



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

A LOS ASISTENTES A LOS CURSOS

Las autoridades de la Facultad de Ingeniería, por conducto del jefe de la División de Educación Continua, otorgan una constancia de asistencia a quienes cumplan con los requisitos establecidos para cada curso.

El control de asistencia se llevará a cabo a través de la persona que le entregó las notas. Las inasistencias serán computadas por las autoridades de la División, con el fin de entregarle constancia solamente a los alumnos que tengan un mínimo de 80% de asistencias.

Pedimos a los asistentes recoger su constancia el día de la clausura. Estas se retendrán por el periodo de un año, pasado este tiempo la DECFI no se hará responsable de este documento.

Se recomienda a los asistentes participar activamente con sus ideas y experiencias, pues los cursos que ofrece la División están planeados para que los profesores expongan una tesis, pero sobre todo, para que coordinen las opiniones de todos los interesados, constituyendo verdaderos seminarios.

Es muy importante que todos los asistentes llenen y entreguen su hoja de inscripción al inicio del curso, información que servirá para integrar un directorio de asistentes, que se entregará oportunamente.

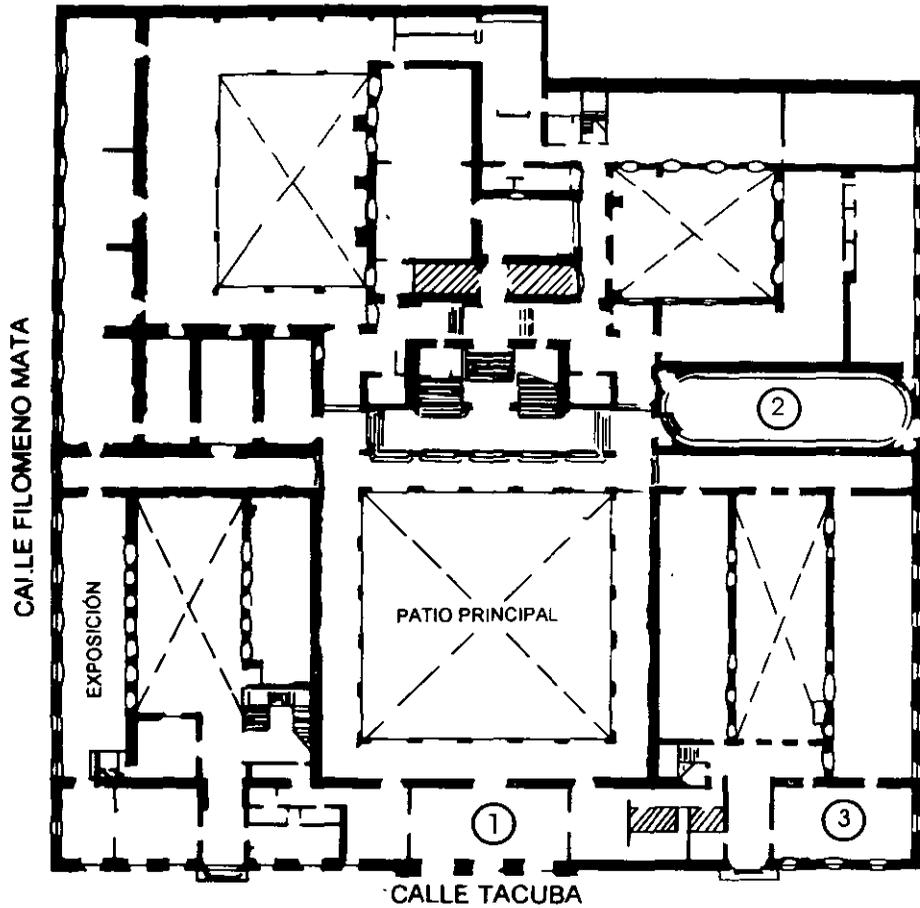
Con el objeto de mejorar los servicios que la División de Educación Continua ofrece, al final del curso deberán entregar la evaluación a través de un cuestionario diseñado para emitir juicios anónimos.

Se recomienda llenar dicha evaluación conforme los profesores impartan sus clases, a efecto de no llenar en la última sesión las evaluaciones y con esto sean más fehacientes sus apreciaciones.

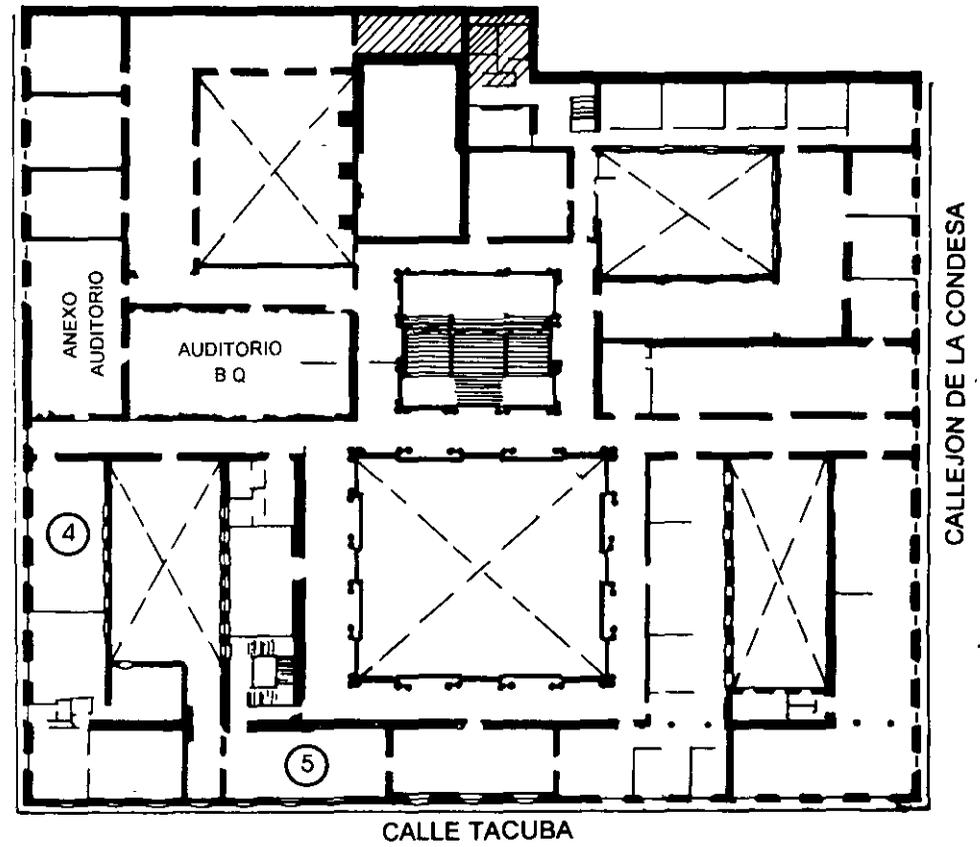
Atentamente

División de Educación Continua.

PALACIO DE MINERIA

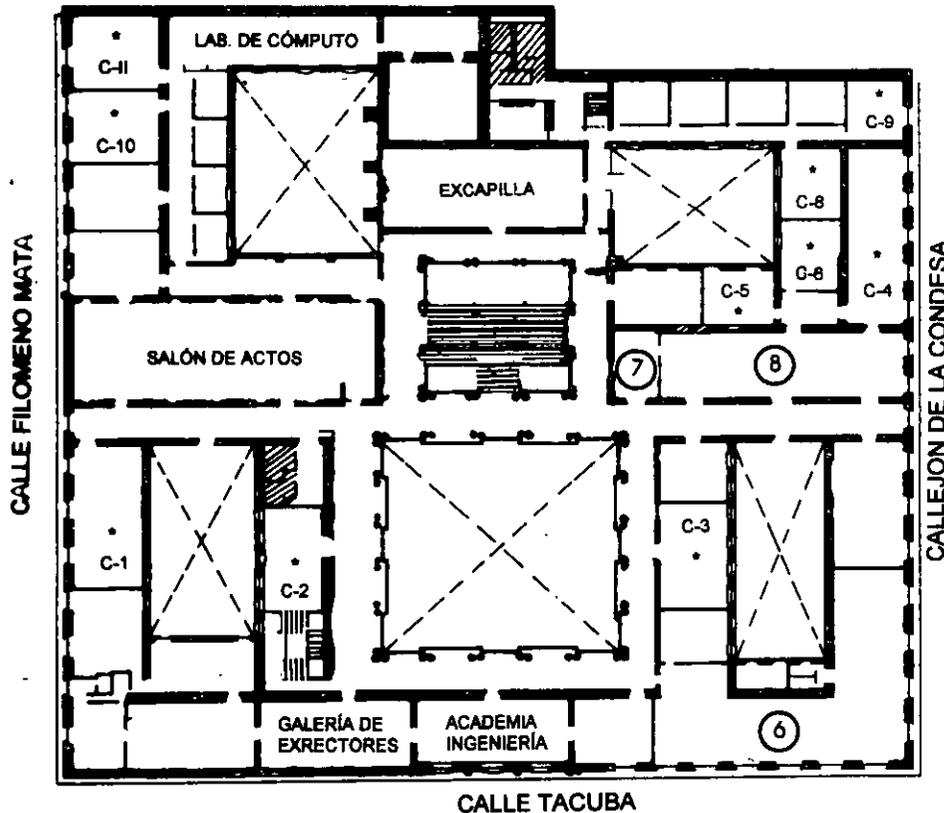


PLANTA BAJA



MEZZANINNE

PALACIO DE MINERÍA



1er. PISO

GUÍA DE LOCALIZACIÓN

1. ACCESO
 2. BIBLIOTECA HISTÓRICA
 3. LIBRERÍA UNAM
 4. CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN "ING. BRUNO MASCANZONI"
 5. PROGRAMA DE APOYO A LA TITULACIÓN
 6. OFICINAS GENERALES
 7. ENTREGA DE MATERIAL Y CONTROL DE ASISTENCIA
 8. SALA DE DESCANSO
- SANITARIOS
- * AULAS



DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA
FACULTAD DE INGENIERÍA U.N.A.M.
CURSOS ABIERTOS

DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA





**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

**MODELOS DE SIMULACIÓN DE
CONTAMINACIÓN Y RIESGO EN INDUSTRIAS**

**CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE
MODELOS ATMOSFÉRICOS**

**EXPOSITOR : ING. MIGUEL A. CASTILLO HOIL
JULIO 1998**

MODELOS DE SIMULACIÓN

I. INTRODUCCIÓN Y CONCEPTOS GENERALES.

Una vez identificados los riesgos que razonablemente pueden dar origen a efectos adversos de cierta magnitud, la siguiente etapa viene marcada por la pregunta: ¿ Cuáles son las consecuencias?. Para responder es necesario tener un modelo o modelos que relacionen la causa original identificada con los efectos previstos, de manera que éstos puedan ser cuantificados.

Existe una etapa a menudo no explícita, en la que se efectúa la selección de los modelos pertinentes. Así, un mismo incidente (p.ej., la ruptura de un tanque conteniendo líquido inflamable bajo presión) puede tener distintas evoluciones (explosión de nube de vapor confinada, incendio flash, BLEVE, formación y dispersión de la nube sin que ocurra ignición, etc.). Las diferentes posibilidades deben ser analizadas con los modelos apropiados, que en cada caso proporcionarán una estimación de las consecuencias que cabe esperar sobre el personal o las instalaciones.

En general, para unas circunstancias determinadas, los modelos disponibles predicen la intensidad y duración del escape y la extensión de las zonas afectadas. Para una emisión tóxica podrían calcularse los contornos para diferentes concentraciones de interés como el TLV o el valor de IDLH.

A continuación se describen los tipos de eventos que pueden tener efectos adversos para posteriormente presentar tres modelos para la estimación de las consecuencias de los eventos antes descritos.

Tipos de eventos

Los riesgos industriales graves suelen estar relacionados con la posibilidad de incendio, explosión o dispersión de sustancias químicas tóxicas o inflamables, y por lo general entrañan el escape de material de un recipiente, seguido en el caso de sustancias volátiles, de su evaporación y dispersión. Entre los accidentes relacionados con los riesgos principales cabe mencionar los siguientes:

- Escape de material inflamable, mezcla del material con el aire, formación de una nube de vapor inflamable y arrastre de la nube hasta una fuente de ignición, lo que provocará un incendio o una explosión que afectará al lugar y posiblemente a zonas pobladas;

- Escape de material tóxico, formación de una nube de vapor tóxica y arrastre de la nube, lo que afectará directamente al lugar y posiblemente a zonas pobladas.

En el caso de la fuga de materiales inflamables, el mayor peligro proviene del repentino escape masivo de líquidos volátiles, o gases, que producen una gran nube de vapor inflamable y posiblemente explosivo (Comisión de Higiene y Seguridad del Reino Unido, 1976). Si la nube se llega a inflamar, los efectos de la combustión dependerán de múltiples factores, entre ellos la velocidad del viento y la medida en que la nube estaba diluida con aire. Esos riesgos pueden causar un gran número de víctimas e ingentes daños al lugar donde se producen y más allá de sus fronteras. Sin embargo, incluso en accidentes graves, los efectos se suelen limitar a unos pocos cientos de metros del punto donde se producen.

La fuga repentina de grandes cantidades de materiales tóxicos puede causar muertes y lesiones graves a una distancia mucho mayor. En teoría, esa fuga podría, bajo ciertas circunstancias climáticas, producir concentraciones letales a varios kilómetros del punto de fuga, pero el número efectivo de víctimas dependerá de la densidad demográfica en el camino que sigue la nube y de la eficacia de las medidas de emergencia que se tomen, que podrían incluir la evacuación.

Los escapes de gases y vapores peligrosos, inflamables o tóxicos, a la atmósfera pueden originarse en instalaciones fijas debido a :

- venteo al aire de una válvula de alivio
- ruptura de un reactor a presión
- ruptura de una tubería o cualquier parte de un equipo

o bien en vehículos de transporte o contenedores debido a :

- venteo al aire de una válvula de alivio
- picadura de un carrotanque, contenedor o cilindro
- ruptura de una válvula
- conexión defectuosa

Atendiendo al tiempo, forma y duración de la descarga, las descargas se clasifican en:

- Descargas instantáneas, que ocurren con duración de pocos segundos o un minuto (puff o nube).
- Descargas continuas, se caracteriza por tener un periodo más largo de duración y produce unas plumas alargadas y estrechas de gas o vapor, las cuales se parecen a las emisiones provenientes de una chimenea.
- Descargas finitas, son las que generalmente ocurren en accidentes, y no corresponden por su duración ni a una descarga instantánea ni a la de emisión continua.

A continuación se describirán el comportamiento de los gases o vapores liberados de una descarga continua o discontinua a la atmósfera. Es importante recordar que estos son casos extremos que normalmente no suceden en la vida real.

Dispersión de Puffs o Nubes de Vapor

Las siguientes tres figuras (1, 2, 3 y 4) muestran el comportamiento de la dispersión de un puff o nubes de vapor grande y de forma semiesférica originado por la entrada de un químico puro en fase vapor o gas a la atmósfera durante un periodo de tiempo de pocos segundos. Además es condición necesaria que la gravedad específica del vapor y densidad de vapor sea similar a la del aire.

Dispersión de Plumas continuas.

La emisión de gases o vapores a la atmósfera sobre un periodo de tiempo extenso que resulta en la formación de la pluma de gas o vapor. Los puntos viento abajo de la fuente de emisión estarán expuestos a una concentración constante durante un periodo de tiempo aproximado igual a la duración de la emisión mientras que la dirección del viento se conserve. Note sin embargo, como es en el caso de las descargas instantáneas que se requiere un periodo de tiempo para que el frente de la nube o pluma alcance los puntos viento abajo después del inicio de la descarga y para que las concentraciones alcancen un nivel más o menos constante. Se requerirá un tiempo similar para que la parte última pase en el punto viento abajo después de que cese la liberación del vapor o gas y las concentraciones disminuyan a puntos seguros. La figura 5 muestra este tipo de dispersión.

Variables que afectan la dispersión atmosférica

Hay diversos factores que influyen el tamaño y forma de las zonas de riesgo viento abajo resultantes de las descargas de vapor o gas a la atmósfera. A continuación se presentan las mas importantes:

- **Cantidad de material descargado:**
En el caso de descargas instantáneas y otras de relativa corta duración, la cantidad total (ej. peso) de vapor o gas liberada a la atmósfera tiene un impacto en el tamaño y forma de las zonas de riesgo viento abajo. Si los otros factores son iguales, descargas más grandes resultarán en zonas más largas y grandes de riesgo viento abajo. Cantidades menores resultarán en zonas más pequeñas. Para el caso de liberaciones continuas los resultados son similares.
- **Estabilidad atmosférica:**
La hora del día, la intensidad de la radiación solar, el grado de nubosidad y la velocidad del viento juegan un papel muy importante en la determinación del nivel de turbulencia en la atmósfera y por consiguiente de las distancias viento abajo en que las concentraciones del contaminante. Los meteorólogos clasifican las condiciones atmosféricas en seis clases de estabilidad atmosférica que van desde la A a la F. La Clase A representa condiciones inestables bajo las cuales hay niveles altos de condiciones inestables, lo que promueve el mezclado rápido y la dispersión de los

ESTADOS INICIALES DE LA DISPERSION DE UNA NUBE O PUFF DE VAPOR

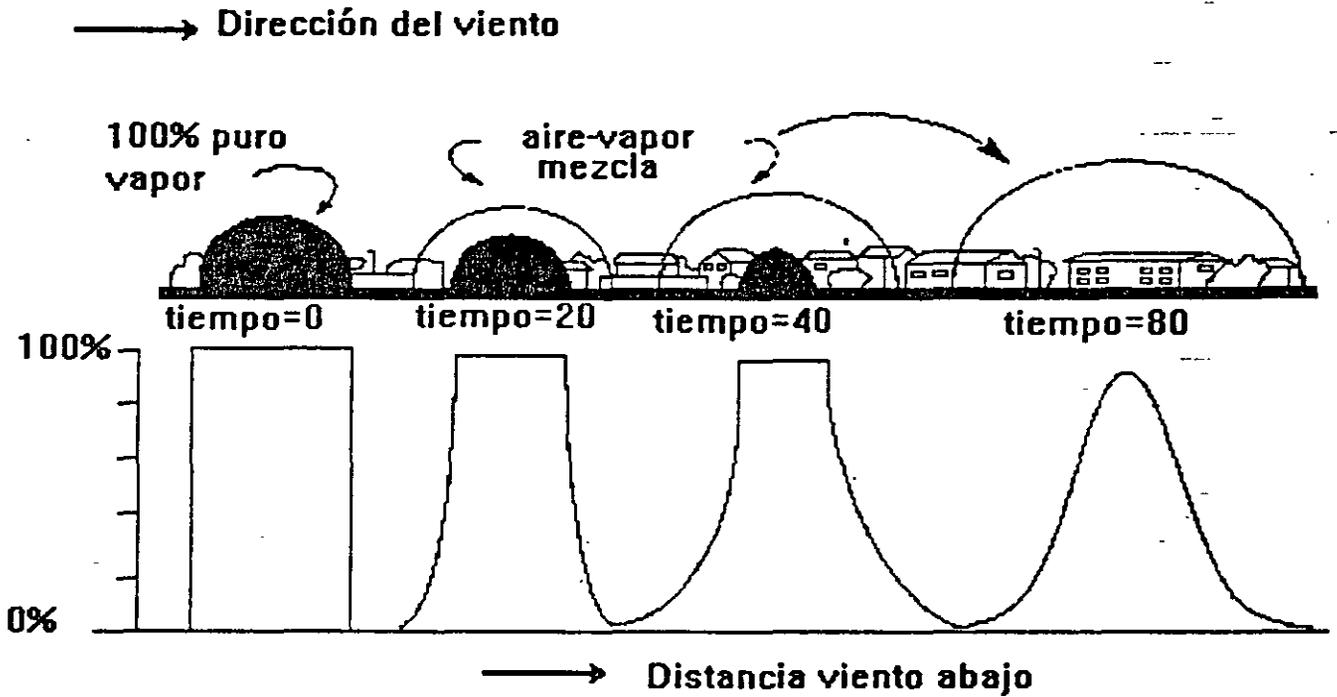


Figura 1

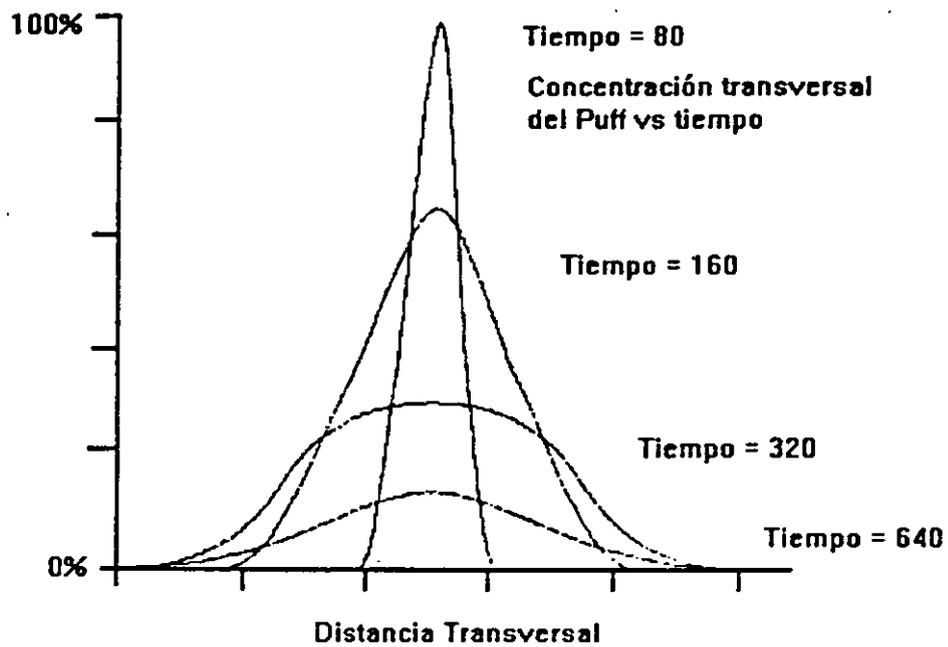


Figura 2

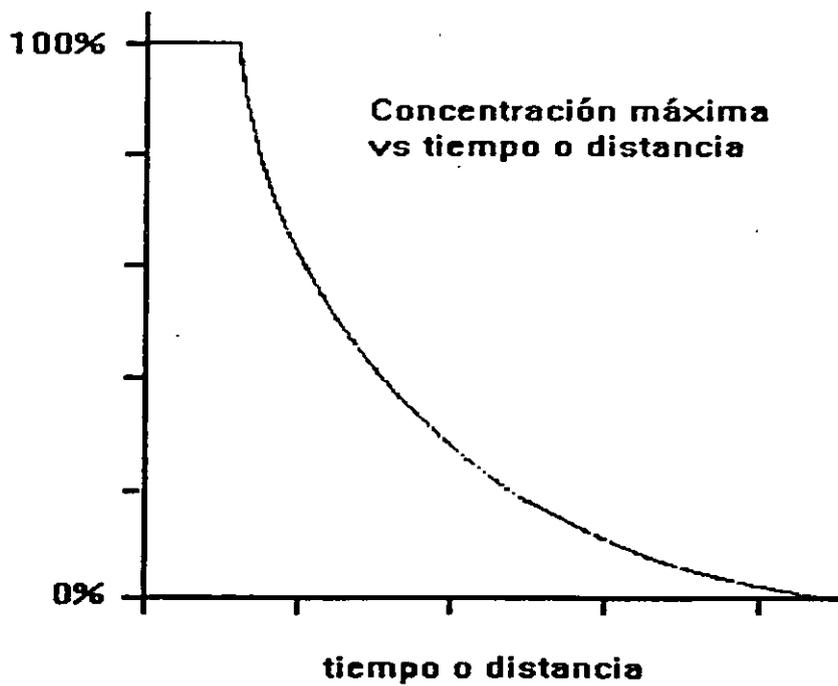


Figura 3

ISOPLETAS DE NUBES O PUFFS A TIEMPO CRECIENTE

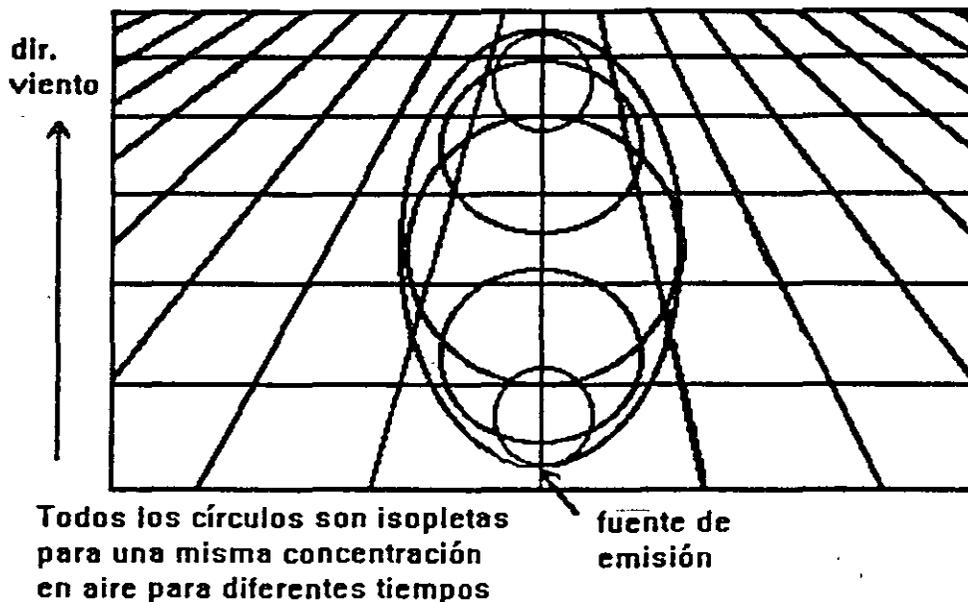


Figura 4

ISOPLETAS EN UNA PLUMA CONTINUA

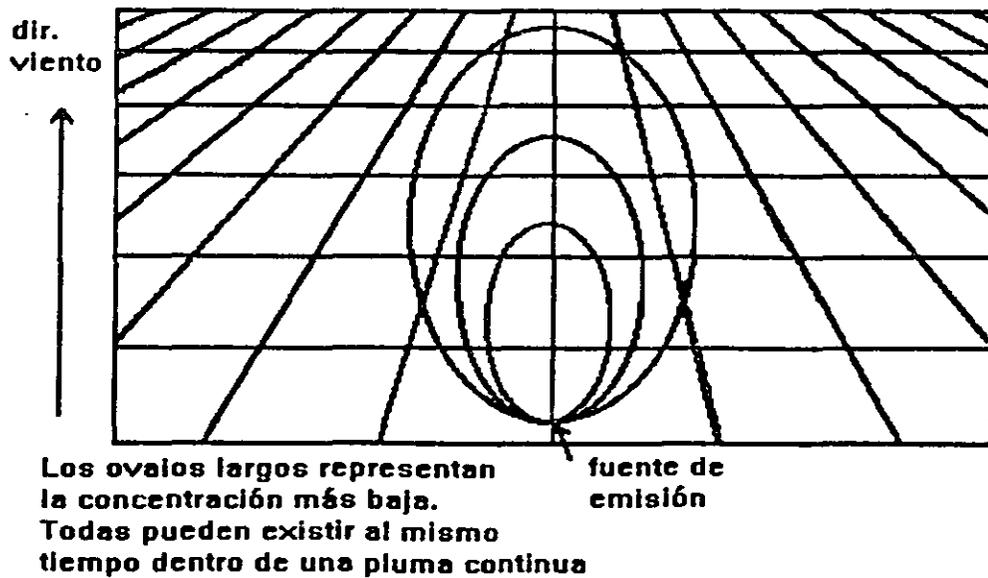


Figura 5

contaminantes. En el otro extremo la clase F representa bajo niveles de turbulencia, los contaminante se mezclan y dispersan muy lentamente en estas condiciones y por lo tanto pueden viajar grandes distancias a concentraciones peligrosas.

Durante un emergencia real, es necesario entender que las condiciones atmosféricas pueden cambiar en el tiempo y que estos cambios pueden influenciar el comportamiento de la dispersión de la nube o pluma.

VELOCIDAD DEL VIENTO A 10 mts. (m/s)	DÍA			NOCHE	
	Radiación Solar Incidente *			Nubosidad entre 4/8 y 7/8	Nubosidad < 3/8
	Fuerte	Moderada	Ligera		
<2	A	A - B	B	F	F
2 - 3	A - B	B	C	E	F
3 - 5	B	B - C	D	D	E
5 - 6	C	C - D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

* NOTA: Radiación Solar fuerte significa: $\geq 600 \text{ W/m}^2$
 Radiación Solar moderada significa entre: 300 y 600 W/m^2
 Radiación Solar ligera significa: $< 300 \text{ W/m}^2$

A = Extremadamente inestable D= Condiciones neutrales
 B = Moderadamente inestable E = ligeramente estables
 C = Ligeramente inestable F = Condiciones moderadamente estables

** Grado de nubosidad = Fracción del cielo sobre el horizonte cubierto por nubes

- Flotación.

La descripción del comportamiento de dispersión de la pluma o nube anterior asume que la gravedad específica del vapor o la densidad del gas es aproximadamente igual al del aire. En los casos en que sean más ligeros o pesados que el aire afectará el fenómeno e dispersión. En el caso de gases o vapores más ligeros que el aire, se esperan concentraciones a nivel de piso menores. Si las condiciones de viento son velocidades bajas, los gases tenderán a flotar, mientras que a condiciones de velocidad de viento mayores mantendrán un mayor tiempo cerca del nivel del suelo. La fig. 6 ilustra esto.

En el caso de gases o vapores más pesados (flotación negativa), la característica más importante de su dispersión es que tenderán a caer o depositarse en el terreno cercano a la fuente de emisión lo que determinará aumentos de concentración cerca de la fuente.

**COMPORTAMIENTO DE PUFFS O NUBES
MAS LIGEROS QUE EL AIRE**

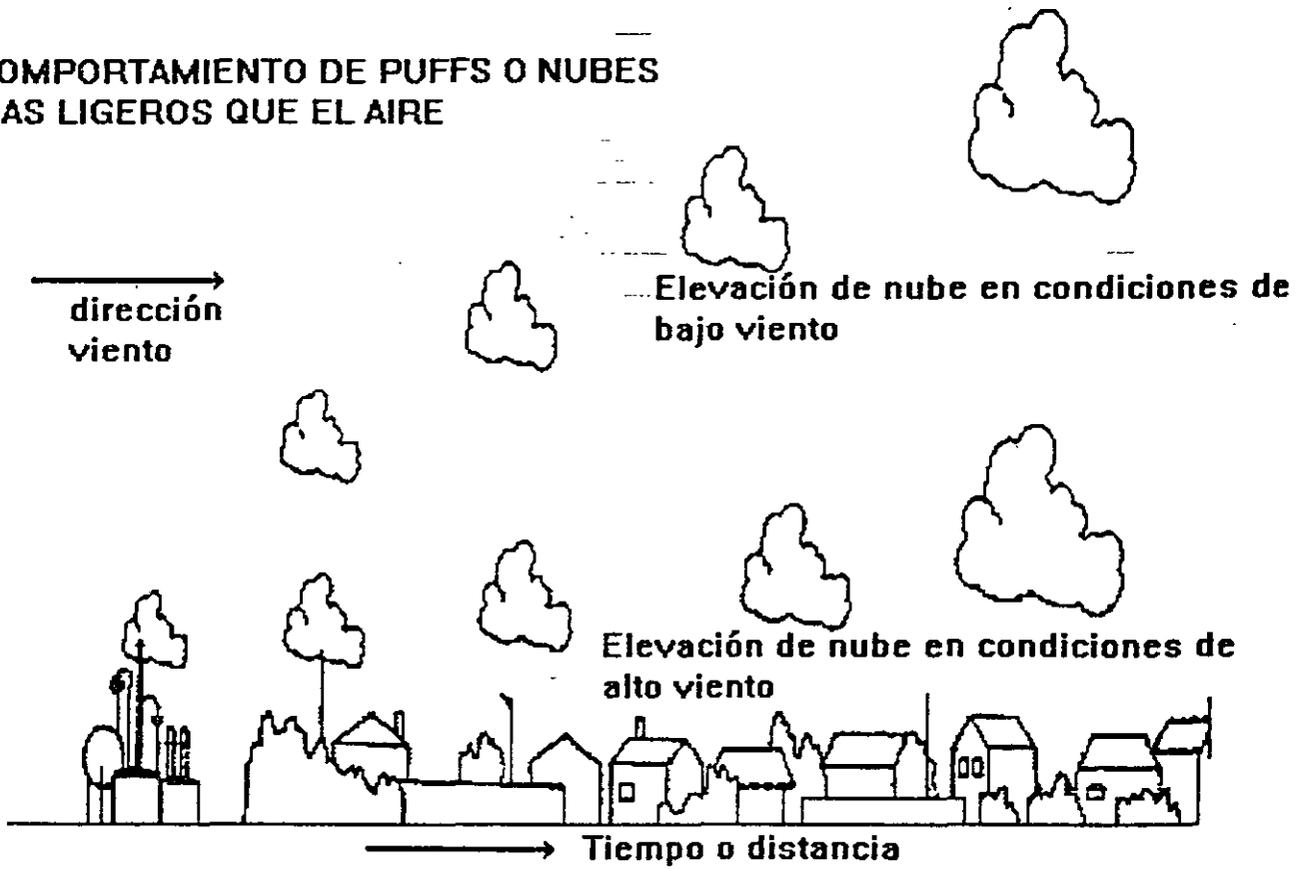


Figura 6

Para el caso de gases más pesados que el aire, es además muy determinante si la descarga es continua y prolongada o de corta duración.

- **Altura de la emisión**

Aunque muchas descargas de gases o vapores son probable que ocurran a nivel de piso, algunas pueden ocurrir en la parte más alta de un equipo, por ejemplo válvula de alivio o dispositivo de venteo.

En el caso de descargas elevadas, las concentraciones máximas se encontrarán en la línea central a una altura dada y no a nivel de piso. En el caso de nubes o plumas con flotación neutra, densidad similar al aire, las concentraciones del contaminante a nivel del piso será esencialmente cero hasta que la parte más baja de la nube o pluma primero toque el suelo. Esta concentración aumentará entonces a distancias viento abajo, alcanzará un pico y después disminuirá a distancias mayores. Las figuras 7.1, 7.2 y 7.3. ilustran esto.

- **Estado físico de los contaminantes**

La discusión anterior se ha centrado en la dispersión de gases y vapores en aire, si bien los polvos finos, humos o aerosoles de líquidos pueden ser transportados por el viento a localidades viento abajo. Algunas de las descargas pueden involucrar mezclas de vapores de químicos o aerosoles y polvos.

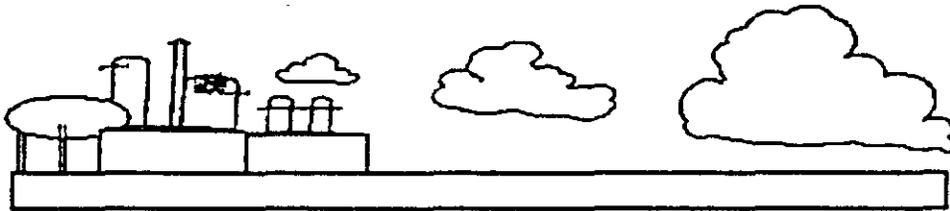
Si el tamaño de partícula de las gotas de líquido o polvos es más grande y pesado estas pueden depositarse de la nube o pluma y caer sobre las superficies del terreno muy cerca del punto de origen. Partículas un poco más pequeñas pueden depositarse en un punto poco más lejano, mientras que las más pequeñas viajarán tanto como si fueran vapores o gases.

- **Velocidad de descarga**

Los vapores o gases pueden ser liberados a la atmósfera a velocidades relativamente bajas o pueden ser venteados a presión elevada como chorro. Hay muchos efectos por el momentum del chorro que alteran el comportamiento del puff o la pluma, particularmente cerca de la fuente de descarga. Un chorro fuerte de vapor o gas tenderá a entrar y mezclar con el aire rápidamente al principio, tendiendo a reducir las concentraciones del contaminante. Estos efectos se vuelven menos importante, sin embargo conforme el puff o la pluma se mueven viento abajo.

En el caso en que la velocidad de viento sea muy alta y la mezcla de gas-aerosol líquido sea más pesado que el aire, hay una posibilidad de que las zonas de riesgo viento abajo sean más largas que las predichas por los modelos de uso general. El comportamiento de tal descargas presurizadas de gases comprimidos licuados es un tema que está recibiendo atención considerable pero que todavía permanece utilizando los métodos actuales factible de errores sustanciales.

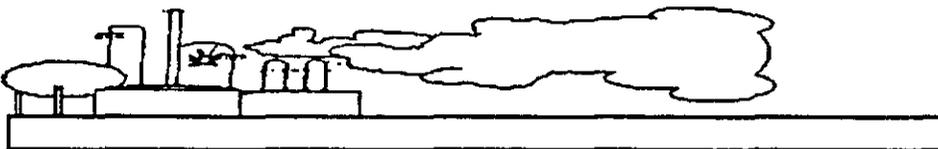
→ Dirección del viento



Dispersión Puff de vapor neutramente flotante. La concentración a nivel de piso puede ser cero por algún tiempo hasta que el primer Puff toque el suelo. Arriba se muestra el mismo Puff a diferentes tiempos.

Figura 7.1

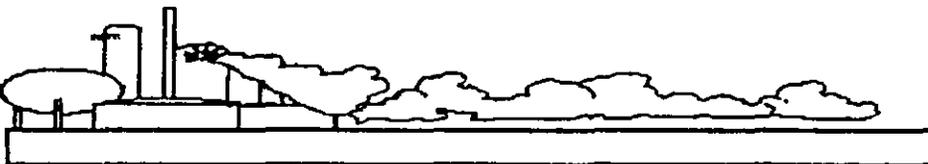
→ Dirección del viento



Dispersión de una pluma continua de vapor neutramente flotante en aire. Note que nuevamente se requiere de una cierta distancia para que alguna concentración se presente cerca del suelo.

Figura 7.2

→ Dirección del viento



Dispersión de una pluma de gas pesado. Un Puff puede seguir el mismo curso durante su dilución con aire.

Figura 7.3

- Terreno

Todo lo que se ha comentado sobre el fenómeno de dispersión atmosférica en fase vapor hasta el momento, ha sido asumido tácitamente que sucede en terrenos planos abiertos sin obstáculos de ningún tipo. En el mundo real, sin embargo, grandes porciones de terreno no son planas ni evitan la presencia de colinas, montañas, árboles o edificios. Todas estas características topográficas y otras influyen en la forma en que los contaminantes se dispersan.

En la mayoría de los casos, un grado de "rugosidad" en el terreno es benéfico ya que tiende a acelerar el grado en el que los contaminantes se mezclan con el aire y se diluyen. Existen sin embargo dos situaciones en las cuales el terreno puede incrementar el riesgo en puntos cercanos al nivel del piso.

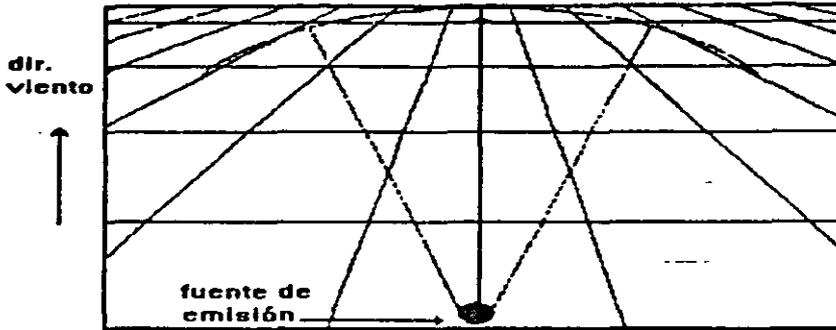
El primer caso incluye situaciones en las cuales los contaminantes queden atrapado dentro de un cañón, valle o una depresión en la superficie de la tierra. Bajo estas condiciones, las paredes o lados de estas pueden prevenir la dispersión de las nubes o plumas y restringir su dilución en el aire. El resultado neto es que estas zonas de riesgo pueden ser de diferente tamaño y forma que las esperadas. Si fuese a ocurrir una inversión térmica esta atraparía aún más al contaminante atrapado en la depresión.

El segundo caso incluye la dispersión de gases o vapores de una fuente elevada de emisión donde hay edificios u otros objetos de formas similares en la tierra en la dirección viento abajo. Conforme el viento pasa sobre un edificio, una parte de él será bajado o atraído hacia el piso. La consideración práctica de este fenómeno es que los contaminantes alcanzarán la superficie mucho antes de lo previsto y a distancias mucho más cortas.

- Cambios en la dirección del viento

La razón principal que uno desea al determinar o predecir las isopletras de concentración o las huellas dactilares de las nubes o plumas de gases o vapores es determinar aquellas áreas viento abajo que pueden requerir la evacuación o alguna otra medida protectora en el caso de una fuga de vapor o gas inflamable/tóxico. Es importante tomar en cuenta, que la dirección del viento rara vez es constante sobre un periodo de tiempo significativo y que la dirección del viento tiende a moverse en varias direcciones. Basados en datos de Handbook of Atmospheric Diffusion, se ha determinado que hay un 90 % de probabilidad que una nube o pluma se mantendrá en un arco de 120 grados de su punto de origen bajo condiciones de estabilidad A, B y C. Para clases de estabilidad más estables, el arco se reduce a 40 grados. La figura 8, muestra el significado práctico bajo los cuales se debe determinar el área de evacuación requerida o de alguna otra acción protectora durante la primera hora de una liberación de vapor o gas peligroso, que debería realizarse en los arcos antes descritos y no en las isopletras de concentración encontradas.

Límites de la zona de peligro de una dispersión de vapor



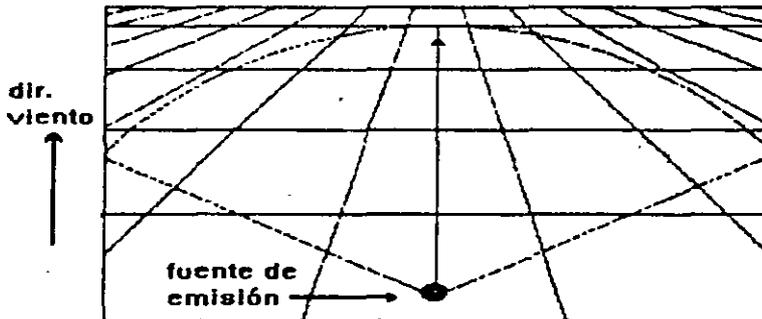
Arco de 40° usado para descargas de menos de 1 hr. de duración bajo establlidades atmosféricas D, E y F.

Las flechas dentro de los límites estimados de la zona de peligro indican la longitud de la distancia de peligro viento abajo en la línea central en la dirección del viento.

Las descargas de mayor duración pueden requerir evacuaciones en un círculo de 360° o medidas de protección si la dirección del viento puede cambiar durante la descarga. Se debe consultar a un calificado metereologista durante emergencias.

Figura 8.1

Límites de la zona de peligro de una dispersión de vapor



Arco de 120° usado para descargas de menor de 1 hr. de duración bajo establlidades atmosféricas A, B y C.

Las flechas dentro de los límites estimados de la zona de peligro indican la longitud de la distancia de peligro viento abajo en la línea central en la dirección del viento.

Las descargas de mayor duración pueden requerir evacuaciones en un círculo de 360° o medidas de protección si la dirección del viento puede cambiar durante la descarga. Se debe consultar a un calificado metereologista durante emergencias.

Figura 8.2

Consideraciones sobre la dispersión de nubes tóxicas

Hemos descrito el fenómeno de dispersión de un gas o vapor liberado, que ocasiona que se tengan diferentes concentraciones de ellos viento abajo del punto de su liberación. En el caso de gases tóxicos lo que se desea es conocer si se alcanzan concentraciones peligrosas para la salud humana utilizando como límites valores como el IDLH, TLV-TWA- TLV-C, ERPG-2, etc.

Para poder comprender la utilidad y aplicabilidad de éstos valores límites a continuación se presenta el significado de cada uno de ellos.

LIMITES DE EXPOSICION RECONOCIDOS

- TLV de la ACGIH (American Conference Gubernamental Industrial Hygienist)
TLV-TWA Concentración 8 horas/40 horas/semana
TLV-STEL Concentración máxima 15 minutos 4 veces por día
TLV-CEILING Concentración en aire que no debe ser excedida en ningún momento
- OSHA PELS (Permit exposure limits)
Para personal que trabaja en comercios.
Establece los límites de exposición permitidos y los valores están publicados en el NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazard
- AIHA-WEELS (American Industrial Hygiene Association)
Workplace environmental exposure level
WEELs (8 horas) STEL (15 minutos)
- NIOSH (IDLH)
Immediately Dangerous To Life or Health
Concentración máxima de contaminantes en aire de la cual se puede escapar en 30 minutos sin sufrir daños irreversibles a la salud
- NAS/NRC EEGL's
El comité de toxicología de la National Research Council perteneciente a la National Science Academy ha publicado una lista de EEGL (emergency exposure guidance limit), los cuales estan enfocados a grupos especializados por ejemplo astronautas, servicios militares.

El SPEGL (short term public emergency guidance level) utilizados para planeación de emergencia, son valores considerados de buena calidad.
- AIHA ERPG (toxic materials)
Emergency response planning guidelines
ERPG-3 Límite permitido una hora sin amenazas a la salud

ERPG-2 Límite permitido una hora sin daños irreversibles
ERPG-1 Límite permitido una hora daños leves

- Sugerencias para la selección de los límites apropiados para la protección de la población en general que están sujetos a vapores tóxicos o gases en casos de emergencia
 - Usar NAS/NRC, SPEGL o el AIHA ERPG-2
 - Usar el valor más alto de los siguientes límites de exposición:
IDLH dividido entre 10
TLV STEL
TLV -TWA multiplicado por tres
TLVC

A continuación se presenta un comentario acerca del uso de estos diferentes valores para estimar zonas peligrosas, ya que no existe un método para seleccionar el límite generalmente utilizado. El criterio de selección en orden decreciente de preferencia que se presenta a continuación está tomado de la recomendación de EPA y no es obligatorio:

- Usar el SPEGL o el ERPG-2 de la ACGIH si ha sido establecido.
- Consulte a un toxicólogo
- Use el valor más elevado de los siguientes:
 - IDLH dividido entre 10
 - TLV-STEL
 - TLV-TWA multiplicado por 3
 - TLV-C

Consideraciones sobre la dispersión de sustancias inflamables

En el caso de un material inflamable podría suceder que se alcanzarán las concentraciones de inflamabilidad o explosividad lo que en el caso de que se encuentre fuente de ignición ocasione un incendio o explosión. Los valores que se buscan son el Low Flammable Limit (LFL) o su Low Explosive Limit (LEL) que en ocasiones se utilizan de manera indistinta. También existen los límites superiores de inflamabilidad y de explosividad (UFL y UEL).

Debido a que una vez dispersos las nubes o plumas pueden alcanzar concentraciones dentro de su rango de inflamabilidad y/o explosividad y por la presencia de una llama ocasionar el incendio o explosión a continuación describimos el tipo de eventos que se pueden suscitar.

Incendios

Los efectos de los incendios sobre las personas son quemaduras de piel y por exposición a las radiaciones térmicas. La gravedad de las quemaduras depende de la intensidad del calor y del tiempo de exposición. La radiación térmica es inversamente proporcional al cuadrado

de la distancia desde la fuente. En general, la piel resiste una energía térmica de 10 kW/m² durante aproximadamente 5 segundos y de 30 kW/m² durante solo 0,4 segundos antes de que se sienta dolor.

Los incendios se producen en la industria con más frecuencia que las explosiones y las emanaciones de sustancias tóxicas, aunque las consecuencias medidas en pérdida de vidas humanas suelen ser menos graves. Por consiguiente, podría considerarse que los incendios constituyen un menor peligro potencial que las explosiones y los escapes de sustancias tóxicas. No obstante, si se retrasa la ignición de un material inflamable que se escapa, puede constituirse una nube de vapor de material inflamable no confinada.

Otro efecto letal que debe tomarse en consideración al producirse un incendio es la disminución del oxígeno en la atmósfera debido al consumo de oxígeno en el proceso de combustión. En general, este efecto se limita al entorno inmediato del lugar del incendio. Son asimismo importantes los efectos sobre la salud originados por la exposición a los humos generados por el incendio. Esos humos pueden incluir gases tóxicos, como bióxido de azufre, de la combustión de disulfuro de carbono y de óxidos nitrosos de los incendios en los que interviene el nitrato amónico.

Los incendios pueden adoptar varias formas diferentes, entre ellas los de incendios de chorro, depósitos, los producidos por relámpagos y explosiones provocadas por la ebullición de líquidos que expanden sus vapores.

- **Incendio de chorro**
Se forma por la descarga de gas inflamable a alta velocidad que ventea o fuga por un orificio y que alcanza una fuente de ignición.
- **Incendio de nubes de polvos**
La dispersión de polvo fino mezclado con aire, forma nubes explosivas cuando se alcanzan la energía mínima de ignición y concentración.
- **Incendio de nubes de vapor no confinadas**
Los vapores que se originan de la evaporación de un derrame de líquidos volátiles forman nubes de vapores, las cuales si alcanzan la concentración entre los límites inferior y superior de inflamabilidad, pueden incendiarse. En ocasiones la flama puede caminar de regreso y alcanzar el contenedor de origen.
- **Incendio de charco de líquido**
Un incendio de charco de líquido se define como un fuego de una cantidad de líquido combustible o inflamable que se derrama sobre una superficie de tierra o agua. Los peligros primarios para la gente y las propiedades incluyen: exposición a radiación térmica y productos tóxicos o corrosivos de la combustión.
- **Bola de fuego (Fireball) debida a una BLEVE, Boiling Liquid Expandure Vapor Explosion.**

Designada algunas veces como una bola de fuego, una explosión de este tipo es una combinación de incendio y explosión con una emisión de calor radiante intenso en un intervalo relativamente breve de tiempo. Como indica la expresión, el fenómeno puede

producirse dentro de un recipiente o depósito en el que se mantenga un gas licuado por encima de su punto de ebullición atmosférico. Si un recipiente a presión se rompe como resultado de un debilitamiento de su estructura, el contenido se escapa al instante como una mezcla turbulenta de líquido y gas que se expande rápidamente y se dispersa por el aire como una nube. Cuando esta nube se inflama, se produce una bola de fuego, que origina una radiación térmica de enorme intensidad en unos pocos segundos. Esta intensidad calorífica basta para causar muertes y graves quemaduras en la piel a varios cientos de metros del recipiente, según la cantidad del gas de que se trate. Este tipo de explosión puede ser causado por un impacto físico sobre un recipiente o depósito que ya está averiado o sometido a una presión excesiva, debido por ejemplo a un accidente de tráfico con un camión cisterna o al descarrilamiento de un vagón cisterna, o también a un incendio que afecte o que se extienda a un contenedor o depósito y que debilite su estructura. Una explosión provocada por la ebullición de un líquido que expande vapor de una cisterna de 50 toneladas de propano puede ocasionar quemaduras de tercer grado a distancias de aproximadamente 200 metros y ampollas a distancias de unos 400 metros.

En la tabla 1 figura una lista de algunos de los principales incendios. A veces resulta difícil hacer una distinción entre un incendio y una explosión. Muy a menudo una explosión va seguida de un incendio y ambos fenómenos causan víctimas.

Tabla 1. Ejemplos de incendios importantes.

Sustancias químicas	Consecuencias		Lugar y fecha
	muertes	lesiones	
Metano	136	77	Cleveland, Ohio, Estados Unidos 1994
GLP (BLEVE)	18	90	Feyzin, Francia, 1966
GNL	40	-	Staten Island, Nueva York, Estados Unidos, 1973.
Metano	52	-	Santa Cruz, México, 1978
GLP (BLEVE)	650	2500	México, D.F., México, 1985

Explosiones

Las explosiones se caracterizan por una onda de choque que produce un estallido y causa daños a las instalaciones y arrojar materiales a cientos de metros de distancia. Las lesiones y daños son ocasionados por la onda de choque de la explosión. Aunque los efectos de la presión excesiva pueden provocar directamente la muerte, la historia de las explosiones industriales muestra que los efectos indirectos de los edificios que se derrumban y los cristales y escombros que vuelan por el aire causan muchas más pérdidas de vidas humanas y heridas graves.

Los efectos de la onda de choque varían según las características del material, su cantidad y el grado de restricción de la nube de vapor. Las lesiones directas se producen a presiones

de 5 a 10 kPa, mientras que los edificios se derrumban y las ventanas y las puertas se rompen a presiones tan bajas como de 3 a 10 kPa. La presión de la onda de choque disminuye rápidamente con el aumento de la distancia desde la fuente de explosión.

Deflagración y detonación

Las explosiones pueden producirse en forma de una deflagración o de una detonación, en función de la velocidad de combustión durante la explosión. Se produce una deflagración cuando la velocidad de combustión o la velocidad de la llama es relativamente lenta, del orden de 1 m/seg. En una detonación, la velocidad de la llama es extremadamente elevada. El frente de la llama se desplaza como una onda de choque, con una velocidad normal de 2000 a 3000 m/seg. Una detonación genera mayores presiones y es mucha más destructiva que una deflagración. La presión máxima causada por una deflagración en un recipiente atmosférico cerrado gira en torno a los 70-80 kPa, mientras que una detonación puede alcanzar fácilmente una presión de 200 kPa. La diferencia depende del material de que se trate, así como las condiciones en que ocurre la explosión. Por lo común, se acepta que una explosión en fase de vapor requiere cierto grado de limitación para que se produzca una detonación.

Explosiones de gases y de polvos.

Se produce una explosión de gases, que en general son catastróficas, cuando se liberan y dispersan con el aire considerables cantidades de material inflamable para formar una nube de vapor explosivo antes de que tenga lugar la ignición. Las explosiones de polvos se producen cuando materiales sólidos inflamables se mezclan intensamente con el aire. El material sólido dispersado adopta la forma de material pulverizado con partículas de dimensiones muy pequeñas. La explosión resulta de un hecho inicial, como un incendio o una pequeña explosión, que motiva que el polvo depositado sobre las superficies pase a ser transmitido por el aire. Al mezclarse con el aire se produce una explosión secundaria que a su vez puede originar una explosión terciaria, y así sucesivamente. Puesto que los cereales, la leche en polvo y la harina son inflamables, las explosiones de polvo han sido más comunes en la industria agrícola. Sin embargo la historia de las explosiones ha mostrado que los efectos nocivos se limitan al lugar de trabajo y afectan menos a quienes están fuera de la fábrica.

Explosiones de nubes de vapor confinado o no confinado

Las explosiones en locales cerrados son las que se producen dentro de algún tipo de contenedor, como un recipiente o una tubería. Las explosiones dentro de los edificios también corresponden a esta categoría. Las explosiones que se producen al aire libre se designan como no limitadas y originan presiones máximas de solo unos pocos kPa. Las presiones máximas de las explosiones en lugares cerrados o limitadas suelen ser superiores y pueden llegar a cientos de kPa.

Análisis de consecuencias incendios y explosiones

Los incendios y explosiones son los tipos de accidentes más frecuentes en el industria química seguido de las emisiones de sustancias tóxicas.

Hay una grana cantidad de materiales inflamables que se manejan a nuestro alrededor como madera, papel, plásticos. fibras textiles, etc.

Es importante conocer la inflamabilidad de los materiales que se manejan en la industria química porque para evaluar las consecuencias de un incendio o explosión nos interesa conocer los riesgos de los gases, líquidos, polvos y aerosoles que se usan en el proceso.

La tabla 2 muestra la distribución porcentual de incendios industriales según el tipo de material involucrado.

La evaluación de consecuencias de incendios o explosiones requiere de datos que definan los escenarios en que ocurren, por ejemplo: cuanto material en los límites de inflamabilidad existe en la nube en el momento de la explosión, cuanto material inflamable líquido existe en un derrame que se está incendiando.

A continuación examinaremos los parámetros mas importantes que define a un material desde el punto de vista de su riesgo de incendio.

CARACTERÍSTICAS DE INFLAMABILIDAD

El término de inflamabilidad hace referencia a la mayor o menor facilidad con que una sustancia puede arder en aire o en algún otro gas que pueda servir como comburente. La combustión es una reacción química en la que se libera energía a partir de la oxidación un material determinado, y el fuego es una consecuencia visible, en determinadas circunstancias, de esta combustión. Se admite con carácter general que la combustión convencional ocurre en la fase vapor lo que significa que los líquidos deben evaporarse o los sólidos descomponerse y volatilizarse antes de entrar propiamente en combustión.

Los elementos necesarios y suficientes para que se produzca un incendio se esquematiza en el llamado triángulo de fuego que se representa en la figura 9.

PUNTO DE INFLAMABILIDAD FLASH POINT

El punto de inflamabilidad de una sustancia t_f es la temperatura mínima a la cual se produce el suficiente vapor como para formar cerca de la superficie de un líquido combustible, una mezcla con aire que este dentro de los límites de inflamabilidad.

Tabla 2
Tipo de material inflamado en incendios industriales
(% del número de casos)

a) Industrias en general	
MATERIAL	(%)
Madera o papel	27.9
Líquidos inflamables o combustibles	22.1
Materias químicas, metales o plásticos	15.7
Textiles	10.3
Productos naturales	9.6
Gas	6.4
Sólidos volátiles	5.4
Materiales con aceite	2.2
Otros tipos indeterminados o no informados	0.4
b) Industria química	
SEGÚN EL ESTADO FÍSICO	
Gas	13
Vapor	20
Líquido	25
Sólido	29
Desconocido	13
SEGÚN EL TIPO DE MATERIAL	
HIDROCARBUROS: 29.5	
Gas	4
Líquido/vapor	23
Sólido	2.5
OTROS PRODUCTOS: 70.5	
Líquido/vapor orgánico	20
Sólidos orgánicos	9
Sólidos celulósicos	8
Hidrógeno	9
Acero	2.5
Azufre	1
Desconocido	21

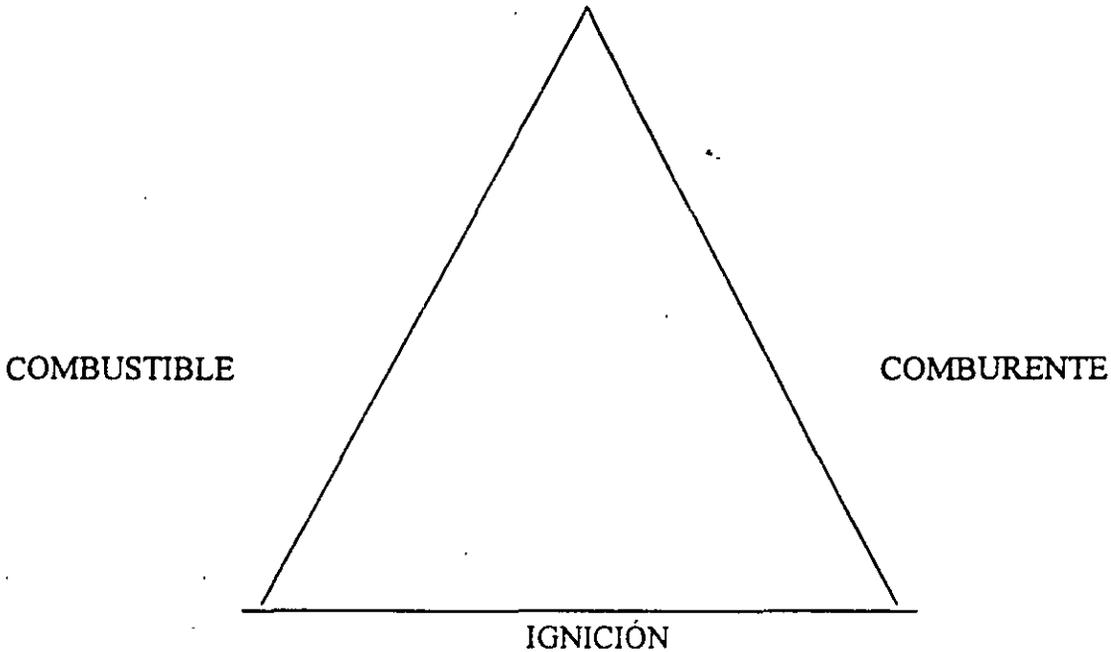


Fig. 9 Triángulo del fuego

TEMPERATURA DE AUTO IGNICIÓN t_a

Es la temperatura a la cual una sustancia inflamable es capaz de quemarse en aire, sin una fuente de ignición externa. La autoignición transcurre por lo tanto sin necesidad de llama o chispa, a partir del propio nivel térmico de la mezcla gaseosa o bien por contacto con una superficie caliente.

LÍMITE DE INFLAMABILIDAD

Los límites de inflamabilidad nos proporcionan el intervalo de concentraciones de combustible (normalmente en porcentaje de volumen) dentro del cual una mezcla gaseosa puede entrar en ignición y arder.

Por debajo del límite inferior de inflamabilidad (LII) no existe suficiente combustible como para propagar la combustión.

De una manera análoga a concentraciones de combustible mayores que la del límite superior de inflamabilidad (LSI) no hay suficiente comburente como para que la reacción se propague.

En la tabla 3 se listan los límites de inflamabilidad de varias sustancias junto con sus temperaturas de autoignición y punto de inflamación.

OXÍGENO MÍNIMO PARA LA COMBUSTIÓN

Anteriormente se han discutido los límites de inflamabilidad basados en la concentración de combustible en aire. Sin embargo, cualquiera que sea la concentración del gas o del vapor combustible, la inflamación de la mezcla puede impedirse si la cantidad de oxígeno se disminuye hasta un nivel suficiente. Por debajo de la concentración de oxígeno (%) mínima para la combustión (O_{min}) la reacción no genera la suficiente energía como para elevar la temperatura de la mezcla (incluyen a los gases inertes presentes) hasta un valor que permita la propagación de la llama.

La utilidad de este concepto es evidente ya que permite eliminar la posibilidad de explosiones independientemente de la concentración de combustible. Por lo tanto (O_{min}) es un parámetro fundamental a la hora de diseñar los sistemas de inertización de recipientes que puedan llegar a obtener mezclas inflamables.

Tabla 3
Características de inflamabilidad de algunas
sustancias seleccionadas

Sustancia	L.I.I. en aire (%)	L.S.I. en aire (%)	Temperatura de autoignición t_a (°C)	Punto de inflamación t_f (°C)
Acetaldehído	4.0	60.0	175	-38
Acetona	2.5	13.0	538	-18
Acetileno	2.5	80-100	305	---
Benceno	1.3	7.9	562	-11.1
Butano	1.6	8.4	405	-60
Estireno	1.1	6.1	490	31.1
Etano	3.0	12.5	515	-135
Etanol	3.3	19.0	423	12.8
Etileno	2.7	36.0	490	-121
Formaldehído	7.0	73.0	430	-67.2
Hexano	1.1	7.5	225	-26
Hidrógeno	4.0	75.0	400	---
Metano	5.0	15.0	538	-188
Propano	2.1	9.5	450	<-104
Propileno	2.4	11.0	460	-108
Tolueno	1.2	7.0	536	4.4

Nota: Los intervalos de inflamabilidad de la tabla corresponden a condiciones estándar en aire.

FUENTES DE IGNICIÓN

La presencia de una fuente de ignición es el tercer elemento indispensable del triángulo del fuego. La afirmación puede invertirse en el sentido, de que si se evita la presencia de fuentes de ignición se evita el fuego.

Para que ocurra la ignición es necesario suministrar la energía mínima de ignición suficiente para iniciar la inflamación de la mezcla. Todos los materiales su característica energía mínima de ignición, que varía con las condiciones ambientales como presión y composición de la mezcla combustible. Las energías mínimas de ignición típicas de hidrocarburos están el orden del 0.25 mJ, existiendo sustancias con energías con energías considerablemente menores (por ejemplo el hidrógeno en torno 0.03 mJ).

Para tener una idea del orden de magnitud representada por estas energías y de la facilidad con que pueden alcanzarse, baste señalar que la carga electrostática acumulada por una persona al caminar sobre una alfombra en un día seco, puede ser suficiente para una descarga de 22 mJ, y la chispa eléctrica de un interruptor ordinario puede estar en el intervalo de 20 a 30 mJ.

Las posibles fuentes de ignición son numerosas. La tabla 4 recoge una distribución porcentual de las fuentes de ignición causantes de incendios.

Tabla 4
Distribución de las fuentes de ignición causantes de incendios
en la industria química y petroquímica (8) (% del número de casos).
Los datos proceden de un estudio de la Fire Protection Association
durante el periodo 1971-1973

Fuentes de ignición	%	% modificado
Superficies calientes	10.1	18.2
Llamas de quemadores	10.1	18.2
Equipo eléctrico	7.6	13.6
Ignición espontánea	7.6	13.6
Chispas y calor debidos a fricción	7.6	13.6
Llamas de oxicorte	5.1	9.1
Niños con fósforos	3.8	6.8
Ignición intencionada	2.5	4.5
Electricidad estática	1.3	2.3
Causa de ignición desconocida	44.3	--

Nota: El % modificado se ha calculado prescindiendo de los incendios con causa de ignición desconocida

GRADO DE INFLAMABILIDAD DE LOS DISTINTOS MATERIALES

No existe un único parámetro capaz de caracterizar la inflamabilidad de los distintos materiales, sino que intervienen varias propiedades en distintos grados de importancia. Entre ellas podríamos citar los ya vistos punto de flash (de gran importancia en cuanto a la inflamabilidad de líquidos combustibles), límites de inflamabilidad y temperatura de autoignición; pero también son de importancia la energía de ignición, velocidad de combustión, calor de combustión, punto de fusión en sólidos, etc. La NFPA clasifica a los materiales de acuerdo a sus características de inflamabilidad, dividiéndolos en cinco apartados.

Grado de inflamabilidad 0: Corresponde a materiales que no arden si están expuestos a temperaturas de 815°C en aire durante cinco minutos. Ejemplos de este tipo de material son el cloruro de aluminio o el nitrato amónico.

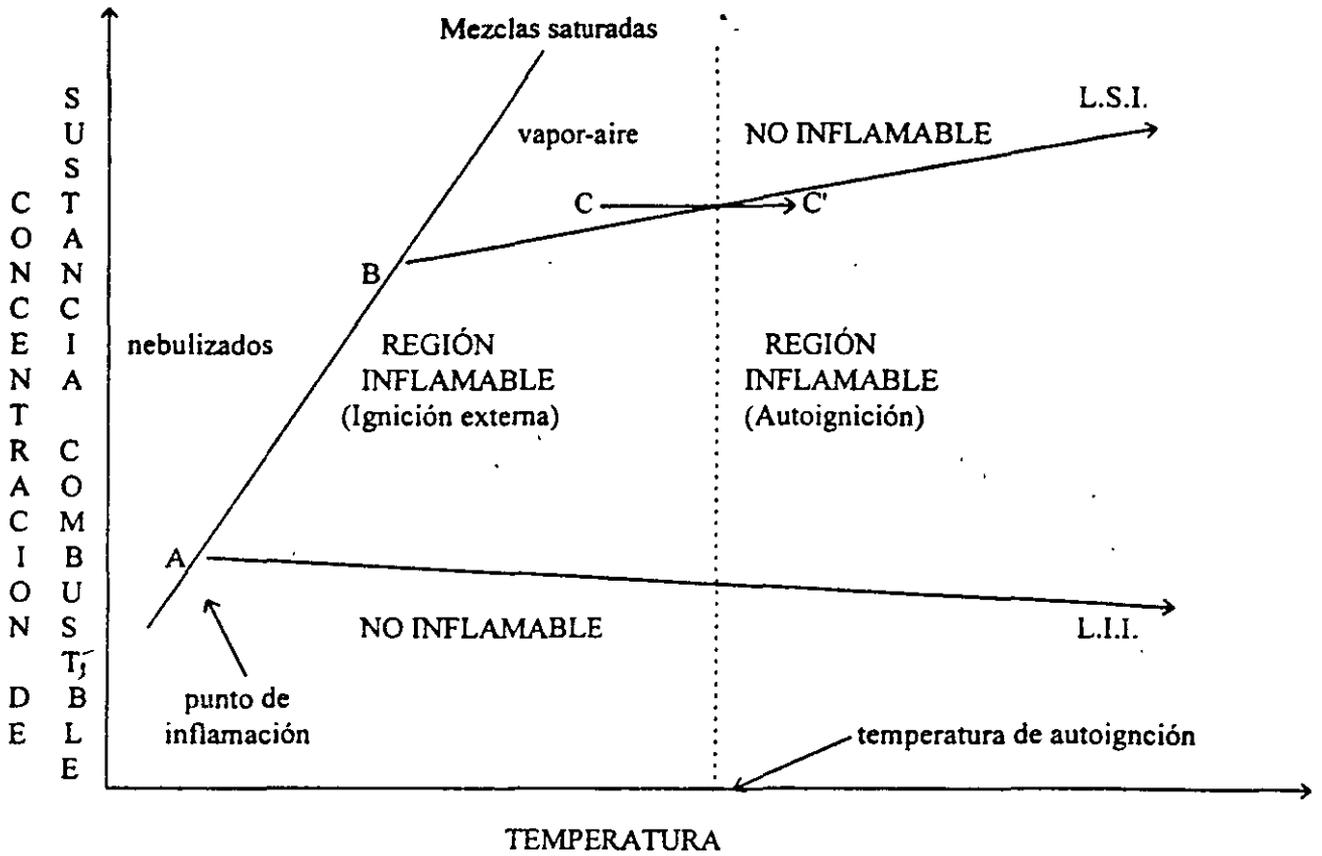
Grado de inflamabilidad 1: Se asigna a los materiales que necesitan un precalentamiento considerable para arder, cualesquiera que sean las condiciones ambientales. Dentro de este grupo entran materiales que arden antes de cinco minutos al exponerlos a aire a 815 °C y líquidos, sólidos y semisólidos combustibles con un punto flash más alto que 93.4 °C. Como ejemplos pueden citarse al dietilenglicol o el alcohol bencílico.

Grado de inflamabilidad 2: Los materiales en este apartado no forman atmósferas peligrosas en contacto con aire bajo condiciones normales, pero sí pueden hacerlo tras un calentamiento moderado, o al ser expuestos a altas temperaturas. Dentro de este grupo están los líquidos con un punto flash sobre 37.8 °C e inferior a 93.4°C, así como los sólidos y semisólidos que producen vapores inflamables con cierta facilidad. Ejemplos de este tipo de materiales son el ácido acético o la anilina.

Grado de inflamabilidad 3: Corresponde a líquidos y sólidos que, sometidos a ignición, pueden arder bajo condiciones ambientales o próximas a ellas. Los líquidos de grado 3 dan origen a atmósferas inflamables en aire, prácticamente en todas las condiciones habituales. En cuanto a sólidos, pertenecen a este grupo aquellos fibrosos (por ejemplo algodón), o en su caso de granulometría relativamente gruesa que, aunque no forman habitualmente atmósferas explosivas en aire pueden arder fácilmente, así como otros sólidos que arden con gran facilidad por contener oxígeno en su molécula (por ejemplo, nitrocelulosa seca). Otros ejemplos de productos pertenecientes a este grupo son la acetona o la dietilamina.

Grado de inflamabilidad 4: Pertenecen a este grupo los materiales que se vaporizan rápidamente en condiciones ambientales y proporcionan una combustión rápida. Se incluyen aquí los gases, materiales criogénicos, líquidos inflamables con un punto flash inferior a 22.8°C y materiales que a causa de su forma física o propiedades pueden dispersarse con facilidad por el aire, formando mezclas explosivas, tales como polvos combustibles finamente divididos y nieblas de líquidos inflamables. Ejemplos de sustancias en este grupo son el acetaldehído o el butano.

FIG. 10 DIAGRAMA DE CONCENTRACIÓN-TEMPERATURA, MOSTRANDO LAS CARACTERÍSTICAS DE INFLAMABILIDAD



EXPLOSIONES

Liberación de energía súbita y violenta.

Clasificación de acuerdo al tipo de energía que libera.

- 1.- Liberación de energía de presión.
- 2.- Liberación de energía química.

En el primer caso, aire comprimido se libera de un recipiente a causa de una falla mecánica seguido del colapso de un recipiente de contención, por ejemplo la ruptura de un cilindro de gas a presión.

En el segundo caso, liberación de energía química causada por reacciones químicas que dan lugar a elevación de temperatura y/o a un aumento del número de moles de gas.

La energía liberada en una explosión química depende de la naturaleza y el estado físico de los reactantes y productos.

Debemos diferenciar explosiones de sustancias combustibles con aire de los explosivos que llevan en sí mismo el oxígeno necesario.

La diferencia entre incendios y explosiones está dada por la velocidad en la que se produce la liberación de energía potencial química en la combustión del material.

Al igual que ocurre en los incendios las explosiones pueden impedirse trabajando fuera del intervalo de inflamabilidad, disminuyendo la concentración del comburente hasta el valor correspondiente o evitando una fuente de ignición.

Las explosiones pueden ser deflagraciones o detonaciones dependiendo de la velocidad del frente de combustión con respecto a la del sonido si la velocidad del frente de llama es menor que la velocidad de propagación del sonido en la mezcla que aun no ha sido alcanzada por la reacción se produce una deflagración, mientras que en caso contrario tiene lugar la detonación de la muestra inflamable.

EFFECTOS DE INCENDIOS Y EXPLOSIONES

La figura 11 muestra distintas cadenas de evolución con los resultados finales que cabe esperar, onda de presión (O.P), formación de proyectiles (P), radiación térmica (RT)

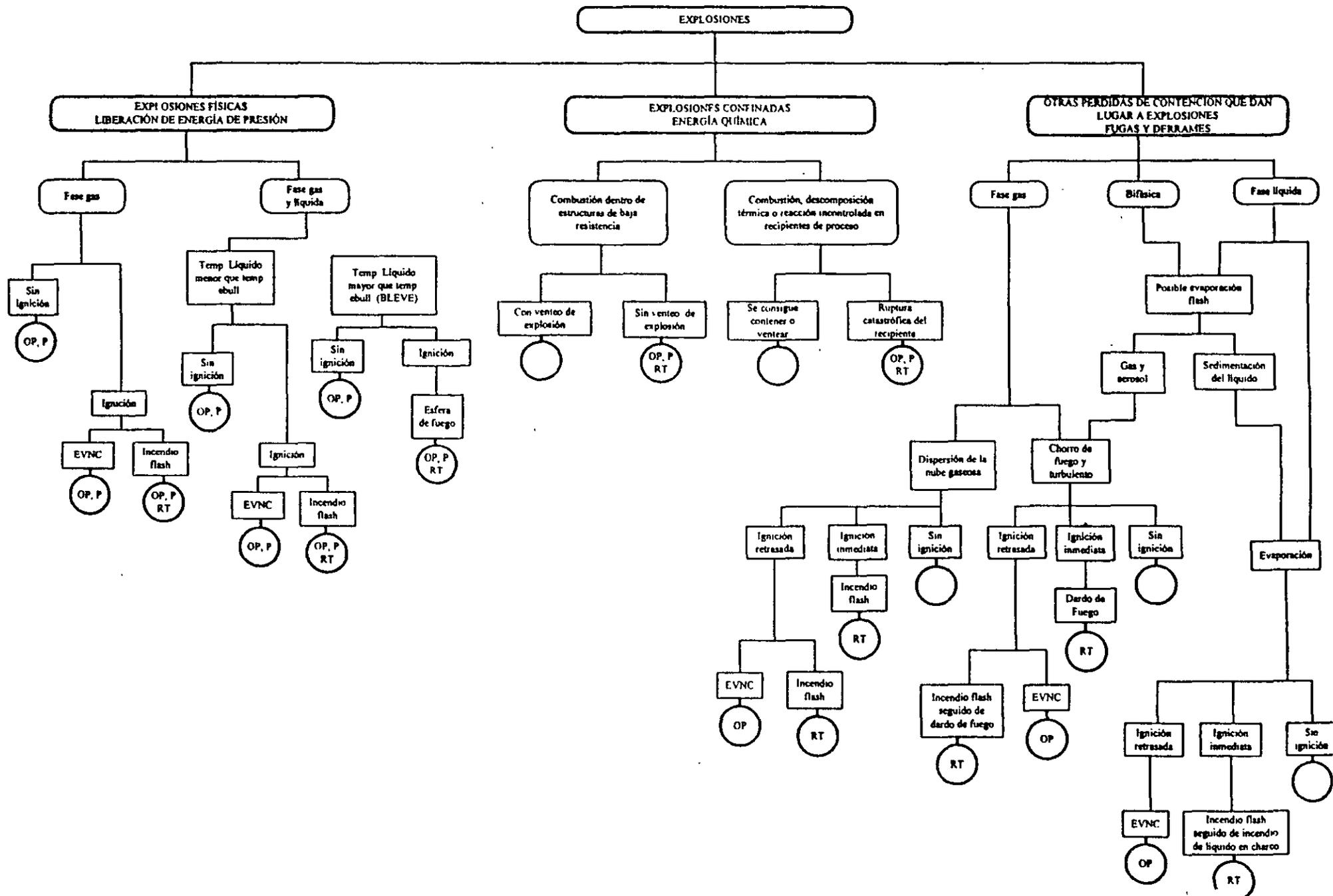


Diagrama de efectos para una explosión. OP= Onda de presión, P= Formación de proyectiles, RT= Radiación Térmica

Figura 11

II. TIPOS DE ESCENARIOS

Para definir el escenario de accidente a estudiar es básico que se conozca el estado físico de los materiales involucrados, ya que por ejemplo si el material involucrado es un gas este pasará directamente a la atmósfera en el caso de una fuga y posteriormente se dispersará mientras que en el caso de los líquidos puede suceder que se forme un charco de líquido, que puede evaporar (depende de si el líquido es volátil o no) o que puede incendiarse el charco, etc. Es por esto que a continuación se presenta una tabla que ayuda a determinar el estado físico del material de acuerdo con la temperatura del material en el contenedor, la temperatura ambiente, los puntos de fusión y ebullición.

Estado típico de materiales en almacenamiento o transporte en contenedores

Puntos de fusión y ebullición normales	Condición en el contenedor	Estado del material	No. de Escenario
PF < TA	T < PF T < TA	Sólido frío	No. 1
PF > TA	T = TA	Sólido	No. 2
PE > TA	T > PF T > TA T < PE	Sólido fundido (líquido)	No. 3
PF < TA	T > PF T < TA T < PE	Líquido frío	No. 4 y 5
PE > TA	T = TA	Líquido	No. 6
PE > TA	T > TA T < PE	Líquido caliente	No. 7
PE > TA	T > PE T > TA	Gas comprimido o vapor sobre líquido caliente	No. 8
PE < TA	T = TA	Gas comprimido o gas licuado a la temperatura ambiente	No. 9 y 10
PE < TA	T > PE T > TA	Gas caliente comprimido o licuado bajo presión a temperatura mayor que la temperatura ambiente	No. 9 y 10

PF = Punto de fusión

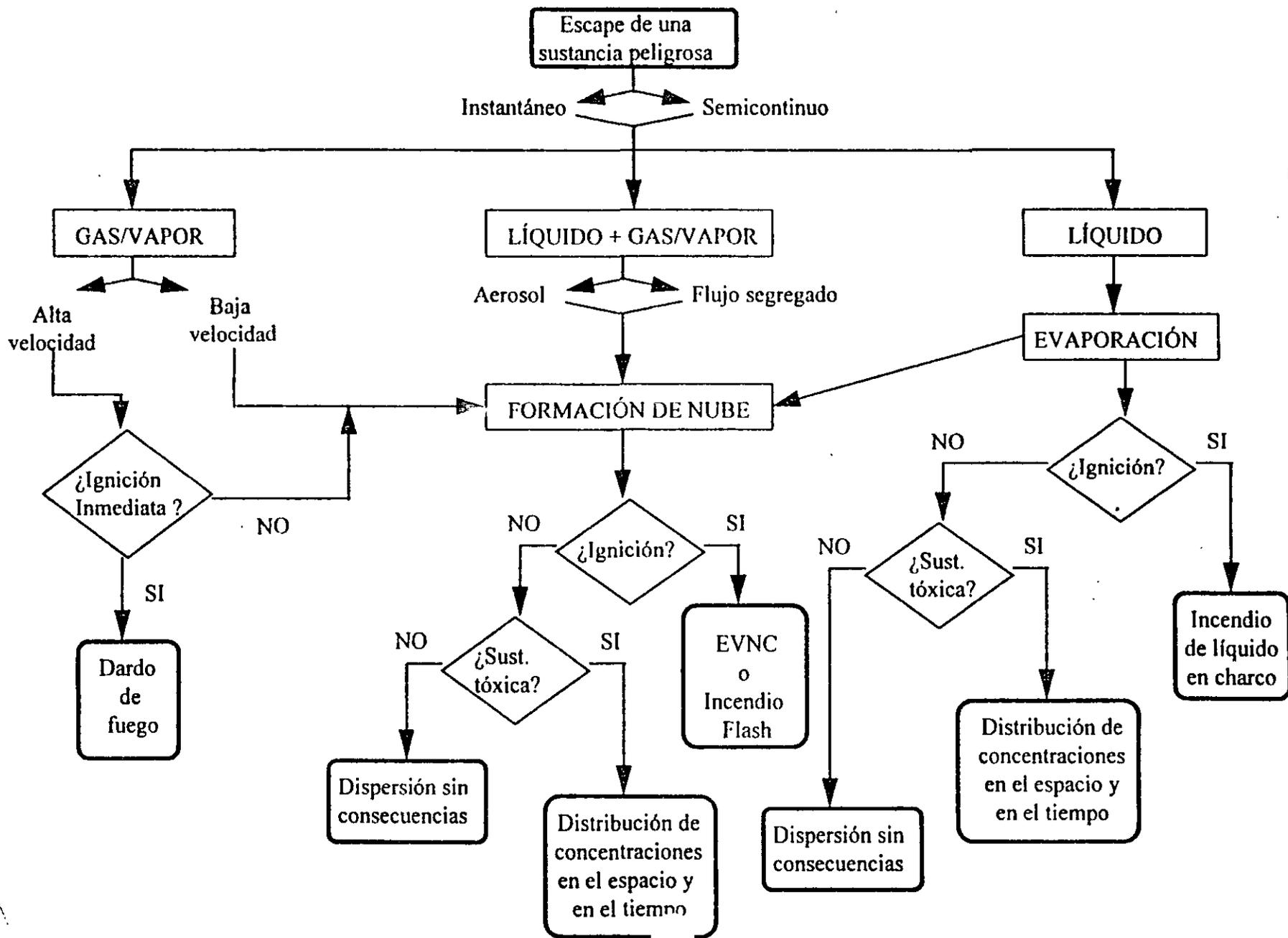
PE = Punto de ebullición

TA = Temperatura ambiente

T = Temperatura en el contenedor

Una vez que se conoce el estado físico del material es importante determinar los eventos que pueden suceder para lo cual son de mucha utilidad los siguientes diagrama de decisión.

SECUENCIA DE EVOLUCION A PARTIR DE L ESCAPE DE UNA SUTANCIA PELIGROSA



III. PROGRAMAS DISPONIBLES PARA LA ESTIMACIÓN DE CONSECUENCIAS.

III.1 Definiciones de términos usados en los programas

- Estado físico: sólido, líquido y gaseoso

La mayor parte de las sustancias existen en más de un estado físico, por ejemplo el agua, existe como sólido hielo, como líquido y como vapor. Otras sustancias como por ejemplo el butano, que es un gas, hierve a $-0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ sobre una plancha de hielo y aún así evapora rápidamente.

Otros pasan directamente del estado sólido al gaseoso por ejemplo, CO_2 sólido.

- Temperatura y calor.

La temperatura de una sustancia puede influir en su estado físico y propiedades.

- Presión

Fuerza aplicada por unidad de superficie.

Es un parámetro muy importante en el manejo de gases o líquidos volátiles.

La presión puede ser absoluta o relativa. La presión de 14.7 psi de presión atmosférica a nivel del mar es una medida absoluta y se presenta apropiadamente en unidades de libras por pulgada cuadrada - absolutas o psia. Cero psia se refiere a completa ausencia de presión o sea un vacío perfecto. La escala relativa de medición más común usada en Estados Unidos presenta valores numéricos medidos en término de presión manométrica. El valor de cero psig se logra cuando se alcanza la presión atmosférica absoluta de una atmósfera estándar. En este sistema una presión absoluta de 15.7 psia debería ser expresada como 1 psig. Dos atmósfera de presión absoluta serían el equivalente a una atmósfera de presión manométrica (gauge)

La presión se puede medir en diferentes sistemas:

Millímetros de mercurio (mm Hg) - en el cual 760 mm Hg son equivalente a una atmósfera estándar.

Newtons por metro cuadrado (N/m^2) - en el cual 101,325 N/m^2 es equivalente a una atmósfera estándar

Pascales (Pa) - que son otro nombre de los N/m^2 , por lo que 101,325 Pa son equivalentes a una atmósfera estándar.

Bares - en los cuales 1.01325 bares son equivalentes a una atmósfera estándar

Pulgadas de agua (in H₂O) - en el cual 407.6 in H₂O equivalen a una atmósfera estándar

Pulgadas de mercurio (in Hg) - en el cual 29.9 in Hg equivalen a una atmósfera estándar

- Presión vapor

Tendencia de líquido a vaporizar abajo de su punto de ebullición.

Su medida es la presión vapor que varía en función de la temperatura.

Hay una relación directa muy importante entre la presión vapor y la concentración máxima que un vapor o gas puede alcanzar cuando se mezcla en el aire en un ambiente abierto. Tales concentraciones están más correctamente expresadas en unidades de porcentaje de concentración de aire por volumen.

$$\text{concentración en \%} = \frac{\text{presión de vapor (mm Hg)}}{760} * 100$$

$$\text{concentración en ppm} = \frac{\text{presión de vapor (mm Hg)}}{760} * 1\,000\,000$$

$$\text{concentración en ppb} = \text{concentración en ppm} * 100$$

$$\text{concentración en mg/m}^3 = \frac{(\text{concentración en ppm}) * (\text{peso molecular})}{0.08205 * (273.15 + ^\circ\text{C})}$$

- Punto de ebullición y presión vapor

El punto de ebullición de los materiales son función de la presión vapor.

Existen líquidos dentro de contenedores sellados que permanecen en estado líquido a temperaturas mayores a su punto de ebullición aunque su presión vapor es mayor de una atmósfera.

Si el calentamiento continua la temperatura y presión aumentan y hay rotura del recipiente si falla la válvula de alivio o no es suficiente o si carece de ella.

Materiales por debajo de la presión atmosférica hierven a una temperatura menor.

Muchos materiales con puntos de ebullición menores a la temperatura ambiente se almacena en cilindros resistentes permaneciendo en estado líquido en equilibrio con su presión vapor por ejemplo, amoníaco, gas L.p., propano.

- Densidad y gravedad específica de sólidos y líquidos.

La densidad es el peso por unidad de volumen .

La gravedad específica es la relación de la densidad de la sustancia dividida entre la densidad del agua.

La densidad del agua es 62.4 lb /ft³ equivalente a un 1 g / cm³ o a 1000 kg/ m³.

Ejemplo: un pie cúbico de aceite pesa 50 lbs y uno de acero pesa 487 lbs. Sus gravedades específicas serán 50/ 62.4 = 0.8 para el caso del aceite y 487/62.4 = 7.8 para el caso del acero.

- Densidad y gravedad específica de gases y vapores.

La densidad y gravedad específica de vapores o gases es más complicada por que estas propiedades se afectan por cambios en presión y temperatura, por lo que hay que tener cuidado al interpretar estos datos cuando se toman con relación a sustancias puras por la siguiente razón: La gravedad específica de una sustancia pura difiere de la gravedad específica de la mezcla del aire con la sustancia pura.

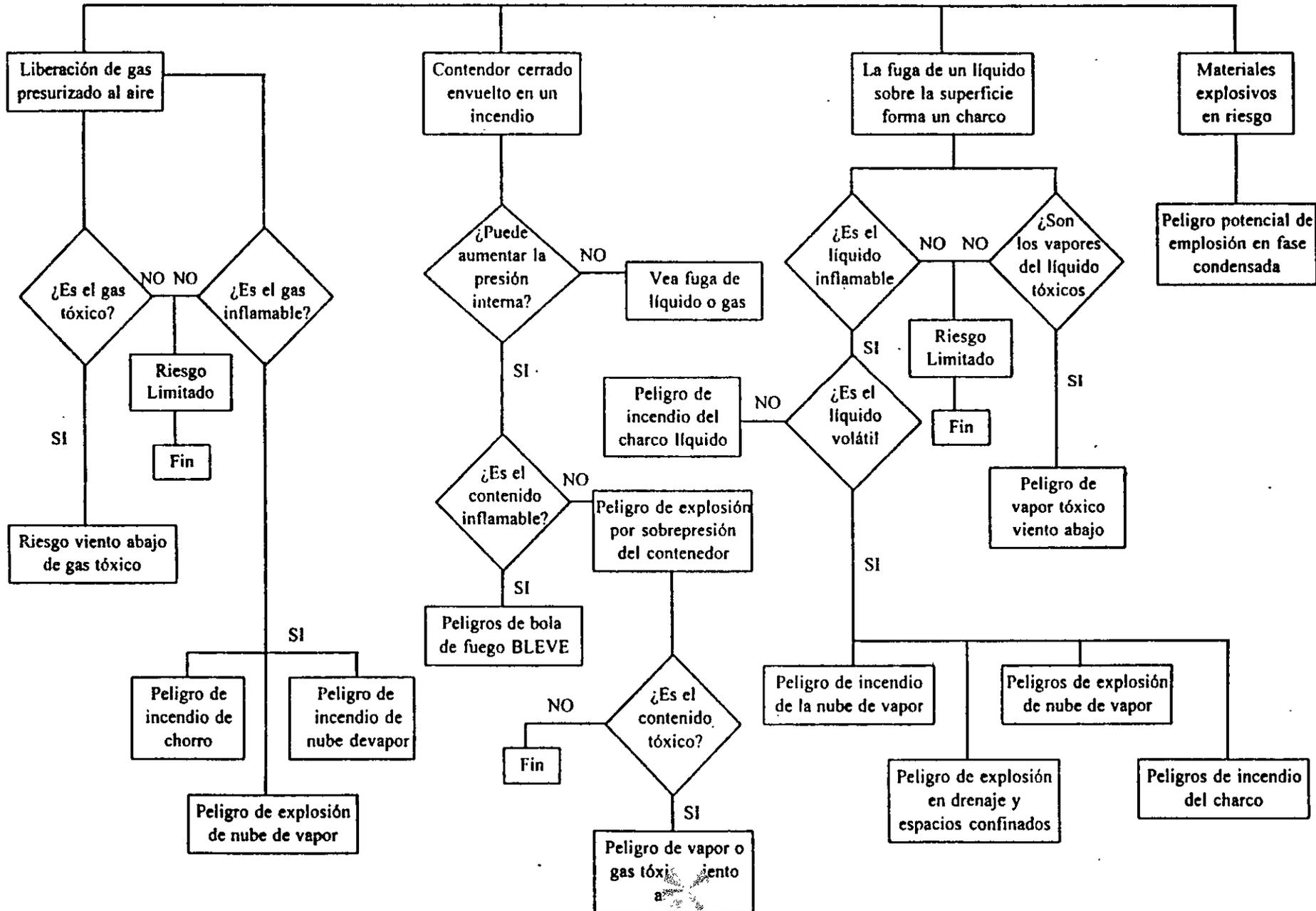
III.2 ARCHIE (Automated Resource for Chemical Hazard Incident Evaluation.)

Este paquete fue desarrollado por la EPA de Estados Unidos y el objetivo del paquete es el proporcionar al personal que prepara una emergencia con diversos métodos de estimación integrados que pueden ser usados para evaluar los impactos por la dispersión de vapor, incendio y explosión asociado con episodios de descarga de materiales peligrosos.

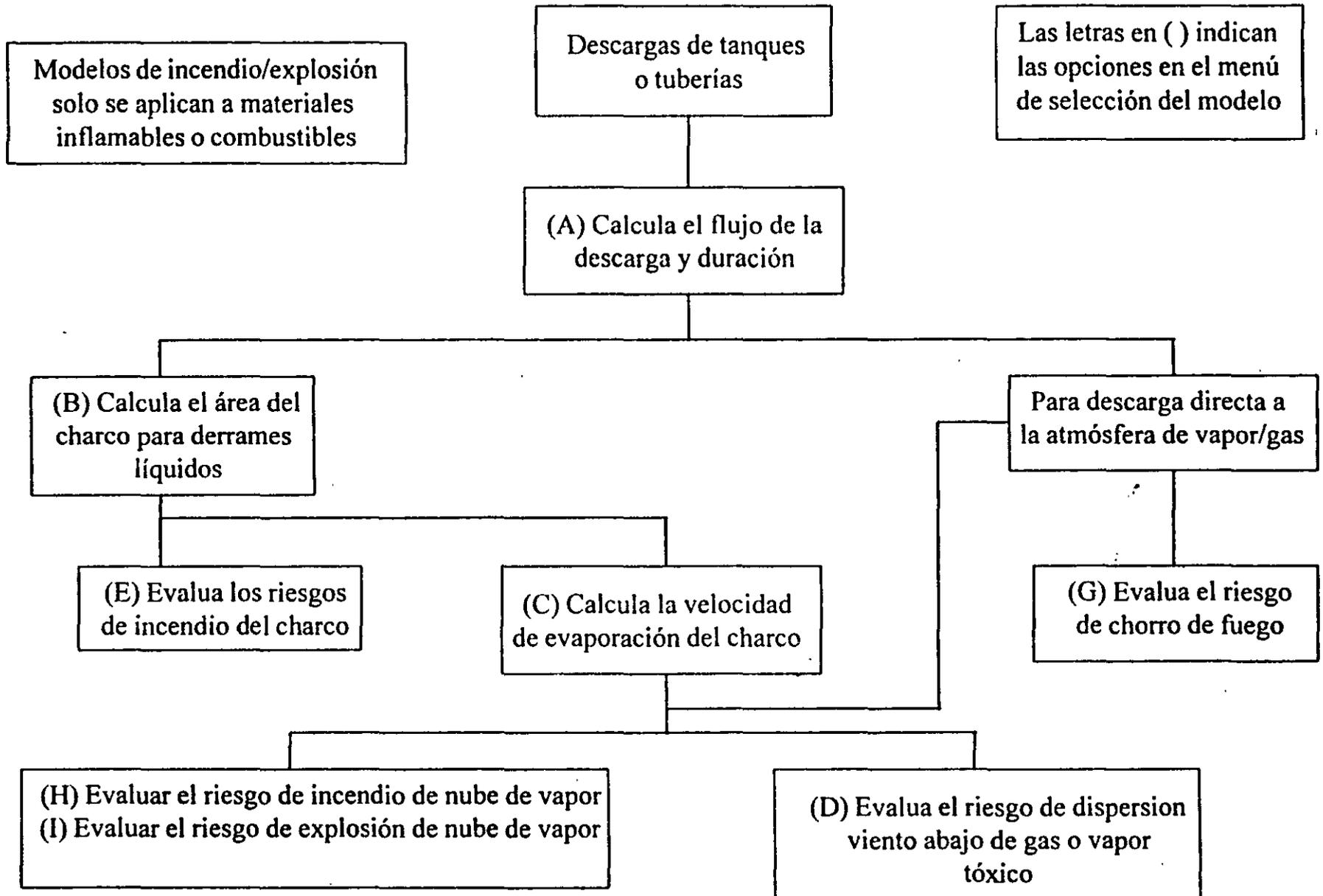
Los modelos de procedimientos de cálculo que están incorporados en la versión 1.0 del ARCHIE son:

- Nueve métodos para estimar la descarga y duración de una fuga de gas o líquido de un tanque o tubería.
- Siete métodos para ayudar a estimar el tamaño de charcos de líquido que se pueden formar en la tierra.
- Dos métodos para estimar la velocidad de evaporación o ebullición de un charco de líquido y la duración de estos fenómenos hasta que el tiempo en que el charco se vacía.
- Un método para estimar la zona de riesgo viento abajo que puede requerir evacuación u otra acción preventiva debido a la liberación de un gas o vapor tóxico a la atmósfera.
- Un método para evaluar los riesgos de radiación térmica por la ignición de un charco de líquido inflamable o combustible.
- Dos métodos para evaluar el tamaño del área viento abajo que puede estar sujeta a concentraciones inflamables o explosivas de gases o vapores en el aire debido a la liberación de un gas o vapor inflamable o explosivo - junto con el peso máximo de gas o vapor potencialmente explosivo en el aire que ocurre durante el incidente.

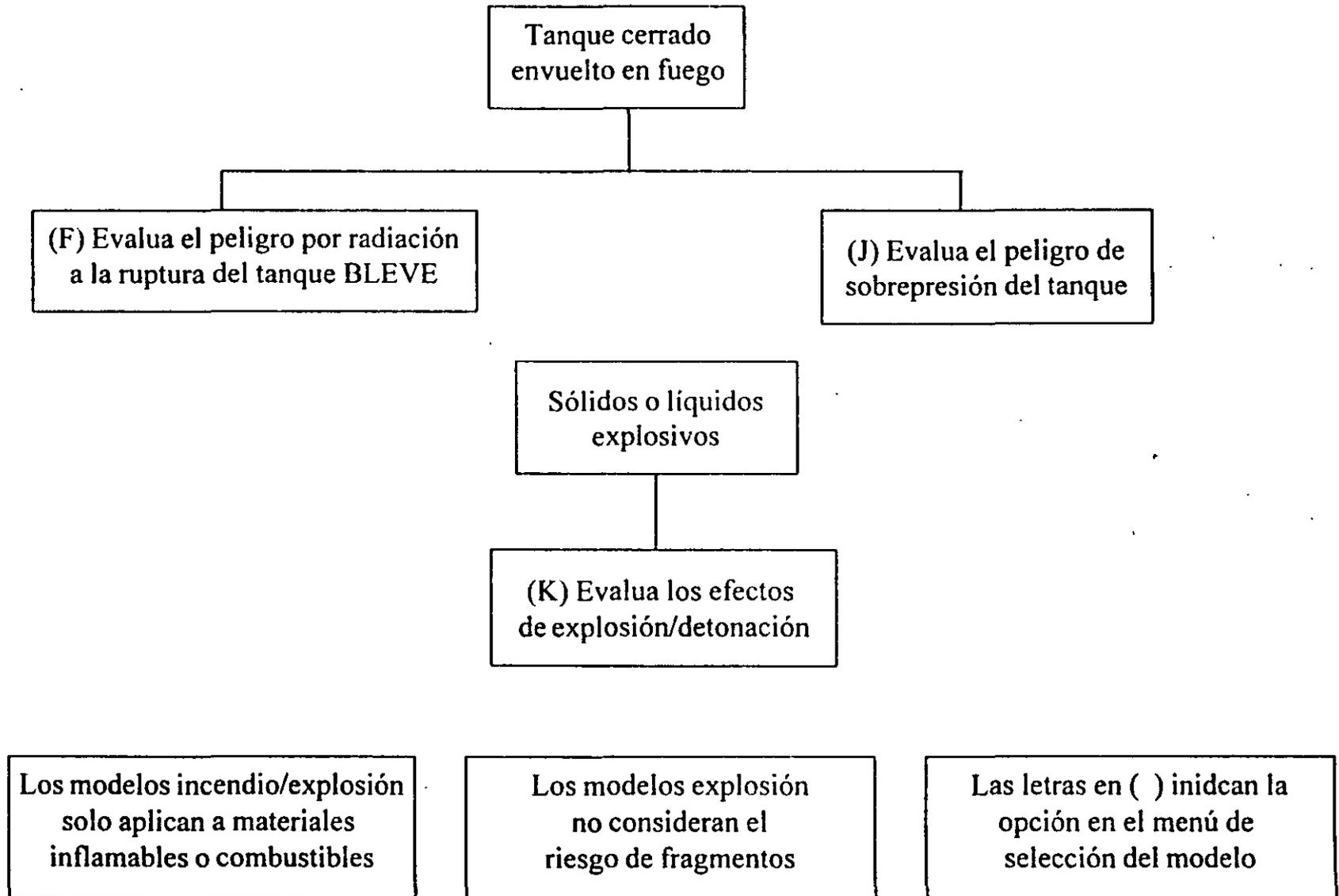
ACCIDENTE CON MATERIAL PELIGROSO



CARTA DE SELECCION DE MODELO



CARTA DE SELECCION DE MODELO



- Un método para evaluar las consecuencias de una explosión de nube de vapor no confinada si el gas o vapor inflamable podría explotar durante su ignición.
- Un método para evaluar las consecuencias de una explosión originada por la sobrepresurización de un tanque sellado o ventilado inadecuadamente debido a calentamiento externo o reacción interna.
- Un método para evaluar las consecuencias de una explosión originada por la ignición de un material verdaderamente explosivo en estado sólido o líquido.

Los procedimientos de cálculo en muchos casos son versiones simplificadas de métodos más sofisticados desarrollados por y/o disponibles por los expertos en el campo. Este paquete intenta proporcionar respuestas aproximadas para propósitos de planeación de emergencia en general. El paquete en la mayoría de los casos producirá resultados que sobreestiman más que subestiman el peligro a la comunidad, pero en ocasiones excepcionales ambos son posibles y probables.

El paquete no es capaz de evaluar como lo son la mayoría de los paquetes:

- Exposición viento abajo a productos de combustión de incendios
- Daños a la persona o propiedad por el impacto de fragmentos de alta velocidad producidos en explosiones.
- Daño y lesiones resultantes de explosiones de líquidos sobrecalentados o explosiones significativas que tengan lugar dentro de un edificio o estructura.
- Daños a la propiedad causados por la exposición a radiación térmica o sustancias corrosivas.

Uso Inconsistente e Inapropiado de los Modelos

Se realizó un gran esfuerzo durante el desarrollo del ARCHIE para asegurar que los usuarios no apliquen la metodología de evaluación de riesgo en forma inconsistente o inapropiada. Aunque cualquiera que intente usar el programa en esa forma encontrará un gran número de verificaciones y balances en el sistema para prevenir el mal uso, la complejidad de los procesos y fenómenos considerado no permiten el desarrollo de un programa totalmente probado. Es por lo tanto necesario que los usuarios apliquen el sentido común en cada paso del análisis para asegurar que el dato de entrada y la información proporcionada por el programa son razonables.

III.3 Modelos Atmosféricos para Simulación de Contaminación y Riesgos en Industrias (SCRI, México)

Este paquete fue desarrollado por Sistemas Heurísticos S.A de C.V. e incluye:

Modelo de Dispersión de una emisión puntual continua de gases.

Suposiciones, la pluma posee una distribución gaussiana de la concentración de contaminantes en las direcciones vertical.

La velocidad del viento es constante
La emisión tiene un gasto constante
la densidad del gas es cercana a la del aire
No considera efectos del terreno

Modelo de Dispersión de un gas o vapor proveniente de una fuga o derrame de un líquido que se evapora.

La emisión es a nivel de piso
Se conoce el gasto emitido en caso de que sea una fuga de gas
Si es líquido el que se evapora tiene dos procedimientos
Se calcula una área de exclusión relacionando la estabilidad atmosférica con un ángulo de fluctuación en el eje de X más la distancia Y máx a ambos lados alcanzando una distancia X_{máx}.

Modelo de Dispersión de un gas liberado en forma masiva e instantánea

El gas es emitido en forma masiva e instantánea
Una característica básica es que se asume que la dispersión de la nube a lo largo de la dirección del viento (x), es igual a la dispersión en la dirección lateral (y)
Además se considera que el viento solamente provoca el desplazamiento de la nube ciento abajo y que no diluye esta.
El tamaño inicial de la nube se estima considerando una distancia ficticia x_f en la cual $S_{y0} = S_{z0} = \text{radio recipiente}/2.15$

Los resultados suministrados por el programa son la distancia recorrida por el puff, el tiempo recorrido y la concentración en el centro del mismo a nivel de piso, así como una gráfica de concentración-distancia en el centro del puff. Igualmente se determinan las curvas de isoconcentración correspondientes a la concentración de interés suministrada por el usuario, cabe recalcar que en cualquier puntos dentro del círculo se tendrá que la concentración en el punto es superior a la concentración suministrada por el usuario.

Modelo de Evaluación de daños provocados por nubes explosivas.

Considera tres tipos de sustancias capaces de formar nubes explosivas:

- A) Gases contenidos a una presión de 500 psi o más
- B) Gases mantenidos es estado líquido por efecto de alta presión o baja temperatura.
- C) Líquidos combustibles o inflamables mantenidos a una temperatura superior a la de su punto de ebullición y que se encuentran en estado líquido por efecto de presión.

Se supone que el material fuga en forma instantánea
El material se vaporiza instantáneamente.

Se asume una nube de forma cilíndrica cuya altura corresponde a su eje vertical. Se supone que la nube cilíndrica no es distorsionada por el viento ni por estructuras o edificios cercanos.

La composición de la nube es uniforme y su concentración es la media aritmética de los límites inferior y superior de explosividad el material

El calor de combustión del material se transforma a un equivalente en peso de TNT. La temperatura del ambiente es de 21.1°C

Se considera que una nube originada en el interior de un edificio, formará una nube de las mismas dimensiones que una originada en el exterior del mismo.

Para determinar la magnitud de la fuga de material explosivo en una planta se pueden considerar 2 criterios o tipos de daños probables:

El Daño Máximo Probable (DMP)

La magnitud de la fuga estará determinada por el contenido del mayor recipientes de proceso ó conjunto de recipientes del proceso conectados entre sí, sin estar aislados uno del otro por válvulas automáticas o a control remoto. Si existen estas válvulas se considerará el contenido del mayor recipientes

No se considera como limitante de la formación de una nube la existencia de fuentes de ignición en las cercanías de una posible fuga.

El Daño Máximo Catastrófico (DMC)

El tamaño de la fuga está determinado por el contenido del mayor recipiente del proceso o conjunto de recipientes del proceso conectados entre sí. No se tiene en cuenta la existencia de válvulas automáticas.

Se considera la destrucción o daños graves de tanques de almacenamientos mayores, como formadores de nubes explosivas catastróficas.

Se consideran las fugas en tuberías de gran capacidad que sean alimentadas desde instalaciones remotas, exteriores o interiores, asumiendo que la tubería será dañada seriamente y que la duración de la fuga es de media hora.

No se considera como limitante de la formación de una nube, la existencia de fuentes cercanas de ignición.

Se incluyen los gases y líquidos empleados como combustibles.

**MODELOS ATMOSFERICOS PARA
SIMULACION DE CONTAMINACION Y
RIESGOS EN INDUSTRIAS**

S C R I

ver. 2.0 Enero de 1993

II. MODELO DE DISPERSION DE UNA EMISION PUNTUAL CONTINUA DE GASES

Antes de entrar propiamente a la descripción de este modelo, a continuación se presentan algunos conceptos que son generales a los modelos de difusión gaussiana y se aplican tanto al modelo de emisión puntual continua como al de fugas y derrames y al de nube o puff.

En los modelos de difusión gaussiana se tiene que la concentración promedio de contaminante en la pluma o masa gaseosa, a una distancia x viento abajo del punto de emisión o del centro de la pluma, es inversamente proporcional a la cantidad de dispersión de la pluma en las direcciones lateral y vertical (D_y , D_z), y a la velocidad del viento de transporte (U) (ref. 1):

$$C \propto \frac{Q}{U D_z D_y} \quad (1)$$

Donde Q es el flujo o masa de contaminante emitido.

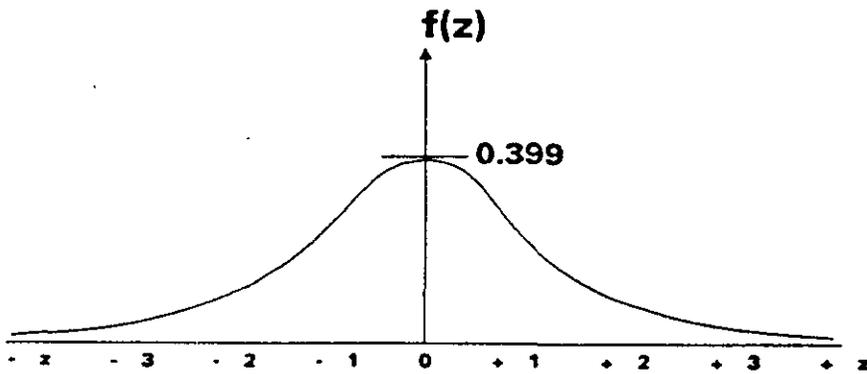
A partir de observaciones efectuadas se ha encontrado que la concentración dentro de la pluma no es uniforme, sino que se tiene un máximo hacia el centro, disminuyendo hacia los bordes. Los resultados teóricos y experimentales indican que el perfil de la concentración dentro de la pluma sigue aproximadamente una curva de distribución en forma de campana, también llamada distribución normal o gaussiana (fig. 1), (refs. 1, 2).

El pico de la curva (la media poblacional) corresponde a una concentración muy cerca del centro de la pluma y los puntos a ± 3 desviaciones estándar (S) de la media, representan aproximadamente los bordes de la pluma o nube.

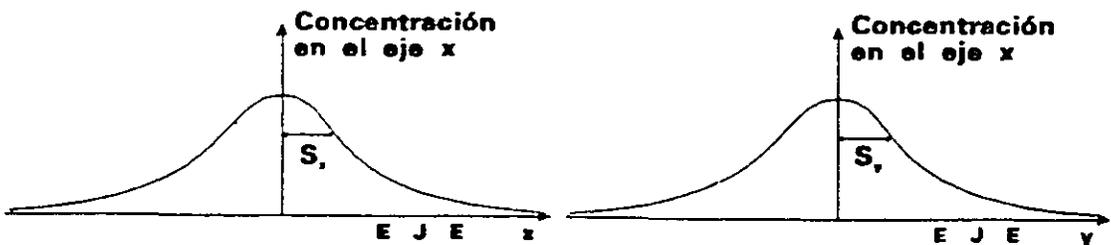
En la práctica S es igual a la distancia, a partir del centro de la pluma, en donde la concentración es igual a 0.6066 la concentración en el centro de la pluma.

La función gaussiana para las direcciones Y y Z puede emplearse entonces para reemplazar:

FIGURA 1. Representación Esquemática de (a) Curva de Distribución Normal Estándar y (b) Coeficientes de Dispersión S_x y S_y



(a)



(b)

$$Dy = Sy (2 \text{ Pi})^{1/2} \quad (2)$$

$$Dz = Sz (2 \text{ Pi})^{1/2} \quad (3)$$

Pi = 3.1416

Sy y Sz son conocidos como los coeficientes gaussianos de dispersión lateral y vertical respectivamente.

II.1 MODELO MATEMATICO

El desarrollo del modelo matemático para la dispersión de una emisión puntual continua, como es el caso de una chimenea, se basa en el esquema de la fig. 2.

De acuerdo con este esquema la concentración de un contaminante gaseoso en una posición x,y,z, proveniente de un emisor puntual continuo, está representada por la ecuación (refs. 2, 3) :

$$C(x,y,z; \text{He}) = \frac{Q}{2\text{PiSySzU}} \exp\left(\frac{-1}{2} \left(\frac{y}{\text{Sy}}\right)^2\right) \left(\exp\left(\frac{-1}{2} \left(\frac{z-\text{He}}{\text{Sz}}\right)^2\right) + \exp\left(\frac{-1}{2} \left(\frac{z+\text{He}}{\text{Sz}}\right)^2\right) \right) \quad (4)$$

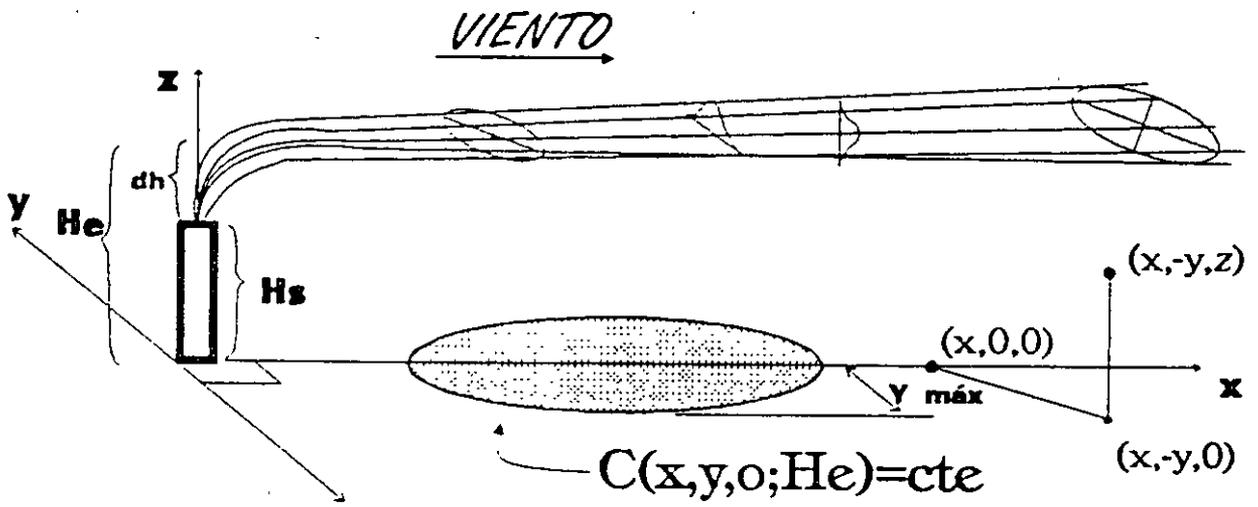
Donde:

C(x,y,z;He) = Concentración en la posición x,y,z, (g/m³)

Q = Emisión de contaminante, (g/s)

U = Velocidad promedio del viento, (m/s)

FIGURA 2. Esquema Conceptual del Modelo de Emisión Puntual Continua



$$\pi = 3.1416$$

H_e = Altura efectiva de emisión, (m)

S_y = Coeficiente de dispersión en la dirección lateral y, (m)

S_z = Coeficiente de dispersión en la dirección vertical z, (m)

Esta ecuación representa la forma más general del modelo, que para ciertos casos puede ser simplificada:

Caso 1:

Si se desea estimar la concentración a nivel de piso, entonces $z=0$ y :

$$C(x, y, 0; H_e) = \frac{Q/\pi S_y S_z U}{\exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{S_y}\right)^2\right)} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{H_e}{S_z}\right)^2\right) \quad (5)$$

Caso 2:

Si se quiere estimar la concentración a lo largo del centro de la pluma y a nivel de piso, entonces $y=0$, $z=0$ y:

$$C(x, 0, 0; H_e) = \frac{Q/\pi S_y S_z U}{\exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{H_e}{S_z}\right)^2\right)} \quad (6)$$

Caso 3:

Si la emisión de contaminante se produce a nivel de piso y se desea estimar la concentración a lo largo del centro de la pluma y a nivel de piso, entonces $y=0$, $z=0$, $H_e=0$ y:

$$C(x, 0, 0; 0) = Q/\pi S_y S_z U \quad (7)$$

En algunas ocasiones es interesante determinar cuál es la **concentración máxima** alcanzada en el centro de la pluma de un emisor elevado ($H_e > 0$), y a nivel de piso ($C(x, 0, 0; H_e)_{max}$), y a qué distancia se presenta (X_{max}). Esto ocurre cuando (ref. 2) :

$$X = X_{\max} \text{ para } Sz = He (2)^{-0.5} \quad (8)$$

y

$$C(x,0,0;He)_{\max} = 2 Q Sz / 2.718 \pi U He^2 Sy \quad (9)$$

La altura efectiva de emisión He es igual a la suma de la altura de la chimenea h más el término de elevación de la pluma dh , debida a la velocidad y temperatura de los gases a la salida de la chimenea. La elevación de la pluma puede ser calculada empleando la ecuación empírica de Holland (refs. 2, 3) y por el método de cálculo de Briggs (ref. 14):

Ecuación de Holland :

$$dh = (V_s D / U) (1.5 + 2.72 P ((T_s - T_a) / T_s) D) \quad (10)$$

Donde:

dh = Elevación de la pluma, (m)

V_s = Velocidad de emisión del gas, (m/s)

D = Diámetro interno de la chimenea, (m)

U = Velocidad del viento, (m/s)

P = Presión atmosférica, (atm)

T_s = Temperatura del gas, (°K)

T_a = Temperatura del aire, (°K)

Debido a que la elevación de la pluma se produce a una cierta distancia de la base de la chimenea, se recomienda no aplicar esta ecuación en el cálculo de concentraciones en los primeros metros a partir de la base de la chimenea.

El empleo de esta ecuación da resultados conservadores de las concentraciones calculadas, ya que en algunos casos subestima la elevación de la pluma (ref. 3). Se sugiere que para condiciones atmosféricas inestables se multiplique el valor de

dh por 1.1-1.2 obtenido con la ecuación (10), y para condiciones estables por 0.8-0.9 (ref. 3).

Cálculo de sobreelevación de la pluma de Briggs. La teoría del método se basa en el arrastre de aire dentro de una corriente formada por la pluma, empleando coeficientes obtenidos empíricamente a partir de un gran número de observaciones hechas sobre una gran variedad de fuentes. Las ecuaciones derivadas por Briggs son las siguientes (Ref. 14):

$$Dh = 1.6 F^{1/2} e^{2/3} / U \quad \text{para } e \leq 3.5X^* \quad (11) \text{ y}$$

$$Dh = 1.6 F^{1/2} (3.5X^*)^{2/3} / U \quad \text{para } e > 3.5X^* \quad (12)$$

Si

$$F \leq 55 \text{ entonces } X^* = 14F^{5/8}$$

$$F > 55 \text{ entonces } X^* = 34F^{2/5}$$

Donde:

Dh = Sobreelevación de la pluma, (m)

$$F = gVsRs^2[(Ts-Ta)/Ts] \quad (13)$$

g = Aceleración de la gravedad, (m/s²)

Vs = Velocidad de salida de los gases de la chimenea

Rs = Radio interno de la chimenea, (m)

Ts = Temperatura media de los gases a la salida de la chimenea, (°K)

Ta = Temperatura del aire ambiente, (°K)

U = Velocidad media del viento, (m/s)

e = Distancia de la fuente al receptor, (m)

Cuando no se especifica la distancia e en la aplicación del modelo, se asume que se tiene la sobreelevación final de la pluma y por lo tanto se considera que $e > 3.5 X^*$.

Se seleccionaron los métodos de **Holland y de Briggs** debido a que los parámetros que se involucran son fáciles de obtener o estimar.

Para el cálculo de los coeficientes de dispersión S_y y S_z se requiere considerar el tipo de estabilidad atmosférica prevaletiente. En el modelo se emplea la clasificación de estabilidad de Pasquill (refs. 3, 4):

Clase	Estabilidad
A	Muy inestable
B	Inestable
C	Ligeramente inestable
D	Neutra
E	Estable
F	Muy estable

La clase se determina a partir de la tabla siguiente, la cual considera varias combinaciones entre la velocidad del viento y la radiación solar durante el día, y la nubosidad durante la noche:

TABLA PARA LA CLASIFICACION DE ESTABILIDAD D.

Velocidad del viento (a 10 m) (m/s)	Día			Noche	
	Radiación Solar Incidente *			Nubosidad entre 4/8 y 7/8	Nubosidad < 3/8
	Fuerte	Moderada	Ligera		
<2	A	A - B	B	F	F
2 - 3	A - B	B	C	E	F
3 - 5	B	B - C	C	D	E
5 - 6	C	C - D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

PASQUILL

* NOTA : Radiación solar fuerte significa : $\geq 600 \text{ W/m}^2$

Radiación solar moderada significa entre: 300 y 600 W/m^2

Radiación solar ligera significa: $< 300 \text{ W/m}^2$

Los valores de S_y ó S_z se obtienen utilizando la ecuación:

$$S_y \text{ ó } S_z = a x^b + c \quad (14)$$

Donde los coeficientes correspondientes, en función del tipo de estabilidad, son : (ref. 4):

Clase	x < 1 Km			x > 1 Km		
	a	b	c	a	b	c
A Sy Sz	.215 .467	.858 1.89	0 .01	mismos coeficientes que para x < 1 Km		
B Sy Sz	.155 .103	.889 1.11	0 0			
C Sy Sz	.105 .066	.903 .915	0 0			
D Sy Sz	.068 .0315	.908 .822	0 0			
E Sy Sz	.050 .0232	.914 .745	0 0	.050 .148	.914 .150	0 -.126
F Sy Sz	.034 .0144	.908 .727	0 0	.034 .0312	.908 .306	0 -.017

Para los casos de estabilidad intermedia (A-B, B-C, C-D) se obtienen por separado Sz y Sy para ambos tipos de estabilidad y se calcula su promedio.

Los coeficientes de dispersión estimados con el procedimiento anterior se aplican para sitios planos sin obstáculos físicos importantes y probablemente subestiman el potencial de dispersión de la pluma de emisores a baja altura en áreas construidas.

Lo anterior es debido a que en la atmósfera existen variaciones espaciales de la turbulencia debido a los efectos de la estratificación del viento en función de la altura y a la rugosidad de la superficie terrestre: en general, la intensidad de la turbulencia es mayor cerca de la superficie terrestre que a alturas elevadas (algunos cientos de metros de altitud), y es generalmente más elevada sobre un terreno rugoso (colinas, edificios, etc.) que sobre un terreno suave (pradera o desierto) (refs. 2, 3, 4).

Es también importante mencionar que los coeficientes calculados con la técnica de Pasquill son representativos para **períodos de monitoreo de cerca de 10 minutos**. En la realidad y debido a las variaciones del viento, las concentraciones medidas viento abajo de un emisor disminuyen a medida que se incrementa el tiempo de muestreo. Para estimar las concentraciones con tiempos de muestreo superiores a unos cuantos minutos se puede emplear la relación (ref 3):

$$C_t = C_c (T_c/T_t)^P \quad (15)$$

Donde:

C_t = Concentración en base al tiempo de muestreo superior a unos cuantos minutos (T_t)

T_t = Tiempo de muestreo superior a unos cuantos minutos

C_c = Concentración conocida y calculada en base a un período de muestreo corto (T_c)

T_c = Tiempo de muestreo corto (generalmente 10 minutos)

P = Constante, con valores entre 0,17 y 0.2

En el caso de tener la presencia de una capa de inversión térmica, la pluma quedará "atrapada" entre ésta y la superficie del suelo, a partir de una cierta distancia (X_L).

Quando se presenta esta situación es necesario incluir un término adicional en la ecuación 4, con el fin de tomar en cuenta

las reflexiones del contaminante tanto sobre el piso como bajo la capa de inversión (se asume que el contaminante no atraviesa la base de la capa de inversión) (refs. 3, 5, 6).

El modelo tiene incorporado un algoritmo de cálculo para involucrar la presencia de una capa de inversión cuya altura de su base está a L metros sobre el nivel del piso. El procedimiento de cálculo es el siguiente:

a) Cálculo de la concentración con la ecuación 4 hasta una distancia $x = X_L$ tal que X_L corresponda a una $Sz = 0.47 L$

b) Entre $x = X_L$ y $x = 2X_L$ e efectúa el cálculo con:

$$\begin{aligned}
 C(x,y,z;He) = & (Q/(2\pi S_y S_z U)) \exp((-1/2)(y/S_y)^2) \\
 & \{ \exp((-1/2)((z-He)/S_z)^2) + \exp((-1/2)((z+He)/S_z)^2) \\
 & N=j \\
 & + \sum_{N=1} [\exp((-1/2)((z-He-2NL)/S_z)^2) \\
 & N=1 \\
 & + \exp((-1/2)((z+He-2NL)/S_z)^2) \\
 & + \exp((-1/2)((z-He+2NL)/S_z)^2) \\
 & + \exp((-1/2)((z+He+2NL)/S_z)^2)] \} \quad (16)
 \end{aligned}$$

c) A partir de $x = 2X_L$ se asume que se llevó a cabo un mezclado vertical uniforme y completo de la pluma y a partir de esta distancia se emplea la siguiente ecuación:

$$C(x,y,z;He) = (Q/(2\pi)^{1/2} S_y L U) \exp((-1/2)(y/S_y)^2) \quad (17)$$

Para efectuar el cálculo de una curva de isoconcentración es necesario efectuar el cociente (ref. 3):

$$C(x,y,0;He) / C(x,0,0;He) = \exp((-1/2) (y/Sy)^2) \quad (18)$$

De donde:

$$Y = (2 \ln(C(x,0,0;He)/C(x,y,0;He)))^{1/2} Sy \quad (19)$$

El programa calcula primeramente las distancias en las cuales la curva de isoconcentración corta al eje X, y en seguida determina los valores de la distancia lateral Y en función de incrementos de la distancia X. Puesto que la forma de la curva se aproxima a una elipse, el área se puede estimar por $(3.1416 AB)$, donde A es el semieje mayor y B el semieje menor.

El modelo implica las siguientes suposiciones:

- La pluma posee una distribución gaussiana de la concentración de contaminante en las direcciones vertical y lateral, con desviaciones estándar de Sy y Sz .
- La velocidad media del viento es U y se considera constante durante el tiempo de aplicación del modelo.
- La fuente emite con un gasto constante Q .
- No existe depósito de contaminante hacia el suelo, ni reacción con el mismo.
- La difusión de contaminante en la dirección x es insignificante, lo cual es adecuado si la emisión es continua o si la duración de la emisión es igual o mayor al tiempo de desplazamiento de la pluma (x/U) .
- La densidad del gas en la pluma tiene un valor cercano a la densidad del aire.

El modelo es aplicable en zonas con topografía plana sin obstáculos físicos importantes.

III. MODELO DE DISPERSION DE UN GAS O VAPOR PROVENIENTE DE UNA FUGA O DERRAME DE UN LIQUIDO QUE SE EVAPORA

III.1 MODELO MATEMATICO

Este modelo esta basado en la ecuación de difusión gaussiana de un gas o vapor. Su algoritmo ha sido diseñado para proveer de una estimación del área de riesgo o de "exclusión" generada por una fuga continua de un gas o de un vapor proveniente de un líquido que se evapora (fig. 3). Para aplicar este modelo es necesario establecer una concentración máxima permisible de exposición (C_{mpe}), la cual permite estimar el área de exclusión ó área de evacuación en caso de accidente. Las ecuaciones gaussianas se emplean bajo el supuesto que las concentraciones máximas se registran a nivel de piso i.e. $z=0$ m, y que el gasto de emisión es constante durante el tiempo de modelación, así como las características meteorológicas.

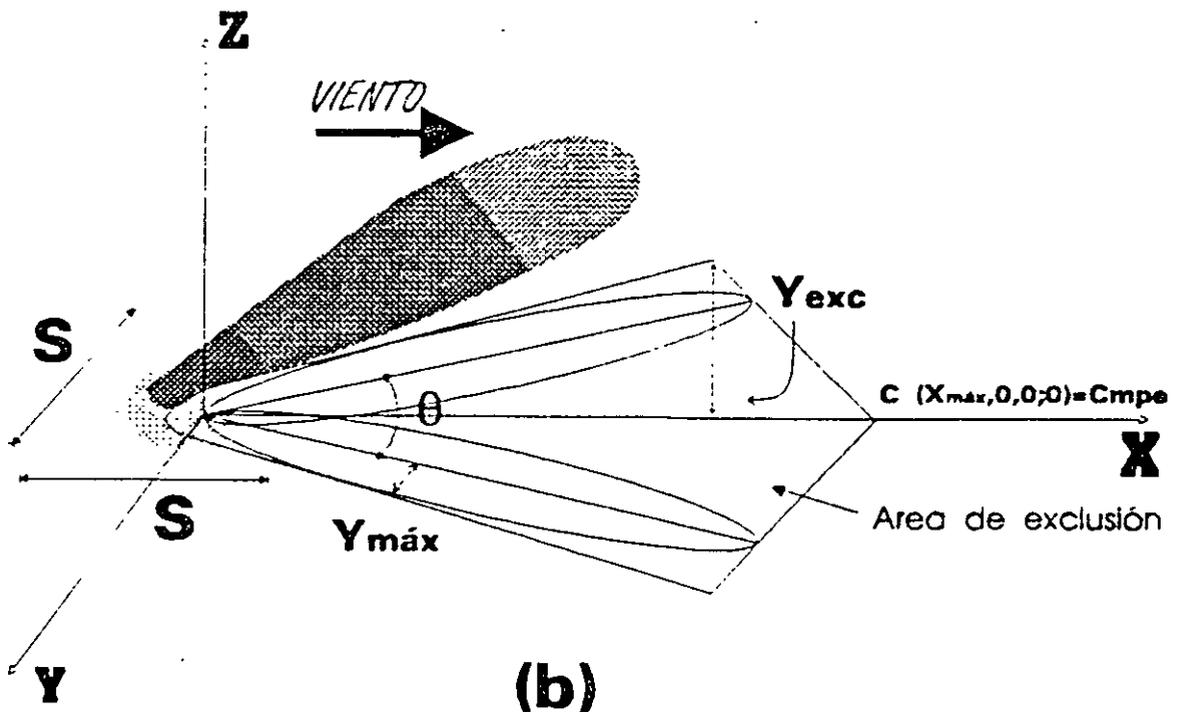
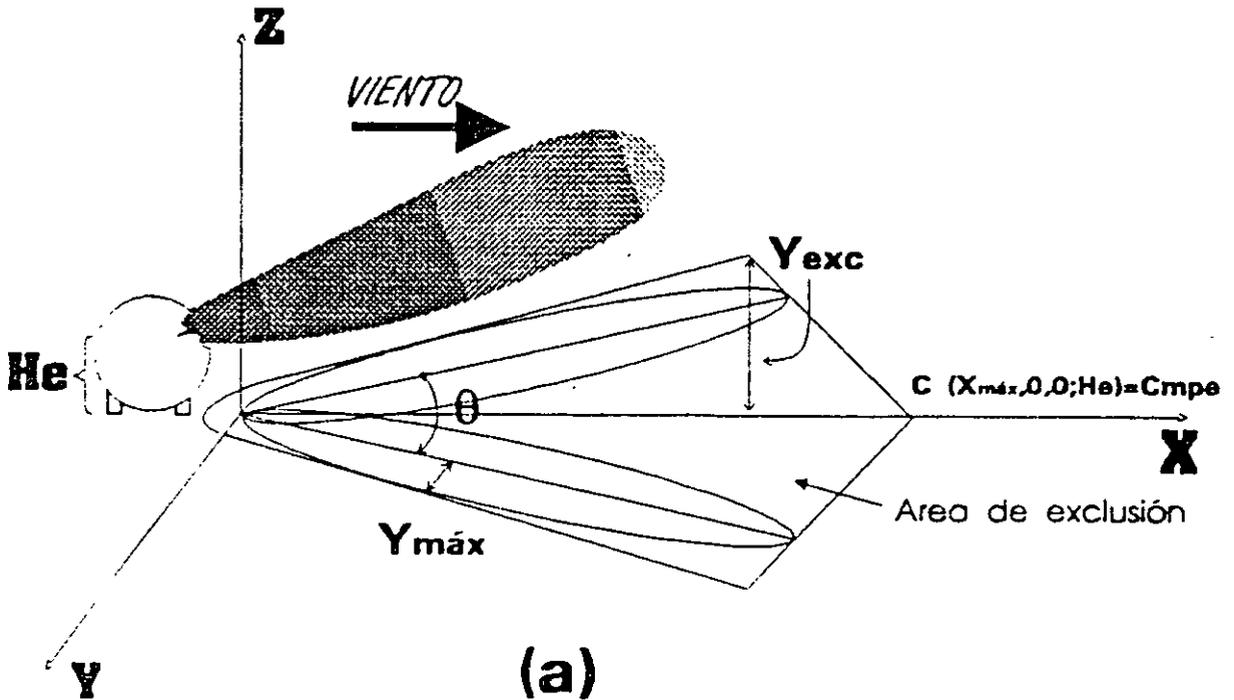
La primera etapa del algoritmo de cálculo se refiere al establecimiento del gasto de emisión.

En la ocurrencia de una fuga de un gas, el gasto emitido Q (g/s) estará determinado por las características del almacenamiento o línea donde se produzca. En la ocurrencia de una ruptura de un almacenamiento el gasto podrá depender del tamaño de la ruptura y de la presión a la que se encuentre almacenado el gas. Para una fuga en una línea de conducción el gasto será función del diámetro de la misma y de la velocidad a la cual es transportado el gas. Para estos tipos de eventos, el modelo asume que el gasto es conocido por el usuario. Sin embargo, para fines prácticos de prevención se recomienda modelar considerando un gasto máximo probable de gas fugado.

Para el caso de un derrame de un líquido que se evapora, el modelo tiene incorporados dos procedimientos para estimar el gasto de vapor emitido.

El primero es un tanto general y se basa en la estimación de un porcentaje de evaporación del líquido (ref. 7). Emplea una fun-

Figura 3. Esquema conceptual del modelo Gaussiano para (a) Fugas de Gases y (b) Líquidos que se evaporan



$$\% \text{ EVAP} = f \left(\frac{\text{P.V. L}}{760 \text{ mm Hg}} \times 100 \right) \quad (17)$$

Donde :

% EVAP = Porcentaje de evaporación del líquido

P.V.L. = Presión del vapor del líquido (mm Hg a 20°C)

Esta función fué determinada para una gran variedad de combustibles para cohetes, considerando un derrame de 600 m², un viento de 4.3 m/s, una temperatura del aire de 80° F y asumiendo que no existe absorción o calentamiento por el suelo.

El gasto de la emisión viene dado por :

$$Q = Q_L (\% \text{ EVAP}) \quad (18)$$

Donde :

Q = Gasto de emisión de vapor (g/s)

Q_L = Gasto de líquido derramado (l/s) x densidad del líquido (g/l)

El segundo procedimiento es más específico y se basa en las siguientes ecuaciones (ref. 8):

$$Q = Q_e S^2 \quad (19)$$

$$Q_e = 0.001315 (P^{1.353} PM)^{0.60327} \quad (20)$$

Donde :

Q = Gasto de emisión de vapor (g/s)

Qe = Gasto de evaporación del líquido ($\text{g s}^{-1} \text{m}^{-2}$)

P = Presión de vapor del líquido (mm Hg)

PM = Peso molecular del líquido (g/molg)

S = Longitud del derrame (m)

Como se puede observar en estas expresiones se involucran tanto las características del líquido como la superficie cubierta por el derrame.

Se recomienda emplear de preferencia la ecuación 20 cuando esto sea posible, ya que la ecuación 18 puede dar lugar a una subestimación del gasto evaporado.

La segunda etapa de cálculo corresponde a la determinación de la curva de isoconcentración para C_{mpe} , empleando la ecuación:

$$y = (2 \ln (C(x,0,0;He) / C(x,y,0;He))^{1/2}) S_y \quad (21)$$

Para el caso de fuga de gas (fig. 3 (a)) :

$$C(x,0,0;He) = (Q/P_i S_y S_z U) \exp \left((-1/2) (He/S_z)^2 \right) \quad (22)$$

$$C(x,y,0;He) = C_{mpe} \quad (23)$$

Donde :

C (x,0,0;He) = Concentración del gas (g/m^3), x metros viento abajo de la fuga

$$\text{Pi} = 3.1416$$

Sy = Coeficiente de dispersión en la dirección y, (m)

Sz = Coeficiente de dispersión en la dirección z, (m)

He = Altura de emisión, (m)

Cmpe = Concentración máxima permisible de exposición, (g/m³)

U = Velocidad media del viento (m/s)

Para el caso de derrame líquido la emisión se estima asumiendo una fuente de área (fig. 3 (b)) y considerando que su forma es cuadrangular.

Para una fuente de área es necesario efectuar una modificación en el cálculo del coeficiente de dispersión lateral Sy , asumiendo una desviación estándar inicial Syo que toma en cuenta una emisión en línea cuya dispersión se efectúa en forma gaussiana (ref. 3). Esto se hace considerando una distancia ficticia de la pluma Xf tal que :

$$\text{Xf} = x + \text{Xy}$$

Xy se obtiene asumiendo que la longitud de un lado del cuadrado (S) del derrame será:

$$\text{S} = 4.3 \text{ Syo}$$

y

$$\text{Syo} = \text{S}/4.3 \quad (24)$$

Donde Syo es el coeficiente de dispersión a la distancia Xy .

Una vez conocido Syo se determinan Xy y Xf , empleándose ésta última para el cálculo de Sy .

Las ecuaciones de cálculo de la concentración para la dispersión del vapor son:

$$C(x,0,0;0) = Q/Pi S_y S_z U \quad (25)$$

$$C(x,y,0,0) = C_{mpe} \quad (26)$$

Como el derrame ocurre a nivel del piso $H_e = 0$ m.

Los cálculos anteriores darán como resultado importante la distancia máxima (X_{max}) alcanzada por la curva de isoconcentración C_{mpe} y el ancho máximo de la elipse Y_{max} . Cabe mencionar que en cualquier punto dentro de la elipse se tendrá una concentración superior a C_{mpe} .

La tercera etapa de cálculo se refiere a la determinación del área de exclusión. Debido a que ésta última estará determinada por las condiciones de estabilidad atmosférica y por la dirección del viento, se ha definido un ángulo de variación o fluctuación (θ) de la pluma de gas o vapor, que es función del tipo de estabilidad. En el modelo se asumen los ángulos siguientes (ref. 7):

Categoría de estabilidad	(θ)
A - B	80°
C - D	30°
E - F	15°

Para el caso de estabilidad intermedia B-C se considera un ángulo de 55°.

El área de exclusión estará entonces definida por un sector con un ángulo θ más la distancia Y_{max} a ambos lados, alcanzando una distancia X_{max} (fig. 3).

Cabe recordar que las ecuaciones de dispersión gaussianas y sus parámetros asociados son los mismos que se presentaron en el modelo puntual continuo, y por lo tanto las suposiciones y restricciones asociadas en el mismo deben ser tomadas en cuenta para la aplicación de este modelo.

IV. MODELO DE DISPERSION DE UN GAS LIBERADO EN FORMA MASIVA E INSTANTANEA

IV.1 MODELO MATEMATICO

El modelo está desarrollado en base a las ecuaciones de dispersión gaussiana de una nube ó "puff" tridimensional, formada por la masa de una substancia gaseosa que es liberada a la atmósfera en unos cuantos segundos, tal como sería la liberación de una nube de gas tóxico provocada por una explosión o ruptura de un almacenamiento.

La fig. 4 muestra la representación esquemática del modelo, el cual ha sido diseñado para proveer de una estimación de la zona afectada por el puff durante su desplazamiento, así como de un seguimiento de la concentración en función del tiempo de arrastre.

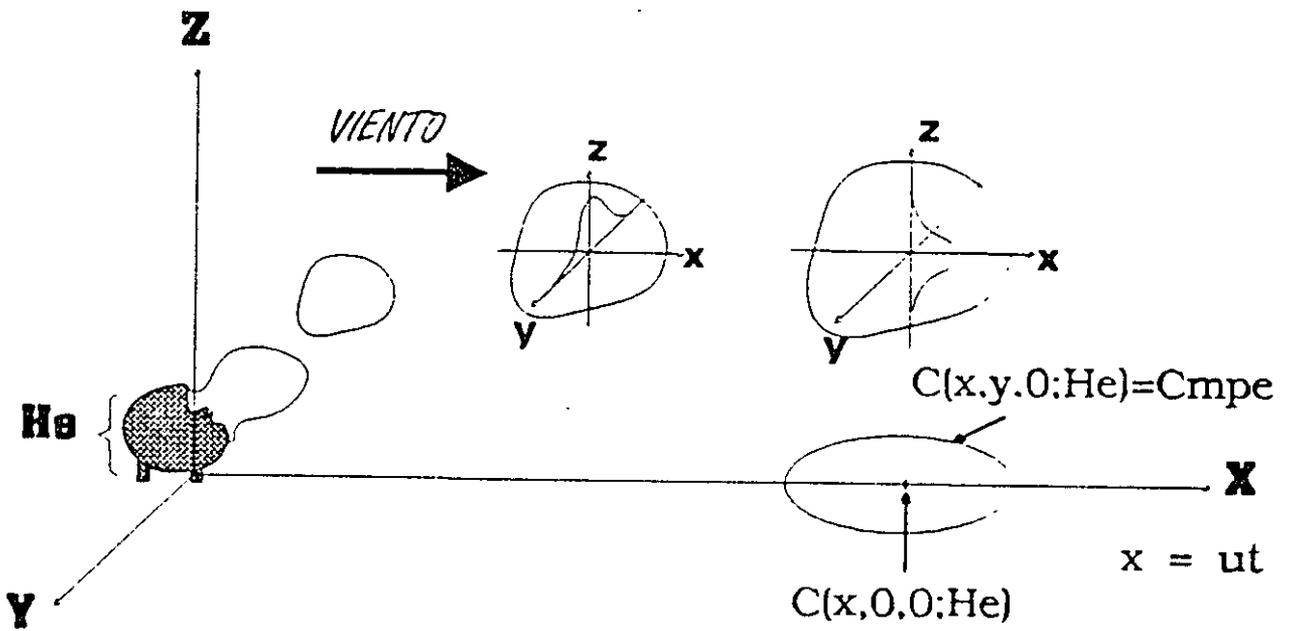
Una característica básica del modelo es que se asume que la dispersión de la nube a lo largo de la dirección del viento (x), es igual a la dispersión en la dirección lateral (y). Por lo tanto, se considera que el viento interviene únicamente como un vector de movimiento del puff, condicionando su posición viento abajo del punto de emisión, no existiendo dilución debida al viento. Así mismo, el modelo involucra sólo concentraciones a nivel del piso i.e. : z = 0.

La ecuación de la dispersión gaussiana tridimensional que constituye al modelo es (refs. 3, 5, 9, 10):

$$C(x,y,0;He) = \frac{2Q}{(2\pi)^{3/2}} \frac{Sp^2 Sz}{\exp\left(\frac{-1}{2} \left(\frac{((x-Ut)^2 + y^2)}{Sp^2} + \frac{He^2}{Sz^2} \right)\right)} \quad (27)$$

Donde:

FIGURA 4. Esquema Conceptual del Modelo PUFF.



$C(x,y,0;H_e)$ = Concentración a nivel de piso en la posición (x,y)
a
partir del centro de la nube, (g/m^3)

Q = Emisión total de gas, (g)

H_e = Altura de emisión de la nube, (m)

$S_p = S_y = S_x$ = Coeficientes de dispersión de la nube en las
direcciones x e y, (m)

S_z = Coeficiente de dispersión de la nube en la dirección z, (m)

$P_i = 3.1416$

t = Tiempo de desplazamiento o recorrido de la nube, (s)

U = Velocidad promedio del viento, (m/s)

x = Distancia a partir del centro de la nube en la dirección del
viento x, (m)

y = Distancia a partir del centro de la nube en la dirección lateral
y, (m)

z = Distancia a partir del centro de la nube en la dirección
vertical z, (m)

Los coeficientes de dispersión S_y y S_z , los cuales definen el tamaño de la nube, son función de la distancia recorrida por el mismo (Ut) y de las condiciones de estabilidad atmosférica pre-valecientes. En el modelo se asume que la estabilidad, así como el viento, permanecen constantes durante todo el recorrido del puff; los coeficientes S_y y S_z se determinan de acuerdo con el procedimiento de Pasquill (ref. 3), ya descrito en el modelo puntual continuo y seleccionándolos de tal forma que la concentración estimada resultante sea representativa de la concentración que se tendría desde una fuente emisora puntual continua (ref. 10). El tamaño inicial de la nube se estima considerando una distancia ficticia x_f en la cual $S_{y0} = S_{z0} = \text{radio recipiente}/2.15$ (ref. 3).

Los resultados suministrados por el modelo son la distancia recorrida por el puff, el tiempo recorrido, y la concentración en el centro del mismo a nivel de piso, así como una gráfica de

concentración-distancia en el centro del puff. Los cálculos se interrumpen cuando se alcanza una distancia de interés o una concentración determinada por el usuario (que puede ser una concentración máxima permisible de exposición (Cmpe)). Igualmente se determinan las curvas de isoconcentración, correspondientes a la concentración de interés suministrada por el usuario, en varios puntos del recorrido del puff, con ayuda de la ecuación:

$$y = (2 \ln (C (0,0,0;He) / C (x,y,0;He))^{1/2}) S_y \quad (28)$$

Donde :

$C (0,0,0;He)$ = Concentración del gas en el centro del puff, a nivel del piso y a una distancia U_t del punto de emisión (g/m^3)

$C (x,y,0;He)$ = C_{mpe} = Concentración correspondiente a la curva de isoconcentración deseada (g/m^3)

Debido a las suposiciones efectuadas, en particular que

$$S_x = S_y$$

se tiene que la curva de isoconcentración estará representada por un círculo. Cabe recalcar que en cualquier punto situado dentro del círculo se tendrá que la concentración en el punto es superior a la concentración máxima de exposición (Cmpe) suministrada por el usuario.

Al igual que en el modelo de fugas y derrames, es necesario mencionar que las características de la ecuación gaussiana empleada en el modelo puff condicionan su aplicación considerando las suposiciones y restricciones señaladas en el modelo puntual continuo, además de las siguientes:

- . El gas es emitido masiva e instantáneamente
- . La dispersión horizontal es igual a la lateral ($S_x = S_y$)
- . El viento no provoca una dilución de la nube en la dirección x

V. MODELO DE EVALUACION DE DAÑOS PROVOCADOS POR NUBES EXPLOSIVAS

El modelo de evaluación de daños provocados por la explosión de una nube de gas o vapor inflamable involucra el cálculo para determinar un potencial explosivo aproximado de sustancias empleadas en la industria (refs. 11, 12, 17, 18). Dentro de las sustancias que se contemplan en el modelo como factibles de formar nubes explosivas se tienen:

- A) Gases contenidos a una presión de 500 psi ó más.
- B) Gases mantenidos en estado líquido por efecto de alta presión o baja temperatura.
- C) Líquidos combustibles o inflamables mantenidos a una temperatura superior a la de su punto de ebullición y que se encuentran en estado líquido por efecto de presión (se excluyen las sustancias cuya viscosidad sea mayor a 1×10^6 centipoises o que posean puntos de fusión mayores a 100°C).

Existen una serie de suposiciones inherentes al modelo que le permiten efectuar las estimaciones y predicciones de daños provocados por la explosión de la nube, destacando las siguientes (refs. 18, 11, 17):

- La fuga de material (almacenado o en proceso) es instantánea, excluyéndose escapes paulatinos de gas a menos que se trate de fugas en tuberías de gran capacidad.
- El material fugado se vaporiza en forma instantánea formándose inmediatamente la nube; la vaporización y formación de la nube se efectúa de acuerdo con las propiedades termodinámicas del gas o líquido antes de producirse la fuga.
- Se asume una nube de forma cilíndrica cuya altura corresponde a su eje vertical. Se supone que la nube cilíndrica

no es distorsionada por el viento ni por estructuras o edificios cercanos.

- La composición de la nube es uniforme y su concentración corresponde a la media aritmética de los límites superior e inferior de explosividad del material.
- El calor de combustión del material se transforma a un equivalente en peso de trinitrotolueno (TNT) (calor de combustión del TNT = 1830 Btu /lb).
- La temperatura del aire ambiente se considera constante e igual a 21.1°C (70°F).
- Se considera que una nube originada en el interior de un edificio, formará una nube de las mismas dimensiones que una originada en el exterior del mismo.

Para determinar la magnitud de la fuga de material explosivo en una planta, se pueden considerar dos criterios o tipos de daños probables: a) El Daño Máximo Probable (DMP) y b) El Daño Máximo Catastrófico (DMC).

La magnitud de la fuga bajo un escenario de DMP se estima considerando :

- a) El tamaño de la fuga estará determinado por el contenido del mayor recipiente de proceso ó conjunto de recipientes del proceso conectados entre sí, sin estar aislados uno del otro por válvulas automáticas o a control remoto. Si existen estas válvulas se considerará el contenido del mayor recipiente.
- b) No se considerará como limitante de la formación de una nube, la existencia de fuentes de ignición en las cercanías de una posible fuga.

Bajo un escenario de DMC, la magnitud de la fuga se estima considerando:

- a) El tamaño de la fuga estará determinado por el contenido del mayor recipiente del proceso o conjunto de recipientes del proceso conectados entre sí. No se tendrá en cuenta la existencia de válvulas automáticas.
- b)

Se considerará la destrucción o daños graves de tanques de almacenamientos mayores, como formadores de nubes explosivas catastróficas.

- c) Se considerarán las fugas en tuberías de gran capacidad que sean alimentadas desde instalaciones remotas, exteriores o interiores, asumiendo que la tubería será dañada seriamente y que la duración de la fuga es de media hora.
- d) No se considerará como limitante de la formación de una nube, la existencia de fuentes cercanas de ignición.
- e) Se incluirán los gases y líquidos empleados como combustibles.

Una vez que se produce la explosión, se generan una serie de ondas expansivas circulares, de tal forma que las ondas de mayor presión están situadas formando una circunferencia cercana al centro de la nube y las de menor presión se sitúan en circunferencias de diámetro mayores. El objetivo del modelo es entonces determinar la magnitud de los diámetros asociados a la sobrepresión de las ondas y los daños producidos en instalaciones.

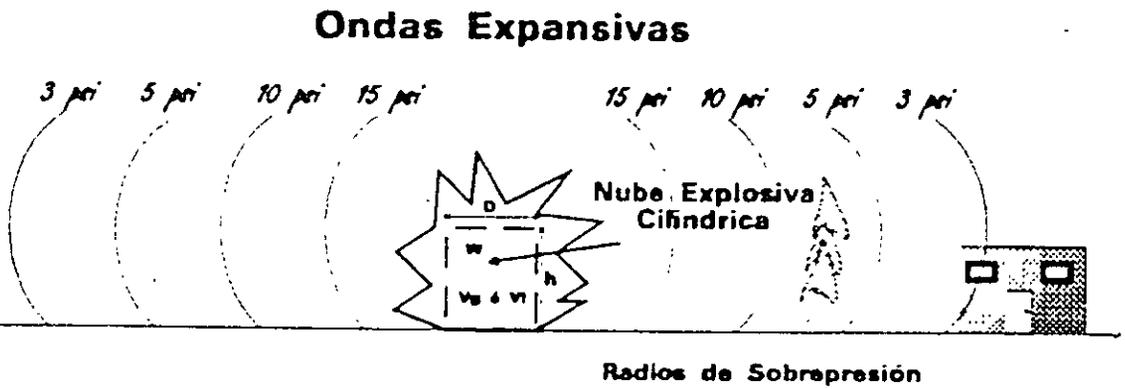
V.1 MODELO MATEMATICO

La figura 5 muestra esquemáticamente la conceptualización del escenario del modelo. La metodología de funcionamiento del modelo involucra varios pasos que son:

- Cálculo del peso de material en el sistema
- Cálculo del peso de material en la nube
- Cálculo del diámetro de la nube formada
- Cálculo de la energía desprendida por la explosión
- Determinación del diámetro de las ondas expansivas
- Determinación de los daños ocasionados.

A) Cálculo del Peso de Material en el Sistema (W_g ó W_I)

Figura 5. Esquema Conceptual del modelo de Nubes Explosivas.



Si el material en el proceso es un gas mantenido a 500 psi de presión o más, el peso de material se estima a partir de la ley de los gases:

$$W_g = \frac{P}{RT} M V_g \quad (29)$$

Donde:

W_g = Peso del gas en el proceso (lb)

V_g = Volúmen del gas en el proceso (ft^3) a condiciones normales (0°C y 1 atm)

Se deberá tomar en cuenta su factor de compresibilidad

M = Peso molecular del gas (lb/lb-mol)

R = Constante de los gases = 1.314 (atm. ft^3 /lb-mol $^\circ\text{K}$)

P = Presión (atm). Se asume igual a 1 atm

T = Temperatura ($^\circ\text{K}$). Se considera igual a 273°K

Si el material en el proceso se encuentra en estado líquido, el peso de material se calcula con su volumen y densidad:

$$W_l = 8.34 R_o V_l \quad (30)$$

Donde:

W_l = Peso del líquido en el proceso (lb)

R_o = Densidad del líquido en el proceso (g/ml) a temperatura del proceso (T_p)

V_l = Volumen del líquido en el proceso (gal)

El valor constante 8.34 es el factor de conversión (lb/g) x (ml/gal).

B) Cálculo del Peso de Material en la Nube (W)

El peso de material en la nube se estima de acuerdo a las características del material en el proceso :

- a) Para un gas mantenido a 500 psi o más de presión, el peso de material en la nube se asume igual al peso de material en el proceso:

$$W = W_g \quad (31)$$

Donde W está dado en libras.

- b) Para los gases licuados por efecto de presión o temperatura, al producirse la fuga se considera que todo el material pasa a la fase gaseosa:

$$W = W_l \quad (32)$$

- c) Para líquidos con un punto de ebullición inferior o igual a la temperatura ambiente (considerada de 21.1°C) se asume que se produce una vaporización total del 100% del material en el proceso, de donde:

$$W = W_l \quad (33)$$

- d) Si el líquido posee un punto de ebullición superior a 21.1°C, la cantidad vaporizada se calcula con:

$$W = W_l \frac{\bar{C}_p (T_p - T_{eb})}{\Delta H_v} \quad (34)$$

Donde:

T_p = Temperatura del líquido en el proceso (°C)

T_{eb} = Temperatura de ebullición del líquido (°C)

$\overline{C_p}$ = Media geométrica de los calores específicos del líquido (cal/g°C) a diferentes temperaturas entre T_{eb} y T_p

ΔH_v = Calor de vaporización del líquido (cal/g) a la temperatura de ebullición T_{eb}

El valor del cociente $\overline{C_p} (T_p - T_{eb}) / \Delta H_v$ representa la fracción del líquido que se vaporiza

C) Cálculo del Diámetro de la Nube Formada (D)

La metodología empleada se aplica únicamente para nubes de gases ó vapores que sean más pesados que el aire.

Como se mencionó anteriormente se asume que la nube es de forma cilíndrica, cuyo diámetro se calcula con la siguiente expresión:

$$D = 22.181 (W/hMF)^{1/2} \quad (35)$$

Donde:

D = Diámetro de la nube formada (ft)

h = Altura de la nube formada (ft)

M = Peso molecular del material

En esta ecuación se considera que la mezcla aire-gas (vapor) se encuentra a 21.1°C y 1 atmósfera de presión.

El parámetro F corresponde a la fracción de la nube representada por gas o vapor, si la nube en su totalidad se encuentra a una concentración explosiva media. F se determina con:

$$F = (LIE + LSE) / (2 (100)) \quad (36)$$

Donde:

LIE = Límite inferior de explosividad del material (%)

LSE = Límite superior de explosividad del material (%)

Generalmente las nubes explosivas alcanzan alturas de hasta 10 ft y se recomienda utilizar este valor para h. Si el gas es ligero hay que tener precaución al emplear alturas superiores a 10 ft ya que el diámetro de la nube se ve disminuido y por consiguiente se puede subestimar el potencial destructivo de la nube.

D) Cálculo de la Energía desprendida por la Explosión (E_d)

Se asume que la energía desprendida por la explosión de la nube se expresa por su equivalente en toneladas de TNT.

La ecuación representativa es:

$$E_d = W \Delta H_c E / 4.03 \times 10^6 \quad (37)$$

Donde:

E_d = Energía generada expresada en 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)

4.03×10^6 = Calor de combustión del TNT (Btu/ton)

E = Factor de explosividad

El factor E es adimensional y determina la fracción del calor de combustión que sirve para producir las ondas de sobrepresión. Para muchos materiales el valor de E se encuentra dentro del

rango 0.01 a 0.1 (ref. 11). Para las nubes explosivas aquí consideradas se emplean los valores :

$E = 0.02$ cuando el escenario se considera de DMP

$E = 0.10$ cuando el escenario se considera de DMC

Los criterios de DMP y DMC en este caso se relacionan únicamente con la eficiencia de la explosión, siendo independientes de los criterios mencionados anteriormente los cuales están relacionados con la estimación de la magnitud de la fuga de material.

E) Determinación del Diámetro de las Ondas Expansivas (Doe)

Las ondas expansivas (o de sobrepresión) consideradas se expresan en unidades de presión y van desde 0.5 psi hasta 30 psi. Como se mencionó, las de mayor presión se encuentran en circunferencias cercanas al centro de la nube explosiva, mientras que las de presiones más pequeñas se situarán en circunferencias alejadas.

La determinación de los diámetros de los círculos de sobrepresión se efectúa a través de funciones del tipo (ref. 11):

$$Doe = Z (Ed)^{1/3} \quad (38)$$

Donde:

Doe = Diámetro de la onda expansiva (ft)

Ed = Energía desprendida por la explosión (ton TNT)

Z = Distancia escalada para la sobrepresión considerada (ft/ton^{1/3})

Las refs. 11 y 12 presentan valores de Z para varios rangos de sobrepresión. En el modelo se emplean los siguientes:

Sobrepresión (psi)	Z (ft/ton^{1/3})
0.5	1291
1.0	800
2.0	485
3.0	400
5.0	292
7.0	240
10.0	200
20.0	161
30.0	120

F) Determinación de los Daños Ocasionados

A fin de determinar los daños ocasionados por la nube explosiva se emplea la información de la tabla 1, la cual muestra los efectos de diversos valores de sobrepresión sobre instalaciones y equipos en refinerías y plantas químicas. A estos daños se deben adicionar posibles incendios y explosiones subsecuentes. En las refs. 11 y 18 se puede consultar información adicional relativa a daños causados por explosiones sobre construcciones, casas y personas.

Para propósitos de espaciamiento en plantas, se recomienda que:

- Una nube explosiva generada en una área no debe cubrir ninguna parte de los edificios o procesos importantes de un área vecina.
- Todos los edificios y equipos importantes de un área deben situarse fuera del círculo correspondiente a una sobrepresión de 0.3 psi que sea generada por la explosión de una nube en un área vecina.

- Los edificios y equipos importantes que puedan ser alcanzados por ondas con valores entre 1 y 3 psi de sobrepresión, deben ser diseñados para resistir una sobrepresión de 2 psi, asumiendo un escenario de DMP ($F = 0.02$).
- Sólo las áreas alcanzadas por ondas de sobrepresión de 1 psi o menores pueden ser consideradas como separadas de la zona de riesgo.

BUFETE AMBIENTAL TÉCNICO, S.A. DE C.V.

Tel: 91(5)6712881 Fax: 91(5)6036034

M. EN I. MA. DEL CARMEN CRUZ ROSAS

MODELOS DE SIMULACION

I. INTRODUCCION Y CONCEPTOS GENERALES

Tipos de eventos

Dispersión de Puffs o Nubes de Vapor

Dispersión de Plumas continuas.

Variables que afectan la dispersión atmosférica

Consideraciones sobre la dispersión de nubes tóxicas

Consideraciones sobre la dispersión de sustancias inflamables

Análisis de consecuencias incendios y explosiones

II. TIPOS DE ESCENARIOS

III. PROGRAMAS DISPONIBLES PARA LA ESTIMACIÓN DE CONSECUENCIAS.

III.1 Definiciones de términos usados en los programas

III.2 ARCHIE (Automated Resource for Chemical Hazard Incident Evaluation.)

III.3 Modelos Atmosféricos para Simulación de Contaminación y Riesgos en Industrias
(SCRI, México)

Programa Universitario de Medio Ambiente

Uso de Herramientas para la Estimación de Consecuencias: PHAST
Ocean. Jorge A. Ortiz García

Introducción.

En su mayoría las sustancias peligrosas requieren de ser liberadas al ambiente para constituir un riesgo. En el caso de gases y líquidos su liberación al ambiente invariablemente implica su dispersión en el aire, la cual debe estimarse para poder evaluar los riesgos que implica.

Los procesos físicos involucrados en la emisión y dispersión de muchas sustancias peligrosas son muy complejos, y en algunos casos no muy bien entendidos. Mucho de la complejidad del problema consiste en la multitud de escenarios de emisión y dispersión que pueden existir en una instalación. La emisión puede ser instantánea o continua desde un recipiente o tubería involucrando gases presurizados, líquidos refrigerados o presurizados o líquidos a presión y temperatura ambiente, resultando en emisiones de vapor que pueden o no ser más pesadas que el aire. Las emisiones pueden involucrar cambios de fase e interacciones termodinámicas con el ambiente, con posible condensación de gotas de líquido desde la nube. A menudo, las estructuras en la planta e irregularidades del terreno afectan significativamente el destino de las sustancias liberadas, que hacen más complicado el proceso de evaluación de riesgos. Estos aspectos técnicos involucrados en la evaluación de dispersión de una sustancia peligrosa han requerido el desarrollo de una serie de metodologías y técnicas, algunas de las cuales pueden ser ejecutadas a mano y muchas que han sido computarizadas. A la fecha existirán más de 100 modelos matemáticos de varios niveles de sofisticación que pretenden considerar alguno o la mayoría de los procesos físicos que pueden estar potencialmente involucrados en los escenarios de accidentes. Muchos de estos modelos están basados en microcomputadoras, mientras que otros requieren de instalaciones mayores. Algunos modelos son más amigables que otros. Los amigables pueden no requerir de mucha experiencia para su aplicación a un problema en particular mientras que otros requieren de antecedentes técnicos de procesos químicos, termodinámica y teoría de difusión turbulenta.

Un modelo de simulación es una expresión que pretende representar el comportamiento de un conjunto de elementos reales. Típicamente los modelos de simulación se emplean para predecir el comportamiento de sistemas mediante el estudio de su funcionamiento y la definición de variables que representen a sus elementos.

En riesgo resultan de utilidad los modelos que calculan las consecuencias potenciales de una determinada emisión, tales consecuencias representan un grado de afectación, o

modificación, en los receptores. Podemos definir al grado de afectación como el nivel de modificación de un elemento de interés, esta modificación normalmente es indeseable.

La afectación puede ocurrir lo mismo en instalaciones industriales, construcciones, población o ambiente. Tal afectación puede ser evidente o bien ocurrir a nivel microscópico o a velocidades demasiado lentas para ser captadas de inmediato. El grado de afectación se mide una vez que se identifican las diferencias ocurridas en el elemento de interés.

La finalidad última de una evaluación de riesgos consiste en identificar los riesgos existentes y estimar su grado de afectación potencial para poder definir las medidas de prevención o mitigación necesarias y comunicar a los trabajadores, población, dirección de la empresa y autoridades cuales son los riesgos asociados. Un riesgo no está bien definido si no se identifica cuál es su grado de afectación, el cuál debe entenderse como una estimación *a priori* para poder identificar las medidas de mitigación pertinentes. La forma más sencilla de comunicar los riesgos es mediante la determinación de radios de afectación, que no son otra cosa que la distancia existente entre el evento indeseable y el efecto que ocasiona.

En el estudio de riesgos el grado de afectación puede evaluarse en términos de toxicidad, explosividad, inflamabilidad o daño físico, y por lo general está relacionado con la liberación de sustancias químicas.

PHAST

PHAST es la abreviatura de Process Hazards Assessment Software Tools (Herramientas de Software para la Evaluación de Riesgos de Proceso). Este programa fue desarrollado y presentado por DNV Technica en el 6º Simposium Internacional en Prevención de Pérdidas, realizado en Oslo en 1988.

PHAST es un producto de software desarrollado para proporcionar un servicio total en el análisis de riesgos de procesos químicos. Calcula las consecuencias de emisiones a la atmósfera accidentales o de emergencia de sustancias químicas inflamables o tóxicas

PHAST ha sido modificado continuamente siendo la versión 5.11 la más reciente. El programa está constituido por modelos los cuales se agrupan a su vez en modelos de descarga, modelos de dispersión y modelos de consecuencias. Cuenta además con una base de datos de sustancias químicas, un menú de parámetros y un archivo de condiciones ambientales. Se cuenta también con modelos de alimentación directa y la facilidad de presentar resultados en forma tabulada y en forma gráfica, ésta última permite la sobreposición de los radios de afectación en mapas de la región o planos del sitio o instalación industrial

La base de datos de materiales está basada en DIPPR, que es una base de datos desarrollada por la Universidad de Penn State para el Center for Chemical Process Safety

(CCPS) del American Institute of Chemical Engineers (AIChE). Contiene 59 sustancias predeterminadas pero puede ampliarse. En esta base de datos también es posible calcular propiedades fisicoquímicas de las sustancias en la base de datos tales como presión de vapor, densidad de líquido, densidad de gas, entre otras. Además permite especificar mezclas de hasta 16 componentes.

El programa emplea aproximadamente 90 parámetros que controlan desde las condiciones ambientales bajo las cuales se supone que ocurren los eventos hasta los niveles de sobrepresión, por ejemplo, que el usuario quiera que el programa le reporte.

Con respecto a las condiciones climáticas el programa permite definir hasta 6 combinaciones de velocidad del viento y estabilidad de acuerdo con la escala de Pasquill, además de temperatura atmosférica, temperatura superficial, humedad relativa y rugosidad superficial. Para aquellos eventos que no sucedan a nivel del mar se puede modificar la presión atmosférica.

Los modelos de descarga calculan el comportamiento de la fuga desde que ocurre hasta que alcanza la presión atmosférica, entre otros aspectos consideran si el material se libera como líquido, vapor o en dos fases, si el material liberado es puro o una mezcla, si el comportamiento es estacionario o dependiente del tiempo, o bien si la descarga ocurre en interiores de edificios. Los parámetros que definen los modelos de descarga se indican a continuación:

- Flujo másico
- Duración
- Temperatura
- Velocidad de expansión
- Velocidad de descarga
- Fracción líquida
- Tamaño y trayectoria de gotas

PHAST permite también una opción en la cual el usuario especifica los parámetros de descarga.

Los modelos de dispersión se aplican una vez que la emisión se encuentra a presión atmosférica y toman en cuenta los parámetros de descarga, ya sea que los halla calculado el programa o que el usuario los halla especificado. Estos modelos calculan la formación de aerosoles, la condensación y formación de charcos y el comportamiento de la nube, tomando en cuenta si ésta es más ligera o más pesada que el aire. De hecho el programa considera que la dispersión está sujeta a diferentes regímenes de dispersión y para cada uno de ellos aplica un modelo específico según se indica a continuación:

Modelo	Régimen
Uniform Jet	Mezcla turbulenta
Gaussian Jet - TECJET	Mezcla turbulenta
Híbrido	Híbrido
Nube densa	Nube densa
Dispersión pasiva	Pasivo

Los modelos de inflamabilidad se aplican automáticamente para el cálculo de consecuencias por eventos tales como BLEVES, flamas de chorro, incendios de charcos, flamazos y explosiones. El tipo de resultados que presentan son niveles de radiación, niveles de sobrepresión y alcance de los límites de inflamabilidad.

Los modelos de toxicidad calculan el alcance de concentraciones de interés para tiempo de exposición específicos, así como también el alcance de los tres valores de ERPG para aquellas sustancias que los tienen definidos y que se encuentran en la base de datos, y finalmente calculan el valor probit cuando en la base de datos se encuentran los coeficientes específicos del material.

La sección de modelos externos permite que a partir de datos alimentados directamente por el usuario se hagan cálculos más detallados de las consecuencias. Para ello se cuenta con otros modelos para cálculo de BLEVE's, de flamas de chorro, de incendios de charcos, de evaporación de charcos y de explosión.

DNV en su compromiso por mantener a PHAST como una herramienta líder realiza de manera continua actualizaciones al programa que consideran los avances más recientes en teoría de dispersión y consecuencias, además de que también recopila la información de accidentes que ocurren en todo el planeta para realizar la simulación con PHAST y cuando encuentran diferencias procede a calibrar los modelos.

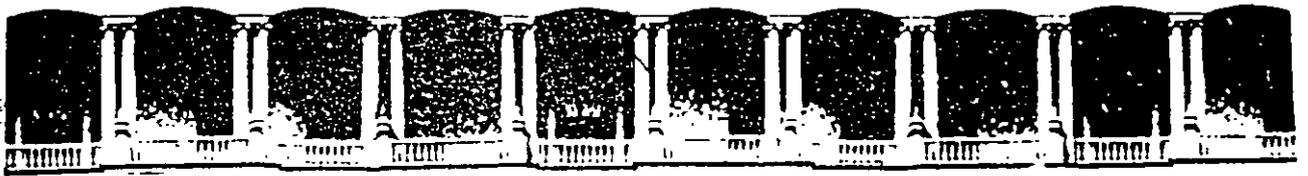
Puede concluirse que las características que hacen de PHAST la herramienta más avanzada para el cálculo de consecuencias por fugas y derrames de sustancias inflamables o tóxicas son las siguientes:

- Modelación rigurosa
- Facilidad de uso
- Validación y calibración de modelaciones con casos reales
- Cálculo desde el origen
- Considera densidad del gas
- Cálculo dentro de edificios
- El usuario especifica el caso (escenario, condiciones físicas) El programa calcula todos los parámetros necesarios para la modelación

En el ejemplo que se presenta a continuación se supone la fuga por un tapón de 38 mm de diámetro en el fondo de una esfera que almacena 40 toneladas de Amoniaco líquido a 24.9°C y 130 psi. Se desea conocer cuales son las zonas afectadas por el IDLH y por el ERPG-3, así como también determinar cuales son los niveles de sobrepresión, radiación térmica y toxicidad presentes a las distancias hipotéticas de interés.

Referencias.

- 1.- DNV Technica. 1996. PHAST Manual de Capacitación.
- 2 - Stone & Webster Engineering Corporation. 1991. Risk Assessment and Risk Management for the Chemical Process Industry. Van Nostrand Reinhold.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

**MODELOS DE SIMULACIÓN DE
CONTAMINACIÓN Y RIESGO
EN INDUSTRIAS**

TEMA

MODELOS DE SIMULACIÓN

**EXPOSITOR : OCEAN. JORGE A. ORTIZ GRACIA
J. HUITRÓN Y CIA.
JULIO 1998**

Modelos de Simulación
Ocean. Jorge A. Ortiz Garcia
J. Huitrón y Compañía

Introducción.

La industria emplea modelos de simulación en diversos aspectos de sus sistemas productivos. Son de especial interés aquellos que tienen que ver con las sustancias peligrosas que se manejan. En su mayoría las sustancias peligrosas requieren de ser liberadas al ambiente para constituir un riesgo. En el caso de gases y líquidos su liberación al ambiente invariablemente implica su dispersión en el aire, la cuál debe estimarse para poder evaluar los riesgos que implica. Estos riesgos tienen el potencial de afectar tanto a la población como al ecosistema o bien al personal e instalaciones de la empresa. Es de aceptación general que la afectación a la población y al personal de la empresa tiene mayor jerarquía que la afectación al ecosistema o a las instalaciones de la empresa, es por ello que al hablar de modelos de simulación se toquen en detalle aquellos que estiman las consecuencias potenciales negativas al ser humano .

Los procesos físicos involucrados en la emisión y dispersión de muchas sustancias peligrosas son muy complejos, y en algunos casos no muy bien entendidos. Mucho de la complejidad del problema consiste en la multitud de escenarios de emisión y dispersión que pueden existir en una instalación. La emisión puede ser instantánea o continua desde un recipiente o tubería involucrando gases presurizados, líquidos refrigerados o presurizados o líquidos a presión y temperatura ambiente, resultando en emisiones de vapor que pueden o no ser más pesadas que el aire. Las emisiones pueden involucrar cambios de fase e interacciones termodinámicas con el ambiente, con posible condensación de gotas de líquido desde la nube. A menudo, las estructuras en la planta e irregularidades del terreno afectan significativamente el destino de las sustancias liberadas, que hacen más complicado el proceso de evaluación de riesgos. Estos aspectos técnicos involucrados en la evaluación de dispersión de una sustancia peligrosa han requerido el desarrollo de una serie de metodologías y técnicas, algunas de las cuales pueden ser ejecutadas a mano y muchas que han sido computarizadas. A la fecha existirán más de 100 modelos matemáticos de varios niveles de sofisticación que pretenden considerar alguno o la mayoría de los procesos físicos que pueden estar potencialmente involucrados en los escenarios de accidentes. Muchos de estos modelos están basados en microcomputadoras, mientras que otros requieren de instalaciones mayores. Algunos modelos son más amigables que otros. Los amigables pueden no requerir de mucha experiencia para su aplicación a un problema en particular mientras que otros requieren de antecedentes técnicos de procesos químicos, termodinámica y teoría de difusión turbulenta.

Un modelo de simulación es una expresión que pretende representar el comportamiento de un conjunto de elementos reales. Típicamente los modelos de simulación

se emplean para predecir el comportamiento de sistemas mediante el estudio de su funcionamiento y la definición de variables que representen a sus elementos.

Podemos generalizar los modelos de simulación en dos tipos: cualitativos y cuantitativos.

Los modelos de simulación cualitativos se limitan a usar expresiones que describan el comportamiento del sistema, por ejemplo una cadena alimenticia donde los productores primarios son consumidos por los consumidores primarios y estos a su vez son consumidos por los consumidores secundarios que al perecer son incorporados al suelo por los organismos reintegradores que los descomponen en nutrientes empleados por los productores primarios y así sucesivamente. En estos modelos no se especifican cantidades transferidas de una etapa a otra.

Los modelos de simulación cuantitativos emplean expresiones matemáticas para especificar en detalle los cambios que ocurren en el sistema, un balance de agua en una instalación industrial es un buen ejemplo de un modelo cuantitativo, cuando los consumos de agua están perfectamente definidos basta con medir la extracción para conocer cuanta se va a aprovechar y cuanta se va a desperdiciar, si hubiere cambios en cualquiera de las etapas el modelo debe ser capaz de predecir que ocurrirá con cada una de las corrientes de agua, y aquí es donde empiezan las complicaciones de los modelos ya que en ocasiones sus predicciones no se ajustan a lo que sucede en la realidad. Esto sólo es indicativo de que el modelo no estaba suficientemente definido y se requiere un mayor investigación para definir relaciones y coeficientes e incorporarlas en el modelo.

Usos de modelos de simulación en el análisis de riesgos.

Los modelos de simulación tienen aplicación prácticamente en todos los procesos tanto naturales como artificiales, sin embargo en este documento nos limitaremos a la aplicación para análisis de riesgos. Típicamente los modelos de simulación en riesgos tienen aplicación en todas las actividades relacionadas con la vida de un proceso, a continuación se indican algunos ejemplos de tales actividades:

- a) Estimación de la magnitud de las consecuencias por fugas y derrames de sustancias peligrosas.
- b) Revisión de localización de planta, arreglo de equipo y diseño de instalaciones
- c) Determinación de modificaciones en el proceso tomando en cuenta el aspecto de la seguridad.
- d) Preparación de planes de contingencia.
- e) Promoción de la conciencia de la seguridad.

La lista puede ser interminable ya que usando los resultados del modelo se puede inclusive facilitar la toma de decisiones sobre inversiones relacionadas con el proceso.

Tipos de modelos usados en análisis de riesgos.

Como se mencionó anteriormente el riesgo de las sustancias peligrosas está en relación con su liberación al ambiente, los modelos de simulación buscan predecir el comportamiento del material durante las diferentes etapas por las que va pasando. Podemos agrupar a los modelos de acuerdo a la etapa del material en que pueden aplicarse como sigue:

- a) Modelos de proceso.- estos modelos esencialmente predicen las transformaciones y comportamiento de las sustancias durante las diferentes etapas del proceso productivo. Pueden llegar a ser tan sofisticados que de hecho controlan el proceso.
- b) Modelos de dispersión.- estos modelos predicen el comportamiento y dirección que seguirán las sustancias cuando son liberadas. Existen modelos para dispersión en aire, modelos para dispersión en agua y modelos para dispersión en el subsuelo, a la fecha no se tiene conocimiento de un modelo que indique la dispersión en los tres medios de manera simultánea.
- c) Modelos de descarga.- estos modelos predicen qué sucederá con el material en el momento en que es liberado al ambiente. Típicamente calculan si el material es liberado como líquido, gas o ambos y en qué proporciones, qué tan rápido se emite, como cambia su temperatura, si es que se forma un charco y qué dimensiones tiene y a qué velocidad se evapora, así como también con qué rapidez se mezcla con el medio en que se liberó.
- d) Modelos de explosión.- estos modelos calculan el alcance de ondas de sobrepresión generadas por la explosión de una nube de vapor de una sustancia.
- e) Modelos de incendio.- calculan el alcance de niveles de radiación térmica causados por las flamas de una sustancia que se ha encendido.
- f) Modelos de proyectiles.- determinan las distancias a que pueden llegar objetos y trozos de recipientes que han estallado.

Para que un modelo de simulación tenga una aplicación útil en el análisis de riesgos es conveniente que considere los aspectos siguientes:

- a) Debe ser aplicable a sustancias peligrosas, por lo tanto debe considerar no sólo sus propiedades fisicoquímicas sino también sus características de toxicidad e inflamabilidad.
- b) Debe poder ser aplicable a eventos en que la sustancia en cuestión es liberada al ambiente, por lo que debe tomar en cuenta las condiciones ambientales de la zona donde ocurre el accidente
- c) Debe ser capaz de predecir el comportamiento de la sustancia al ser liberada, esto es que pueda predecir o manejar la formación de nubes, charcos o neblinas según el tipo de sustancia emitida, e igualmente debe poder definir los cambios que ocurren durante la dispersión tales como turbulencia, densidad de la nube e influencia del viento.
- d) La dispersión que modele debe identificar el alcance de concentraciones de interés que el usuario pueda definir, o bien que sean concentraciones que indiquen algún grado de afectación.

e) Debe poder definir las distancias a diferentes niveles de afectación ya sea por toxicidad, explosividad o inflamabilidad.

Un modelo que cumpla con las condiciones anteriores será muy útil en última instancia para la toma de decisiones. Otras consideraciones sobre el uso de modelos de simulación se indican a continuación:

La rapidez con que el modelo realice sus cálculos representará un ahorro sustancial de tiempo. La exactitud de los resultados permitirá un ahorro en recursos ya que se evitará que se realicen gastos para proteger zonas que ya sean seguras o bien permitirá una dedicación adecuada de recursos en las áreas que requieran protección. La precisión, o reproducibilidad, del modelo asegurará confianza en los resultados obtenidos. Finalmente el costo del modelo será directamente proporcional al beneficio que pueda generar pero hay que tomar en cuenta que si es un buen modelo su costo será muchas veces menor al de los gastos para reparar los daños causados por un evento indeseable que no fue evaluado adecuadamente.

Criterios de modelación.

Casi tan importante como las características del modelo empleado son los criterios que siga el analista para evaluar los riesgos. Ante todo debe identificar escenarios que resulten en la liberación de la sustancia al ambiente para que después, de acuerdo al tipo de modelo que se esté usando, se calculen las consecuencias o radios de afectación potenciales. Existen muchos enfoques que pueden tomarse para realizar la modelación. En principio se pueden modelar todos los escenarios que puedan imaginarse al analista, sin embargo siempre es mejor tomar un enfoque sistemático ya que de esa manera se evita que halla subjetividad en el análisis; siguiendo ese enfoque se puede optar por estudiar los antecedentes del proceso y modelar aquellos eventos que han ocurrido en el pasado o que pudieron haber ocurrido. Otro enfoque consiste en identificar los eventos indeseables y modelarlos.

Existen dos documentos que pueden servir de guía para establecer criterios de modelación:

- a) El Manual de Técnicas para Evaluar Riesgos Industriales, del Banco Mundial.
- b) La Risk Management Program Rule, de la EPA.

El Manual de Técnicas para Evaluar Riesgos Industriales sugiere una metodología que consiste en dividir el proceso en los equipos que lo constituyen, agrupar los equipos por tipo, es decir tuberías, recipientes, bombas, etcétera y proceder a evaluar fugas para cada tipo de equipo. Típicamente se sugiere evaluar para cada equipo la ruptura total instantánea del recipiente o tubería, una fuga de diámetro equivalente al de la línea de mayor diámetro conectada al recipiente, una fuga equivalente al 20% del diámetro de la línea de mayor

diámetro conectada al recipiente, la apertura del sistema de alivio cuando corresponda, y una BLEVE cuando se trate de recipientes que contengan sustancias inflamables.

La Risk Management Program Rule especifica que para cada sustancia tóxica y para cada sustancia inflamable se debe modelar un escenario denominado "Peor Caso" que consiste en la liberación de todo el inventario que pueda contener el recipiente de almacenamiento más grande en un tiempo de 10 minutos si la sustancia es tóxica o instantáneamente si la sustancia es inflamable. Además del Peor Caso se debe modelar un "Escenario Alternativo" para cada sustancia tóxica y un "Escenario Alternativo" que represente a todas las sustancias inflamables. Se deberán modelar Escenarios Alternativos adicionales según se requiera a fin de que se tenga información de afectación para todos los posibles receptores. Un Escenario Alternativo es cualquier escenario que tenga una probabilidad razonable de ocurrir y que presente radios de afectación que alcancen a la población. A diferencia de los criterios del Banco Mundial, los criterios del RMP también especifican consideraciones sobre condiciones ambientales de la zona donde se realice la modelación según sea el Peor Caso o el Escenario Alternativo de acuerdo con la tabla siguiente:

PEOR CASO	ESCENARIO ALTERNATIVO
Velocidad del viento / estabilidad	
1.5 m/s y estabilidad F o según el sitio.	Según el sitio o 3.0 m/s y estabilidad D.
Temperatura / humedad	
Temperatura máxima diaria más alta y humedad promedio con base en el últimos 3 años o 25°C y 50%	Temperaturas y humedades promedio o 25°C y 50%
Altura de la emisión	
A nivel de piso	Según el escenario o a nivel de piso
Topografía	
Urbana o rural según aplique	Urbana o rural según aplique
Temperatura de la sustancia	
Temperatura máxima diaria más alta en el caso de líquidos no refrigerados, con base en los últimos 3 años, o la temperatura del proceso, la que sea mayor. En el caso de gases licuados por refrigeración a presión atmosférica usar sus puntos de ebullición O bien 25°C o el punto de ebullición de la sustancia	Según la temperatura de proceso o ambiente adecuada al escenario. O bien 25°C o el punto de ebullición de la sustancia
Puntos finales	
ERPG 2, LOC, 10% IDLH, 0.1LC50 o 0.01LD50 para sustancias tóxicas. Sobrepresión de 1.0 psi para explosión.	ERPG 2, LOC, 10% IDLH, 0.1LC50 o 0.01LD50 para sustancias tóxicas. Sobrepresión de 1.0 psi para explosión. 5 Kw/m2 por 40 segundos para incendios. Limite inferior de inflamabilidad

Validación.

A pesar de todo el esfuerzo consumido en desarrollar técnicas analíticas que simulen los mecanismos físicos responsables de la dispersión de una sustancia liberada, la mayoría de los modelos de dispersión no reflejan el realismo deseado para propósitos de evaluación de riesgo y consecuencias. Esto es debido en gran parte a la complejidad inherente e incertidumbre asociadas con estos procesos y acopladas con numerosas incertidumbres y falta de datos de alimentación precisos y detallados que definan el escenario de emisión de interés. El punto fundamental es que los modelos de dispersión contienen muchas simplificaciones y consideraciones que conducen a predicciones que en el mejor de los casos pueden considerarse como estimaciones. Muchos estudios han sido auspiciados por la EPA para determinar el grado de precisión de las predicciones y han dado como resultado que la precisión depende mucho de la complejidad del terreno y condiciones meteorológicas.

La validación en sí es una medida de la confianza en los resultados del modelo, sin embargo hay que tomar en cuenta que en muchos casos los modelos no son más que ecuaciones que de uno u otro modo son correctas, los mismos resultados se obtendrían si se hacen los cálculos a mano y esto es algo que por lo general crea confusión. Muchas veces se cuestiona la validación sin pensar qué es lo que el programa está haciendo, y lo que está haciendo es simplemente reportar los resultados de una secuencia de ecuaciones basadas en investigaciones y presentadas en foros científicos, muchos modelos lo que hacen es tomar estas mismas ecuaciones y dar un formato de manera que el usuario pueda fácilmente alimentar la información necesaria y obtener resultados de manera escrita o gráfica. Una persona experimentada puede validar un modelo basándose en experiencias anteriores, o bien lo que se hace en la práctica es realizar experimentos donde se liberan materiales de prueba y se miden sus concentraciones a diferentes distancias a favor del viento, posteriormente se realizan las simulaciones y se comparan los resultados. Si los resultados reportados por el modelo son semejantes a las concentraciones medidas se dice que el modelo es válido. Ahora bien, el hecho de que un modelo no reporte resultados semejantes a los medidos no quiere decir que el modelo no sirva, a lo mucho quiere decir que las ecuaciones usadas no son aplicables a las condiciones del experimento.

La exactitud de un modelo depende en gran medida de los parámetros que considera, y por parámetros se entienden variables que está considerando, éstas van desde las propiedades de la sustancia hasta factores ambientales. Algunos de los parámetros que debe considerar un modelo para reflejar mejor condiciones reales son:

a) Material. - punto de ebullición, punto de fusión, peso molecular, presión de vapor, densidad, tendencia a polimerizarse, reacciones con al aire o con el agua, facilidad de modelar mezclas, uso de valores absolutos para propiedades o incorporación de coeficientes para las ecuaciones del cálculo de dichas propiedades, entre otros.

b) Descarga.- determinación de tasa de emisión, estado físico al ser liberada, variación de temperatura durante la descarga, tamaño de las partículas emitidas, formación de charcos, o requiere que el usuario alimente esta información.

c) Dispersión.- consideración de las diferentes etapas de dispersión: expansión turbulenta inicial, densidad de la nube, dispersión pasiva, consideración de la estabilidad atmosférica y velocidad del viento.

Finalmente habrá que decir que no existe un protocolo de validación de modelos, y si bien existen investigadores que se han dado a la tarea de comparar el desempeño de diferentes modelos que en teoría tienen la misma aplicación, los parámetros de comparación dependen mucho de quién está haciendo la investigación y cuales son sus objetivos. Podemos resumir diciendo que la validación de un modelo no depende de que tan apegadamente refleja la realidad sino más bien de la validez de las ecuaciones que utiliza, los criterios que asume y los parámetros que toma en cuenta. Conociendo qué hay dentro de un modelo uno puede darse una buena idea de si su aplicación es conveniente o no, no es necesario esperar a que ocurra un evento indeseable para comparar sus consecuencias con las estimadas por el modelo.

Referencias.

- 1.- DNV Technica. 1996. PHAST Manual de Capacitación.
- 2.- EPA. 1996. RMP Offsite Consequence Analysis Guidance.
- 3.- Stone & Webster Engineering Corporation. 1991. Risk Assessment and Risk Management for the Chemical Process Industry. Van Nostrand Reinhold.
- 4.- World Bank. Techniques for Assessing Industrial Hazards: A Manual.

Modelos de Simulación

USOS

- Diseño de condiciones de proceso, especificaciones de equipo, arreglo de instalaciones, ubicación de planta
- Planeación de respuesta a emergencias
- Desarrollo de medidas de prevención: controles, procedimientos, capacitación

TIPOS DE MODELOS

- Proceso - $A + B = PRODUCTOS$
- Dispersión - aire, agua, subsuelo
- Descarga - flujo, estado físico, tamaño
- Explosión - alcance de ondas de sobrepresión
- Incendio - alcance de niveles de radiación térmica
- proyectiles - alcance de objetos y trozos

MODELOS DE SIMULACION

- Predicción del comportamiento de un sistema
- Cualitativos - describen el comportamiento del sistema
- Cuantitativos - ecuaciones que especifican los cambios en el sistema

USOS

- Evaluación de cambios al proceso, sustitución de equipos, paro de planta
- Decisión sobre inversiones tomando en cuenta el riesgo

SIMULADORES Y RIESGO

- Sustancias peligrosas
- Eventos - liberación al ambiente
- Comportamiento - nubes, charcos, nieblas
- Dispersión - alcance de concentraciones de interés
- Definición de grado de afectación - incendio, explosión, toxicidad

SIMULADORES Y RIESGO

- Toma de decisiones
- Rapidez - optimiza tiempo
- Exactitud - ahorro en recursos
- Precisión - confianza en resultados
- Costo - comodidad, irrelevante al comparar con el costo de los daños

CRITERIOS DE MODELACION

- Al gusto
- Antecedentes
- Eventos indeseables
- Legislación
- Banco Mundial
- RMP

CRITERIOS BANCO MUNDIAL

- Por tipo de equipo
- Ruptura recipiente
- Ruptura línea mayor
- Fuga línea mayor
- Fuga 20% línea mayor
- Apertura sistema de alivio
- BLEVE

CRITERIOS RMP

- Peor caso
- Casos alternos
- Toxicidad, inflamabilidad
- Inventario
- T° material, atmosférica
- Humedad relativa
- Rugosidad del terreno
- Estabilidad atmosférica
- Puntos finales

VALIDACION

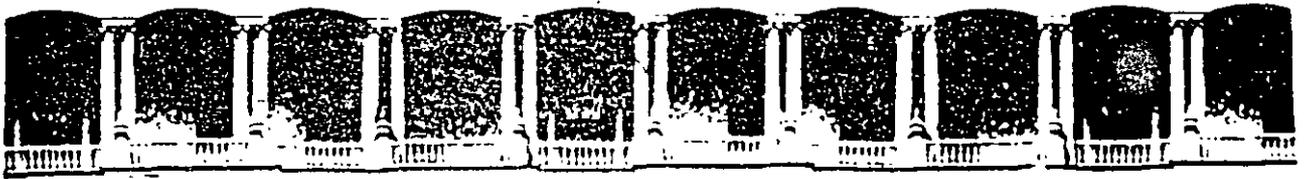
- Confianza en los resultados del modelo
- Teórica - $2+2=4?$, antecedentes
- Práctica - liberar, medir, comparar
- Parámetros considerados
- ¿Quién?

PARAMETROS

- Material - PE, PF, PM, Pv
 - polimerización, reacciones con agua, aire
 - mezclas
 - ¿valores o coeficientes?
- Descarga - tasa de emisión, estado físico, temperatura, tamaño
 - charcos
 - ¿cálculos automáticos?

PARAMETROS

- **Dispersión - estabilidad, turbulencia, densidad**
 - ¿dispersión pasiva?



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

**MODELOS DE SIMULACIÓN DE
CONTAMINACIÓN Y RIESGO
EN INDUSTRIAS**

TEMA

RISK MANAGEMENT PROGRAM RULE

**EXPOSITOR : ING. MIGUEL A. CASTILLO HOIL
JULIO 1998**

Contenido

Risk Management Program Rule

RMP

- Generalidades
- Evaluacion de Riesgo
- Programas de Prevencion - 2 y 3
- Respuesta a Emergencias
- Plan de Manejo de Riesgos
- Otros Requisitos

Aplicabilidad

- Fuentes Fijas con Sustancias Normadas en Cantidades Mayores al Limite - 3 Anos
- Programa 1- Historial de 5 Anos, Distancia a Receptores Publicos, Procedimientos de Respuesta a Emergencias
- Programa 2
- Programa 3 - SIC, OSHA
- Modificaciones a Procesos

Requisitos Generales

Programa 1

- Presentar un Programa de Manejo de Riesgos (PMR)
- Analizar el Peor Caso, Demostrando que no se Afecta a Receptores Publicos e Incluirlo en el PMR
- Historial de Accidentes en 5 Anos
- Asegurar la Coordinacion con Grupos Locales de Respuesta a Emergencias

Requisitos Generales

Programa 2

- Presentar PMR
- Desarrollar e Implantar un Sistema Administrativo
- Realizar una Evaluacion de Riesgos
- Implantar las Etapas de Prevencion
- Desarrollar e Implantar un Programa de Respuesta a Emergencias
- Presentar la Informacion sobre Elementos del Programa de Prevencion

Requisitos Generales

Programa 3

- Presentar PMR
- Desarrollar e Implantar un Sistema Administrativo
- Realizar una Evaluacion de Riesgos
- Implantar las Etapas de Prevencion
- Desarrollar e Implantar un Programa de Respuesta a Emergencias
- Presentar la Informacion sobre Elementos del Programa de Prevencion

Sistema Administrativo

- Asegurar la Implantacion de los Elementos del PMR
- Asignacion de Responsable del Desarrollo, Implantacion e Integracion de los Elementos del RMP
- Definir Lineas de Autoridad

Parametros de Analisis de Consecuencias fuera del Sitio

- Puntos Finales
 - Sustancias Toxicas
 - Sustancias Inflamables - explosion
 - calor
 - limites de flamabilidad
- Velocidad del Viento y Estabilidad
- Temperatura Ambiente y Humedad

Peor Caso

- Programa 1 - 1 Peor Caso por Proceso
- Programas 2 y 3 - 1 Peor Caso, el de Mayor Afectacion, para Sustancias Toxicas y Otro para Sustancias Inflamables, y Peores Casos Adicionales por Afectacion Potencial de Otros Receptores
- La Mayor Cantidad Considerando Controles Administrativos

Evaluacion de Riesgos

- Analisis de Consecuencias Fuera del Sitio
- Analisis de Peor Caso
- Analisis de Escenario Alterno
- Definicion de Impactos en Poblacion y Ambiente
- Revision y Actualizacion
- Documentacion
- Historial de Accidentes

Parametros de Analisis de Consecuencias fuera del Sitio

- Altura de la Emision
- Rugosidad Superficial
- Densidad del Gas
- Temperatura de la Sustancia Emitida

Peor Caso

- Liberacion en 10 Minutos para Gases o Gases Licuados por Refrigeracion sin Contencion Pasiva o que Formen Charcos de Menos de 1 cm
- Formacion Instantanea de Charcos para Liquidos
- Explosion de Nube de Vapor para Sustancias Inflamables

Escenario Alterno

- 1 Escenario Alterno por Sustancia Toxica
- 1 Escenario Alterno para Todas las Sustancias Inflamables
- Mayor Posibilidad de Ocurrencia que el Peor Caso
- Alcance el Punto Final Fuera de la Instalacion

Impactos en la Poblacion

- Estimar la Poblacion Dentro del Radio de Afectacion
- Indicar Prescencia de Escuelas, Hospitales, Prisiones, Parques, Areas Recreacionales, Edificios Importantes (comerciales, de oficinas o industriales)
- Censo mas Reciente
- 2 Cifras Significativas

Revisiones y Actualizaciones

- Por lo Menos 1 Vez Cada 5 Anos
- Dentro de 6 Meses a Partir de Cualquier Cambio de Proceso que Pueda Incrementar o Disminuir la Distancia a los Puntos Finales por un Factor de 2 o Mas Habra que Presentar un Plan de Manejo de Riesgos Nuevo

Escenario Alterno

- Emisiones por Mangueras de Transferencia
- Emisiones de Tuberias de Proceso
- Emisiones de Recipientes o Bombas de Proceso
- Derrame por Sobrellenado de Recipientes
- Apertura de Valvulas de Alivio
- Rupturas en Contenedores por Mal Manejo

Impactos en el Ambiente

- Lista de Receptores Dentro del Radio de Afectacion
- Mapas Locales

Documentacion

- Memorias de los Casos
- Descripcion de los Escenarios y Equipos
- Medidas de Mitigacion Consideradas
- Cantidad, Tasa de Emision y Duracion
- Metodologia para las Distancias a los Puntos Finales
- Determinacion de Poblacion y Receptores Ambientales

Historial de Accidentes

- Todas las Emisiones Accidentales
- Muertes, Danos o Perdidas Significativas de Propiedad
- Muertes, Danos, Evacuaciones, Afectacion a Propiedades y al Ambiente Fuera del Sitio

Historial de Accidentes

- Fecha, Hora y Duracion Aproximada
- Sustancia Emitida
- Cantidad Liberada
- Tipo de Emision y Origen
- Condiciones Ambientales
- Impactos en el Sitio
- Impactos Fuera del Sitio

Historial de Accidentes

- Evento Generador y Factores Contribuyentes
- Notificacion a Organismos de Respuesta
- Cambios Operacionales o de Proceso Resultantes de la Investigacion de la Emision

Programa de Prevencion 2

- Informacion de Seguridad
- Revision de Riesgo
- Procedimientos de Operacion
- Capacitacion
- Mantenimiento
- Auditorias de Cumplimiento
- Investigacion de Accidentes

Informacion de Seguridad

HDS
Inventario Maximo Proyectado
Lmites Seguros de T, P, Q y Composicion
Especificaciones del Equipo
Codigos y Estandares de Proceso
Cumplimiento con Buenas Practicas de Ingenieria

Revision de Riesgos

- Riesgos Asociados al Proceso y Sustancias
- Errores Humanos o de Equipo
- Medidas de Prevencion Existentes o Requeridas
- Deteccion y Monitoreo de Emisiones
- Listas de Verificacion Adecuadas
- Documentacion y Seguimiento
- Actualizacion Cada 5 Años o por Cambios

Procedimientos de Operacion

- Escritos
- Arranque
- Operacion Normal
- Operaciones Temporales
- Paro Normal y de Emergencia, y Arranque
- Consecuencias de Desviaciones
- Inspecciones al Equipo
- Actualizaciones

Capacitacion

- Empleados Nuevos
- Cursos de Refuerzo cada 3 Anos
- Despues de Cambios Mayores

Mantenimiento

- Procedimientos
- Capacitacion en Mantenimiento y Riesgos del Proceso y Correccion de Condiciones Inseguras
- Capacitar a Contratistas
- Inspecciones y Pruebas

Auditorias de Cumplimiento

- Cada 3 Años
- 1 Persona que Conozca el Proceso al Menos
- Reporte de Desviaciones
- Documentacion y Seguimiento
- Conservar los 2 Reportes mas Recientes

Investigacion de Accidentes

- Emision Catastrofica
- Antes de 48 horas
- Fecha del Incidente y de la Investigacion
- Descripcion del Incidente
- Factores Controbuyentes
- Recomendaciones
- Documentacion y Seguimiento
- Conservar Resumenes por 5 Años

Programa de Prevencion 3

- Informacion de Seguridad del Proceso
Compilacion Escrita
Informacion de Riesgos de las Sustancias 29 CFR
1910
Informacion de Tecnologia del Proceso
Informacion del Equipo del Proceso

Programa de Prevencion 3

- Procedimientos de Operacion
- Capacitacion
- Integridad Mecanica
- Manejo de cambios
- Revision Previa al Arranque
- Auditorias de Cumplimiento
- Investigacion de Accidentes
- Participacion de Empleados
- Permiso para Trabajos Calientes
- Contratistas

Informacion de Riesgo de Sustancias

- Toxicidad
- Limites Permisibles de Exposicion
- Datos Fisicos
- Datos de Reactividad
- Datos de Corrosion
- Estabilidad Termica y Quimica
- Efectos Peligrosos por Mezclas
- 29 CFR 1910.1200(g)

Analisis de Riesgo del Proceso

- 29 CFR 1910.119(e) - cada 5 anos

What-If

Checklist

What-If/Checklist

HAZOP

FMEA

Fault Tree Analysis

Metodologia Equivalente Apropriada

Analisis de Riesgo de Proceso

- Riesgos del Proceso
- Incidentes Previos con Potencial de Consecuencias Catastroficas
- Controles Ingenieriles y Administrativos
- Consecuencias por Falla de Controles
- Identificacion de Fuentes Estacionarias
- Factores Humanos
- Evaluacion Cualitativa de Efectos por Fallas

Analisis de Riesgo de Proceso

- Equipo con Experiencia en Ingenieria y Operaciones de Proceso, con 1 Elemento Experimentado en el Proceso Estudiado y 1 Elemento Experimentado en la Metodologia Empleada
- Documentacion y Seguimiento
- Actualizacion Cada 5 Anos
- Archivar Resultados Toda la Vida del Proceso

Integridad Mecanica

- Procedimientos Escritos
- Capacitacion en Mantenimiento
- Inspeccion y Pruebas
- Deficiencias del Equipo

=

=

Administracion del Cambio

- Procedimientos Escritos para Cambios en Procesos Quimicos, Tecnologia, Equipo, Procedimientos y Fuentes Estacionarias
- Bases Técnicas del Cambio Propuesto
- Impacto del Cambio en Seguridad y Salud
- Modificaciones a Procedimientos de Operacion

Participacion de Empleados

- Enterar y Consultar a los Empleados y sus Representantes Sobre las Acciones para Cumplir con los Requisitos del Programa de Prevencion
- Dar Acceso a los Analisis de Riesgo de Proceso y a Toda la Informacion Generada para el Programa de Prevencion

Contratistas

- Registro de Capacitacion
- Cumplimiento a Reglas de Seguridad en el Sitio
- Notificar de Riesgos Especiales

Administracion del Cambio

- Tiempo Necesario para el Cambio
- Requerimientos de Autorizacion
- Capacitacion de Empleados
- Actualizacion de Informacion de Seguridad del Proceso y Procedimientos de Operacion

Contratistas

- Influencia en la Seguridad del Proceso
- Notificar los Riesgos Conocidos y Respuesta a Emergencias
- Desarrollar Practicas Seguras para Control de Entrada, Estancia y Salida de Contratistas
- Capacitacion en Seguridad

Respuesta a Emergencias

- Aplicabilidad
 - Programa de Respuesta a Emergencias
- Procedimientos de Informacion de Emisiones Accidentales
- Tratamiento Medico y de Primeros Auxilios
- Procedimientos y Medidas de Respuesta a Emergencias despues de la Emision Accidental
- Uso del Equipo
- Capacitacion
- Revision y Actualizacion
- Coordinacion con Comites Locales

Otros Requisitos

- Conservar Archivos por 5 Años
- Disponibilidad de Informacion al Publico de Acuerdo a Normas Vigentes
- Auditorias Periodicas por la Autoridad

Analisis de Consecuencias Fuera del Sitio

Estructura General

- **Generalidades**
- **Peor Caso** **tasa de emision toxica**
 puntos finales toxicos
 puntos finales sobrepresion
- **Caso Alterno** **escenarios toxicos**
 - **tasas de emision**
 - **distancias de impacto****escenarios inflamables**
 - **tasas de emision**
 - **distancias de impacto**
- **Receptores Fuera del Sitio**

Generalidades Programa 1

- 1 Analisis de Peor Caso para Cada Sustancia que se Tenga Arriba de la Cantidad Limite

Peor Caso

- Emision de la mayor cantidad de una sustancia normada debida a la falla de un recipiente o linea de proceso que resulte en la mayor distancia a un punto final especifico
- La mayor cantidad se determina tomando en cuenta los controles administrativos

Generalidades Programas 2 y 3

- 1 Analisis de Peor Caso para Sustancias Toxicas
- 1 Analisis de Peor Caso para Sustancias Inflamables
- 1 Analisis de Peor Caso Adicional en Caso de que Puedan Afectarse a Receptores Distintos a los Presentados en los Casos Anteriores
- 1 Caso Alterno para Cada Sustancia Toxica, Incluyendo la del Peor Caso
- 1 Caso Alterno para Sustancias Inflamables

Casos Alternos

- Aquellos que puedan resultar en concentraciones, sobrepresiones o calor radiante que alcancen los puntos finales especificados.

Aceptacion de Modelos o Metodos Computacionales

- Disponibilidad Publica o Comercial, o Modelos Particulares que Puedan Compartirse con la Autoridad
- Apropriados para las Sustancias y Condiciones que se Modelen
- Uso de las Definiciones Aplicables para Peor Caso
- Uso de los Parametros Aplicables Especificados en la Norma

Parametros de Modelacion - Puntos Finales

PEOR CASO

- Anexo B para Sustancias Toxicas
- 1 psi para Sustancias Inflamables para Explosiones de Nubes de Vapor

CASO ALTERNO

- Anexo B para Sustancias Toxicas
- 1 psi para Sustancias Inflamables para Explosiones de Nubes de Vapor
- 5 kW/m² por 40 seg para Incendios
- Limite Inferior de Flammabilidad

Parametros de Modelacion - Estabilidad y Velocidad del Viento

PEOR CASO

- Estabilidad F y 1.5 m/seg para Velocidad del Viento
- Otros Valores de Estabilidad y Velocidad del Viento en el Sitio que Sean Comunes en Base a Informacion Meteorologica de los Ultimos 3 Anos

CASO ALTERNO

- Condiciones Meteorologicas Tipicas del Sitio
- Estabilidad D y 3.0 m/seg para Velocidad del Viento

Parametros de Modelacion - Temperatura Ambiente y Humedad

PEOR CASO

- Para Sustancias Toxicas, la Mayor Temperatura Maxima Diaria y la Humedad Promedio en el Sitio de los Ultimos 3 Anos
- 25 C y 50%

CASO ALTERNO

- Promedios de Temperatura y Humedad en el Sitio o en Estacion Meteorologica Local
- 25 C y 50%

Parametros de Modelacion - Altura de la Emision

PEOR CASO

- A Nivel del Piso

CASO ALTERNO

- De Acuerdo al Escenario
- A Nivel del Piso

Parametros de Modelacion - Topografia

- Urbana - con muchas obstrucciones
- Rural - pocos edificios u obstrucciones

Parametros de Modelacion - Densidad de Gases

PEOR CASO

- Las Tablas o Modelos Empleados en la Dispersion de Sustancias Toxicas Deben Tomar en Cuenta la Densidad de los Gases

CASO ALTERNO

- Las Tablas o Modelos Empleados en la Dispersion Deben Tomar en Cuenta la Densidad de los Gases

Parametros de Modelacion - Temperatura de la Sustancia Emitida

PEOR CASO

- Liquidos - Emision a la Mayor Temperatura Maxima Diaria de los Ultimos 3 Anos o a la Temperatura de Proceso, la Mayor
- Gases Licuados por Refrigeracion a Presion Atmosferica - Emision a Temperatura Igual a su Punto de Ebullicion
- 25 C o el Punto de Ebullicion

CASO ALTERNO

- Temperatura de Proceso o Ambiente Adecuada Segun el Escenario
- 25 C o el Punto de Ebullicion

Peor Caso - Gases Toxicos

- Estado Gaseoso a 25 C Excepto Gases Licuados por Refrigeracion a Presion Atmosferica
- Se Asume que la Emision de Todo el Material Ocurre en 10 Minutos
- Gases Licuados por Refrigeracion se Modelan como Liquidos en su Punto de Ebullicion Emitidos desde un Charco
- El Punto Final es: ERPG-2 o LOC

ERPG-2

- Emergency Response Planing Guidelines
- American Industrial Hygiene Association
- Basados en Exposicion de 60 Minutos
- Efectos en Personas:
ERPG 1 - Irritacion Leve
ERPG 2 - Daño no Permanente
ERPG 3 - Posiblemente Fatal

LOC

- Level Of Concern for extremely hazardous substances
- Emergency Planning and Community Right-to-Know Act section 302
- 1/10 IDLH Previos a 1994
- 1/10 IDLH Estimado:
0.1 LC₅₀
1.0 LC₁₀
.01 LD₅₀
0.1 LD₁₀

Peor Caso - Liquidos Toxicos

- Recipiente - la Cantidad se Derrama en una Superficie Plana, no Absorbente
- Tuberias - la Cantidad Derramada Forma un Charco
- La Cantidad Derramada se Expande Instantaneamente Hasta:
1 cm en areas sin dique
Cubrir el dique
- Punto Final - ERPG-2 o LOC

**Documentacion Caso Alterno
Sustancias Toxicas**

- Nombre de la Sustancia
- Estado Fisico
- Tablas o Nombre del Modelo
- Escenario
- Cantidad Emitida
- Tasa de Emision
- Velocidad del Viento y Estabilidad
- Topografia
- Distancia al Punto Final
- Poblacion Dentro de la Distancia

**Docuñmentacion Caso Alterno
Sustancias Toxicas**

- Receptores Publicos Dentro de la Distancia
- Receptores Ambientales Dentro de la Distancia
- Medidas de Mitigacion Pasivas
- Medidas de Mitigacion Activas

**Docuñmentacion Peor Caso
Sustancias Inflamables**

- Nombre de la Sustancia
- Tablas o Nombre del Modelo
- Escenario
- Cantidad Emitida
- Punto Final Usado
- Distancia al Punto Final
- Poblacion Dentro de la Distancia
- Receptores Publicos Dentro de la Distancia
- Receptores Ambientales Dentro de la Distancia
- Medidas de Mitigacion Pasivas

**Documentacion Caso Alterno
Sustancias Inflamables**

- Nombre de la Sustancia
- Tablas o Nombre del Modelo
- Escenario
- Tasa de Emision
- Velocidad del Viento y Estabilidad
- Topografia
- Punto Final Usado
- Distancia al Punto Final
- Poblacion Dentro de la Distancia
- Receptores Publicos Dentro de la Distancia

**Documentacion Caso Alterno
Sustancias Inflamables**

- Receptores Ambientales Dentro de la Distancia
- Medidas de Mitigacion Pasivas
- Medidas de Mitigacion Activas