguientes pasos.

1. Definir los límites de estudio.
2. Acumular información necesaria.
3. Definir el equipo de evaluación o grupo de analistas.
4. Elaboración del listado de aspectos a revisar.
5. Lista de Resultados.

1. Definir los límites de estudio.

Hay dos tipos de límite: el límite del sistema físico y el límite por la categoría de la consecuencia del riesgo. Es decir que las consecuencias como seguridad pública, daño a la planta, etc., definirán la porción de la planta a considerar. En general, esto puede dividirse en riesgo público, de trabajo y económico. Estos a su vez pueden ser divididos más específicamente en lesiones a trabajadores.

Después de que las categorías de consecuencia son definidas para el estudio, los límites físicos del estudio pueden ser definidos. El propósito de definir esos límites es mantener el equipo enfocado en porciones de la planta en las cuales la consecuencia puede ocurrir.

2. Acumular información necesaria.

La información necesaria es recolectada por los equipos de analistas. Esta información puede ser arreglada para incluir los aspectos siguientes :

- I. Flujo diario de proceso.
 1. Condiciones de operación.
 - a. Materiales de proceso usados, incluyendo propiedades físicas.
 - b. Procesos químicos y termodinámicos.
 2. Descripción del equipo.
- II. Plano de localización.
- III. Diagramas de Proceso e instrumentación.
 1. Controles
 - a. Monitores continuos.
 - b. Alarmas y su función.
 2. Instrumentación.
 - a. Gráfica.
 - b. Dimensión.
 - c. Monitores.
- IV. Operaciones.
 1. Responsabilidades y obligaciones del personal de operación.
 2. sistemas de comunicación.
 3. Procedimientos
 - a. Mantenimiento preventivo.
 - b. Calor de trabajo permisible.
 - c. Acceso al recipiente.
 - d. Señalamientos.
 - e. Emergencia.

3. Definir el equipo.

Los equipos de 2 ó 3 miembros son adecuados para cada área de investigación identificada. El equipo debe incluir :

- a. Expertos en categoría de consecuencias.
- b. Conocimiento de los procesos de planta.
- c. Experiencia general en la evaluación de riesgos.

Esto hace necesario un supervisor de línea de manufactura, un supervisor de línea de operaciones y personal para operaciones, mantenimiento e ingeniería.

4. Conducción de las revisiones.

La reunión debe empezar con una explicación básica del proceso usando la información recopilada de la planta y debe darse por el personal de la planta el cual tiene conocimiento de la misma. La presentación debe describir las precauciones de seguridad y controles del procedimiento.

Cuando los equipos están dando la información, hacen la conducción de la revisión. El equipo no debe limitarse a ellos mismos para las preguntas preparadas ¿Que pasa si...?, si no que debe usar su destreza y combinarla con la interacción del equipo para asegurar que la investigación sea completa. El tiempo necesario para completar una revisión depende del tamaño de la planta. El equipo no debe precipitarse y tampoco trabajar muchas horas consecutivas. Idealmente un equipo trabaja 4 horas por día.

5. Lista de Resultados.

Las preguntas-respuesta incluyendo riesgos, consecuencias y soluciones de importancia son todas enlistadas. El estudio es completo cuando el equipo de analistas (o equipos, si hay diferentes áreas de investigación) completa su lista y reporta los resultados al responsable individual.

Los resultados deben ser revisados con el administrador o gerente de planta y oficiales de seguridad asegurando que sean transmitidos para la acción siguiente.

***EJEMPLO**

Para ejemplificar el Análisis "Qué pasa si.."; de nueva cuenta se analiza el diagrama de obtención de Fosfato diamonio a partir de Acido fosfórico y Amoniaco de la fig 2.1.

¿Qué pasa si..?

- 1.-...un producto perjudicial es introducido en lugar del ácido fosfórico?
 - Pudiera existir una reacción violenta.
- 2.-...el ácido fosfórico está en la concentración equivocada?
 - No se obtiene el producto deseado, ni con la pureza requerida.
- 3.-...el ácido fosfórico está contaminado?
 - Las impurezas pueden reaccionar dando un producto no deseado.
- 4.-...la válvula A está cerrada?
 - No se lleva a cabo la reacción.
- 5.-...si el agitador del recipiente está sobre-especificado?
 - La reacción puede no llevarse a cabo en su totalidad o bien puede obtenerse un producto incorrecto.
- 6.-...la válvula C está cerrada?
 - El producto puede descomponerse.

Soluciones de Importancia:

- Llevar a cabo un estricto control de calidad de la materia prima
- Tener procedimientos de operación bien definidos
- Capacitación del personal
- Revisión de equipo

2.2.6 ESTUDIOS DE RIESGO Y OPERABILIDAD (HAZOP)

* PROPOSITO Y APLICABILIDAD⁽⁶⁾.

El estudio de HazOp fue desarrollado para identificar riesgos de proceso en una planta y los problemas de operabilidad, los cuales aunque no peligrosos, disminuirían la capacidad de las plantas para lograr alta productividad.

El estudio de HazOp resulta óptimo desde el punto de vista de costo cuando se aplica a nuevas plantas en el punto donde el diseño está firme y documentado o para plantas existentes donde se planea un mejor diseño.

Aunque el estudio de HazOp fué desarrollado para complementar la experiencia basada en la práctica cuando un nuevo diseño o tecnología es involucrado; su uso se ha expandido a todas las fases de vida de la planta.

* RECURSOS NECESARIOS.

El HazOp requiere descripción detallada de la planta, la cual se obtiene con los planos de localización , procedimientos y diagramas de flujo. También requiere conocimiento considerable del proceso, instrumentación y operación y esta información es usualmente proporcionada por equipos de miembros expertos en estas áreas.

* ELABORACION⁽⁶⁾.

El HazOp está basado en el principio de que varios expertos con diferentes puntos de vista pueden interactuar e identificar más problemas trabajando en conjunto y combinando sus resultados, que trabajando separadamente. Su objetivo es revisar la planta mediante una serie de reuniones durante las cuales un equipo multidisciplinario de analistas sigue la estructura prevista por las palabras guía.

Este grupo de analistas experimentado lleva sistemáticamente una guía a través del diseño de la planta usando una colección fija de palabras llamadas " palabras guía⁽⁸⁾".

Las palabras guía son simples palabras las cuales son usadas para guiar y simular el proceso ideado y descubrir desviaciones. Estas palabras guía son aplicadas tanto a parámetros más grandes (por ejemplo reacción, transferencia) como a parámetros más específicos (presión, temperatura), asegurando que el diseño es explorado en todos los caminos concebibles. La Tabla 2.2 muestra las palabras guía más utilizables ya que existen algunas modificaciones a las mismas. Estas palabras son aplicadas a puntos específicos o "nodos de estudio" en el diseño de la planta, para identificar las desviaciones potenciales de los parámetros del proceso. El equipo agrega entonces posibles causas de las desviaciones y las consecuencias. Si las causas y consecuencias son realistas y significativas, son remarcadas para la acción siguiente, la cual toma lugar fuera del estudio.

TABLA 2.2
" Palabras Guía "

Palabras Guía.	Desviación.
NO	Negación total del propósito de diseño.
MAS	Incremento de alguna propiedad física tal como flujo o temperatura a un nivel superior del propósito de diseño.
MENOS	Decremento de alguna propiedad física tal como flujo o temperatura a un nivel inferior del propósito de diseño.
ASI COMO	Algo ocurre en adición al propósito de diseño del sistema.
PARTE DE	Sólo se logra parte del propósito de diseño.
REVERTIR	Regresar al propósito del diseño.
ALGO DISTINTO	Se logra algo distinto al propósito del diseño.
MAS QUE	Se tienen más componentes presentes en el sistema de los que deben existir.

El procedimiento del HazOp consta de los siguientes pasos:

1. Definir el propósito, objetivos y esfera de acción del estudio.
2. Seleccionar el equipo de análisis.

3. Preparación del estudio.
4. Realización de la revisión.
5. Lista de Resultados.

1. Definir el propósito, objetivos y esfera de acción del estudio⁽⁶⁾.

Deben hacerse lo más explícito posible. Estos objetivos son normalmente fijados por el personal responsable de la planta o proyecto, asistido por el líder del estudio HazOp. Es importante que esta interacción tome lugar para proporcionar la autoridad para el estudio y asegurar que sea bien enfocado. Aunque el objetivo general es identificar riesgos y problemas de operabilidad, el equipo debe enfocarse en el propósito o razón del estudio. Algunas razones para el estudio podrían ser :

- ⇒ Verificar la seguridad del diseño.
- ⇒ Decidir donde se construirá.
- ⇒ Verificar los procedimientos de operación/seguridad.
- ⇒ Proveer de seguridad donde exista la posibilidad de un accidente.
- ⇒ Verificar que la instrumentación de seguridad está respondiendo de acuerdo a los parámetros.

2. Seleccionar el equipo de analistas^(6,7).

Idealmente el equipo consiste de 5 a 7 miembros. El líder del equipo debe tener experiencia en HazOp y el resto del equipo debe ser experto en áreas relevantes al plan de operación, por lo que un equipo debe incluir:

- ⇒ Líder del equipo HazOp.
- ⇒ Ingeniero de procesos.
- ⇒ Ingeniero de mantenimiento.
- ⇒ Representante de seguridad si el problema tiene implicaciones de seguridad.

- ⇒ Ingeniero ambientalista, si el problema es de interés ambiental.
- ⇒ Supervisor y operador si el problema a estudiar ya está en operación.

El líder del equipo debe mantener diversos factores en mente para asegurar que: (1) los miembros no compitan; (2) tener cuidado de escuchar a todos los miembros de la asamblea; (3) durante las reuniones no permitir que ninguno tome una posición defensiva; (4) mantener un nivel alto de energía; esto es, descansar cuando sea necesario.

3. Preparación del estudio.

La preparación del estudio depende del tamaño y complejidad de la planta y consiste de 3 fases :

- a. Obtener los datos necesarios.
- b. Conversión de datos.
- c. Programar las reuniones requeridas.

a. Obtener los datos necesarios.

Típicamente los datos consisten de diagramas de tubería, diagramas de proceso, planos de localización de la planta, isométricos y dibujos de fabricación. Adicionalmente debe haber instrucciones de operación, cartas de control, diagramas lógicos y programas de computadora. Los datos deben ser inspeccionados para asegurarse de que pertenezcan al área definida de estudio y no contener discrepancias o ambigüedades.

b. Llevar los datos a una forma conveniente y planear la secuencia de estudio.

Los datos obtenidos se deben arreglar de tal que se pueda planear la secuencia del estudio y las sesiones.

El líder del equipo de analistas usualmente prepara un plan de secuencia de estudio, antes del inicio del mismo para asegurar que dicho equipo se aproxime a la metodología de operación de la planta. La planeación del trabajo depende del tipo de planta, siendo mínima para plantas continuas.

En plantas donde el proceso es por lotes; el trabajo preparativo es usualmente más extenso; ya que se necesita un manual de operaciones, así, las secuencias de operación son representativas de una gran parte del HazOp.

El equipo de estudio, al iniciar el trabajo y en el transcurso de éste aplica las palabras guía a nodos específicos de estudio. Estos nodos son establecidos por el líder del equipo antes de alguna reunión. El líder del equipo generalmente define los nodos de estudio en secciones de tubería. Entre estos nodos están los componentes fundamentales de la planta (bombas, tanques, cambiadores de calor, etc.) que causan cambios en los parámetros entre nodos.

c. Programar las reuniones necesarias.

El primer requerimiento es para estimar las horas de trabajo que el equipo necesita para el estudio. Después de esto el líder del equipo puede preparar las reuniones. Idealmente cada sesión no debe ser mayor de 3 horas (preferentemente en la mañana). Las sesiones largas son indeseables porque usualmente crean fallas.

4. Realización de la Revisión.

El estudio HazOp requiere que el plan sea dividido en nodos de estudio y que los procesos en esos puntos sean dirigidos con la guía de palabras. Generalmente se descubre lo siguiente: 1) Se necesita más información, 2) la desviación con sus causas y consecuencias.

El siguiente esquema muestra la secuencia de la revisión:

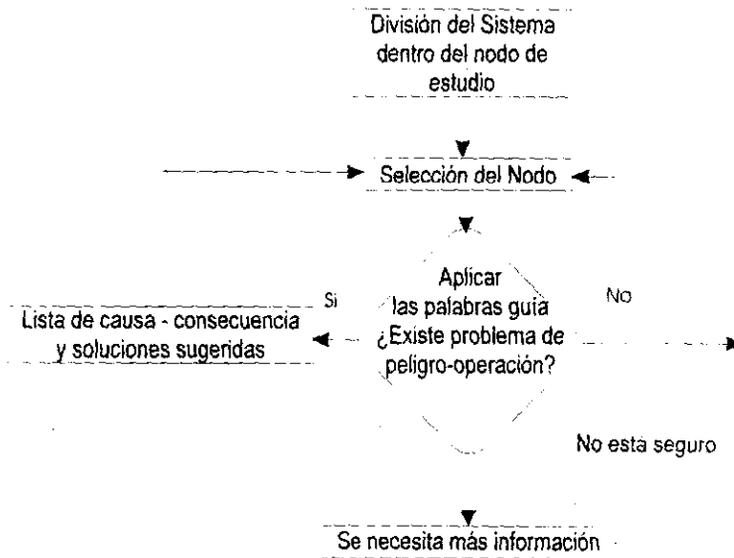


Fig. 2.5 SECUENCIA DE LA REVISIÓN HAZOP.

5. Lista de Resultados.

Un formato de HazOp debe ser llenado durante las reuniones. Los resultados son llevados a una tabla donde se enlistan los tópicos, descripción de las desviaciones, identificación de causas posibles por el equipo, consecuencias de las desviaciones y recomendaciones del equipo.

* EJEMPLO.

Obtención de Fosfato Diamonio a partir de Acido Sulfúrico y Amoniaco;

analizado por el método HazOp.

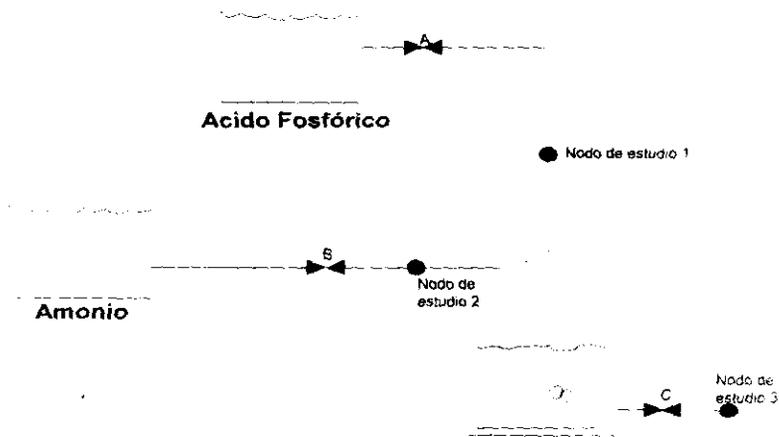


Fig. 2.6 REVISIÓN HAZOP DE LA PRODUCCIÓN DE FOSFATO DE DIAMONIO

INO

a) No hay flujo por el nodo de estudio 1

Consecuencia: Exceso de amonio en el reactor.

Causa:

- Válvula "A" tiene falla de cierre.
- Suministro de ácido fosfórico agotado.
- Ruptura de tubería

Acción sugerida: Cierre automático de válvula **B** por pérdida de flujo desde el suministro de ácido fosfórico.

II MENOS

Menor flujo.

Consecuencia: Exceso de amoniaco en el reactor.

Causa: Válvula "A" parcialmente cerrada. Obstrucción parcial o gotera en tubería.

Acción sugerida: Cierre automático de la válvula **B** basado en la reducción del flujo en la tubería de suministro de ácido fosfórico.

El mismo análisis se completando el estudio de nodo y continúa con las otras palabras guía: **MAS, PARTE DE, TANTO COMO, REVERSA**, etc. para cada uno de los siguientes nodos de estudio.

2.2.7 ANALISIS DE MODO Y EFECTO (FMECA).

* PROPOSITO Y APLICABILIDAD.

El FMECA se refiere enteramente al equipo, las formas en que puede fallar, los efectos que pueden generarse y estimación de probabilidad de fallas. Estos datos proveen bases para determinar dónde pueden hacerse cambios aumentando la probabilidad de que el diseño funcione satisfactoriamente.

Cada falla es considerada individualmente como un suceso independiente sin relación a otras fallas en el sistema, excepto los efectos subsecuentes que deberían producirse. Generalmente un FMECA es completado primero sobre bases cualitativas. Los datos cuantitativos pueden ser aplicados para establecer un rango crítico por el sistema o subsistemas.

Los errores humanos generalmente no son examinados en un FMECA, además éste no es eficiente para identificar combinaciones de fallas de equipo que lleven a accidentes.

*** ELABORACION.**

El modelo consta de los siguientes pasos :

1. Determinar el nivel de solución.
2. Definir el problema y condiciones de límite.
3. Completar la tabla de resultados.
4. Reporte de resultados.

1. Determinar el nivel de solución.

El FMECA debe enfocarse sobre el sistema individual o subsistemas en la planta y sobre su modelo de fallas y efectos con respecto al nivel de riesgo.

Si existe un peligro a nivel de planta, el FMECA debe enfocarse sobre el sistema individual o subsistemas de la planta y en sus modelos de fallas y efectos con respecto al peligro que representa para la planta; por ejemplo, el sistema de alimentación, sistema de mezclado en lotes y los diferentes sistemas que hacen la planta. Cuando un peligro es a nivel sistema, el FMECA debe enfocarse sobre el equipo individual que hace el sistema y en sus modelos de fallas y efectos con respecto al peligro a nivel sistema, por ejemplo: el bombeo de la alimentación, válvulas de control de flujo y sistemas de alarma, etc.

2. Definir el problema y condiciones límite.

Los requerimientos mínimos para la definición del problema incluyen :

- ⇒ Identificar la planta y/o sistemas que son el sujeto del análisis.
- ⇒ Establecer el sistema físico que rodea el equipo contenido en el FMECA. Especificando las interfaces con otros procesos y sistemas de servicio y qué porciones de estas fases son incluidas en el FMECA. Uno de los caminos para indicar el sistema físico es marcarlos sobre un diagrama que rodea todo el equipo.
- ⇒ Colectar los datos de referencia que identifican el equipo de proceso y su función relacionada al sistema. Es necesario que esta información sea referente a todo el equipo incluido dentro del sistema.

⇒ Proveer de un rango crítico, el cual puede ser definido en términos de probabilidad de falla, la severidad del accidente resultante, o una combinación de estos factores. La definición del problema puede también incluir otras facilidades o procesos específicos asumiendo que tienen influencia directa sobre los efectos resultantes de las fallas de equipo.

3. Llenar la Tabla de Resultados.

Una tabla debe ser producida iniciando con un límite del sistema sobre un dibujo de referencia y evaluar los aspectos importantes en el orden en que aparezcan.

Todo lo referente a cada equipo o sistema dirigido en el FMECA deben ser concluido antes de proceder con el siguiente aspecto.

4. Reporte de Resultados.

El resultado de un FMECA es una tabulación de los efectos de las fallas de equipo dentro del proceso o sistema. La identificación del equipo provee una referencia directa entre el equipo y el diagrama de tubería e instrumentación o los diagramas de flujo. El rango crítico provee una medida relativa de los modos de falla del equipo y su contribución al riesgo del sistema tal como indica la tabla 2.3

Tabla 2.3

RANGO CRITICO

Efectos	Rango de Crítico
Ninguno	1 (lo mejor)
Proceso con desorden menor , riesgos pequeños. No requiere paro de proceso.	2
Procesos con desorden mayor. Riesgos significativos. Requiere paro ordenado del proceso.	3
Riesgo inmediato. Paro de emergencia del proceso.	4 (lo peor)

Los resultados del FMECA son muy usados en otros métodos de evaluación de riesgos. Por ejemplo, en conjunción con el HazOp, el FMECA provee un sumario de los peligros asociados con el componente de falla. También es muy útil en el análisis de árbol de fallas, árbol de eventos y análisis causa-consecuencia.

* EJEMPLO

La siguiente figura muestra la realización del Análisis de Modo de Falla, Efecto y el Rango Crítico. El esquema consta de una pequeña parte de un proceso que incluye una bomba que alimenta a un intercambiador de calor.

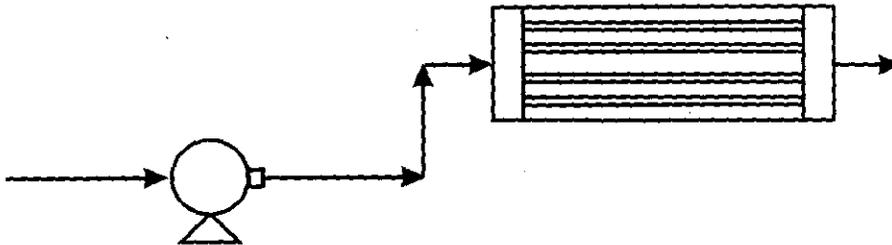


Fig. 2.7 ALIMENTACIÓN A UN INTERCAMBIADOR DE CALOR

De acuerdo a este diagrama, el FMECA queda como sigue:

Descripción del equipo.	Modo de Falla	Efecto	Rango Crítico *
Bomba, operación normal	a. Falla de paro cuando se requiere b. Ruptura de sello o Ruptura de coraza.	Proceso ligeramente desordenado. Riesgos pequeños. No requiere paro de proceso.	2
Intercambiador de calor	a. Ruptura de tubos. b. Ruptura de coraza.	Riesgo menor No requiere paro de proceso.	2

* El Rango para este ejemplo está basado en el Cuadro de Efectos y Rango Crítico mostrado en el punto 5 "Reporte de Resultados"

2.2.8 ANALISIS DE ARBOL DE FALLAS (FTA).

* PROPOSITO Y APLICABILIDAD.

El Arbol de Fallas es una representación gráfica de la relación entre las fallas de equipo de proceso y un accidente específico. Ayuda a identificar combinaciones entre fallas de equipo, errores humanos e incidentes ambientales que dan como resultado un accidente.

*RECURSOS NECESARIOS.

- a. Un completo conocimiento de las funciones de la planta y/o sistema.
- b. El conocimiento de las fallas del equipo del sistema y/o planta y sus efectos sobre el mismo. Esta información puede ser obtenida de un FMECA.

- **PERSONAL REQUERIDO.**

Un analista debe ser el responsable, y habrá ingenieros, operadores y otro personal que tenga experiencia con el sistema y equipo incluidos en el análisis.

- **ELABORACION.**

Para elaborar el organigrama; en la parte superior del mismo se encuentra el incidente no deseado. Los subsecuentes niveles inferiores o ramas identifican todas las fallas o combinaciones de fallas que pueden causar el incidente no deseado. Los siguientes símbolos son usados en la construcción del árbol de fallas para estas relaciones :

TABLA 2.4

Símbolo	Significado
	Compuerta Lógica "o".- Indica que los eventos producidos ocurren si alguno de los eventos de falla ocurren.
	Compuerta Lógica "y".- Indica que los eventos producidos ocurren sólo cuando todos los eventos ocurren.
	Barrera de Inhibición .- Sucede cuando el evento de falla se realiza y la condición de inhibición es satisfecha.
	Retraso .- Indica que el evento ocurre cuando el evento causante se ha realizado y el tiempo de retraso especificado ha expirado.
	Evento Básico .- Representa una falla de equipo base.
	Evento Intermedio .- Representa un evento falla que resulta de la interacción entre otros eventos falla que son desarrollados a través de puertas o barreras lógicas tales como las anteriormente definidas.
	Evento No Desarrollado .- Representa un evento falla que no es examinado ya sea porque la información no está disponible o bien porque su consecuencia es insignificante.
	Evento Externo .- Representa una condición o evento que es asumido como una condición del árbol de fallas.
	Símbolo de Transferencia .- Indica que el árbol de fallas es desarrollado en la ocurrencia del símbolo correspondiente de transferir fuera. Estos símbolos son caracterizados usando números o un sistema de código para asegurar que ellos pueden diferenciarse

Los defectos del equipo de procesos y sus fallas, que son descritas en un árbol de fallas pueden ser agrupadas en tres clases:

- ⇒ Defectos primarios.
- ⇒ Defectos secundarios.
- ⇒ Ordenamiento de fallas y defectos.

Los defectos primarios son aquellos donde la falla del equipo no puede atribuirse a algunas fuerzas o condiciones externas.

Los defectos secundarios son aquellos donde la falla del equipo puede atribuirse a algunas fuerzas o condiciones externas.

Ordenamiento de fallas y defectos se refiere a disfunciones del equipo en el cual los componentes operan apropiadamente pero en el tiempo o lugar incorrecto.

La construcción del análisis tiene 4 pasos :

1. Definición del problema.
2. Construcción del árbol de fallas.
3. Solución del árbol de fallas.
4. Rango mínimo.

1. Definición del problema.

La definición del problema consiste en :

- ⇒ Definir un evento tope, el evento accidente que es el sujeto del árbol de fallas.
- ⇒ Definir las condiciones de análisis incluyendo :
 - ⇒ Eventos no autorizados.
 - ⇒ Eventos existentes.
 - ⇒ Límites físicos del sistema.
 - ⇒ Nivel de solución.

La definición de un evento tope es uno de los aspectos más importantes en la definición del problema.

El evento tope es el accidente o evento no deseado el cual es el sujeto del análisis, y debe ser definido precisamente para el sistema o planta bajo estudio.

Las condiciones del análisis son necesarias para definir los "accidentes" que eventualmente hacen el árbol de fallas. Estas condiciones describen el sistema en su estado normal y de falla.

2. Construcción del Arbol de Fallas⁽⁷⁾.

La construcción empieza en el evento tope y procede plano por plano, hasta que todos los eventos falla han sido desarrollados en sus causas de contribución básica. El siguiente nivel determina las causas necesarias y suficientes, que dan como resultado el evento tope. Normalmente no son causas básicas pero son fallas intermedias que requieren desarrollo adicional. Si el análisis puede determinar inmediatamente las causas básicas del evento tope, el problema no es conveniente para un árbol de fallas y puede ser evaluado por otros métodos. Si una de las causas inmediatas da como resultado directamente en el evento tope, las causas son conectadas al evento tope con una compuerta lógica "o". Si todas las causas inmediatas son necesarias para que una ocurrencia del evento tope, entonces las causas son conectadas con una compuerta lógica "y".

Cada una de las causas inmediatas es entonces tratada de la misma forma que el evento tope, y sus causas inmediatas, necesarias y suficientes son determinadas y mostradas con la simbología apropiada. Este proceso continúa hasta que todas las fallas intermedias han sido desarrolladas dentro de sus causas básicas.

Reglas para la construcción del Arbol de Fallas.

a. Condiciones de los eventos de falla.

Escribir las condiciones en las cajas y círculos de eventos (simbología de la Tabla 2.4), precisar qué falla es, dónde está y cuándo ocurre.

b. Evaluación del evento.

Cuando se evalúa una falla, responde la pregunta ¿Esta falla puede consistir en una falla del equipo de proceso?. Si la respuesta es "sí el evento", se denomina un evento "Estado de fallas de equipo". Si la respuesta es "no", se denomina como un "estado de fallas de sistema".

c. Regla " no milagros ".

Si se tiene una falla y la función del equipo de proceso es normal; entonces se crea una secuencia de fallas, por lo tanto se debe considerar que el equipo funciona normalmente. Nunca considerar el "milagro" de que la falla inesperada de algún equipo interrumpe o previene la ocurrencia de un accidente.

d. Completar el nivel.

En el árbol de fallas cada nivel debe ser completado antes de iniciar el siguiente nivel.

La figura 2.8. muestra la construcción del FTA.

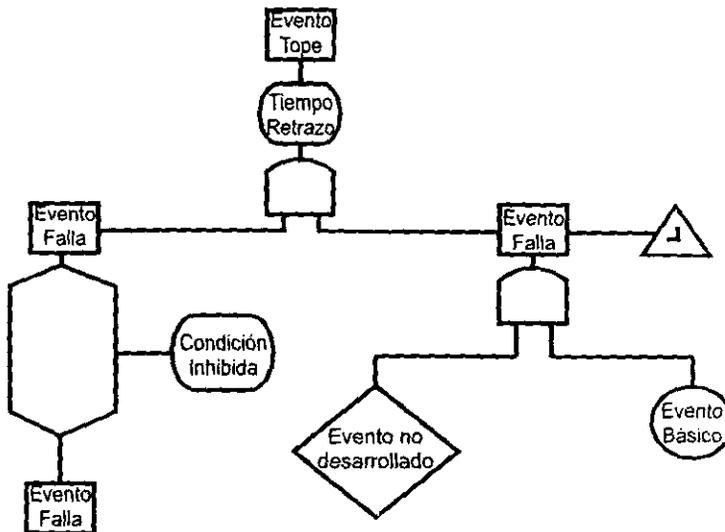


Fig. 2.8 ESQUEMA DE UN ARBOL DE EVENTOS

3. Solución del Arbol de Fallas.

Completar el árbol provee de mucha información por las interacciones entre las fallas de equipo de proceso que darían como resultado en un accidente.

Una vez construido el organigrama de fallas puede ser utilizado para estimar la frecuencia del incidente superior. En la primera etapa de la cuantificación, el organigrama se reduce a una forma matemáticamente equivalente usando álgebra Booleana. Los grupos de incidentes básicos que pueden causar el incidente superior se denominan conjuntos superiores. Con la aplicación de la "ley de la absorción" del álgebra Booleana, estos conjuntos se reducen a un grupo de incidentes básicos que son justo lo suficiente para desencadenar el incidente superior. Este conjunto de incidentes básicos se llama conjunto mínimo. La probabilidad de que ocurra el incidente superior es la sumatoria de las probabilidades de los conjuntos mínimos.

4. Rango mínimo.

Para un rango cualitativo, se pueden considerar dos factores. Primero es la importancia estructural, la cual está basada sobre un número de eventos base que están en cada corte. En este tipo de rango, un evento mínimo es más importante que dos eventos mínimos y así sucesivamente.

Este rango implica que un error humano es más frecuente que una falla de equipo de proceso en funcionamiento, y ésta a su vez es más frecuente que una falla de equipo no muy utilizado.

*** EJEMPLO.**

Para ejemplificar la realización del Arbol de Fallas (FTA); la fig. 2.5 muestra un sistema que consiste de un reactor para un proceso altamente inestable, que es sensible a pequeños incrementos de temperatura. El sistema es equipado con un tanque extinguidor para protegerlo de una reacción incontrolada.

El tanque extinguidor debe inundar el reactor y el flujo de alimentación debe parar. El proceso del reactor es monitoreado por 2 sensores de temperatura (T_1 y T_2). El sensor T_1 activa automáticamente la válvula de salida del tanque extinguidor cuando se detecta una elevación de temperatura. Al mismo tiempo, el sensor T_2 suena una alarma en el cuarto de control para alertar al operador así como el botón para cerrar la válvula de alimentación del reactor y apriete el botón para abrir la válvula del tanque extinguidor en caso de que el sensor T_1 falle.

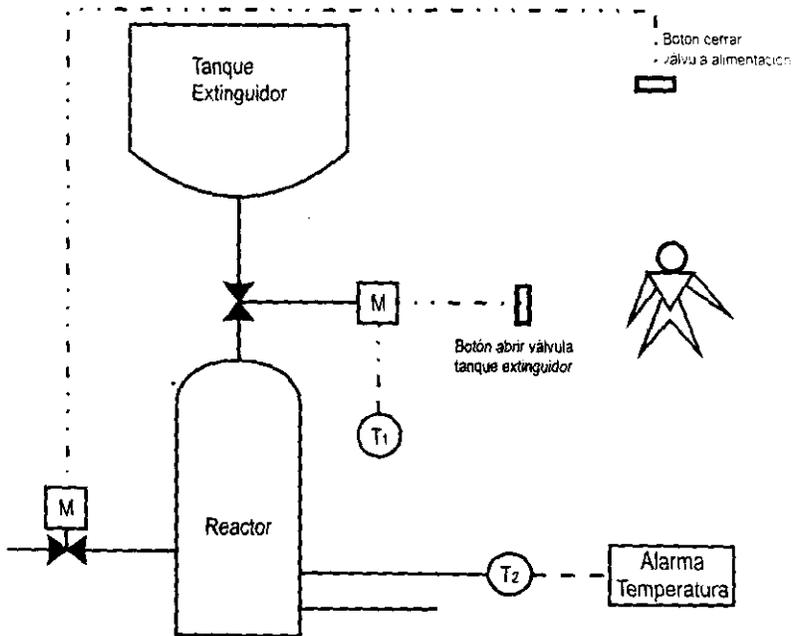


Fig. 2.9 PROCESO AUTOMATIZADO (ALTAMENTE INESTABLE)

La figura 2.10 muestra la construcción del árbol de fallas para el ejemplo.

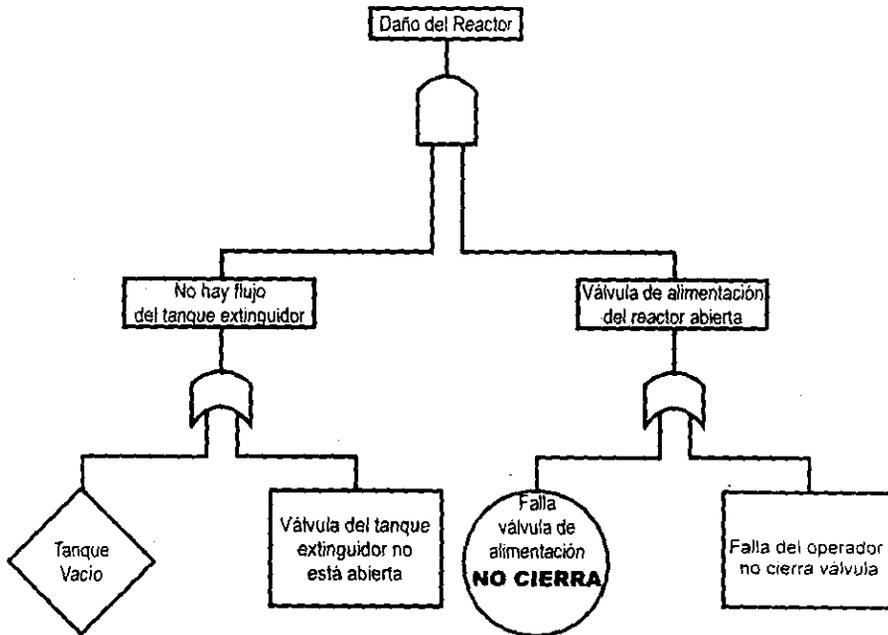


Fig. 2.10 ÁRBOL DE FALLAS PARA EL EVENTO

2.2.9 ARBOL DE EVENTOS (ETA).

* PROPOSITO Y APLICABILIDAD⁽⁷⁾.

El árbol de eventos (ETA), identifica la secuencia de eventos siguiendo un evento inicial que dé como resultado un accidente; en contraste con el FTA, el ETA usa lógica progresiva hacia adelante para determinar las secuencias de un accidente.

A menudo se usan este tipo de organigramas para describir la historia cronológica de un accidente y la mitigación promedio de algún sistema de seguridad o procedimiento en el curso del accidente.

Los resultados pueden usarse para la incorporación del sistema de seguridad faltante al diseño de la planta. También se puede evaluar la existencia de características de seguridad adecuados o examinar las fallas de equipo.

*** RECURSOS NECESARIOS.**

a. Conocimiento de eventos iniciales; esto es, fallas de equipo de proceso o sistemas que pueden causar accidentes potenciales.

b. Conocimiento del funcionamiento de los sistemas de seguridad y los procedimientos de emergencia que mitigarían los efectos de un evento inicial.

*** ELABORACION.**

El organigrama de ETA empieza con el suceso inicial a la izquierda. De ahí se ramifica a los subsecuentes sucesos exitosos y/o fallas y errores que pueden emanar del incidente inicial. En cada punto crítico se hacen preguntas acerca de la posibilidad de ocurrencia de diferentes tipos de daño.

El procedimiento general contiene 4 pasos :

1. Identificar el evento inicial.
2. Identificar las funciones de seguridad diseñadas para el evento inicial.
3. Construcción del árbol de eventos.
4. Descripción de la secuencia del accidente.

1. Identificar el evento inicial.

Este evento debe ser una falla de equipo de proceso o sistema, error humano o un proceso que de como resultado una variedad de efectos dependiendo de cómo el operador o sistema responden al evento. En muchas aplicaciones del árbol de eventos, el evento inicial es anticipado, de tal forma que el diseño de planta incluye sistemas o procedimientos que son creados para responder y mitigar los efectos del evento inicial.

2. Identificar las funciones de seguridad diseñados para el evento inicial.

Las funciones de seguridad que responden al evento inicial pueden ser a través de defensas de planta, estas funciones usualmente incluyen:

- . Sistemas de seguridad que responden automáticamente al evento inicial (incluyendo sistemas de paro automático).
- . Alarmas que alerten al operador cuando el evento inicial ocurra.
- . Acciones del operador diseñadas para perfeccionar la respuesta a alarmas o procedimientos.
- . Barreras o métodos que son creados para limitar los efectos del evento inicial.

El análisis debe identificar todas las funciones de seguridad que puedan cambiar el resultado del evento inicial en el orden cronológico al que ellos responden. La descripción de estas funciones de seguridad deben incluir su propósito inicial. Los sucesos y las fallas de las funciones de seguridad son contabilizadas por el árbol de eventos.

3. Construcción del Arbol de Eventos⁽¹⁰⁾.

El árbol de eventos desarrolla cronológicamente los accidentes, comenzando con el evento inicial y procediendo a través de sucesos y/o fallas de las funciones de seguridad que responden al evento inicial. Los resultados son accidentes claramente definidos que pueden resultar del evento inicial.

El primer paso en la construcción del árbol es que el evento inicial se encasilla en el lado izquierdo de la página, y las funciones de seguridad son listadas en orden cronológico en la parte superior de la página. La línea debajo de la descripción del evento inicial representa la progresión del accidente desde que ocurre el evento inicial a la primera función de seguridad.

El siguiente paso es evaluar la función de seguridad. Sólo dos posibilidades son consideradas: suceso de la función de seguridad y falla de la función de seguridad. Esta evaluación considera que el evento inicial ha ocurrido.

El análisis podría decidir en todo caso, los sucesos o fallas de la función de seguridad que afectan durante el transcurso del accidente. Si el accidente es afectado, una rama de división es insertada en el árbol de eventos para distinguir entre el éxito y la falla de la función de seguridad. Normalmente el éxito de la función es denotada por una trayectoria ascendente y la falla de la función por una trayectoria descendente. Si la función de seguridad no afecta el transcurso del accidente, la trayectoria del accidente continúa a la siguiente función sin puntos de ramificación.

Cada punto de división desarrollado en el árbol de eventos crea trayectorias de accidentes adicionales que pueden ser evaluados individualmente por cada uno de los sistemas de seguridad subsecuentes.

Cuando se evalúa una función de seguridad sobre una trayectoria de accidente el análisis debe tomar las condiciones (sucesos previos y fallas) dictadas por la trayectoria del accidente sobre la función de seguridad.

4. Descripción de la secuencia del accidente.

La secuencia representa una variedad de consecuencias que pueden seguir al evento inicial. Una o más secuencias pueden representar un regreso a la seguridad o a las operaciones normales o a un paro ordenado.

Una vez que las secuencias son descritas, el analista puede distinguir los accidentes basados sobre la severidad de las consecuencias.

La estructura del árbol de eventos, muestra claramente la progresión del accidente, ayuda al analista a especificar dónde los procedimientos o sistemas de seguridad podrían ser más efectivos en la protección de accidentes.

*** EJEMPLO.**

Se ilustra el método de Arbol de Eventos con el siguiente esquema. Se tiene un reactor de oxidación sujeto a incrementos de temperatura. Tiene sensores de temperatura T1 y T2.

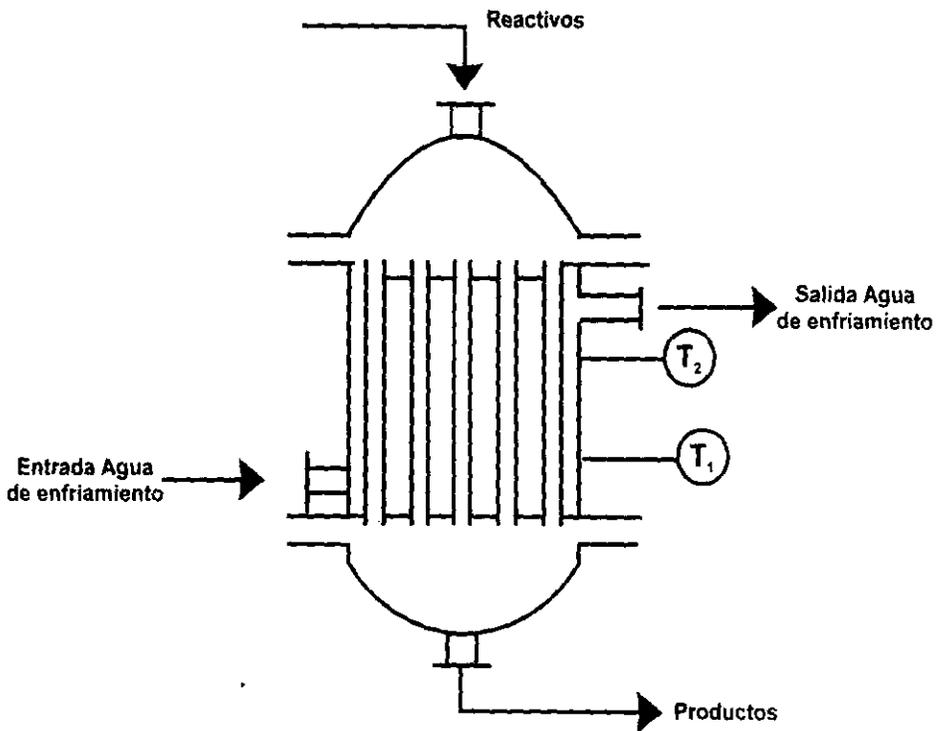


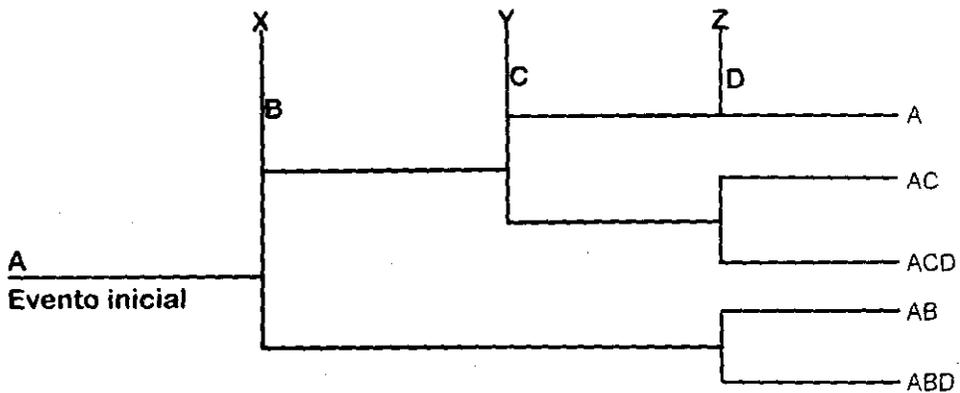
Fig. 2.11 REACTOR DE OXIDACIÓN

Evento Inicial : Pérdida de agua de enfriamiento para el reactor de oxidación.

Identificación de las funciones de seguridad :

- A. Alarma de alta temperatura. Alerta al operador a la temperatura T_1 .
- B. El operador restablece el flujo de agua de enfriamiento para el reactor de oxidación.
- C. Sistema de paro automático. La reacción se detiene a la temperatura T_2 .

CONSTRUCCION DEL ARBOL DE EVENTOS



- A: Condición de seguridad. Retorno a operación normal.
- AC: Condición de seguridad. Detención del proceso.
- ACD: Condición insegura. Reacción incontrolable El operador está enterado del problema.
- AB: Condición inestable. Paro de proceso.
- ABD: Condición insegura, escape de reacción. El operador no está enterado del problema.

2.2.10 ANALISIS CAUSA - CONSECUENCIA.

* PROPOSITO Y APLICABILIDAD⁽⁷⁾.

El Análisis Causa-Consecuencia combina las características del análisis del árbol de eventos con el análisis de árbol de fallas. El resultado es una técnica que relaciona consecuencias de accidentes específicos con sus posibles causas básicas. Su ventaja para el análisis es que usa un método gráfico que puede proceder en ambas direcciones: siguiendo la consecuencia anterior del evento y la causa básica del evento.

El resultado es un diagrama causa-consecuencia que describe la relación entre la consecuencia del accidente y sus causas básicas. La solución del diagrama para la secuencia del accidente particular es mediante un conjunto mínimo. Estos juegos son análogos al árbol de fallas porque representan todas las combinaciones de causas básicas que pueden resultar en la secuencia del accidente.

*** RECURSOS NECESARIOS.**

- a. Conocimiento de las fallas de componentes del proceso que podrían causar accidentes.
- b. Conocimiento de los sistemas de seguridad y procedimientos de emergencia que pueden evitar un accidente.

*** ELABORACION.**

El análisis consta de 6 pasos :

1. Seleccionar un evento para ser evaluado.
2. Identificar las funciones de seguridad que influyen el curso del accidente.
3. Desarrollar la trayectoria del accidente que resulte del evento (Análisis árbol de eventos).
4. Desarrollar el evento y la función de seguridad del evento falla para determinar sus causas básicas.
5. Determinar el conjunto mínimo de la secuencia del accidente.
6. Evaluar los resultados del análisis.

1. Seleccionar un evento para ser evaluado.

Los eventos analizados pueden definirse en dos caminos :

- . Evento tope (como en árbol de fallas).
- . Evento inicial (como en árbol de eventos).

El evento de interés es sin embargo, un evento falla o una falla de equipo. La información adicional para seleccionar estos eventos puede ser encontrada en las secciones apropiadas del procedimiento del árbol de fallas y árbol de eventos.

2 y 3. Identificar las funciones de seguridad (sistemas, acciones del operador, procedimientos, etc.) que influyen el transcurso de los resultados del evento y desarrollo de la trayectoria del accidente. .

Para (2) y (3) las diferentes trayectorias de accidentes son construidas en base al suceso cronológico. La primer diferencia entre el árbol de eventos y causa-consecuencia es el símbolo usado en el diagrama,(como lo muestra la fig. 2.13).

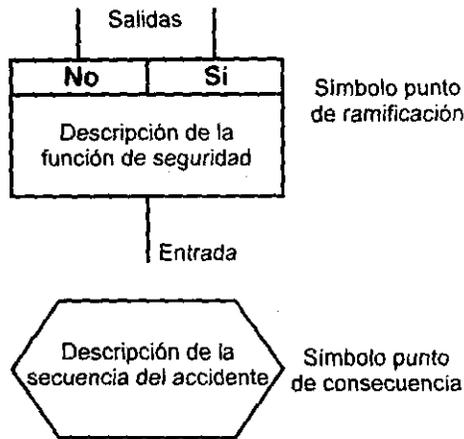


Fig. 2.13 SIMBIOLOGÍA DE ANÁLISIS CAUSA-CONSECUENCIA

4. Desarrollar el evento y la función de seguridad del evento falla para determinar las causas básicas (análisis árbol de fallas).

5. Determinar el conjunto mínimo de la secuencia del accidente.

La secuencia del accidente es compuesta de una secuencia de eventos, cada uno de los cuales es un evento tope. Estos datos son manejados como en el árbol de fallas.

6. Evaluar los resultados del análisis.

Para evaluar los resultados de causa-consecuencia se utiliza un proceso de dos pasos. Primero las secuencias del accidente son distinguidas en base a su severidad y a la importancia para la seguridad de la planta. Entonces para cada secuencia de accidente importante, el conjunto mínimo de la secuencia del accidente puede ser distinguido para determinar las causas básicas más importantes.

2.2.11 ANALISIS DE ERRORES HUMANOS.

*** PROPOSITO Y APLICABILIDAD.**

El análisis de errores humanos identifica cuáles de éstos son potenciales y sus efectos o bien sus causas. Es una evaluación sistemática de los factores que influyen en los operadores, grupo de mantenimiento, técnicos y otro personal de la planta.

Puede usarse para identificar fallas en herramienta y fallas en el diseño de trabajo las cuales producen un alto rango de errores humanos. Evalúa los efectos de las modificaciones en el diseño sobre la perfección del operador.

*** RECURSOS NECESARIOS.**

- a. Procedimientos de planta.
- b. Información de las entrevistas del personal de la planta.
- c. Conocimiento de la disposición de la planta y la función de la misma.
- d. Disposición del cuarto de control y de los sistemas de alarma.

*** PERSONAL REQUERIDO.**

Se necesita de un analista que debe estar familiarizado con las técnicas de entrevista y debe tener acceso a la planta y a la información pertinente tales como procedimientos y diagramas. Debe estar familiarizado también con las consecuencias de varios tipos de errores humanos.

2.3 SELECCION DEL PROCESO

Después de conocer el estado de desarrollo del proceso, se determinará qué pasos del proceso de evaluación de riesgos necesitan ser completados y conociendo el propósito de la evaluación, ya es posible referirse a la tabla 2.5 para encontrar los procedimientos que podrían ser utilizados. La selección entre estos puede hacerse en base a sus atributos y entendiendo los factores que son importantes al escoger.

TABLA 2.5 PROCEDIMIENTO DE EVALUACION DE RIESGOS

Pasos en el proceso de evaluación	Listas de verificación	Revisión de seguridad	Rango relativo Mond-Dow	Análisis preliminar	Análisis ¿qué pasa si...?	Hazop	Modelo de fallas, efectos y análisis de criticabilidad	Arbol de fallas	Arbol de eventos	Análisis Causa Consecuencia	Análisis de errores humanos
Desviación de la buena práctica	Pp	Pp	Pp								
Identificar riesgos	Pp	Pp	Pp	pp	pp	pp	pp	pp			
Estimar consecuencias			Pp		pp	pp	pp				
Oportunidades de reducir consecuencias			Pp	p.sec.		aux	aux				
Identificar eventos iniciales					pp	pp	pp	pp			pp
Estimar probabilidad de evento inicial						aux	aux	pp		pp	
Oportunidad para reducir evento inicial								pp		pp	pp
Secuencia de eventos iniciales y consecuencias					pp			pp	pp	pp	
Estimar la probabilidad de la secuencia de eventos								pp	pp	pp	
Estimar magnitud de las consecuencias									pp	pp	
Oportunidad para reducir probabilidad y/o consecuencias									pp	pp	Pp
Evaluación cuantitativa de riesgos								Pp	pp	pp	Pp

CONCLUSIONES DEL CAPITULO.

Existen diferentes metodologías de análisis de riesgos y cada una puede ser aprovechada al máximo siempre que la seleccionemos adecuadamente; esto es, tomando en cuenta el propósito de la evaluación, la información disponible, el tamaño del proceso/sistema y tiempo y costo de la evaluación.

Con ayuda de la tabla de procedimientos se puede determinar en primera instancia aquellos que sean utilizables.

Otro punto de interés es que será necesario para cualquier método la disponibilidad y conocimiento de los diagramas de proceso, diagramas de tubería e instrumentación, etc., y planes de arranque, operación normal y paro de la planta y/o sistema, así como planes de emergencia.

La importancia de este capítulo radica en el conocimiento de los factores de selección de la metodología de evaluación así como de la descripción de la misma. Todo lo anterior apoyará para determinar las medidas de prevención y/o control de riesgos (objetivo fundamental del Análisis de Riesgos).

CAPITULO III

DEFLAGRACIÓN Y DETONACIÓN DE NUBES INFLAMABLES

Siguiendo con el esquema propuesto para abordar el tema de Evaluación de Consecuencias (partiendo de lo general a lo particular), expuesto al inicio del trabajo; en este capítulo se tiene como objetivo el explicar qué es una deflagración y una detonación de nubes inflamables y para ello se iniciará especificando qué es una deflagración y una detonación, posteriormente se definirá lo que es una nube inflamable y los factores que intervienen en la formación de la misma. Una vez explicado lo anterior, se entrará a lo que es propiamente una deflagración y una detonación de dichas nubes lo que forzosamente llevará a conocer aspectos importantes como son: límites de explosividad, velocidad de flama, gases tóxicos, etc., que darán a la explosión ciertos rangos de afectación lo cual será analizado en el capítulo IV.

3.1 DEFLAGRACIÓN Y DETONACIÓN ⁽¹⁴⁾.

Las sustancias explosivas producen dos clases de reacciones violentas y luminosas: una de ellas comprende la inflamación de gases y la deflagración de líquidos y sólidos; y la otra las detonaciones.

Deflagración es la propagación de una zona de combustión a una velocidad que es menor a la velocidad del sonido. En la deflagración, la llama progresa en condiciones esencialmente isobáricas en toda la sustancia reactiva. La velocidad de propagación de una llama por mezclas gaseosas homogéneas varía desde unos cuantos centímetros hasta varios metros por segundo. En deflagraciones de explosivos sólidos la reacción se produce en la superficie de los granos y se propaga capa por capa hacia el interior del grano con velocidades medidas en milímetros por segundo a la presión atmosférica.

Detonación es el proceso de combustión de mezclas de gas-aire (vapor – aire o polvo - aire) en la cual la velocidad de flama tiende a la velocidad del sonido y se acompaña por una onda de choque. Esta velocidad está en el orden de 2000 m/s.

La zona de combustión contiene la flama que exhibe temperaturas y presiones extremas y es asociada de forma considerable con los efectos. Dado que la reacción de combustión avanza, la temperatura de los reactantes se incrementa de acuerdo a su consumo en la zona de combustión. En algún punto, los cambios de reacción de un proceso de combustión normal pasan a una muy alta razón de procesos de oxidación; cuando esto ocurre, la reacción de oxidación se propaga a la velocidad del sonido y la reacción de combustión presenta las ondas de choque.

El origen de las ondas de choque puede ser explicado con la siguiente consideración sencilla, aplicable a cualquier sustancia en la que la velocidad del sonido crece a través del mismo, según aumenta la temperatura (como en los gases), o con el aumento de la densidad. Supóngase que un cilindro de longitud infinita está cerrado en un extremo por un émbolo movable y lleno del material de que se trata, el cual se supone que está en reposo y es de composición, densidad y temperatura uniformes. Supóngase que el émbolo es empujado hacia adelante a baja velocidad: se produce entonces una onda compresiva de poca amplitud en el medio contiguo al émbolo, que se propaga hacia adelante a la velocidad acústica normal. El medio de la parte posterior de la onda avanza con la velocidad del émbolo y es comprimido y calentado ligeramente. Supóngase que el émbolo recibe otro incremento de velocidad que hace avanzar otra onda compresional. Su velocidad es mayor que la de la primera onda por razón del estado alterado del medio y también porque la velocidad es tomada con relación al medio, que también está avanzando; así pues, la segunda onda tiende a alcanzar a la

primera. Supóngase ahora que el émbolo experimenta varios incrementos similares de velocidad y que se empieza a propagar por el medio una serie de pequeñas ondas consecutivas, cada una de las cuales tiene mayor velocidad que la inmediata anterior. Sucede entonces que a la postre todas las ondas alcanzan a la primera, de lo cual resulta una onda llamada onda de choque.

Por otro lado; lo más notable de las detonaciones, es su naturaleza no isobárica. La parte de la sustancia que no ha sido tocada por la detonación permanece a la presión inicial. En el frente de detonación la presión crece casi discontinuamente hasta su valor máximo (que puede ser entre 10 y 100 veces la presión inicial de gases, y hasta 200 000 atm en explosivos sólidos densos). Por detrás del frente de detonación la presión disminuye gradualmente. La temperatura y la densidad experimentan variaciones súbitas similares. El frente de detonación avanza por el explosivo a gran velocidad alcanzando los 3500 m/s en gases y 8000 m/s en líquidos y sólidos. A diferencia de las deflagraciones, la velocidad de propagación de las detonaciones es gobernada por variables termodinámicas o hidrodinámicas y no por la velocidad de las reacciones químicas que ocurren en la explosión. Para que se dé una explosión se necesita que estén presentes: un polvo combustible o vapor inflamable, aire o algún otro oxidante y una fuente de ignición, como lo muestra la figura 3.1⁽¹⁶⁾

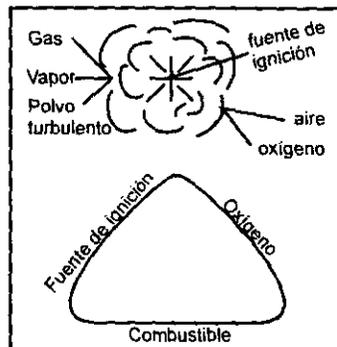


Fig. 3.1 COMPONENTES NECESARIOS PARA UNA EXPLOSIÓN

En el caso de los líquidos, éstos no arden como los combustibles sólidos. Son sus vapores los que entran en ignición. El "punto de ignición" es la temperatura a la que los líquidos liberan vapores suficientes para formar una mezcla combustible con el aire cerca de la superficie de los líquidos o dentro del recipiente utilizando una flama.

Si se hace referencia ahora al vapor o gas; se dice que todo vapor o gas que se queme puede también explotar; esto depende de que se mezcle con el aire en la proporción adecuada. La "temperatura de ignición" es la temperatura a la que los gases o vapores combustibles mezclados con el aire, se prenderán sin necesidad de una llama abierta.

Los vapores provenientes de líquidos volátiles pueden posarse sobre la superficie del líquido en un recipiente o tanque. Pueden derramarse sobre sus bordes y transportados por corrientes de aire se elevarán si son más ligeros que el aire o caerán y se arrastrarán si son más pesados, al tratar de mezclarse con el aire. En cualquier lugar que existan hay peligro de incendio o de explosión y éste es bastante potente.

3.2 FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA FORMACIÓN DE NUBES INFLAMABLES ⁽¹⁷⁾.

Una nube inflamable es aquella que se forma a partir de una sustancia capaz de producir una mezcla con aire en concentraciones tales que pueda prenderse espontáneamente o mediante alguna fuente de ignición. La formación de esta nube puede atribuirse a diferentes aspectos tales como :

- ⇒ Propiedades del material (considerando a la materia prima, producto intermedio y producto final).
- ⇒ Condiciones meteorológicas.
- ⇒ Características de almacenamiento, proceso y transporte.

3.2.1 Propiedades del Material.

La sobrepresión de las explosiones de nubes de vapor *dependen de la reactividad del combustible*. La alta velocidad de flama y la sobrepresión generadas son consecuencia de la alta reactividad, por lo tanto se debe conocer la química involucrada con los materiales explosivos. Líquidos, gases y vapores deben ser evaluados respecto a :

- ⇒ Temperatura de punto de flash.
- ⇒ Temperatura de autoignición.
- ⇒ Rango de concentraciones para flamabilidad.
- ⇒ *Rango de concentraciones para detonación.*
- ⇒ Energía mínima de ignición.
- ⇒ Estabilidad térmica.
- ⇒ Características de explosión presión-tiempo.
- ⇒ Piroforicidad.
- ⇒ Tendencia a polimerizarse.
- ⇒ Comportamiento durante la combustión, deflagración y detonación.

Análisis de 30 diferentes sustancias (todas orgánicas a excepción del hidrógeno), que han sido implicadas en 177 incidentes de explosiones de nubes de vapor no confinadas ("uvce", unconfined vapor cloud explosions) han indicado que los gases inflamables que contienen de 2 a 6 átomos de carbono han sido responsables *prácticamente de todos los casos de "uvce"* con una preponderancia de hidrocarburos de C₃ y C₄. Una excepción significativa es el metano, este material en la forma de gas natural es extraído y manejado en grandes cantidades y sólo una vez ha sido implicado en una "uvce". La información sugiere además, que el vapor de una olefina es más dañino que el correspondiente a una parafina.

Ésteres de nitrato, compuestos nitroaromáticos y nitroamina son cercanamente relacionados en explosividad. Grupos azo, ácido nitroso, peróxido y acetileno, pueden formar parte de estructuras explosivas.

3.2.2 Condiciones Meteorológicas.

Estas condiciones, consideradas como características externas del sistema pueden causar alteraciones en la materia prima así como productos de proceso tal es el caso de las altas temperaturas las cuales repercuten en la presión de vapor de químicos en sistemas de almacenamiento.

3.2.3 Características de Almacenamiento, Proceso y Transporte.

El almacenamiento inadecuado facilita la formación de nubes inflamables. La administración de un buen almacenamiento de explosivos dicta las cantidades límite que son almacenadas continuamente así como las paredes que deben separar las áreas de almacenamiento para prevenir la explosión, ya que los materiales inflamables en la producción, transporte y/o manejo, pueden relacionarse entre sí y formar una grieta, una ruptura de la tubería o una ruptura del tanque.

Sustancias con propiedades explosivas, no pueden ser manipuladas en plantas convencionales de proceso por lotes además, al evaluar todos los materiales de proceso; es importante considerar aquellos materiales no clasificados como explosivos ya que pueden descomponerse violentamente cuando se sujetan a calentamientos localizados.

3.3 DETONACIÓN DE NUBES INFLAMABLES ⁽¹⁷⁾.

Las explosiones de nubes inflamables pueden ser confinadas o no confinadas, y son ocasionadas por sustancias peligrosas como diversos explosivos, propelantes, fertilizantes, gases y vapores combustibles así como polvos inflamables, lo cual se explicará a continuación.

3.3.1 EXPLOSIONES DE NUBES DE VAPOR NO CONFINADAS ⁽²⁰⁾.

El desarrollo de una explosión de nube de vapor no confinada "uvce" (*unconfined vapor cloud explosions*) puede ser descrito como un proceso de cuatro pasos; el primero, es una fuga de vapor inflamable o gas hacia la atmósfera. Algunos tipos de fugas producen el vapor o el gas después de la pérdida del contenido, por ejemplo líquidos elevados a una gran temperatura o la evaporación de líquidos volátiles provenientes de recipientes muy grandes. El segundo paso, es una mezcla de aire y material escapado en el ambiente formando una nube que tiene un cierto rango de inflamabilidad por lo menos en una parte de su volumen. El tercer paso es la ignición, esto es, el fuego. El cuarto paso es la propagación de la flama a través de regiones de la nube donde la concentración de sus propios materiales está en el rango de inflamabilidad, generando una sobrepresión significativa. Esta última usualmente requiere que uno o más de los siguientes hechos se presenten: a) turbulencia, b) confinamiento parcial y c) detonación. La turbulencia puede existir aún anterior a la ignición, por ejemplo el viento o la turbulencia causada por la misma salida del material y más importante sin embargo, es la turbulencia que se desarrolla como consecuencia de la propagación de la flama.

El punto clave que determina si una "uvce" es posible, es el proceso de dispersión ya que se necesita algún tiempo de retraso entre la pérdida de contenido y la ignición, dando tiempo para que se forme la nube inflamable.

3.3.2 EXPLOSIONES DE NUBES DE VAPOR CONFINADAS⁽²⁰⁾.

El confinamiento y los obstáculos son factores significantes que contribuyen a la aceleración de la flama, con lo cual se tiene la posibilidad de que exista la transición de una deflagración a una detonación.

La suma de obstáculos hacia las flamas, produce dramáticas aceleraciones llegando la velocidad de la flama hasta 400 m/s en una corta distancia. Experimentos a escala en los cuales se usaron obstáculos (por ejemplo, láminas con orificios o espirales en un tubo); fueron capaces de obtener aceleraciones suficientes para producir un incremento en la velocidad de flama hasta de 800 m/s.

Cuando las flamas se propagan en una región llena de obstáculos, el mecanismo de aceleración se debe a la corriente que genera la flama, jalando esta misma hacia la parte más estrecha entre los obstáculos y entonces la flama es enrollada en los vértices del obstáculo. La flama se dirige hacia delante, al ser empujada desde atrás por unas bolsas donde se producen reacciones para liberarse de los obstáculos. El incremento del área de fuego da como resultado un volumen mayor de las flamas fuera de la región que se está quemando; esto es, resulta una aceleración de las flamas en regiones no limitadas. Si la velocidad de la flama aumenta lo suficiente, entonces pueden ocurrir fluctuaciones en la presión. Estas fluctuaciones también pueden aumentar la propagación de la flama y los mecanismos de aceleración. Si este último llega a un nivel suficientemente alto es posible que ocurra una pequeña transición a la detonación.

3.3.3 EXPLOSIONES DE POLVO⁽²⁰⁾.

Muchos polvos son combustibles y pueden encenderse en el aire. Si el polvo se dispersa como una nube y después se enciende la gran área de contacto con el aire permite una combustión que procede demasiado rápido y se puede dar una explosión de polvo.

Las características de una explosión de polvo son la rápida propagación de la combustión y la correspondiente rápida generación de temperatura. En apariencia una explosión de polvo puede ser comparada con una de gas o de vapor que ocurren bajo circunstancias similares. Para una nube dispersada en el aire abierto, el resultado de la ignición es una flama o una chispa que desarrolla una pequeña presión.

No todos los materiales que pueden encenderse en el aire pueden causar explosiones de polvo, aún si están finamente divididos y secos. La razón porque algunos polvos combustibles son no explosivos no ha sido definitivamente establecida. Numerosas industrias manufacturan o manipulan polvos explosivos, los principales son productos agropecuarios, químicos, minas, carbón, farmacéuticos, plásticos y derivados de la madera. Ejemplos de industrias donde los polvos explosivos están presentes y que en realidad han causado explosiones son la industria del calzado, la papelera y la manufactura de refrigeradores.

Aunque el producto principal de una industria pueda no ser el polvo y no presente peligro de explosión, se deben dar consideraciones para los materiales intermedios utilizados y los procesos usados en la manufactura del producto final. Estos procesos pueden crear productos secundarios o desechos de materiales que son explosivos y en la fábrica presentan un gran riesgo como en otras industrias donde el principal producto es un explosivo. Aspectos de gran importancia en una explosión ya sea de vapor, gas o polvo son:

- ⇒ Límites de Explosividad.
- ⇒ Velocidad de Flama.
- ⇒ Fuentes de Ignición.
- ⇒ Explosiones Secundarias.
- ⇒ Gases Tóxicos.

Todos ellos influyen en la gravedad de una explosión, y aunque la evaluación de consecuencias se tratará en el siguiente capítulo, para dejar más claro el concepto de detonación de nubes inflamables se revisarán todos estos aspectos como paso siguiente.

Límites de Explosividad.

Para que una flama se propague a través de una nube de polvo, gas o vapor; la concentración de éste debe estar entre los límites inferior y superior de explosividad. El límite inferior de explosividad puede ser definido como la mínima concentración de polvo en una nube, necesaria para promover la propagación de la flama. Esta es una cantidad bien definida y puede ser determinada mediante pruebas en pequeña escala. Los valores usualmente se dan en términos de masa de polvo por unidad de volumen en el aire. Cuando la concentración de polvo se incrementa por arriba del límite inferior de explosividad y pasa al valor estequiométrico, entonces la velocidad de la flama y el vigor de la explosión se incrementan de manera cuantitativa. A medida que la concentración de polvo se incrementa, el efecto del polvo remanente es cada vez más notable y eventualmente se puede llegar a una concentración en la cual la propagación de la flama no ocurre más. Este es el límite superior de explosividad. Los límites de explosividad dependen no solamente de la composición de la nube sino también del tamaño de las partículas y del contenido de la humedad así como la fuente de ignición.

Los problemas de explosión también se hacen más serios si el proceso envuelve el uso de solventes flamables, la flamabilidad del solvente es importante, en realidad puede ser el factor determinante para una explosión.

Las tablas 3.1 y 3.2 muestran los límites de explosividad para algunos vapores y polvos:

Tabla 3.1 Límites de Explosividad para Vapores.

Material	Volumen de vapor / volumen de aire, %.	
	Lim. Inferior	Lim. Superior
Alcohol Etilico	3.3	19.0
Amonia	16.0	25.0
Benceno	1.3	7.1
Butano	1.9	8.5
Monóxido de Carbono	12.0	75.0
Gasolina	1.4	7.6
Hidrógeno	4.0	75.0
Propano	2.2	9.5

Velocidad de la Flama.

La velocidad de la flama en una explosión de polvo no es constante y depende de un cierto número de factores; dos de éstos, son la composición química del polvo y el aire en el cual este polvo está suspendido. La velocidad de la flama también depende del tamaño de las partículas de polvo, entre menores sean las partículas es mayor la velocidad de la flama y la turbulencia del gas en el cual se dispersa el polvo. Una turbulencia incrementada puede llevar a velocidades de flama muy superiores, además, la velocidad también está

Tabla 3.2 Límites de Explosividad para Polvos.

Material	Onzas /pie cúbico de aire.
	Lím. Inferior
Celulosa	0.055
Carbón de hulla	16.0
Cocoa	0.075
Almidón de maíz	0.04
Cáñamo	0.04
Leche	0.05
Anhídrido ftálico	0.015
Poliestireno	0.02
Resina	0.015
Laca	0.02
Azúcar	0.045
Aluminio	0.045
Aleación Al-Mg.	0.02
Cromo	0.23
Hierro	0.12
Magnesio	0.04
Silicón	0.11
Estaño	0.19
Titanio	0.045

influenciada por el poder de la fuente de ignición. Ambas características del polvo y el diseño de la planta por lo tanto, afectan a la velocidad de la flama durante la explosión.

Explosiones Primarias y Secundarias.

Una explosión de polvo puede ser venteadada a partir del equipo en el cual ocurre. Las ondas de presión de la primera explosión pueden sin embargo, causar que el polvo depositado en las superficies de alrededor sea lanzado hacia el aire fuera de la planta, así se puede dar una segunda explosión a partir de la nube de polvo resultante de la primera.

Las tablas 3.3 y 3.4 indican la velocidad de flama y la energía crítica (energía necesaria y suficiente) para el inicio de detonación así como la energía de descomposición de algunos grupos moleculares.

Tabla 3.3 Velocidad de Flama y Energía crítica.

Material	Velocidad (m/s)	Energía crít.(KJ)
H ₂	1968	5.28
CH ₄	1801	19.2 - 105.6 MJ
C ₂ H ₂	1864	5.76
C ₂ H ₄	1822	48.0 - 72.0
C ₂ H ₆	1825	144.0 - 192.0
C ₃ H ₆	1809	216.0 - 250.0
C ₃ H ₈	1798	240.0 - 384.0
C ₄ H ₁₀	1796	240.0 - 384.0

Tabla 3.4 Energía de Descomposición de Grupos Moleculares.

Grupo Molecular	Energ.(KJ/mol)
-ONO2	460.0
N-NO2	450.0
-C-NO2	390.0
-NH2.HNO3	350.0
-C-O-O-C-	350.0
N-NO	320.0
-C-N3	310.0
-C-C-	200.0
-N-N-	140.0
-NH-NH-	120.0
-CH-CH-	100.0
O	
-CH-CH2	80.0

Gases Tóxicos.

Las flamas y la presión que acompañan las explosiones de polvo son una fuente principal de muertes, pero los productos de una explosión de combustible son también peligrosos. Estos son deficientes en oxígeno y es muy probable que contengan gases tóxicos particularmente monóxido de carbono.

Fuentes de Ignición.

A parte de unos pocos factores muy especiales donde la dispersión puede encender el polvo, una fuente de ignición debe estar presente. Aunque hay un gran número de fuentes diferentes de ignición a diferentes temperaturas, energías y duraciones; pueden ser convenientemente agrupadas como sigue ⁽¹⁾:

FUENTES DE IGNICION	{ Flama abierta
	{ Smoldering
	{ Superficies Calientes
	{ Soldadura y Corte
	{ Fricción o Impacto
	{ Chispas Eléctricas

Flama Abierta.- Las flamas producidas por gases encendidos, líquidos o sólidos son poderosas fuentes de ignición. Una suspensión de polvo puede ser encendida por una flama permanentemente establecida, por ejemplo, una pequeña flama de piloto.

Smoldering.- Esta es una forma de combustión en la cual no hay llamas sólo arde humeando. Los polvos que pueden arder generalmente pueden ser encendidos por una ignición de baja energía como por ejemplo, cigarrillos.

Superficies Calientes.- Estas pueden presentarse como parte de un proceso o como resultado de alguna falla. Las situaciones típicas donde se puede prender el polvo, incluyen las siguientes⁽¹⁸⁾:

1. Presencia de una suspensión de polvo en un medio sobrecalentado *como por ejemplo un horno o una secadora.*
2. Localización de polvo en una superficie con un ambiente caliente, por ejemplo en la pared interna de una secadora y
3. Polvo disperso alrededor o depositado en una superficie caliente con una *atmósfera fría o fresca como el polvo en una lámpara eléctrica.*

Soldadura y Corte.- Muchas explosiones de polvo han sido causadas por operaciones de soldadura o corte a altas temperaturas llevadas a cabo en presencia de capas o suspensiones de polvo, gas o vapor explosivo.

Fricción e Impacto.- La ignición a partir de fricción puede llevarse a cabo de muchas maneras :

1. El material que se procesa puede generar excesiva fricción en la planta.
2. El material que se procesa puede contener objetos extraños como metal o piedras.
3. La fricción puede ser causada por el mal funcionamiento del equipo en una planta, si las piezas de metal se gastan.
4. Utilizar herramientas manuales o automáticas puede dar como resultado un sobrecalentamiento localizado intenso.
5. Una capa de polvo o posiblemente una suspensión pueden ser encendidas por chispas ocasionadas por el contacto de acero contra el aluminio.

Chispas Eléctricas.- La electricidad es una poderosa fuente de ignición porque la energía disponible normalmente excede aquella que se necesita para encender el polvo. En la industria, la electricidad estática presenta considerable peligro a causa de la transferencia de carga a conductores metálicos aislados que no están en contacto con tierra. Cuando la descarga a tierra ocurre desde objetos conductores, *la carga fluye desde el objeto lo que maximiza la energía de la chispa.*

CAPÍTULO IV

EVALUACIÓN DE CONSECUENCIAS DE LOS RIESGOS

Las deflagraciones y detonaciones ocurren anualmente en todos los segmentos de la industria química y petrolera; y mientras que *nadie planea tener una explosión, es mejor anticiparla.*

La preparación de una comunidad para responder en los casos en que se presente un incidente que involucre materiales considerados como peligrosos, se basa en conocer la posibilidad de que ellos se puedan presentar, y la potencialidad de sus consecuencias si llegaran a ocurrir.

El propósito de este capítulo es discutir un aspecto muy importante en la prevención de daños de la explosión: La estimación de daños de acuerdo a la distancia de las ondas expansivas de las explosiones, lo que se llama radio de afectación, se analizarán dos metodologías diferentes, no porque sean las únicas, sino por los aspectos que consideran cada una. Dicho análisis será auxiliado por un ejemplo comparativo; de acuerdo a la secuencia siguiente.



Fig. 4.1 DIAGRAMA DEL CAPÍTULO

4.1 MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE DAÑOS DE UNA NUBE INFLAMABLE.

Las estimaciones de daño en una explosión, pueden ser hechas con certeza suficiente para la mayoría de los propósitos de diseño y planeación conociendo:

1. El rendimiento de la explosión en unidades de energía comparable a un material de emergencia.
2. Una adecuada regla de escalas para hacer referencias manuales en términos de distancia y nivel máximo de sobrepresión.
3. El conocimiento de la resistencia de los diseños estructurales a diferentes sobrepresiones.
4. Un buen juicio.

Se han elaborado diferentes métodos de estimación de daños, sin embargo; en este trabajo se consideran únicamente dos; para los cuales se realiza un pequeño estudio comparativo con respecto a los diferentes aspectos que evalúan cada uno y sus premisas. El primero de ellos es un método que se ha venido utilizando desde hace algún tiempo por lo que se le llamará "Método Conservador"; esto es meramente con fines de identificación en el presente documento.

El segundo, al cual se le llamará "Método Complementado"; es básicamente una conjunción de otros métodos que como su nombre lo dice se "complementan" entre sí. Tal método parte de la estructura que fue publicada por Imperial Chemical Industries de Wilton, England y Total Prevention Systems.

4.2 ESTIMACIÓN DE DAÑOS DE UNA NUBE INFLAMABLE "MÉTODO CONSERVADOR".

Esta metodología se basa en el siguiente diagrama de bloques:

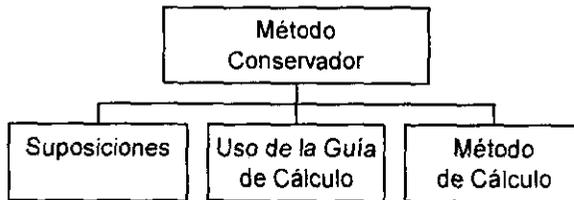


Fig. 4.2 DIAGRAMA DE BLOQUES "MÉTODO CONSERVADOR"

4.2.1 SUPOSICIONES

En los últimos años se han hecho diversos estudios basados en las experiencias sufridas, que han definido clara y detalladamente el potencial explosivo de una nube de gases y que proponen métodos de análisis de las pérdidas ocasionadas por los desastres. Estos métodos incluyen datos como velocidad de la fuga, velocidad y dirección del viento, así como otras condiciones atmosféricas. Sin embargo, en la predicción de un desastre potencial, estas variables son desconocidas y debe determinarse una aproximación conservadora y práctica que reduzca los efectos al mínimo para el cálculo de una nube. Por tal motivo se harán las siguientes suposiciones:

1. La fuga es instantánea y no se considerará el caso de un escape de gas paulatino, excepto para fugas en tuberías de gran capacidad con material transportado desde instalaciones alejadas.
2. El material fugado se vaporiza instantáneamente y la nube se forma inmediatamente, de acuerdo a las condiciones termodinámicas del gas o líquido inflamable antes de la fuga.
3. La nube adquiere una forma cilíndrica cuya altura es su eje vertical. No se consideran distorsiones ocasionadas por viento o por estructuras y edificios presentes.

4. La nube tiene una composición uniforme y su concentración en el aire está en el punto medio entre los límites inferior y superior de explosividad de material.
5. Se tomará el calor de combustión del TNT (2000 Btu/lb) para convertir el calor de combustión del material a un equivalente de peso de TNT.
6. La temperatura ambiente es constante: 70°F(21.1 °C).
7. Posibles formadores de nubes explosivas:
 - ⇒ Gases en estado líquido por enfriamiento.
 - ⇒ Gases en estado líquido por efecto de alta presión.
 - ⇒ Gases sujetos a presiones de 500 psi o mayores.
 - ⇒ Líquidos inflamables o combustibles a una temperatura mayor a su punto de ebullición y mantenidos en estado líquido por efecto de presión (excepto materiales con una viscosidad mayor que 1×10^4 centipoises o puntos de fusión sobre 212 °F).

Está reconocido que una explosión de una mezcla confinada vapor-aire dentro de un edificio tendrá una fuerza explosiva mayor que una explosión en espacio abierto del mismo volumen del vapor; sin embargo en la generalidad de los casos el volumen que ocupa una nube de vapor explosivo, producto de fugas factibles, será mucho mayor que el volumen de la mayoría de los edificios industriales. Por tal motivo, se supondrá que una fuga originada en el interior de un edificio, formará una nube de las mismas dimensiones que una originada en el exterior.

4.2.2 MÉTODO DE CÁLCULO.

El método de cálculo se compone de los siguientes puntos:

- A. Determinación de una fuga probable.
- B. Cálculo del peso del material en el sistema.
- C. Cálculo de la cantidad vaporizada.
- D. Cálculo de la magnitud de la nube.
- E. Cálculo de la energía desprendida.
- F. Cálculo del diámetro de las ondas expansivas.
- G. Determinación del daño

A. DETERMINACIÓN DE UNA FUGA PROBABLE.

1. Daño Máximo Probable (DM).

Para efectos del cálculo de DM en una planta con riesgo de formación de nubes explosivas, se usará el siguiente criterio para estimar las dimensiones de una fuga :

a) *El tamaño de una fuga estará determinado por el contenido del mayor recipiente de proceso o serie de recipientes de proceso conectados entre sí sin estar aislados uno de otro. Si existen válvulas automáticas o a control remoto que separen esos recipientes al originarse una fuga, se considerará reducida ésta, de manera que siempre se considerará que la mínima fuga se tomará como el contenido del recipiente mayor.*

b) *La existencia de fuentes de ignición en las cercanías de una posible fuga no se considerará como limitante de la formación de una nube. La experiencia de explosiones por nubes de vapores ha demostrado la posibilidad de formación de grandes nubes en las cercanías de fuentes de ignición, por efecto de corrientes de aire y difusividad del gas.*

2. Daño Catastrófico Probable (DC).

Para efecto de la estimación del DC, se utilizará el siguiente criterio para la estimación del tamaño de una fuga:

a) *El tamaño de la fuga dependerá del contenido del mayor recipiente del proceso o serie de recipientes conectados entre sí. No se considerará la existencia de válvulas automáticas.*

b) *Deberá considerarse la destrucción o daño grave de tanques mayores de almacenamiento como formadores de nubes explosivas catastróficas.*

c) *Se considera también fugas en tuberías de gran capacidad, alimentadas desde instalaciones remotas, propias o exteriores, suponiendo que la tubería es dañada seriamente y que el material fugará por 30 minutos.*

d) Tampoco se considerará la posibilidad de limitación de la formación de una nube por fuentes de ignición cercanas.

e) Se tomarán en cuenta gases o líquidos usados como combustibles.

B. CALCULO DEL PESO DEL MATERIAL EN EL SISTEMA.

1. Gases.

Si el material en el sistema es un gas a 500 psig o más de presión, el peso del gas se calculará por :

$$W_G = 0.002785 M V_G \dots \dots \dots (1)$$

donde

- W_G = peso del gas descargado (lb).
- M = peso molecular del gas.
- V_G = volumen del gas corregido a condiciones normales (273 °K y 1 atm). Debe tomarse en cuenta el factor de compresibilidad del gas.

2. Líquidos.

Si el material en el sistema se encuentra en estado líquido, se usará :

$$W_L = 8.35 \rho V_L \dots \dots \dots (2)$$

donde

- W_L = peso del líquido fugado (lb).
- ρ = densidad del material a la temperatura del proceso: T_1 (g/cm^3).
- V_L = volumen del líquido contenido (gal).

C. CALCULO DE LA CANTIDAD VAPORIZADA (W).

1. Para líquidos o gases licuados con punto de ebullición menor a 70°F (21.1°C), se supone que el 100% se vaporizará, por lo que :

$$W = W_G \text{ y } W = W_L$$

2. Para líquidos con punto de ebullición sobre 70°F, la cantidad vaporizada será:

$$w = w_L Cp(T1 - T2) / \Delta H_v \dots (3)$$

donde

W	=	peso del material vaporizado (lb)
\overline{Cp}	=	media geométrica de los calores específicos a diferentes temperaturas entre T1 y T2. (cal/g°C).
$T1$	=	temperatura del líquido en el proceso (°C)
$T2$	=	punto de ebullición (°C).
ΔH_v	=	calor de vaporización a T2 (cal/g)
W_L	=	peso del líquido fugado

D. CÁLCULO DE LA MAGNITUD DE LA NUBE.

Para efectos de este método se considerarán únicamente gases o vapores que sean más pesados que el aire, los cuales constituyen la inmensa mayoría de los potenciales formadores de nubes explosivas.

La experiencia ha demostrado que una nube explosiva alcanza una altura hasta de 10 pies, por lo que es conveniente considerar ésta como la altura general de una nube. Debe tenerse mucho cuidado al considerar una altura mayor para gases ligeros, ya que podría dar como resultado un error en el diámetro de la nube que llevarán a una subestimación de su potencial.

El diámetro de la nube se calcula con :

$$D = 22.19 \sqrt{W/hMv} \dots (4)$$

donde

D = diámetro de la nube (ft)

h = altura de la nube (ft)

M = peso molecular

v = fracción de la nube representada por vapor o gas si la nube entera se encuentra en la concentración explosiva media, calculada por :

$$v = \frac{LEL(\%) + VEL(\%)}{2 * 100\%} \dots \dots (5)$$

Si se considera la altura standard de la nube como 10 pies, se tiene :

$$D = 7.017 \cdot \sqrt{\frac{W}{Mv}} \dots \dots \dots (6)$$

E. CÁLCULO DE LA ENERGÍA DESPRENDIDA.

La energía desprendida por una nube explosiva estará expresada por su equivalente en toneladas de TNT y estará dada por

Donde

W_e = peso de TNT que produce una fuerza equivalente a la explosividad de la nube (ton TNT).

ΔH_c = calor de combustión del material (Btu/lb)

f = factor de explosividad.

W = peso del material vaporizado

El factor de explosividad (f) de materiales varia de 0.01 a 0.1 (adimensional) y depende de la capacidad del material a detonar. El valor calculado del factor de explosividad es 0.1 para propelentes de cohetes con oxígeno líquido.

Las nubes explosivas varían de 0.01 a 0.05 o más en caso de catástrofes.

Para el cálculo de DM se usará $f=0.02$.

Para el cálculo de DC se usará $f= 0.1$.

F. CÁLCULO DEL DIÁMETRO DE LAS ONDAS EXPANSIVAS.

Las ondas expansivas consideradas en este método, producto de una explosión, se expresan en unidades de presión y varían de 0.5 psi a 30 psi. Las ondas de mayor presión estarán en una circunferencia cerca del centro de la nube

explosiva, mientras que las de menor presión abarcan una circunferencia de diámetro mayor.

La determinación de los diámetros de estas circunferencias de onda expansiva se lleva a cabo por medio de la fig. 4.3

Se determinarán los diámetros para los valores de We obtenidos tanto para DM como DC.

G. DETERMINACIÓN DEL DAÑO.

Para determinar la extensión del daño producido por una nube explosiva se usa la tabla 4.1 y la figura 4.3, basadas en los efectos de las diversas presiones de onda expansiva. La figura 4.3 es una gráfica donde se determinan los diámetros de ondas de sobrepresión en función de las toneladas de TNT producidas y la presión generada. La tabla 4.1 indica de acuerdo con dichas presiones; los daños a equipo e instalaciones, y la figura 4.4 ilustra dichos diámetros de onda de sobrepresión en una planta, dando una mayor idea del alcance que pudiera tener algún siniestro de este tipo, aunque, a éstos deberán adicionarse los posibles incendios y/o explosiones subsecuentes. Este riesgo es importante ya que dentro de la circunferencia de onda expansiva de 5 psi existe la certeza de destrucción de tuberías y si existe riesgo de incendio por esta causa, puede considerarse un daño total (desastre) dentro de esta circunferencia.

En la determinación del DM pueden tomarse en cuenta para considerar reducido el daño probable, factores como tuberías soldadas, rociadores, válvula y tubería protegidas, sistemas de agua contra incendio asegurados, etc.; sin embargo, para el cálculo de DC, estos factores no deben tomarse en cuenta.

TABLA 4.1

EFECTOS DE NUBES EXPLOSIVAS EN REFINERIAS

1. **Cuartos de control: Construcción de concreto y estructura de fierro.**
 - 0.5 psi - ruptura de ventanas.
 - 1.0 psi - deformación de la estructura.
 - 1.5 psi - derrumbe del techo.
 - 3.5 psi - derrumbe de muros de concreto.
 - 10.0 psi - derrumbe de estructura de fierro.
2. **Torre rectangular: Estructura de concreto.**
 - 5.5 psi - fractura de la estructura de concreto.
 - 7.0 psi - derrumbe de la estructura y la torre.
3. **Torre de vacío octagonal: Estructura de concreto.**
 - 7.0 psi - fractura de la estructura.
 - 7.5 psi - ruptura del anclaje de la torre y caída de ella.
4. **Torre fraccionadora: Montada sobre pedestal de concreto.**
 - 4.5 psi - aflojamiento de tuercas de anclaje.
 - 7.0 psi - caída de la torre.
5. **Torre de regeneración: Estructura de acero.**
 - 5.0 psi - deformación de la columna.
 - 7.0 psi - caída de la torre.
6. **Torre de regeneración: Estructura de concreto.**
 - 8.5 psi - fractura de la estructura.
 - 16.0 psi - derrumbe de la estructura y la torre.
7. **Reactor rectangular de cracking catalítico: Estructura de concreto.**
 - 8.0 psi - fractura de la estructura.
 - 12.0 psi - derrumbe de estructura y de la torre.
8. **Desisobutanizador: Montado sobre pedestal y zapatas.**
 - 9.5 psi - caída del reactor.
9. **Unidad de recuperación de vapor: Estructura rectangular de acero.**
 - 6.0 psi - derrumbe de la estructura.
10. **Horno de tubos fijos.**
 - 1.5 psi - desplazamiento ligero de su posición original.
 - 6.0 psi - caída de la chimenea.
 - 6.5 psi - derrumbe del horno.
11. **Edificio de mantenimiento.**

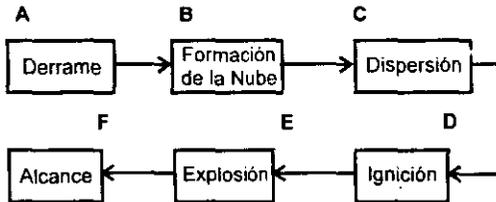
- 0.3 psi - caída del techo de asbesto corrugado.
- 3.0 psi - deformación de la estructura.
- 12. Torre de enfriamiento de agua.**
 - 0.3 psi - caída de lumbreras de asbesto corrugado.
 - 3.5 psi - derrumbe de la torre.
- 13. Tuberías: Soportadas por estructura de acero.**
 - 3.5 psi - deformación de la estructura.
 - 6.0 psi - derrumbe de la estructura y rompimiento de la tubería.
- 14. Tuberías: Soportadas por estructura de concreto.**
 - 3.5 psi - fracturas en la estructura.
 - 5.0 psi - derrumbe de la estructura y rompimiento de líneas.
- 15. Tanques de almacenamiento esféricos.**
 - 7.0 psi - deformación de la estructura en tanques llenos.
 - 7.5 psi - deformación de estructura en tanques vacíos.
 - 9.0 psi - derrumbe de estructura.
- 16. Tanques de almacenamiento: Techo cónico y techo flotante.**
 - 1.5 psi - levantamiento de tanques vacíos.
 - 3.5 a 6.5 psi - levantamiento de tanques llenos o medio llenos, dependiendo de su capacidad.

4.2.3 USO DEL MÉTODO CÁLCULO.

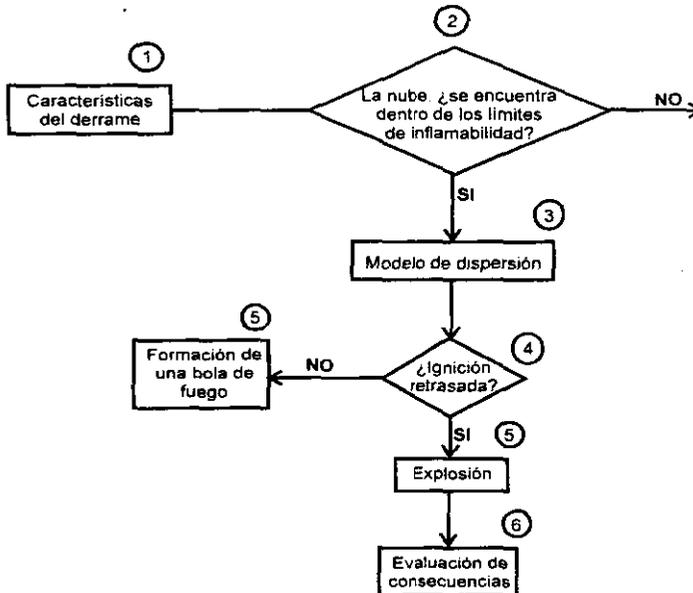
El análisis de una nube explosiva debe ser hecho sólo por personal familiarizado con la planta y el proceso. Por este método será posible calcular el daño máximo probable (DM) y el daño catastrófico probable (DC). Se deberá utilizar para todas y cada una de las unidades de proceso o plantas con mayor potencial de formación de nubes explosivas. Debe considerarse que el potencial explosivo de una nube será el más peligroso de una planta, en la mayoría de los casos, aunque pueden existir otro tipo de riesgos que deben ser siempre tomados en cuenta. Por ejemplo, una planta con sólo un pequeño potencial de fuga inflamable, puede tener un potencial peligroso de explosión en el interior de equipos que cause un daño grave que sobrepasa el potencial de una nube explosiva.

4.3 ESTIMACION DE DAÑOS DE NUBES INFLAMABLES "METODO COMPLEMENTADO"

Este método se basa en el siguiente diagrama de bloques:



De acuerdo al diagrama se obtiene el siguiente diagrama de flujo:



Evaluando el diagrama de flujo tenemos :

1 Características del Derrame. Cantidad del inventario en la planta que es liberado antes de que ocurra la ignición

En el caso de una fuga de material peligroso, la manera precisa en la cual se da esta fuga debe ser definida cuidadosamente teniendo en cuenta que ésta puede influenciar la severidad de las consecuencias en gran medida.

El parámetro más importante al determinar los rangos de descarga es el tamaño del orificio de descarga, dado que la ruptura completa de una tubería de gran diámetro es totalmente diferente de un pequeño orificio en una abrazadera.

La pérdida instantánea del material total de inventarios en un conducto o en la planta completa es altamente improbable; por lo cual se sugiere que cuando se calcule la cantidad que se derrama se sigan los siguientes pasos:

- a. Ignorar las fallas de los conductos mayores.
- b. Ignorar las fallas de líneas especiales.
- c. Si las válvulas de aislamiento están ajustadas se considera que pueden operar en 5 min. Si las únicas válvulas de aislamiento son locales, se deberá considerar que no son operadas y que entonces el derrame continúa hasta que pueda ser aislado de otra manera o hasta que todo el material se haya derramado.

Cómo, por qué y dónde puede ocurrir una fuga del material, es algo que se debe establecer haciendo una clara especificación del peligro utilizando un método como el modelo de fallas, árbol de eventos o hazop, además es deseable hacer una determinación de la probabilidad de que ocurra un accidente, ya que el riesgo depende por un lado de la probabilidad y por el otro, de la severidad de las consecuencias.

2. Límite de inflamabilidad de la nube y Fracción del material escapado que se enciende

Las explosiones de nubes de vapor inflamable casi siempre resultan a partir de la fuga de líquidos volátiles ya que un líquido no volátil no producirá suficiente vapor. El primer paso para saber qué cantidad de material se encenderá es la determinación de la cantidad de material que se volatiliza, esto normalmente se denomina como *Modelo de la Fuente*; esto es, la proporción a la cual el material es integrado al aire (límites de inflamabilidad). Este material es manejado como gas. La proporción de la fuente u origen de este material será la proporción de la fuga desde cualquier orificio en el equipo.

Si este material se maneja como un líquido debajo de su punto de ebullición atmosférico, la proporción de la fuente será la proporción a la cual el material se evaporó a partir del recipiente del líquido, formado por la fuga o escape del líquido. Si el material es un líquido sobrecalentado (gas o líquido o fuga en dos fases), la proporción de la fuente puede ser la proporción de la fuga en el punto de ebullición o una combinación de ambas variantes.

La tasa de evaporación depende de diferentes factores tales como presión de vapor del líquido, área superficial del derrame y velocidad del viento.

Un método para estimar la tasa de emisión de inflamables via computadora es el *Modelo de Emisión de un Derrame*.⁽¹⁾ Este modelo fue creado por Monsanto Company en 1985 el cual involucra un gran número de variables que de alguna manera afectan dicha emisión.

3. Modelo de Dispersión. Distancia que recorre la nube antes de iniciar la ignición

Se considera frecuentemente que la nube no viaja. Ya que en la mayoría de los casos las nubes encontrarán fuentes de ignición como hornos o vehículos dentro de la planta antes de que hayan viajado muy lejos. Considerar que la nube

no viaja es bueno para hacer cálculos aproximados pero un desplazamiento de cien metros de la nube de vapor es muy posible, digamos en un caso de 5 ó 10.

Se han desarrollado diferentes modelos de dispersión para establecer la distancia a la cual una nube de vapor inflamable se puede diluir por debajo de la concentración que pueda considerarse dañina. Un modelo muy flexible, es el Modelo de la Pluma Gausiana; en él se considera que así como se mueve una pluma, el aire se mueve lateral y verticalmente. Las concentraciones laterales y verticales siguen una distribución gausiana con una concentración máxima a lo largo de la línea central de la pluma y progresivamente en menores concentraciones al incrementarse la distancia desde la línea central.

Se cree que la dispersión es el resultado de los remolinos que son a causa del aire circundante que entra en la pluma. El área seccional en forma de cruz de la pluma crece al disminuir la concentración en la línea central conforme aumenta la distancia hacia donde sopla el viento. Las causas de que esto suceda están determinadas por la velocidad del viento y otros factores del clima así como el terreno por debajo de la pluma. Los meteorólogos catalogan típicamente las condiciones atmosféricas que afectan la dispersión en seis clases de estabilidad atmosférica desde la "A" a la "F". La primera representa condiciones inestables caracterizadas por una gran luz solar, el cielo claro y altos niveles de turbulencia en la atmósfera. Estas condiciones promueven rápidamente la mezcla y dispersión de la nube en el aire. En el otro extremo, la "F" representa los cielos nocturnos y bajos niveles de turbulencia. En la siguiente tabla se muestran las diferentes categorías de estabilidad :

Tabla 4.2

Categorías de Estabilidad Atmosférica Pasquill-Gifford.

					Día (TURBULENCIA)	
MPH	Nudos	m/seg	Fuerte	Moderado	Ligero	
13.4	11.7	6	C	D	D	
11.2-13.4	9.7-11.7	5-6	C	C-D	D	
6.7-11.2	5.8-9.7	3-5	B	B-C	C	
4.5-6.7	3.9-5.8	2-3	A-B	B	C	
4.5	3.9	2	A	A-B	B	

Noche		
MPH	Poco nublado	Nublado
4.5	F	F
4.5-6.7	E	F
6.7-11.2	D	E
11.2-13.4	D	D
13.4	D	D

2.24 MPH= 1.95 nudos

3.6 KPH= 1.0 m/s

La categoría neutral, D, podría considerarse para condiciones durante el día o la noche. La noche se refiere a un período comprendido entre 1 hora antes del anochecer y 1 hora antes del amanecer.

4. Ignición retrazada. Probabilidad de ignición.

La ignición no es de ninguna manera segura, pero hay una pequeña información disponible sobre su probabilidad. En plantas de polietileno la experiencia muestra que solamente una de diez mil fugas o derrames se enciende. Esta baja probabilidad puede ser el resultado de una buena mezcla causada por alta presión.

En cualquier planta la probabilidad de ignición se incrementará con el tamaño del derrame, así es más probable que la nube cubra o traslape un horno o cualquier otra fuente de ignición. Para derrames grandes (más de 10 ton), la probabilidad de la ignición es mayor que de 1 a 10 y quizás es tan alta como de 1 a 2.

Supóngase que hay un orificio de 2 pulg de diámetro en un recipiente conteniendo petróleo a la temperatura atmosférica y a una presión de 100 lb/pulg². El líquido se derrama y escapa a 3 ton/min, pero se forma una muy pequeña cantidad de vapor, puede haber fuego pero la probabilidad de una explosión es mínima a menos que el derrame se produzca dentro de un edificio. Ahora supongase que hay un orificio de 2 pulg en un recipiente que contiene un gas inflamable como propileno a una temperatura atmosférica y a una presión de 100 lb/pulg²; el gas se escapa a razón de 1/4 ton/min. Si el gas tiene una ruta de escape sin obstáculos será diluido por una mezcla con el oxígeno y la probabilidad de una explosión es mínima. Pero si el gas desciende hacia tierra o penetra en otro equipo y pierde su energía cinética se formará una nube de gas y entonces es posible la explosión. Ahora supongase que hay un orificio de 2 pulg en una pipa que contiene petróleo a 120°C y a 100 lb/pulg²; el petróleo se derramará al mismo nivel en el primer ejemplo pero está arriba de su temperatura normal de ebullición. Una octava parte puede explotar, los experimentos y los estudios teóricos muestran que el resto del material va a formar una gran nube de vapor y es posible que se produzca una explosión de grandes proporciones. Todo lo anterior indica que los resultados variarán según la situación.

5. Probabilidad de que ocurra una explosión y no sólo una flama espontánea en el caso de encontrar una fuente de ignición.

Algunos derrames no explotan porque se encienden inmediatamente, sin embargo si la ignición se retrasa puede haber una explosión.

La probabilidad de que haya una explosión en lugar de una flama se incrementa con el tamaño de la nube. Entre más grande sea una nube es más probable que una porción significativa de ésta esté en el centro del rango de explosividad y que haya mayor facilidad de aumento en la velocidad de la flama.

Muchos autores han sugerido que aproximadamente 5 ton de vapor se requieren para producir una explosión de una nube de vapor, pero no se conoce un estudio teórico o una encuesta detallada de la evidencia que ha sido utilizada para apoyar esta posición. Explosiones de una gran severidad han ocurrido en tanques que contienen menos de una tonelada cuando el gas y el aire fueron mezclados en la proporción correcta. Estas no simulan las condiciones de la vida real, pero siempre hay una pequeña oportunidad de que al aire libre se produzca una buena mezcla.

6. Fracción de la nube de vapor que explota y cantidad de calor de combustión producido por la onda de choque.

Los daños producidos por la ráfagas causadas por una explosión caen dentro de estas categorías :

Cráteres, es decir; la producción de grandes orificios.

Ondas de choque en superficie

Difracción del cargamento de niveles máximos de sobrepresión.

Daños por objetos que serán lanzados en forma de proyectiles.

Ondas de choque en tierra.

Radiaciones térmicas.

Efectos secundarios (cáncer o enfermedad a la posteridad).

Las estimaciones de la fracción del calor de combustión que es utilizada en la producción de la onda de choque usualmente varían entre 1 y 10% aunque las estimaciones más altas y más pequeñas también se aceptan ocasionalmente. Una razón para la variación de esto es que algunos autores toman un porcentaje del derrame o fuga total, mientras que los otros toman un porcentaje de aquél en la parte de la nube que está dentro del rango explosivo, así, si se considera que el 10% del material derramado o escapado está dentro del rango de explosividad, entonces el 10% del calor de combustión del material en el rango explosivo es igual al 1% del calor de combustión del derrame o fuga completo. Si la ignición es retrasada, el vapor tiene mayor tiempo de dispersarse y la cantidad dentro del rango explosivo primero se incrementará y después decrecerá, de acuerdo a la condición meteorológica que se trate.

4.4. EJEMPLO COMPARATIVO

Se propone como escenario, un derrame continuo de propano proveniente de un contenedor vertical con capacidad de 50 ton. Las condiciones de almacenamiento son : temperatura de 25 °C y una presión de 190 lb/ pulg². El diámetro de ruptura por la que se derrama el líquido es de 4 pulg. Se aplica la condición de estabilidad atmosférica F, con una velocidad del viento de 2 mph. Las propiedades del líquido en cuestión son:

⇒ Peso molecular (lb/lb-mol):	44.11
⇒ Densidad (lb/ft ³):	36.45
⇒ Punto de ebullición (F):	43.47
⇒ Calor de evaporación (btu/lb):	147.30
⇒ Calor específico (btu/lb-F):	0.576
⇒ Número de Schmith:	1.1905
⇒ Presión parcial (mmHg):	0.0
⇒ Constante de Antoine (base 10 log, mmHg y C):	

$$A = 6.800$$

$$B = 804.576$$

$$C = 247.220$$

Para realizar la evaluación se tomarán en cuenta 4 etapas principales del escenario como lo indica la siguiente figura:

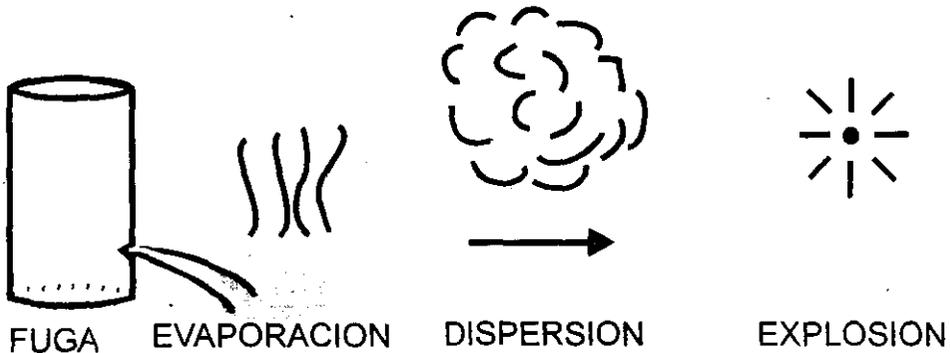


Fig. 4.5 Etapas de escenario de explosión

4.4.1 CRITERIOS

“METODO CONSERVADOR”

FUENTE

⇒ Considera fuga instantánea.

EVAPORACION

⇒ Considera la formación instantánea de la nube. (evaporación total).

DISPERSION

⇒ Formación de nube cilíndrica de composición uniforme y se encuentra en el punto medio entre el límite inferior y superior

“METODO COMPLEMENTADO”

FUENTE

⇒ Considera necesario definir la fuga cuidadosamente.

EVAPORACION

⇒ Considera que la evaporación es una función de la presión de vapor, por lo que no se da una evaporación total e instantánea.

DISPERSION

Considera la dispersión como resultado de remolinos, (velocidad del viento y otros factores meteorológicos como las condiciones Pasquill - Gifford.)

de inflamabilidad.

⇒ Formación de Pluma Gaussiana.

EXPLOSION

⇒ Ignición inmediata.

EXPLOSION

⇒ Probabilidad de ignición proporcional al tamaño del derrame.

Para derrames grandes la probabilidad de ignición es mayor de 1/10 ó ½.

⇒ Los resultados varían según la situación :

- * confinamiento.
- * temp. de ebullición.
- * temp. de autoignición.
- * rango de explosividad.

4.4.2 EVALUACION CUANTITATIVA "METODO CONSERVADOR"

1. Fuga de 50 ton de propano.

$$T=25^{\circ}\text{C}$$

$$\rho=190 \text{ lb/pulg}^2$$

$$W_L=8.35 \rho V_L$$

$$\rho = 23.309 \text{ g/ml}$$

$$V_L = 566.724 \text{ gal} \left(\frac{0.01602 \text{ g}}{\text{cm}^3} \right) = 0.583929 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = \text{g/ml}$$

$$W_L = 110303.82 \text{ lb} \left(\frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ ton}} \right) \left(\frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} \right) \left(\frac{1 \text{ ml}}{0.583929} \right) = 8562684.47 \text{ ml} = 85626.84847 \text{ lit} = 622.68 \text{ gal.}$$

2. Cantidad vaporizada: $W=W_L$.

$$W = W_L = 110303.82 \text{ lb}$$

3. Magnitud de la nube:

$$D = 7.017 \sqrt{W / MV}$$

$$D = \frac{M=44.11 \text{ g/mol}}{7.017 \sqrt{W / MV}} = \text{pies}$$

$$M=44.11 \text{ g/mol}$$

$$f = \frac{LEL + VEL}{2(100)} = \frac{2.3 + 9.5}{2(100)} = 0.10925$$

$$D=1061.616 \text{ pies si } H=10 \text{ pies}$$

4. Cálculo de la Energía Desprendida.

$$W_e = W \Delta H_{cf} / 4 \times 10^6 = (110\,303.82 \text{ lb}) (21\,490 \text{ btu/lb}) / 4 \times 10^6$$

$$\Delta H_{cf} = 21\,490 \text{ btu/lb}$$

$$\text{si } f=0.02 \text{ para } W_{DM}=11.85 \text{ ton TNT}$$

$$\text{si } f=0.1 \text{ para } W_{DC}=59.259 \text{ ton TNT}$$

5. Cálculo del Diámetro de las ondas expansivas.

Considerando que:

$W_{DM}=11.85 \text{ ton TNT}$ y $W_{DC}=59.259 \text{ ton TNT}$ se tiene:

$F_t=(0.3048)$

Presión de Onda Expansiva	Diámetro DM		Diámetro DC	
	pies	mts.	pies	mts.
10 psi	460	140.2	700	213.36
7 psi	510	155.2	900	274.32
5 psi	600	182.88	1100	335.28
3 psi	900	274.32	1600	487.68
2 psi	1100	335.28	2000	609.6
1 psi	1800	548.64	3000	914.4
0.5 psi	3000	917.4	4850	1478.28

4.4.3 EVALUACION CUANTITATIVA "METODO COMPLEMENTADO".

Como ya se indicó anteriormente, este método involucra mayor número de variables por lo que se realizará de acuerdo al esquema de fuga, evaporación, dispersión y explosión.

FUGA Y EVAPORACION.

Para el estudio del derrame se utilizó el Arbol de Eventos como muestra la figura 4.6 y basándose en la tabla 2.5:

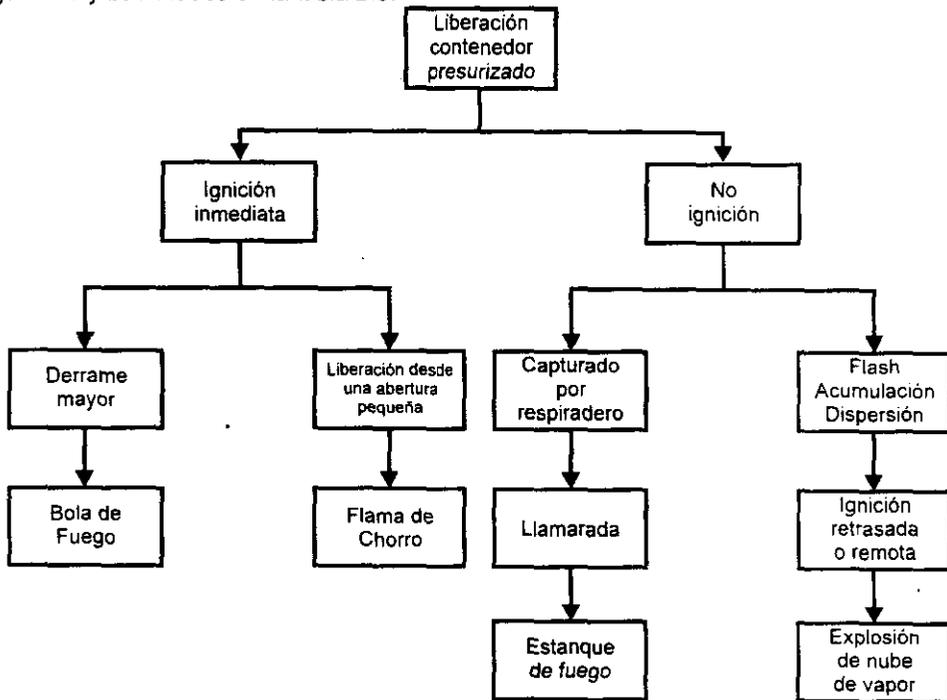


Fig. 4.6 ÁRBOL DE EVENTOS

Para el análisis fuga-avaporación, se utiliza el Modelo de Emisión de un Derrame elaborado por Monsanto Company⁽¹⁾. El procedimiento consiste de dos modelos computarizados los cuales proveerán los resultados de tiempo de derrame contra la tasa de emisión y de emisiones continuas desde un charco continuamente abastecido⁽⁴⁸⁾.

El modelo de derrame consiste de dos partes, la tasa de derrame desde una unidad o ruptura y la formación de un estanque. El cálculo de la tasa de emisión involucra la transferencia de masa y de calor, por lo que el procedimiento considera la solución simultánea de ambos balances (masa y calor).

El balance de calor consiste de la transferencia por conducción para/desde el piso, transferencia por convección para/desde la atmósfera, radiación solar desde el estanque, radiación atmosférica y pérdida de calor por evaporación.

El tamaño del estanque aumentará en base a la razón de adición de líquido, la geometría y características de la superficie que recibe y la razón de evaporación instantánea o tasa de flash.

DISPERSION Y EXPLOSION.

Para obtener los cálculos de dispersión-explósión se recurrió al Modelo de la Pluma Gaussiana descrito anteriormente. Para éste, se tienen diferentes modelos o submodelos de simulación del comportamiento de una dispersión de nubes inflamables, de los cuales se utilizará el Modelo ISCSTU de Liberación continua de la UNAMAP (Unified Air Modeling for Air Pollution).⁽¹⁾

A continuación se presenta el análisis de los resultados obtenidos por los programas fuga-*evaporación* y *dispersión-explósión*, para derrame de 50 ton de Propano.

Resultados del análisis fuga-*evaporación*:

Derrame:	inicial	final
Volumen del tanque, pies ³	3016.0	0.0
Área del estanque, pies ²	0.0	7238.22

Razón de derrame, pies ³ /hr	37 454.64	0.0
Razón de flasheo, lb/hr	643 148.30	0.0
Duración del estudio, hr	1.00	
Duración del derrame, hr	8.3063 X 10 ⁻²	

Tiempo (hr)	Emisión Instantánea de Fuente de Area (lb/hr-pie ²)	Emisión desde el estanque formado	Emisión Flash (lb/hr)
0.000	0.000E+00		643148.30
0.083	1.126E+01	=15.26 g/sm ²	
0.167	9.073E+00		
0.250	8.098		
0.333	7.516		
0.417	7.118		
0.500	6.824		
0.583	6.596		
0.667	6.412		
0.750	6.259		
0.833	6.130		
0.917	6.019		
1.000	5.922		

Análisis de Resultados:

1. El derrame de 50 ton ocurre en 0.083 hr.
2. En ese mismo ejemplo, la emisión por flash es 643148.3 lb/h la cual, considerando la duración del evento (0.083hr = 293.85s) indica que el material emitido directamente a la atmósfera es:

$$643148.3 \text{ lb/h (453.6 g/3600s)} = 81\,036.68 \text{ g/s}$$

$$81\,036.68 \text{ g/s (298.8 s)} = 24\,213\,759.98 \text{ g} = 24\,213.76 \text{ kg}$$

$$= 24.214 \text{ ton.}$$

A esta cantidad habrá que sumarle la emisión proveniente del estanque a fin de obtener la Emisión Total del Evento.

$$\text{Emisión del estanque: } 11.26 \text{ lb/h-pie}^2$$

$$11.26 \text{ lb/h-pie}^2 (453.6 \text{ g/3600})(10.76 \text{ pie}^2/\text{m}^2) = 15.26 \text{ g/s-m}^2$$

$$15.26 \text{ g/s-m}^2 (300 \text{ m}^2)(298.85 \text{ s}) = 1\,368\,426.3 \text{ g}$$

$$= 1\,368.4 \text{ Kg} = 1.37 \text{ ton.}$$

$$\text{Emisión Total} = 24.214 + 1.37 = 25.584 \text{ ton.}$$

Esta es la cantidad de propano "vaporizada" a partir de una fuga de 50 ton. Esa misma cantidad es menor a las 50 ton ($W = WL$) consideradas por el "Método Conservador".

Transformando esta cantidad a toneladas de TNT, utilizando la misma fórmula que en el método "conservador"

$$W = 25.584 \text{ ton (1 x 10}^6 \text{ gr / 1 ton)}(2.205 \times 10^{-3} \text{ lb / 1 gr)} = 56\,412.72 \text{ lb}$$

$$W_e = W \Delta H_c f / 4 \times 10^6 = 303.07 \text{ f}$$

$$25.584 (21490 \text{ btu / lb}) / 2000 \text{ btu} = 274.900$$

$$\text{si } f = 0.01 \quad W_{DM} = 303.07(0.01) = 3.0307$$

$$\text{si } f = 0.1 \quad W_{DC} = 303.07(0.1) = 30.307$$

PRESION	D_{DM}		D_{DC}	
	(ft)	(mts)	(ft)	(mts)
10	280	85.34	580	176.78
7	340	103.63	680	207.26
5	440	134.11	900	274.32
3	555	169.16	1250	381.0
2	670	204.21	1700	518.16
1	1100	335.28	2400	731.52
0.5	1800	548.64	4000	1219.2

3. Para hacer comparable este escenario en cuanto a material "vaporizado" se simuló la fuga de aproximadamente 200 ton, que tiene una duración de 0.15 h (9 min) con lo cual la cantidad emitida es:

Derrame:	inicial	final
Volumen del tanque, pies ³	12064.0	6 123.09
Área del estanque, pies ²	0.0	3216.40
Razón de derram, pies ³ /hr	39 823.52	38 284.67
Razón de flasheo, lb/hr	683 824.40	657 400.40
Duración del estudio, hr	0.15	
Duración del derrame, hr	1.5 X 10 ⁻¹	

Duración de estudio: 0.15 hr

Tiempo (hr)	Emisión Instantánea de Fuente de Area (lb/hr-pie ²)	Emisión Flash (lb/hr)
0.000	0.000E+00	
0.038	1.487E+01	683824.40
0.075	1.166E+01	
0.113	1.022E+01	
0.150	9.359E+00=	=12.688 g/sm ²

Emisión de Flasheo = 683 824.40 lb/hr

683 824.40 lb/hr(453.6 g/lb)(1/3600 s)= 86 161.87g/s

Para 0.15 hr (540 s):

86 161.87 g/seg (540 s)=46 527 409.8 g= 46.53 ton.

Emisión del estanque= 12.688 g/s-m²

12.688 g/s-m² (300 m²)(540 s)=2 055 456 g= 2.055 ton.

Emisión Total = 48.58 ton.

Para realizar el Análisis de Dispersión es necesario determinar la velocidad a la cual se efectúa el flasheo:

Si la emisión flash es 86 161.87 g/s:

86 161.87 g/seg = 1953.3 g/mol/s

si n= 44.11 g/gmol

Partiendo de la ecuación

$$PV=nRT$$

Se tiene:

$$V = nRT / p = 1953.3(0.082)(298)/12.9 = 3700 \text{ lit.}$$

$$Q = 3700 \text{ lit/seg} = 3.7 \text{ m}^3/\text{seg}$$

área = A = 0.785 D², donde D² es el diámetro interno

$$A = 0.785(0.1016)^2 = 0.0081 \text{ m}^2$$

$$\text{Velocidad} = v = Q/A = 456.6 \text{ m/seg.}$$

Introduciendo los datos de la tasa de emisión y tasa de flasheo así como la velocidad de esta última, al programa de dispersión, se obtiene el análisis para las 200 ton de propano correspondiente a las 50 ton de emisión total. El estudio se aplica a 45 días en las cuales se combinan las condiciones atmosféricas Pasquill-Gifford, tabla 4.3.

Tabla 4.3. COMBINACIÓN DE CONDCONES ATMOFÉRICAS PASQUILL-GIFFORD PARA 45 DÍAS

Día	Velocidad del viento (mph)	Temperatura (°K)	Condición
1	1.0	298	A
2	1.5	298	A
3	2.0	298	A
4	2.5	298	A
5	3.0	298	A
6	1.0	298	B
7	1.5	298	B
8	2.0	298	B
9	2.5	298	B
10	3.0	298	B
11	4.0	298	B
12	5.0	298	B
13	2.0	298	C
14	2.5	298	C
15	3.0	298	C
16	4.0	298	C
17	5.0	298	C
18	7.0	298	C
19	10.0	298	C
20	12.0	298	C
21	15.0	298	C
22	1.0	298	D
23	1.5	298	D
24	2.0	298	D
25	2.5	298	D
26	3.0	298	D
27	4.0	298	D
28	5.0	298	D
29	6.0	298	D
30	7.0	298	D
31	10.0	298	D
32	12.0	298	D
33	15.0	298	D
34	20.0	298	D
35	2.0	298	E
36	2.5	298	E
37	3.0	298	E
38	4.0	298	E
39	5.0	298	E
40	1.0	298	F
41	2.0	298	F
42	2.5	298	F
43	3.0	298	F
44	4.0	298	F
45	5.0	298	F

En la evaluación de dispersión de la nube explosiva, formada por las dos fuentes (estanque y flsheo); se identificó el día 40 como crítico; (tablas 4.4 y 4.5) es decir, el día donde la concentración de la nube formada es mayor. La evaluación de dispersión fue realizada para campo cercano (hasta 609.6 mts de radio) y campo lejano (hasta 3048 mts de radio).

Tabla 4.5

Resultados del análisis de dispersión (campo cercano).

CONCENTRACION ($\mu\text{g} / \text{m}^3$)	HORA DEL DIA	DIA TABLA (4.3)	DISTANCIA (m)	CONCENTRACION ($\mu\text{g} / \text{m}^3$)	HORA DEL DIA	DIA TABLA (4.3)	DISTANCIA (m)
103714400	1	40	250	13360300	1	39	250
55217450	1	40	500	13270880	1	42	750
5185700	1	41	250	12555600	1	40	150
45563860	1	22	250	11856680	1	36	500
41485760	1	42	250	11531710	1	27	250
34571470	1	43	250	11319120	1	6	250
33241930	1	35	250	11282510	1	13	250
33176020	1	40	750	11241550	1	23	500
30375910	1	23	250	11220010	1	45	500
27608730	1	41	500	11193620	1	41	1000
26593540	1	36	250	11069550	1	43	750
25928600	1	44	250	10309680	1	31	250
22781930	1	24	250	10073690	1	32	250
22378930	1	40	1000	9930513	1	28	250
22161290	1	37	250	9923335	1	30	500
22086980	1	42	500	9792889	1	37	250
20742900	1	45	250	9594905	1	29	250
18405840	1	43	500	9297413	1	33	250
18225590	1	25	250	9155796	1	14	250
16862160	1	22	500	8963276	1	42	1000
16622810	1	38	250	8632658	1	22	750
16588100	1	41	750	8557343	1	44	750
15190550	1	26	250	8449836	1	24	500
14816820	1	35	500	8238431	1	40	2000
13815400	1	44	500	8120738	1	35	750

Tabla 4.4

Resultados del análisis de dispersión (campo lejano).

CONCENTRACION ($\mu\text{g} / \text{m}^3$)	HORA DEL DIA	DIA TABLA (4.3)	DISTANCIA (m)	CONCENTRACION ($\mu\text{g} / \text{m}^3$)	HORA DEL DIA	DIA TABLA (4.3)	DISTANCIA (m)
6101032	1	40	2500	1626872	1	45	4000
4840587	1	40	3000	1597847	1	36	3000
3516846	1	40	4000	1539718	1	42	5000
3381230	1	41	2500	1529680	1	37	3000
2867636	1	42	2500	1516705	1	43	5000
2836807	1	44	2500	1515017	1	40	10000
2822457	1	43	2500	1465119	1	39	2500
2814166	1	40	5000	1456715	1	22	2500
2813931	1	41	3000	1429609	1	23	2500
2727086	1	45	2500	1406585	1	44	5000
2416768	1	42	3000	1387475	1	24	2500
2409705	1	43	3000	1338253	1	38	3000
2382309	1	44	3000	1309532	1	35	4000
2238373	1	45	3000	1282128	1	25	2500
2163051	1	41	4000	1257122	1	45	5000
2022389	1	35	2500	1237800	1	41	7500
1949517	1	40	7500	1207771	1	22	3000
1903379	1	36	2500	1207548	1	23	3000
1873462	1	42	4000	1186455	1	36	4000
1866203	1	43	4000	1162912	1	26	2500
1857250	1	37	2500	1155705	1	39	3000
1783266	1	44	4000	1135004	1	24	3000
1777936	1	41	5000	1102564	1	37	4000
1718630	1	35	3000	1061660	1	42	7504
1670266	1	38	2500	1046417	1	35	5000

Realizando la conversión a toneladas de TNT del material emitido y tomando en cuenta los factores para cálculo de daño máximo y daño catastrófico del método conservador se tiene lo siguiente:

$$W = 48.58 \text{ ton } (1 \times 10^6 \text{ gr})(2.205 \times 10^{-3} \times 16) = 107 \ 118.9$$

$$W_e = W \Delta H c f / 4 \times 10^6 = 575.49 \text{ f}$$

$$575.99(0.01) = 5.75$$

$$575.99 (0.1) = 57.549$$

Cálculo del diámetro de las ondas expansivas.

$$DM = 5.75 \text{ TNT}$$

$$DC = 57.5459 \text{ TNT}$$

Presión de Onda Expansiva	Diámetro DM		Diámetro DC	
	Complementado	Conservador	Complementado	Conservador
	mts.	mts.	mts.	mts.
10 psi	106.68	140.2	198.12	213.36
7 psi	124.96	155.45	243.84	274.32
5 psi	152.40	182.88	320.04	335.28
3 psi	204.21	274.32	472.44	487.68
2 psi	274.32	335.28	579.12	609.6
1 psi	426.72	548.64	883.92	914.4
0.5 psi	731.52	914.4	1463.04	1478.28

Si se compara las cantidades obtenidas por el "Método Conservador", son 1.2 veces mayores tanto en Daño Máximo como en Daño Catastrófico que las obtenidas por el "Método Complementado". Por otro lado tomando en cuenta el análisis realizado de la aportación de la fuente con respecto a la aportación puntual, esta última no influye tanto como la primera como pudiera esperarse según el estudio de la tasa de emisión general.

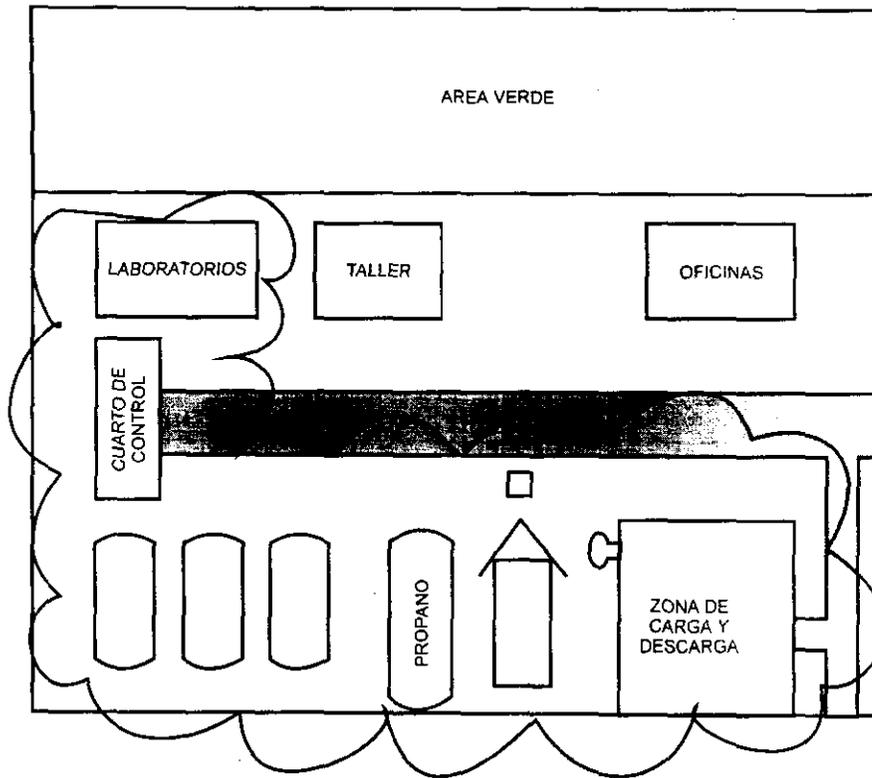


FIG. 4.6 MAPA DE RIESGOS. DERRAME EN CONTENEDOR DE PROPANO.

ANÁLISIS COSTO/CONFIABILIDAD DE LAS METODOLOGÍAS EMPLEADAS EN LA EVALUACIÓN DE LA MAGNITUD DE DAÑOS.

La palabra catástrofe significa un accidente extraordinariamente costoso tanto si hay como si no hay víctimas. Un percance que resulta varias veces más costoso que cualquier otro que ordinariamente pudiera ocurrir durante un período de varios años, puede recibir adecuadamente esta clasificación. En el caso de la mayoría de las compañías, los acontecimientos que se traducen en muerte o en incapacidad

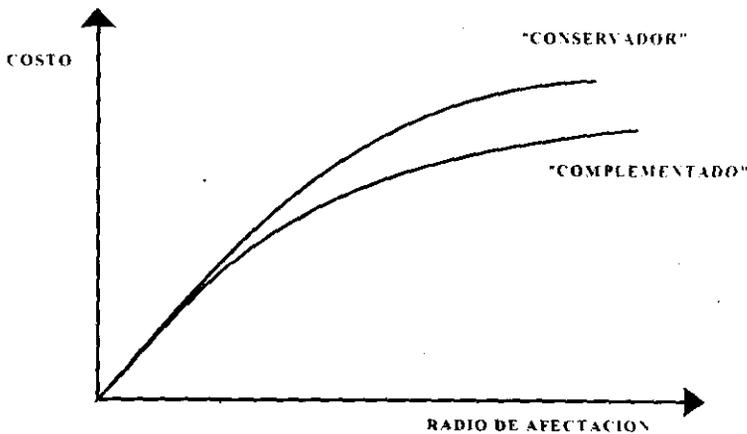
total permanente aún cuando ocurren con poca frecuencia, son incluidos en la categoría de catástrofe. Por ello en el empleo de datos acerca de los costos; alguien ha de tomar decisiones para mostrar cuánto dinero ha de ser asignado y cuanto énfasis ha de ser dado a las operaciones de seguridad, desde el nivel gerencial hasta el nivel operativo.

El ejemplo mostrando se refiere precisamente a lo que pudiera ser una catástrofe y para determinar cuál es el procedimiento de evaluación de se puede tomar en cuenta el grado de confiabilidad de los mismos y la magnitud de daños o radio de afectación determinado por cada uno aún, sin hacer un estudio profundo de costos (costos por indemnización a víctimas dentro y fuera de la planta, tiempos muertos, sustitución de personal, tiempo de capacitación, restauración o sustitución de equipo, pérdida de materia prima y producto terminado, etc.).

En lo que se refiere a confiabilidad se puede decir que el "Método Complementado" al considerar las diferentes variables que podrían afectar la emisión y dispersión de la nube de vapor se acerca más a la realidad del escenario que la metodología "Conservadora" la cual supone fuga total, evaporación instantánea y fuente de ignición inmediata.

Por otro lado tomando en cuenta el mayor número de variables posibles, los resultados indican que el "Método Complementado" aporta menor alcance en daños que el "Conservador" lo que implica menores costos de prevención y control, ya que no de haría un gasto monetario innecesario, y además aprovechar el capital en alguna otra necesidad

El valor de una actividad en particular dentro de una compañía puede ser indicado por muchos procedimientos, pero cuando se presenta en función del dinero, mediante aumento en las ventas, o disminución en los costos, ésta constituye evidentemente la forma más efectiva. La siguiente figura nos muestra cómo se refleja el costo por medidas de manejo con respecto a la distancia o radio de afectación de las explosiones de acuerdo a las dos metodologías estudiadas.



CONCLUSIONES

Dado el crecimiento nacional e internacional de la Industria Química, y el constante consumo, manejo y producción de químicos capaces de formar nubes inflamables; resulta de gran importancia la realización de un ANALISIS DE RIESGOS en materia de explosiones así como la EVALUACION DE LA MAGNITUD DE SUS CONSECUENCIAS de tal forma que se pueda prevenir y en caso extremo controlar un siniestro de tal índole.

Haciendo referencia al ANALISIS DE RIESGOS; en el presente estudio se encontró que existen numerosas fuentes de auxilio para los Ingenieros de Proceso, Industriales, de Higiene y Seguridad, Ambientales, etc., como son las diferentes metodologías de análisis de riesgos utilizables de acuerdo al propósito de los analistas, al proceso/sistema y a la documentación disponible.

Así también se cuenta con modelos de estudio y evaluación de consecuencias de los riesgos; que para este caso, pueden apegarse al escenario de riesgo en gran medida; lo que aportará resultados más reales abriendo nuevas perspectivas que permitirán en un momento dado enfrentarse a una emergencia.

Modelos que se basan en las consideraciones hechas por el "Método Complementado" pueden guiar a una buena toma de decisiones. Por otro lado para la prevención y control de riesgos se puede hacer uso de las medidas de manejo que van desde reparar un equipo; hasta la modificación y optimización del proceso incluyendo la concientización del personal de tal forma que todos los movimientos se apeguen a las normas y regulaciones de seguridad. Será entonces de gran utilidad revisar los apéndices I y II de este trabajo en los cuales se determina cuáles son las sustancias consideradas como de alto riesgo en nuestro país así como las recomendaciones para la mitigación del riesgo.

El análisis de riesgos, la evaluación de sus consecuencias y las medidas de prevención y control significan en todo momento un costo y éste; debe ser optimizado de tal forma que sea el menor pero también proporcione seguridad, así pues, la principal fuerza impulsora del movimiento de la seguridad industrial, es el hecho de que los accidentes CUESTAN MUCHO. Se pueden lograr ahorros considerables evitándolos y el objetivo primero y de mayor prioridad del trabajo relacionado con la seguridad, es el humano. Esto indica sencillamente que para muchas compañías la reducción de los costos ha tenido en realidad el mayor efecto en el origen de una reducción de las lesiones.

Con el análisis de costo/confiabilidad, se puede observar que siguiendo una metodología más próxima a la realidad como es la de "Método Complementado", se lograrán mayores beneficios y menores costos que el desarrollado por el "Método Conservador".

Cabe señalar que la metodología de evaluación de consecuencias empleada en este estudio de ninguna manera es absoluta. La ciencia y la tecnología al evolucionar, requerirán y aportarán nuevas herramientas de análisis que ayudarán a una mejor toma de decisiones y por lo tanto, a la disminución de riesgos.

De todo lo anterior nace y se desarrolla la trascendencia del presente estudio que por su disponibilidad y contenido; aporta grandes beneficios reflejados en el aspecto

económico y social dado que no sólo evita daños a la planta, sino también al personal que labora en ella así como a las comunidades vecinas y al medio ambiente.

APENDICE I

**PODER EJECUTIVO
SECRETARIA DE GOBERNACION**

ACUERDO POR EL QUE LAS SECRETARIAS DE GOBERNACION Y DESARROLLO URBANO Y ECOLOGIA . CON FUNDAMENTO EN LO DISPUESTO POR LOS ARTICULOS 50 FRACCION X Y 146 DE LA LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLOGICO Y LA PROTECCION AL AMBIENTE; 27 FRACCION XX - XII Y 37 Y FRACCIONES XVI Y XVII DE LA LEY ORGANICA DE LA ADMINISTRACION PUBLICA FEDERAL, EXPIDEN EL SEGUNDO LISTADO DE ACTIVIDADES ALTAMENTE RIESGOSAS

Mediante este acuerdo se expide el segundo listado de actividades *altamente riesgosas* que corresponde a aquellas en que se manejan *sustancias inflamables* y explosivas en cantidades tales que producirse una liberación, ya sea por fuga o derrame de las mismas en la producción, procesamiento, transporte, almacenamiento, o uso o disposición final provocaría la formación de *nubes inflamables*, cuya concentración sería semejante a la de su límite inferior de inflamabilidad, en un área determinada por una franja de 100 metros de longitud en torno de las instalaciones o medio de transporte dados, y en el caso de formación de *nubes explosivas*, la presencia de ondas de *sobrepresión* de 0.5 lb/pulg² en esa misma franja.

La secretaria de Gobernación y de Desarrollo Urbano y ecología, previa opinión de las Secretarías de Energía Minas e Industria Paraestatal, de Comercio y Fomento Industrial, de Agricultura y Recursos

Hidráulicos, de Salud y del Trabajo y Previsión Social, así como con la participación de la Secretaría de la Defensa Nacional, llevaron a cabo los estudios que sirvieron de sustento para determinar los criterios y este segundo listado de actividades que deben considerarse altamente riesgosas.

En mérito de lo anterior, hemos tenido a bien dictar el siguiente:

ACUERDO

ARTICULO 1o.- Se expide el segundo listado de actividades *altamente riesgosas* que corresponde a aquellas en que se manejan *sustancias inflamables* y explosivas.

ARTICULO 2o.- Se considerará como actividad *altamente riesgosa*, el manejo de *sustancias peligrosas* en cantidades iguales o superiores a la cantidad de reporte.

ARTICULO 3o.- Para los efectos de este Acuerdo se considerarán las definiciones contenidas en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente y las siguientes:

CANTIDAD DE REPORTE: Cantidad mínima de *sustancia peligrosa* en producción, procesamiento, transporte, almacenamiento, uso o disposición final, o la suma de éstas, existentes en una instalación o medio de transporte dados, que al ser liberadas por causas naturales o derivadas de la actividad humana ocasionaría una

afectación significativa al ambiente, a la población o a sus bienes.

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

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

SUSTANCIA INFLAMABLE: Aquella que es capaz de formar una mezcla con el aire en concentraciones tales para prenderse espontáneamente o por la acción de una chispa.

SUSTANCIA EXPLOSIVA: Aquella que en forma espontánea o por acción de alguna forma de energía genera una gran cantidad de calor y energía de presión en forma casi instantánea.

ARTICULO 4o.- Las actividades asociadas con el manejo de sustancias inflamables y explosivas que deben considerarse altamente riesgosas son la producción, procesamiento, transporte, almacenamiento, uso y disposición final de las sustancias que a continuación se indican, cuando se manejen cantidades iguales o superiores a las cantidades de reporte siguientes:

I. Cantidad de reporte: a partir de 500 kg.

a) En el caso de las siguientes sustancias en estado gaseoso:

ACETILENO
 ACIDO SULFHIDRICO
 ANHIDRIDO HIPOCLOROSO
 BUTANO (N. ISO)
 BUTADIENO
 1-BUTENO
 2-BUTENO (CIS, TRANS)
 CIANOGENO
 CICLOBUTANO
 CICLOPROPANO
 CLORURO DE METILO
 CLORURO DE VINILO
 DIFLUORO 1-CLOROETANO
 DIMETIL AMINA
 1,1-DIMETILPROPANO
 ETANO
 ETER METILICO
 ETILENO
 FLUORURO DE ETILO
 FORMALDEHIDO
 HIDROGENO
 METANO
 METILAMINA
 2 - METIL PROPENO
 PROPANO
 PROPILENO
 PROPINO
 SULFURO DE CARBONILO
 TETRAFLUROETILENO
 TRIFLUOROCLOROETILENO
 TRIMETIL AMINA

b) En el caso de las sustancias en estado gaseoso no previstas en el inciso anterior y que tengan las siguientes características:

Temperatura de inflamación $\leq 37.8^{\circ}\text{C}$
 Temperatura de ebullición $< 21.1^{\circ}\text{C}$
 Presión de vapor $> 760 \text{ mm Hg}$

c) En el caso de las siguientes sustancias en estado líquido:

2 - BUTINO
 CLORURO DE ETILO
 ETILAMINA
 3-METIL-1-BUTENO
 METIL ETIL ETER
 NITRITO DE ETILO
 OXIDO DE ETILENO
 1-PENTANO

II. Cantidad de reporte: a partir de 3000 kg.

a) En el caso de las siguientes sustancias en estado líquido:

ACETALDEHIDO
 ACIDO CIANHIDRICO
 AMILENO (CIS. TRANS)
 COLODION
 DISULFURO DE CARBONO
 2-METIL-1-BUTENO
 2-METIL-2-BUTENO
 OXIDO DE PROPILENO
 PENTANO (N.ISO)
 1-PENTENO
 1-PENTENO
 SULFURO DE DIMETILO

III. Cantidad de reporte: a partir de 10,000 kg.

a) En el caso de las siguientes sustancias en estado líquido:

ACROLEINA
 ALIL AMINA
 BROMURO DE ALILO
 CARBONIL DE NIQUEL
 CICLOPENTANO
 CICLOPENTENO
 1-CLORO PROPILENO
 2-CLORO PROPILENO

CLORURO DE ALILO
 CLORURO DE ACETILO
 CLORURO DE PROPILO (N. ISO)
 1,1-DICLOROETILENO
 DIETILAMINA
 DIHIDROPIRAN
 2,2 DIMETIL BUTANO
 2,3 DIMETIL BUTANO
 2,3-DIMETIL 1-BUTENO
 2,3-DIMETIL 2-BUTENO
 2 ETIL 1-BUTENO
 ETER DIETILICO
 ETER VINILICO
 ETILICO MERCAPTANO
 ETOXIACETILENO
 FORMIATO DE ETILO
 FORMIATO DE METILO
 FURANO
 ISOPRENO
 ISOPROPENIL ACETILENO
 2-METIL PENTANO
 3-METIL PENTANO
 2-METIL 1-PENTENO
 2-METIL 2-PENTANO
 3-METIL PENTANO
 4-METIL 1-PENTENO
 4-METIL 2-PENTENO
 2-METIL 2-PROPANOTIOL
 METIL PROPIL ACETILENO
 METIL TRICLOROSILANO
 PROPIL AMINA (N.ISO)
 PROPENIL ETIL ETER
 TETRAHIDROFURANO
 TRICLOROSILANO
 VINIL ETIL ETER
 VINIL ISOPROPIL ETER

IV. Cantidad de reporte: a partir de 20,000 kg.

a) En el caso de las siguientes sustancias en estado líquido:

ACETATO DE ETILO
 ACETATO DE METILO

ACETATO DE VINILO
 ACETONA
 ACRILATO DE METILO
 ACRILONITRILLO
 ALCOHOL METILICO
 ALCOHOL ETILICO
 BENCENO
 1-BROMO -2-BUTENO
 BUTILAMINA (N. ISO. SEC. TER)
 CICLOHEXANO
 CICLOHEXENO
 CICLOHEPTANO
 2-CLORO-2-BUTENO
 CLORURO DE BUTILO (N. ISO. SEC. TER)
 CLORURO DE VINILIDENO
 DICLOROETANO
 DICLOROETILENO (CIS. TERNS)
 1,2-DICLOROETILENO
 DIMETIL DICLOROSILANO
 1,1-DIMETIL HIDRAZINA
 2,3 DIMETIL PENTANO
 2,4-DIMETIL PENTANO
 DIMETOXI METANO
 DIISOBUTILENO
 DIISOPROPILAMINA
 DIOXOLANO
 ETER ETIL PROPILICO
 ETER PROPILICO (N. ISO)
 ETIL BUTIL ETER
 ETIL CICLOBUTANO
 ETIL CICLOPENTANO
 ETIL DICLOROSILANO
 ETIL METIL CETONA
 ETILENIMINA
 FORMIATO DE PROPILO (N. ISO)
 FLUOROBENCENO
 1-HEXENO
 2-HEXENO (CIS. TRANS)
 HEPTANO (N. ISO. Y MEZCLAS DE ISOMEROS)
 HEPTENO
 HEPTILENO
 HEPTILENO 2-TRANS
 1,4-HEXADIENO

HEXANO (N. ISO Y MEZCLAS DE ISOMEROS)
 ISOBUTIALDEHIDO
 2-METIL FURANO
 METIL CICLOHEXANO
 METIL CICLOPENTANO
 METIL DICLOROSILANO
 METIL ETER PROPILICO
 2-METIL HEXANO
 3-METIL HEXANO
 METIL HIDRAZINA
 2-METIL-1,3-PENTADIENO
 4-METIL-1,3-PENTADIENO
 METIL PIRROLIDINA
 2,METIL TETRAHIDROFURANO
 METIL VINIL CETONA
 MONOXIDO DE BUTADIENO
 NITRATO DE ETILO
 2,5-NORBORNADIENO
 OXIDO DE BUTILENO
 OXIDO DE PENTAMETILENO
 1,2-OXIDO DE BUTILENO
 PIRROLIDINA
 PROPIONALDEHIDO
 PROPIONATO DE METILO
 PROPIONATO DE VINILO
 TRIETILAMINA
 2,2,3-TRIMETILBUTANO
 2,3,3-TRIMETIL 1-BUTENO
 2,3,4-TRIMETIL 1-PENTENO
 2,4,4-TRIMETIL 2-PENTENO
 TRIMETILCLOROSILANO
 VINIL ISOBUTIL ETER

V. Cantidad de reporte: a partir de 50,000 kg.

a) En el caso de las siguientes sustancias en estado gaseoso:

GAS L.P. COMERCIAL (1)

VI. Cantidad de reporte: a partir de 100,000 kg.

a) En el caso de las siguientes sustancias en estado líquido:

ACETATO DE PROPILO (N. ISO)
 ALCOHOL ALILICO
 ALCOHOL DESNATURALIZADO
 ALCOHOL PROPILICO (ISO)
 AMILAMINA (N.SEC)
 BROMURO DE N-BUTILO
 BUTIRATO DE MITILO
 BUTIROMITRILLO (N.ISO)
 1,2-DICLOROPROPANO
 2,3-DIMETIL HEXANO
 2,4-DIMETIL HEXANO
 P-DIOXANO
 ETER ALILICO
 FORMIATO DE ISOBUTILO
 2-METIL-2-BUTANOL
 2-METIL BUTIRALDEHIDO
 2-METIL-3-ETIL PENTANO
 3-METIL- 2-BUTANOTIOL
 METIL METACRILATO
 PIPERIDINA
 PIRIDINA
 PROPIONATO DE ETILO
 PROPIONITRILLO
 TETRAMETILO DE PLOMO
 2,2,3-TRIMETIL PENTANO
 2,2,4-TRIMETIL PENTANO
 2,3,3-TRIMETIL PENTANO
 TOLUENO

VII. Cantidad de reporte: a partir de 200.000 kg.

a) En el caso de las siguientes sustancias en estado líquido:

ACETAL
 ACETATO DE BUTILO (ISO. SEC)
 ACETATO DE ISOAMILO
 ACETATO DE ISOPROPENILO
 ACETONITRILLO
 ACRILATO DE ISOBUTILO

ALCOHOL AMILICO (N.SEC)
 ALCOHOL BUTILICO (ISO. SEC. TERT)
 AMIL MERCAPTANO
 BUTIRATO DE ETILO (N. ISO)
 CLOROBENCENO
 CLORURO DE AMILO
 CROTONALDEHIDO
 CUMENO
 DIETILCETONA
 DIETILICO CARBONATO
 1,3-DIMETIL BUTILAMINA
 1,3-DIMETIL CICLOHEXANO
 1,4-DIMETIL CICLOHEXANO (CIS. TRANS)
 ESTIRENO
 ETIL BENCENO
 ETIL BUTILAMINA
 2-ETIL BUTIRALDEHIDO
 ETIL CICLOHEXANO
 ETILENDIAMINA
 ETILENO-GLICOL DIETILICO ETER
 FERROPENTACARBONILO
 ISOBROMURO DE AMILO
 ISOFORMIATO DE AMILO
 METACRILATO DE ETILO
 METIL ISOBUTIL CETONA
 METIL PROPIL CETONA
 NITROETANO
 NITROMETANO
 OCTANO (N. ISO)
 OCTENO (ISO)
 1-OCTENO
 2-OCTENO
 OXIDO DE MESITILO
 2,2,5-TRIMETIL HEXANO
 VINIOL TRICLOROSILANO
 XILENO (M.O.P)

VIII. Cantidad de reporte: a partir de 10.000 kg.

a) En el caso de las sustancias en estado líquido. no previstas en las fracciones anteriores y que tengan las siguientes características:

Temperatura de inflamación ≤ 37.8 °C

Temperatura de ebullición <21.1°C
 Presión de vapor >760 mm Hg

IX. Cantidad de reporte: a partir de 10000 barriles

a) En el caso de las siguientes sustancias en estado líquido:

GASOLINAS (1)

KEROSENAS INCLUYENAFITAS Y DIAFANO (1)

(1) Se aplica exclusivamente a actividades industriales y comerciales.

ARTICULO 5°.- Se exceptúa de este listado a las actividades relacionadas con el manejo de las sustancias a que se refiere el artículo 41 de la Ley Federal de Armas de Fuego y Explosivos. ARTICULO 6°.- Las cantidades de reporte de las sustancias indicadas en este Acuerdo, deberán considerarse referidas a su más alto porcentaje de concentración. Cuando dichas sustancias se encuentran en solución o mezcla, deberá realizarse el cálculo correspondiente, con el fin de determinar la cantidad de reporte para el caso de que se trate.

ARTICULO 7°.- Las Secretarías de Gobernación, y de Desarrollo Urbano y Ecología, previa opinión de las Secretarías de Energía Minas e Industria Paraestatal; de Comercio y Fomento Industrial, de Agricultura y Recursos Hidráulicos, de Salud y del Trabajo y Previsión Social podrán ampliar y modificar el listado objeto del presente Acuerdo, con base en el resultado de las investigaciones que sobre el particular se lleven a cabo.

TRANSITORIO

UNICO.- El presente Acuerdo, entrará en vigor al día siguiente de su publicación en el Diario Oficial de la Federación.

México, D.F., a 30 de abril de 1992.- El Secretario de Gobernación, **Fernando Gutiérrez Barrios**.-Rúbrica.- El Secretario de Desarrollo Urbano y Ecología, **Luis Donald Colosio Murrieta**.-Rúbrica.

APENDICE II

MEDIDAS DE MANEJO

Análisis de vulnerabilidad.

Este aspecto permite conocer la forma y alcances en que un posible evento puede afectar a un sistema, considerando así a una empresa o a una comunidad. El análisis de vulnerabilidad combina la consideración del riesgo, con los medios de enfrentarlo, con las posibles consecuencias y con la forma como dichas consecuencias afectarían la estabilidad del sistema. Por lo tanto, el análisis de vulnerabilidad va más allá del aspecto cuantitativo del riesgo, llegando a la evaluación cualitativa de sus consecuencias, involucrando factores técnicos, económicos, sociales y políticos.

Una definición de vulnerabilidad podría ser: "El grado relativo de sensibilidad de un sistema, ante las consecuencias de un riesgo, en unas condiciones dadas de seguridad respecto al mismo". Por lo tanto, entre mayor sea la forma como se pueda afectar la estabilidad del sistema, mayor será la vulnerabilidad de dicho sistema ante el riesgo que se considere.

Mapas de riesgos.

Una vez identificados y calificados los diferentes riesgos existentes, es necesario ubicarlos en el espacio, con el fin de determinar la concentración o densidad de los mismos dentro de las áreas de una comunidad. Esta densificación, ubicación y calificación de los riesgos, es lo que comúnmente se denomina como un "Mapa de Riesgos". Los mapas de riesgos son el fundamento para el establecimiento, tanto de medidas de prevención, como para la planeación de respuestas adecuadas a incidentes con materiales peligrosos.

Las técnicas para la elaboración de mapas de riesgos requieren de trabajos interinstitucionales en forma multidisciplinaria, involucrando las agencias estatales, los organismos de emergencias y las empresas

organismos privados que en alguna forma estén relacionados con los riesgos a analizar. Para ello es fundamental la identificación de las fuentes de información confiables existentes, tanto a nivel nacional como internacional, ya que la utilización de dicha información facilita grandemente la elaboración de los planes, al evitar actuar sobre simples supuestos.

El dibujo muestra un sencillo mapa de riesgos.

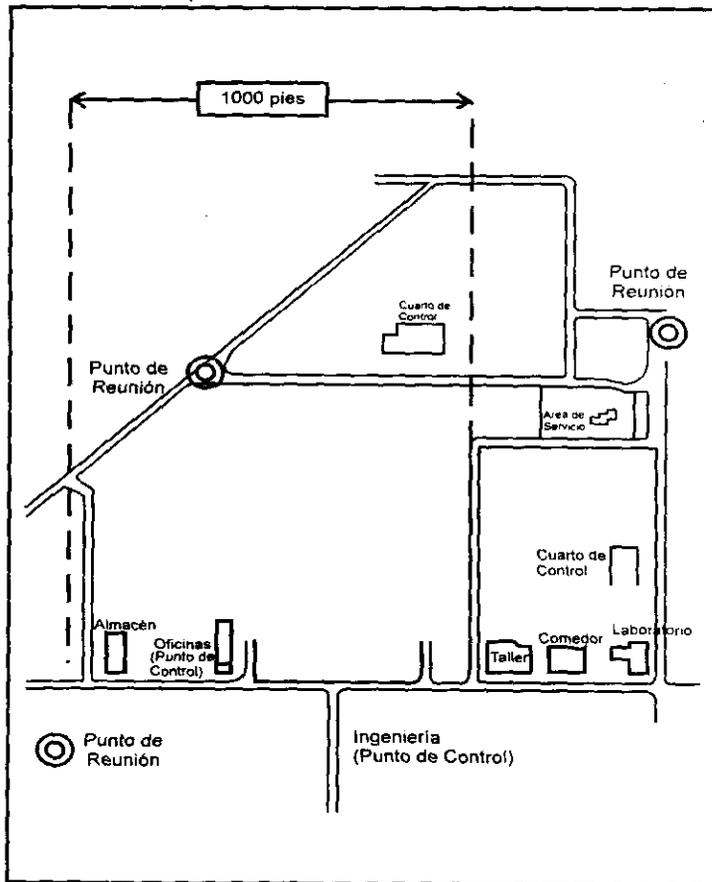


Fig. A. MAPA DE RIESGOS O "DIAGRAMA DE PÉTALO"

Áreas de Mayor Peligro.

Al definir y evaluar más claramente los diferentes factores que afectan la probabilidad y los resultados de una explosión de nube de vapor, se puede identificar y definir áreas dentro de las cuales el peligro es mayor.

Estas áreas se llaman Áreas de Peligros Mayores. El conocimiento de estas áreas ayudará a:

1. Identificar dónde son necesarios los estándares o parámetros especiales de diseño y construcción particularmente para edificios ocupados como cuartos de control.
2. Decidir dónde se debe promover la no concentración de la gente.
3. Decidir dónde no deben ser construidas otras unidades si queremos evitar el riesgo de un efecto dominó en el cual, una explosión en una unidad daña la siguiente y provoca una segunda explosión.
4. Definir la tasa del seguro.
5. Diseñar experimentos para incrementar el conocimiento de los efectos de las explosiones de nubes inflamables.

Medidas de Manejo.

Una vez concluida la etapa de evaluación de consecuencias, se debe considerar un análisis detallado de las oportunidades para prevenir y controlar los eventos que den origen a accidentes mayores, se puede comenzar por la identificación de medidas que eviten la ocurrencia de dichos eventos.

En la estrategia de manejo deben considerarse primordialmente los enfoques de prevención y minimización del riesgo en su origen (Eliminación y Reducción) antes que su transferencia o control, entendido éste como la simple adición de equipos o sistemas.

El análisis para establecer el esquema de manejo, debe abarcar las siguientes áreas:

MEDIDAS DE MANEJO	Sistemas de monitoreo.
	Optimización de instrumentación.
	Modificaciones a condiciones de proceso y almacenamiento.
	Entrenamiento de personal.

A. Sistemas de Monitoreo.

Es importante contar con los medios necesarios para conocer las variables meteorológicas de interés en el propio sitio; es decir, instalar una estación meteorológica que proporcione no solamente la información para realizar los estudios de evaluación de consecuencias, sino la necesaria para optimizar la ejecución del plan de respuesta a emergencias en caso de que ocurra el accidente.

Otro sistema o equipo relevante dentro de los aspectos preventivos es el requerido para la detección temprana de la liberación de MAP's (material altamente peligroso). La instalación y operación confiable de un sistema de este tipo reducirá el tiempo de respuesta para manejar el evento.

El propósito de los equipos de monitoreo es facilitar a los grupos de emergencia la identificación cualitativa y cuantitativa de las sustancias peligrosas presentes. Los principios de operación pueden ser diversos según sean las características que se quieren determinar. Los de más amplia utilización son⁽⁷⁵⁾:

- Medidores de Oxígeno.
- Indicadores de Gas Combustible (explosímetros).
- Medidores de Monóxido de Carbono.
- Medidores del pH.
- Instrumentos para detección de Radiación.
- Tubos colorimétricos.

- Analizadores de vapores orgánicos.
- Medidores de fotoionización.
- Bombas de muestreo de aire.
- Película o cintas para vapores orgánicos.
- Cintas para mercurio.

El uso de los equipos de monitoreo debe ser responsabilidad del personal especializado, con conocimientos y experiencia tanto en su funcionamiento, como en la interpretación de los resultados. Especial cuidado debe tenerse con la calibración que se haga de los diferentes instrumentos de medida, pues de ello dependerá en gran parte la confiabilidad en los resultados que se obtengan.

B. Optimización de Instrumentación.

Para todo el personal en una industria, le es familiar la existencia de la instrumentación de proceso que se pudiera denominar "normal"; la cual está orientada, principalmente, a asegurar la calidad y cantidad de la producción (si bien, también contendrá elementos de diseño para mantener el funcionamiento de la planta dentro de los márgenes que se consideren seguros con base en la experiencia y desarrollo de la tecnología que se trate). Sin embargo, como se ha visto, las condiciones de operación de un proceso pueden apartarse radicalmente de los límites definidos.

Por esta razón, la inclusión de instrumentación adicional (denominada de seguridad) se hace con la idea de restablecer, en caso de falla, las condiciones de la planta a una situación segura; previniendo, aún durante desajustes severos en las condiciones normales de operación de la planta, el surgimiento de condiciones que lleven a un accidente mayor.

La instrumentación de seguridad puede variar desde un simple sistema de alarmas hasta un elaborado sistema de ensamblaje diseñado para realizar automáticamente una secuencia complicada de acciones para enfriar, purgar, depresurizar, etc.

La tabla muestra una comparación de algunos aspectos de las instrumentaciones "normal" y de "seguridad". La diferencia más importante entre ambas es que el sistema de seguridad debe tener una confiabilidad muy alta, mucho más que la considerada como aceptable para instrumentación normal de control. De hecho, una de las funciones de la instrumentación de seguridad es proteger de las fallas de la instrumentación normal de control. Por esta situación, la instrumentación de seguridad debe ser diseñada para estar completamente separada e independiente de otras funciones de control.

TABLA A.

COMPARACION ENTRE SISTEMAS DE INSTRUMENTACION

Normal	De Seguridad
Uso frecuente de algoritmos de control complejos.	Usualmente simple.
La confiabilidad debe ser suficiente en función de necesidades económicas.	La confiabilidad debe ser muy alta.
La falla de control puede resultar en condiciones inseguras.	Debe procurarse un diseño "failsafe"; es decir, la falla de la instrumentación no debe conducir a una situación insegura.

C. Modificaciones a proceso y almacenamiento.

Al igual que la optimización de instrumentación, las medidas que pueden considerarse en este aspecto pueden ser simples o complejas, variando de alteraciones en la condiciones de operación, pasando por la sustitución radical en la filosofía del proceso.

Algunas posibilidades son :

- Reducir la cantidad almacenada de materiales peligrosos.
- Diseñar e instalar conexiones únicas a fin de eliminar transferencias equivocadas.
- Instalación de sistemas de venteo y supresión de explosiones.

- Instalación de sistemas de inertización, etc.

De cualquier forma, al aplicar las posibilidades anteriores y/o algunas otras; es siempre un punto importante la observación y seguimiento de las legislaciones así como de las normalizaciones dado que es necesario establecer un marco legal que determine políticas nacionales en concordancia con las ya complementadas en otros países, bajo los parámetros establecidos por las Naciones Unidas y otras agencias de Instituciones con experiencia en el tema. Asimismo, la ley debe contener los diferentes niveles de autoridad y responsabilidad, tanto en el ámbito gubernamental como privado, referentes a la organización, operación y control.

Para realizar las modificaciones al proceso/sistema y almacenamiento es indispensable la revisión de la siguiente normalización:

1. Segundo listado de actividades altamente riesgosas (SEDUE), publicado en el Diario Oficial de la Federación y que incluye este trabajo en el apéndice I.
2. Normas Oficiales Mexicanas publicadas también en el Diario Oficial de la Federación, siendo de especial interés para el tema que ocupa a este trabajo las siguientes:

CLAVE	FECHA	PAG.	DENOMINACIÓN
NOM-002-STPS-1993	15-07-93	48	Relativa a las condiciones de seguridad para la prevención y protección contra incendios en los centros de trabajo.
NOM-005-STPS-1993	15-07-93	58	Relativa a las condiciones de seguridad en los centros de trabajo para el almacenamiento, transporte y manejo de sustancias y combustibles.
NOM-008-STPS-1993	19-07-93	13	Relativa a las condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo donde se produzcan, almacenen o manejen sustancias químicas capaces de generar contaminación en el medio ambiente laboral.
NOM-022-STPS-1993	19-07-93	16	Relativa a las condiciones de seguridad en los centros de trabajo en donde la electricidad estática representa un riesgo.

D. Entrenamiento de personal.

Durante la identificación de eventos es común encontrar como causa de accidentes el "Error de operación" o más táctico: "Error del Operador". Si se pretende minimizar tales eventos, es necesario contar con un programa efectivo de entrenamiento de operadores.

Entiéndase el por qué : Cuando se construye una planta, se establecen programas de entrenamiento de los operadores que participarán en el arranque. Estos programas son frecuentemente, muy elaborados : incluyen períodos de estancia en plantas similares, sesiones técnicas y familiarización con cada uno de los elementos que conforman el proceso requiriendo, así mismo, varios meses y una erogación considerable que se justifican a fin de lograr un arranque rápido y seguro. Sin embargo, una vez que la planta ha estado en operación por cierto período, el entrenamiento de nuevos operadores se lleva a cabo, también frecuentemente, sin el cuidado y atención con que se realizó el de los operadores originales. Esta situación ha sido la causa de accidentes en plantas después de 3 ó 4 años de su inicio de operaciones cuando los operadores originales han dejado esas funciones.

La situación descrita, unida a las modificaciones a proceso, incremento de instrumentación, etc., hacen que sea más conveniente contar con un programa de entrenamiento de operadores, teniendo en mente que siempre será un contribuyente de importancia a la seguridad de la planta.

En lo que respecta al entrenamiento y preparación del personal de emergencia, dado que la atención de incidentes que involucran materiales peligrosos lleva consigo varios niveles de responsabilidad operacional; los niveles de respuesta deben diferenciarse adecuadamente definiendo en forma clara los alcances de su actuación. El no hacerlo representa un grave riesgo tanto para el personal de emergencia, como para la comunidad misma. En consecuencia, la preparación del personal de respuesta debe corresponder a las exigencias de las responsabilidades a asumir por cada grupo.

BIBLIOGRAFIA

1. Milier E, David.- **"How to Establish Industrial Loss Prevention and Fire Protection"** .- AICHE.- 1985.
2. Freeman, Raymond A.- **"What Should you Worry About when Doing a Risk Assessment?"** .- Monsanto Co.- Chemical Engineering Progress.- Noviembre 1989.
3. Gibson,S.B.-**"HazardAnaiysisandRiskCriteria"**.-Loss Prevention.-1989.
4. Kolluru, Rao V.- **"Understand the Basics of Risk Assessrnt"** .- Chemical Engineering Progress.- Marzo 1991.
5. Technical Manuai.- **"Dows Fire and Explosion Index Hazard Clasification Guide"** .-AICHE.- 5a. Ed.-USA.-1981.
6. Kietz, Trevor a.- **"Eliminating Potential Process Hazards"** .- Chemical Eingenieering.-Abril 1, 1985.
7. Arendt, Steven(et. al.).- **"Do's and Dont's to OSHA-PROFF Your Process Hazard Analyses"**.- Chemical Eingenieering.- March, 1993.
8. Louiiey, H. G.- **"Operatibility Studies and Hazard Analysis"** .- Chemical Eingenieering Process.- Vol. 70, No. 4.- Abril 1974.
9. Freeman, Raymond A.- **"The Use of Risk Assessment in the Chemical Industrias"** .- Monsanto Co.- Plant 1 Operation Progress (Voi.4 No. 2).- Abril 1985.
10. Burns, Caroiyn C.- **"Balancing Risk and Availability in Toxic Chemical Production"** .- Chemical Engineering Progress.- Septiembre 1984.
11. Vervalin, C. H. - Hazard Evaluation.- **Hydrocarbon Processing Staff.**-Hidrocarbon Processing. Diciembre 1986.
12. Brovning, R. L.- **"Analyzing Industrial Risks"** .- Monsanto Co.- Chemical Engineering.- Octubre 1969.
13. Browning, R. L.- **"Finding the Critica; Path to Loss"** .- Chemical Engineering.Noviembre 1969.

14. Strehione, R. A.- **"Blast Wave From Deflagration Explosions an Acoustic Approach"**. -AICHE 1981.
15. Sauvides, CN.- **"The Modelling of Gas Explosions : a Comparison of a 3-D Numerical Model with Simpler Models"** .- AICHE 1990.
16. Bruderer, Reinhard E.- **"Use Bulk Bags Cautiously"** .- Ciba-Geigy Corporation. Chemical Engineering Progress.- Mayo 1993.
17. Manuel, F.- **"Peligros de Explosión"** .- Número 78.- Seguridad Industrial.
18. Palmer, K. N.- **"Dust Explosions : Initiations Characteristics and Protection"** .- Chemical Engineering Progress. Marzo 1990.
19. Clark, Sid.- **"Preventing Dust Explosions"** .- Chemical Engineering.- Octubre 1981.
20. Mancini, R. A.- **"Workshop on Unconfined Vapor Cloud Explosions"** . Plant/Operations Progress (vol. 11, No. 1).- Enero 1992.
21. Shepherd, Joseph E.- **"Unconfined Vapor Cloud Explosions : A New perspectiva"** .- AICHE.- 1990.
22. Johnson, D. M.- **"Scaled Experiments to Study Vapor Cloud Explosions"** .- Trans I Chem E., vol. 69, Part b.- Mayo 1991.
23. Browning, R. L.- **"Estimating Loss Probabilities"** .- Chemical Engineering.- Diciembre 1969.
24. Stoessel, Francis.- **"What is your Thermal Risk?"** .- Chemical Engineering Progress.- Octubre 1993.
25. Mendoza, V. A.- **"Understand Flame and Explosion Quenching Speeds"** .- Chemical Engineering Progress.- Marzo 1993.
26. Viera, G. A.- **"Lessons Learned from the Ethylene Oxide Explosion at Seadrift Texas"** .- Chemical Engineering Progress.- Agosto 1993.
27. Sing J. And McBride M. - **"Successfully Model Complex Chemical Hazard Scenarios"** .- Chemical Engineering Progress.- Octubre 1990.
28. Pineau, J. P. **"Learning from Critical Analysis of Hazard Studies and from Accidents in France"**.- AICHE.- 1990.

29. Phillips, K. Gerry.- **"A Discussion of the Detonation Potential of Ethylene Vapor Clouds"**.- AICHE.- 1990.
30. Segaués, R. O. **"Learn Lessons from the PEPCON Explosions"**.- Chemical Engineering Progress (vol. 87, No. 6).- Junio 1991.
33. Donat, C. **"Pressure Relief as Used in Explosion Protection"**.- Chemical Engineering.- Abril 1987.
34. Schulze, Richard H.- **"Practica; Planning for Toxic Gas Releases"**.- Trinity Consultants Inc.- Julio 1985.
35. Petersen, William B.- **"Estimating Concentrations Downwind from an Instantaneous Puff Release"**.- Environmental Sciences Research Laboratory. National Technical Information Service.- Agosto 1982.
36. Schuize, Richard H.- **"Estimating Concentrations Downwind from an Instantaneous Puff Release"**.- Trinity Consultants Inc.- Julio 1984.
37. World Bank.- **"World Bank Guidelines for Identifying Analyzing and Controlling Major Hazard Installations in Developing Countries"**.- Office of Environment and Scientific Affairs Projects Policy Department.- Septiembre 1985.
38. The Center for Chemical Plant Safety.- **"Guidelines for Hazard Evaluation Procedures"**.- AICHE.-1985.
39. Secretaría de Trabajo y Previsión Social.- **"Relación de Proyectos de Normas Oficiales Mexicanas Publicadas en el Diario oficial de la Federación"**.Asociación Mexicana de Higiene y Seguridad, A. C. (AMHSAC).- Vol. 34, No. 11. Noviembre 1993.
40. National Fire Protection Association.- **"Prontuario de Normas NFPA"**.- AMHSAC. Vol. 32, No. 12.- Diciembre 1991.
41. Secretaría de Comunicaciones y Transportes.- **"Etiquetación en el Transporte de Materiales Peligrosos"**.- AMHSAC (vol.32, No. 12).-Diciembre 1991.
42. Secretaría de Gobernación, Desarrollo Urbano y Ecología.- **"Segundo Listado de Actividades Altamente Riesgosas (Sustancias Inflamables y Explosivas)"**.AMHSAC (Vol. 33, No. 8).- Agosto 1992.
43. Buitrón, Silva J. Arturo.- **"Principios Generales de la Ingeniería de Seguridad"**.AMHSAC (Vol. 34, No. 5).- Mayo 1995.
44. Duque, César.- **"Programa para Prevención y Atención de Incidentes con**

Materiales Peligrosos Haz-Mat".- AMHSAC (Vol. 34. No. 6)Junio 1993.

45. The Water Pollution Control Federation.- **"Control of Specific (Toxic) Pollutants"**.Air PollutionControl Association.- Febrero 1979.
46. Hanka, Steven R.- **"Nonguideline Modeling from a Scientific Perspective"**.- ERT Newsletter No. 2-84 Enviromental Research Technology. Inc.
47. Mallet, Roger.- **"Evaluate the Consequences of Incidents"**.- Chemical Engineering Progress.- Enero 1993.
48. Mallet, Roger.- **"Evaluate the Consequences of Incidents. Part 2"**.- Chemical Engineering Progress.- Febrero 1993.
49. **"Guía de Cálculo de Nubes Explosivas"**.- Celanese Mexicana
50. Smith, David.- **"Remanuy Reactions and Thermal Explosions"**.- Chemical Engineering.- Diciembre 1982.
51. Brassie, W. C.- **"Guidelines for Estimating Damage Explosion"**.- Dow Chemical Compant.
52. Bureau of Mines Report of Investigatons.- **"Detonation of a Flarnrnable Cloud Folloing a Propane Pipeline Break"**.- US Department of the interior.- 1973.
53. Grimalde, John (et. al.).- **"Análisis de Costos "**.- La Seguridad Industrial. Su Administración.- 211. Ed. En Español.- Edit. Alfaomega.- México 1991.
54. Louis, D. J.- **'The Mond Fire, Explosion and Toxity Index Aplied to Plant Layout and Spacing"**.- Chemical Eingeering.- julio 1991.
55. Carr, James W.- **"Taking the Guesswork Out of Pilot Plant Safety"**.- Chemical Engineering Progress.- Septiembre 1988.
56. Carigan, M. K.- **"Which Instrumentation for Hazardous-Area plants?"**.- Chemical Engineering.- Septiembre 1990.
57. Kirby, Gary N.- **"Preventing Failures of Equipment Subject to Explosions"**.- Chemical Engineering.- Junio 1986.
58. Godbey, Thomas.- **"Brace your Plant Agalnst a Dust Explosions"**.- Chemical Eingeering.- Abril 1991.
59. Nazaro, Frandseo N.- **"Preventing or Surviving Explosions"**.- Chemical Eingeering.- Agosto 1988.

60. Prugh, Richard W.- **"Quantify BLEVE Hazards"**.- Chemical Engineering Progress.-Febrero 1991.
61. Cartwright, Paul.- **"Look at Electrostatics Closely"**.- Chemical Engineering Progress.- Septiembre 1992.
62. Mendoza, V. A.- **"Understand Flare and Explosions Quenching Speeds"**.- Chemical Engineering Progress.- Mayo 1993.
63. Chapell, W. G.- **"Pressure Time Diagram for Explosion Vented Space"**.- AICHE 1981.
64. Skinner, S. J.- **"Explosive Evolution of Gas in the Manufacture of Ethyl Polysilicate"**.- AICHE 1981.
65. Scott, John N.- **"Succeeding at Emergency Response"**.- Chemical Engineering Progress.- Diciembre 1992.
66. Eijnatten A. L. N, Van.- **"Explosion in a Naphtha Cracking Unit"**.- Chemical Engineering Progress.- Septiembre 1977.
67. Somerville, Robert L.- **"Reduce Risk of Handling Liquefied Toxic Gas"**.- Chemical Engineering Progress.- Diciembre 1990.
68. American Institute of Chemical Engineers.- **"Guidelines for Technical Management of Chemical Process Safety"**.- 1989.
69. Manual de Análisis de Riesgos, Industrias Resistol S. A.- 1987.