



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTONOMA DE MEXICO  
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLAN



FALLA DE ORIGEN

ESTUDIO DE UN MODELO DE DISPERSION DE GASES  
EN UN PROCESO

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO QUIMICO  
P R E S E N T A N :  
MARIO PEREZ MARIN  
RODOLFO ZENDEJAS LOERA

ASESOR: I.O. RAFAEL GARCIA NAVA

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEXICO.

1995



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

# FALLA DE ORIGEN



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN  
SECRETARIA ACADÉMICA  
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

U. N. A. M.  
FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES CUAUTITLAN



Departamento de  
Exámenes Profesionales

DR. JAIME KELLER TORRES  
DIRECTOR DE LA FES-CUAUTITLAN  
P R E S E N T E .

AT. N. ING. Rafael Rodríguez Gabellos  
Jefe del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la F.E.S. - C.

Con base en el art. 23 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS TITULADA:

Estudio de un Modelo de Dispersión de Gases en un Proceso

que presenta el pasante: Mario Pérez Marín  
con número de cuenta: 9077039-0 para obtener el TITULO de:  
Ingeniero Químico ; en colaboración con :  
Rodolfo Landejas Herrera

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

A T E N T A M E N T E .

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx., a 07 de Febrero de 1965

PRESIDENTE	I.Q. Rafael García Navarro	
VOCAL	I.Q. Fernando Orozco Ferreyra	
SECRETARIO	I.Q. I. Rafael Samalva Morales	
PRIMER SUPLENTE	M.en SV. Elicio Pastor Rivera Herrero	
SEGUNDO SUPLENTE	I.Q. Ma. Elena Quiroz Jacins	

# FALLA DE ORIGEN



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN  
SECRETARIA ACADÉMICA  
UNIDAD DE LA INGENIERIA RESERVA  
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

U. N. A. M.  
FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES CUAUTITLAN



Departamento de  
Exámenes Profesionales

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DR. JAIME KELLER TORRES  
DIRECTOR DE LA FES-CUAUTITLAN  
P R E S E N T E

AT'N: Ing. Rafael Rodríguez Ceballos  
Jefe del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la F.E.S. - C.

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

Estudio de un Modelo de Dispersión de Gases en un Proceso:

que presenta el pasante: Rodolfo Landaes Luere

con número de cuenta: 8276377-55 para obtener el TITULO de:  
Ingeniero químico ; en colaboración con:

Mario Pérez Larín

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

A T E N T A M E N T E .

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlan Izcalli, Edo. de Méx., a 07 de Febrero de 1994

PRESIDENTE J. Q. Rafael García Vaya

VOCAL I. Q. Fernando Orozco Parreño

SECRETARIO I. Q. I. Rafael Samuira Morales

PRIMER SUPLENTE P. en CV, Eligio Pastor Rivera Martín

SEGUNDO SUPLENTE I. Q. M.A. Elena Quiroz Macías

## **Agradecimientos:**

### **Mario:**

A mi Madre Margarita Marín de Pérez, por su gran capacidad de entemecimiento para con todos sus hijos.

A mi Padre Nicanor Pérez Hernández de quien sin duda heredé su capacidad de asombro.

A mis hermanos: Audiel, Yoni y Sacramento por su infinito sacrificio para con sus hermanos menores.  
Miguel Angel, porque es quien más me conoce y más me ha enseñado a vivir la vida.  
Myleidi, Javier y Arturo por alegrarme la vida con sus sonrisas.

A mi novia Edith Arroyo Mondragón por su comprensión y porque lo impredecible de su ser no le quita lo maravilloso.

A mis amigos: Oscar Embriz Pacheco por la adolescencia compartida.  
Carlos Flores R. y Luis Norberto P. por la intensa alegría con que hemos compartido estos últimos años.  
Javier Martínez C., Oscar Peralta P., Miguel Alvarez S., Carlos Cortés F., Rodrigo Calderón M., Eduardo de Moraes, Gilberto Sánchez T., Juan M. Campos y Leopoldo A. Granados por el buen grupo que formamos en la Facultad. A todos y cada uno de mis compañeros (as) de la 17ava. Generación de Ingeniería Química.

De manera Especial a Gilberto Díaz Reyes quien desinteresadamente me ha brindado su apoyo y total amistad.

A las familias: Embriz Pacheco, Díaz Reyes, Subiría Reyes, Reyes Gonzalez, Bautista Muñóz, Arroyo Mondragón y Díaz López porque de forma más que directa han contribuido para la culminación de esta Tesis.

**Rodolfo:**

**Agradezco a mi Sra. Madre por el reto impuesto cuando más lo necesitaba.**

**A Mireya mi esposa, por lo que me brinda cotidianamente, por la comprensión, amor, libertad y familia obsequiada en estos tres años de unión.**

**A todas las personas que participaron directa o indirectamente, por sus observaciones comentarios, críticas y orientaciones como: La Ing. Julieta Isabel Sánchez Rangel, Ing. Susana Guadalupe Vázquez Gallegos, Ing. Ada Meza Meza, Ing. César Balderas Naranjo, Ing. Héctor Salinas Cruz, Ing. Carlos Miranda Aguilar.**

**Y en forma muy especial a una persona que no puso objeción alguna cuando pudo ayudar a la realización de esta Tesis, al amigo Gilberto Díaz Reyes y a su familia.**

**Gracias a todas y cada una de las personas que cite y a las que no mencioné y participaron con la ayuda directa e indirecta recibida durante la realización y culminación de esta Tesis.**

**Estudio de un Modelo  
de Dispersión de Gases en un Proceso**

***Índice***

- I. Introducción.
- II. Objetivos.
- III. Antecedentes.

<b>Capítulo 1.</b>	<b>Fundamentos de la Dispersión de Gases.</b>	
	1.1. Historia.	1
	1.2. Reglamentaciones y Normas.	2
	1.3. Estudio de Riesgo Ambiental.	8
	1.3.1. Técnicas para la Identificación de Riesgos.	10
<b>Capítulo 2.</b>	<b>Factores que Afectan la Dispersión.</b>	
	2.1. Condiciones Ambientales.	16
	2.1.1. Temperatura.	16
	2.1.2. Viento.	18
	2.1.3. Categorías de Estabilidad Climáticas.	21
	2.1.4. Razón de Falla.	22
	2.1.5. Capa de Inversión.	24
	2.2. Influencia de las Condiciones Atmosféricas en la Dispersión.	25
	2.2.1. Comentarios.	28
	2.3. Dilución de la Pluma.	29
	2.4. Efectos de Obstrucciones sobre la Dispersión.	30
	2.4.1. Recomendaciones.	30
	2.4.2. Comentarios.	32

	2.5. Túneles con Viento.	32
	2.5.1. Comentarios.	33
<b>Capítulo 3.</b>	<b>Modelo de Dispersión Gaussiano, Análisis de Nube Explosiva.</b>	
	3.1. Modelo gaussiano: Isoconcentración posición (X, Y, Z).	36
	3.2. Análisis de Nubes Explosivas (método gráfico).	48
<b>Capítulo 4.</b>	<b>Uso del Modelo de Dispersión.</b>	
	4.1. Validación del Modelo de Isoconcentración con respecto a una Publicación.	62
	4.2. Análisis de una Nube Explosiva.	65
<b>Capítulo 5.</b>	<b>Resultados y Conclusiones.</b>	
	5.1. Análisis de Resultados.	71
	5.2 Conclusiones Generales.	72
<b>Anexos:</b>		
	Anexo I. Resultados obtenidos con el programa Calcon.	73
	Anexo IIA. Gráfica del coeficiente de dispersión $\sigma_y$ referido a las categorías de estabilidad de Pasquill.	74
	Anexo IIB. Gráfica del coeficiente de dispersión $\sigma_z$ referido a las categorías de estabilidad de Pasquill.	75
	Anexo III. Gráfica de sobrepresión.	76
	Anexo IV. Pseudocódigo del programa Calcon.	77
<b>Bibliografía.</b>		83

## I. Introducción.

En la actualidad el aspecto ambiental es de suma importancia por el incremento de los índices de contaminación en la ciudad de México y en ciudades industrializadas como Monterrey y Guadalajara. Esta contaminación creciente es originada por diferentes fuentes emisoras, de las cuales ha surgido la necesidad de estudiarlas con el fin de estar en condiciones de poder proponer técnicas prácticas para abatir o disminuir esa emisión de contaminantes.

Existe una gama de actividades que el Ingeniero Químico puede llevar a cabo dentro de este ámbito, realizando para cada fuente emisora un estudio particular, determinando así el evento que representa el probable riesgo y teniendo como consigna la seguridad del personal, el ambiente y el equipo implicado en el análisis. Los eventos probables que podrían presentarse en el transporte, almacenamiento y manejo de hidrocarburos son entre otros: fugas en fase gaseosa o líquida, derrames de líquido en cualquier equipo o tubería, emisión directa de gas en venteos o válvulas de seguridad a la atmósfera por cualquier causa lógica aceptable. Al fijar las variables del probable evento se procede a estudiar sus respectivas consecuencias, de las cuales se pueden mencionar: las tóxicas, deflagrantes y detonantes del material emitido.

Se tiene la tendencia de estudiar los eventos probables en fase gaseosa, porque es la que representa mayor riesgo de formación de mezclas explosivas y/o flamables con el oxígeno del aire. El presente trabajo se orienta hacia un modelo de dispersión con su respectivo análisis de detonación.

El estudio de cómo se puede modelar la dispersión de gases en un proceso, tiene como finalidad la de prever concentraciones indeseables a nivel de piso, producidas por una fuente emisora. Al no prever esta situación se han producido graves accidentes, algunos causando daños en forma irreversible y catastrófica.

El Ingeniero Químico basándose en los resultados del modelo, analiza el proceso a fondo y conforme a los criterios ingenieriles, puede discernir los riesgos futuros a las instalaciones y proponer las medidas preventivas, correspondientes a cada caso en particular.

Este trabajo cuenta con cinco capítulos, en el primero se detallan los fundamentos o antecedentes de la dispersión de gases, en el cual se trata el porqué la necesidad del estudio y en base a qué se debe realizar la dispersión. El segundo capítulo consta de los factores que afectan la dispersión, definiendo en forma general los conceptos más comunes sobre el tema como son: las condiciones climatológicas, las influencias de las mismas (mencionando que sus efectos originan los parámetros esenciales en cada caso específico a estudiar o analizar) y parámetros involucrados en la evaluación de la concentración máxima. Además en este capítulo se describen los efectos adversos en la dispersión. En el tercero se hace la presentación del modelo con sus ecuaciones, limitaciones y restricciones teóricas, incluyendo las tablas de criterios de daños al hacer el análisis de detonación. En el cuarto capítulo se simula el modelo con datos teóricos, se compara además con datos de una publicación<sup>(9)</sup> con el objetivo de validar el modelo. En el último capítulo se realiza el análisis de resultados estableciendo ventajas y desventajas del modelo de dispersión propuesto.

## **II. Objetivos.**

- 1.- Recopilar información, lo cual tiene como finalidad introducir y mostrar al lector los fundamentos básico-teóricos, conceptos generales y el modelo de dispersión a usar.**
- 2.- Presentar criterios básicos para que las personas interesadas en el modelo de dispersión, tengan un punto de partida al elaborar un análisis particular.**
- 3.- Presentar el modelo de dispersión conocido como Isoconcentración con todas sus variables y características.**
- 4.- Ilustrar un análisis de detonación en función de la concentración calculada por el modelo de dispersión.**
- 5.- Analizar el grado de confiabilidad del modelo comparando los resultados respecto a otra publicación, remarcando las ventajas y desventajas del modelo de dispersión.**

### III. Antecedentes.

En zonas densamente pobladas, se tienen muchas Industrias que almacenan, transportan y manejan hidrocarburos o derivados de ellos; se sabe el riesgo que representa el hecho de trabajar con materiales que forman mezclas explosivas al ventearlas, exponiéndose la salud e integridad física de quienes laboran y del ambiente circunvecino, ya que, al presentarse tal evento, se provocan daños irreversibles, tanto en el interior de la planta como al exterior, en esto último se observa el daño que sufre la atmósfera debido a la emisión de gases contaminantes que se dispersan y difunden en la biósfera.

El presente estudio muestra el modelo de dispersión de gases en una emisión, estimando las concentraciones lo más cercano a lo real.

Las dependencias gubernamentales tales como: la Secretaría de Desarrollo Social por conducto de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente y el Instituto Nacional de Ecología, así como los Estados de la República y en su caso de los municipios están involucrados en la realización de los estándares de emisión de gases al aire como por ejemplo los mostrados en la Tabla 1, son quienes aplican sanciones e inclusive la clausura parcial o total del centro de trabajo. Los valores de las concentraciones máximas permisibles varían cada dos años, debido a la revisión a que se someten y si existe alguna reglamentación, se publica en el Diario Oficial de la Federación y a partir de ese día, las personas responsables de las industrias tienen un año como plazo máximo para someterse a esas disposiciones, por medio de instalaciones, adaptaciones o reestructuraciones en sus centros de trabajo, si no, se tendrán que sujetar a las sanciones legislativas correspondientes al caso.

Como antecedente es necesario definir lo que es un contaminante ambiental, entendiéndose éste como todo agente físico, elemento o compuesto químico o biológico, capaz de alterar las condiciones del ambiente del centro de trabajo y que por sus propiedades, concentración y tiempo de acción altere la salud del hombre.

Cuando se menciona el nivel máximo permisible de contaminantes, se refiere al límite mínimo del compuesto o elemento químico, dañino al hábitat y al hombre, no sobrepasándose en ningún momento dicho límite considerando tres categorías (refiriéndose a lo tóxico):

1. Dosis Letal, 50% muerte ( $LD_{50}$ ). El  $LD_{50}$  es la cantidad de un material que, cuando es administrado a animales de laboratorio mata a la mitad de ellos. Es expresado en mg de sustancia administrada por peso del cuerpo del animal expresado en Kg (mg/Kg). Cuando es extrapolado a humanos la dosis letal para una persona promedio de peso W (Kg) es:  $LD_{50} \times W$ , (ver Tabla 1).
2. La Concentración Letal, 50% muerte ( $LC_{50}$ ). El  $LC_{50}$  es la concentración de un material normalmente expresado en ppm que, cuando es administrado a animales de laboratorio, mata a la mitad de ellos durante el periodo de exposición, (ver Tabla 1).
3. Limite de Umbral al Dolor (TLV). Es la concentración máxima en ppm de un constituyente en el aire a la cual las personas pueden estar expuestas repetidamente, día a día sin presentar efectos adversos a su salud, (ver Tabla 1).

**TABLA 1 Límites de Umbral, Concentración y Dosis Letal<sup>14</sup>.**

Material	Fórmula Química	Gr. Esp. Gas	TLV (ppm)	$LC_{50}$ (ppm)	$LD_{50}$ (mg/kg)
Cianuro de Hidrógeno	HCN	0.94	10	160/30min	1.1
Sulfuro de Hidrógeno	H <sub>2</sub> S	1.18	20	713/hr	—
Dióxido de Azufre	SO <sub>2</sub>	2.21	5	—	—
Cloro	Cl <sub>2</sub>	2.40	1	293/hr	—
Monóxido de Carbono	CO	0.97	50	1800/4hr	—
Bióxido de Carbono	CO <sub>2</sub>	1.52	5000	—	—
Metano	CH <sub>4</sub>	0.55	—	400/hr	—
Tetracloruro de Carbono	CCl <sub>4</sub>	1.585	10	9526/8 hr	4620

Muchas de las sustancias tienden a tener un olor específico, la concentración en aire a la cual la sustancia es inicialmente detectada por este olor, es conocido como Limite de Umbral de Olor, cuando alguna sustancia es detectada por su olor, la concentración en la atmósfera puede exceder su valor de TLV. Por ejemplo, para el amoníaco se tiene un limite de umbral de olor de 46.8 ppm, mientras que su TLV es de 25 ppm; esto indica que, si el olor del amoníaco es detectado en el ambiente, la inhalación del mismo puede representar un serio riesgo de salud.

La sanidad de un material está en función de su LD<sub>50</sub> ó LC<sub>50</sub> según se trate de líquido o gas respectivamente. Con una numeración de enteros del 0 al 4 se indica el grado de severidad contra la salud de dicho material. Un valor de 4 indica severo riesgo, mientras que el de cero (0) indica que dicho material no representa riesgo alguno, (ver Tabla 2).

**TABLA 2 Relación Cuantitativa de Sanidad<sup>(2)</sup>**

Razón de Sanidad	Efecto	Valor de LC <sub>50</sub> (@ Gases) (ppm)
0	Sin Daño	LC <sub>50</sub> > 10,000
1	Iritación, molestia	5,000 < LC <sub>50</sub> ≤ 10,000
2	Posibles daños permanentes	3,000 < LC <sub>50</sub> ≤ 5,000
3	Daños severos	1,000 < LC <sub>50</sub> ≤ 3,000
4	Muerte	LC <sub>50</sub> ≤ 1,000

Los gases flamables y los vapores de líquidos flamables generalmente entran en combustión con facilidad cuando son mezclados con aire y expuestos a una fuente de ignición. Sin embargo, para las sustancias flamables y combustibles, existen concentraciones en aire por arriba y por debajo de las cuales no se queman. Las concentraciones en aire entre las que se está en condiciones de combustión son:

**El límite inferior de flamabilidad (LIF).**- es la máxima concentración de vapor o gas en aire u oxígeno debajo de la cual la propagación de la flama no ocurre aún existiendo alguna fuente de ignición (% vol).

**El límite superior de flamabilidad (LSF).**- es la mínima concentración de vapor o gas en aire u oxígeno, arriba de la cual la propagación de la flama no ocurre, aún en contacto de una fuente de ignición(% vol).

#### **Grados de Riesgo de Fuego.**

Los grados de riesgo de fuego serán categorizados de acuerdo a la susceptibilidad de los materiales para entrar en combustión, de acuerdo a los siguientes criterios de N.F.P.A.<sup>(2)</sup>:

#### Grado 4.

Se asigna un grado 4 a los materiales que rápida o completamente se vaporizan a presión atmosférica, y a temperatura normal del ambiente, o materiales que se disipan fácilmente en el aire. Este grado usualmente incluye:

Gases flamables, materiales flamables criogénicos, materiales que sufren ignición espontáneamente cuando se exponen al aire, así como también líquidos flamables clase IA. Para comprender esta clasificación, primero habrá que mencionar una propiedad inherente de los materiales, conocida como punto flash:

**Punto Flash:** Existe una temperatura mínima a la cual un líquido genera suficiente vapor libre, para empezar a formar una mezcla en condiciones de ignición con el aire próximo a la superficie del líquido; esta temperatura es llamada Punto Flash.

De esta forma, podemos citar lo que implica Clase IA.

**Clase IA:** Líquidos con puntos flash menores de 73°F (28.8°C) y puntos de ebullición inferiores a 100°F (37.8°C). Un ejemplo de un líquido flamable clase IA es el n-pentano.

#### Grado 3

Este grado es asignado a materiales líquidos y sólidos que puedan sufrir ignición bajo casi todas las condiciones de temperatura ambiente. Este grado generalmente incluye:

Líquidos flamables clase IB y IC.

**Clase IB:** Líquidos con punto flash debajo de los 73°F (28.8°C) y punto de ebullición en o sobre los 100°F (37.8°C), ejemplo: benceno, gasolina y acetona.

**Clase IC:** Líquidos con punto flash mayor o igual a 73°F (28.8°C) y punto de ebullición inferior a los 100°F (37.8°C), ejemplo: n-butil acetato.

## **Grado 2**

Adquieren este grado materiales que moderadamente puede calentarseles o exponerlos a temperaturas relativamente altas antes de que en ellos ocurra la ignición. Este grado usualmente incluye:

Líquidos clase II y líquidos combustibles clase IIIA.

**Clase II:** Son aquellos líquidos con punto flash mayor o igual a 100°F pero que no exceden los 200°F (93.4°C), ejemplo: kerosina.

**Clase IIIA:** Líquidos con punto flash mayor o igual a 140°F (60°C) pero que no exceden los 200°F, ejemplo: fenol.

## **Grado 1**

Este grado es para materiales que requieren considerable precalentamiento bajo todas las condiciones de temperatura ambiente, antes de que la ignición ocurra. Este grado incluye:

Materiales que se queman en aire cuando se exponen a temperaturas cercanas a los 1500°F (815.5°C), por un período de 5 minutos o menos y materiales clase IIIB.

**Clase IIIB:** Líquidos que tienen punto flash mayor o igual a 200°F, ejemplo: etilénol.

## Grado Cero

Están dentro de este grado materiales que no se queman. Este grado usualmente incluye cualquier material que no se quema en aire, aún cuando es expuesto a temperaturas de 1500°F por un periodo de 5 minutos, (ver Tabla 3).

**TABLA 3 Valores de Flamabilidad y Sanidad<sup>(2)</sup>**

Compuesto	Límites de Flamabilidad (% vol.)		Razón de Sanidad	
	Inferior	Superior	Salud	Flamab
Acrlonitrilo*	3.0	17.0	4	3
Etanolamina	3.0	23.5	2	2
Acetaldehído***	4.0	80.0-	2	4
Acetona**	2.5	12.8	1	3
Acetileno**	2.5	100	1	4
Benceno***	1.2	7.8	2	3
1,3 Butadieno**	2.0	12.0	2	4
Butano**	1.9	8.5	1	4
1 Buteno**	1.6	10.0	1	4
1 Butanol**	1.4	11.2	1	3
Bisulfuro de Carbono***	1.3	50	2	3
Clorobenceno**	1.3	9.6	2	3
Cianógeno**	6.8	32	4	4
Decano	0.8	5.5	0	2
Etano**	3.0	12.5	1	4
Metano**	5.0	15.0	1	4
Metanol***	6.0	36	1	3
Naftaleno	0.9	5.9	2	2
Nicotina	0.7	4.0	4	1
Pentano**	1.5	7.8	1	4
Fenol*	1.8	8.8	3	2
Propenal	2.6	17.0	2	3
Propeno**	2.1	9.5	1	4
Propileno**	2.0	11.1	1	4
Piridina**	1.8	12.4	2	3
Estireno	0.9	6.8	2	3
Tolueno***	1.1	7.1	2	3
Fluoruro de Vinilo	2.6	21.7	1	4
Tetracloruro de Carbono	---	---	3	0
Cloro*	---	---	3	0
Flúor*	---	---	4	0

(Cont.)

Compuesto	Límites de Flammabilidad (% vol)		Razón de Sanidad	
	Inferior	Superior	Salud	Flamab
Cianuro de Hidrógeno***	6.0	41	4	4
Acido Sulf-hídrico***	4.3	46	3	4
Oxidos de Nitrógeno*	—	—	3	0
CO	12.5	74	3	4
Cloruro de Etilo	3.8	15.4	2	4
Etileno**	2.7	36.0	1	4
Eter Etilico**	1.9	36.0	2	4
Heptano**	1.05	6.7	1	3
Hexano**	1.1	7.5	1	3
Hidrazina*	2.9	98	3	3
Hidrógeno**	4.0	75	0	4

\* Estos compuestos aparecen en el Diario Oficial de la Federación 26/03/80, como tóxicos.

\*\* Estos compuestos aparecen en el Diario Oficial de la Federación 04/05/80, como inflamables.

\*\*\* Estos compuestos aparecen en ambas publicaciones del Diario Oficial.

Por otra parte la intoxicación ocurrirá si el material emitido tiene propiedades tóxicas, como son el amoníaco y el cloro entre otros; éstos no tienden a inflamarse o explotar pero sí tienen límites de umbral al dolor (TLV).

Al dispersarse el contaminante sin prevención alguna, provoca intoxicación o una detonación causando graves accidentes. Unos han sido por causas incontrolables o imprevistas, otros por descuidos como de agentes tóxicos en sistemas de manejo, transporte y almacenamiento de los mismos. Como ejemplo se tiene la fuga de algún gas combustible, provocando detonación en un lugar cerrado al tener una concentración dentro de los límites de flammabilidad y coexistiendo las condiciones necesarias para explotar, causando graves daños. En la mayoría de los accidentes se observan causas imprevistas y poco controlables, por lo que es necesario estudiar el proceso, conocer los puntos de alto riesgo y así poder proponer medidas preventivas.

## Capítulo 1.

### Fundamentos de la Dispersión de Gases.

En este capítulo se revisa porqué son necesarias las reglamentaciones y Normas de calidad de aire basándose en las experiencias sufridas por detonación, intoxicación o deflagración ocurridas en varias plantas industriales; posteriormente, se describen los contaminantes más comunes en un proceso, algunas de sus propiedades y daños que causan al hombre y ambiente.

Una aplicación de los modelos de dispersión se dá en el informe preliminar de riesgos, por medio del cual se conocen los riesgos probables en una planta (ver 1.3 de este capítulo), con los resultados de dicho informe el Ingeniero Químico propone las acciones preventivas y modificaciones pertinentes (cursos de capacitación al personal, simulacros, planes de contingencia, etc.), para evitar las desagradables consecuencias al dispersarse un gas sin control , y en caso de llegarse a presentar, que esta situación sea con los menores daños posibles.

#### 1.1. Historia.

Uno de los eventos con daños considerables que están documentados<sup>(18)</sup>, es el descrito a continuación, tal suceso se presentó en los Estados Unidos de Norteamérica.

Es un evento referente a la explosión de propano al fracturarse el ducto en que se transportaba en Puerto Hudson Mo., sucedió lo siguiente: la tubería en la que se transportaba propano líquido, presentó un fenómeno conocido como golpe de ariete, provocando la ruptura de la tubería fugándose gran cantidad de propano, al hacer contacto con el ambiente se vaporizó, formándose así una enorme nube, duró 24 minutos la fuga y al rebasarse el límite inferior de explosividad de la mezcla gaseosa, ésta detonó. Causó un daño catastrófico radial (6 Km), produciendo ondas expansivas de choque originadas en el punto de detonación, formando un cráter y afectando 6 Kilómetros a la redonda.

En el párrafo anterior se mencionaron dos conceptos que requieren de mayor explicación:

- **Onda de Sobrepresión.-** Esta onda se conoce también como onda de choque, ésta se origina a partir del punto de detonación formándose esferas, las más pequeñas son las que se encuentran cerca del punto detonante, siendo éstas las de mayor sobrepresión, a medida que se hacen más grande las esferas, la sobrepresión disminuye entendiéndose esto como menor fuerza de choque.
- **Límites de Explosividad.-** Estos dos límites se refieren a la concentración estequiométrica del detonante y del aire, con la cual se tiene una explosión, es decir, si la concentración del detonante se encuentra por arriba o por abajo de dichos límites, no habrá detonación. Generalmente los límites de explosividad están contenidos en los límites de flamabilidad.

Desgraciadamente tales eventos han marcado la pauta para tomar medidas preventivas en instalaciones industriales donde se involucren materiales flamables, de estas experiencias se auxilia el Ingeniero Químico para tener un marco de referencia para hacer un análisis de riesgos más confiable, evitando un riesgo probable o por lo menos disminuir el daño al presentarse éste.

Han ocurrido graves accidentes por intoxicación, deflagración y explosión, citar cada uno de ellos implicaría hacer una recopilación de esos eventos, que no es el objetivo de la tesis.

## **1.2. Reglamentaciones y Normas.**

Se ha fijado un límite estandarizado de calidad de aire con el fin de proteger el ambiente, rebasando dicho límite se causará daños irreversibles.

Frecuentemente, determinados contaminantes afectarán varias zonas en diferentes concentraciones. Por ejemplo: 500 micro g/m<sup>3</sup> de cierto contaminante, afecta materiales de construcción (edificios); 250 micro g/m<sup>3</sup> daña a la vegetación y 125 micro g/m<sup>3</sup> puede

ser nocivo para la salud del ser humano, en este ejemplo, el valor de la concentración más baja se incluirá en los estándares de calidad de aire. Correspondiendo dicha tarea a SEDESOL.

Algunos de los contaminantes más comunes y potencialmente nocivos para la salud y el bienestar público, son los que se muestran en la Tabla 4.

TABLA 4 Estimación Global en las emisiones de aire contaminado por año<sup>(1)</sup>

Aire Contaminado con:	Fuente Emisora			% Emisión por el hombre
	Hombre	Natural	10 <sup>6</sup> ton/año total	
Monóxido de Carbono	2.7	35.0	37.7	7
Dióxido de Carbono	128	10.000	10.128	1
Oxido de Nitrógeno	0.6	5.0	5.6	11
Hidrocarburos (excepto metano)	0.7	4.4	5.1	14
Compuestos sulfurados	0.8	1.4	2.2	35
Partículas	> 0.1	> 2.0	> 2.1	+ 5

**Monóxido de Carbono.**- Es un producto de combustión incompleta, en altas concentraciones (mayor a 0.1 ppm) es tóxico<sup>(16)</sup>. El estar expuesto aún a bajas concentraciones los reflejos se hacen lentos en el hombre y daña a las personas que son especialmente sensibles a niveles elevados de carboxihemoglobina. La concentración de CO en una ciudad con suficiente tráfico alcanza hasta 50 ppm y puede llegar a niveles como de 140 ppm en los momentos en que existe congestión de tráfico. La fuente de envenenamiento más seria por CO es la provocada por fumar o inhalar humo de cigarrillos. El humo del cigarrillo contiene un valor cercano a los 400 ppm de CO. Los médicos estiman que la exposición crónica de CO es un factor que contribuye a las enfermedades cardíacas.

**Esmog Fotoquímico.**- El término esmog es una palabra compuesta en inglés y proviene de "smoke"= humo, "fog"= niebla y fotoquímico debido a que los procesos fotoquímicos juegan un papel importante en su formación.

El óxido nítrico, NO, se forma en pequeñas cantidades en los cilindros de los motores de combustión interna por la combinación directa de nitrógeno y oxígeno:



En el aire el NO se oxida rápidamente en dióxido de nitrógeno:



La fotodisociación del NO<sub>2</sub> inicia la reacción asociada con el smog fotoquímico. Dicha disociación del dióxido de nitrógeno en NO y oxígeno requiere de 304 KJ/mol lo cual corresponde a un fotón de longitud de onda de 393 nm. Por consiguiente, con la luz del sol el dióxido de nitrógeno sufre el siguiente proceso:



El oxígeno atómico que se forma sufre varias reacciones posibles, una de las cuales contribuye a la formación del ozono:



Donde: M= nitrógeno u oxígeno.

El asterisco significa que la molécula contiene un exceso de energía.

El ozono es un componente clave del smog fotoquímico. Aunque es una pantalla para la radiación ultravioleta esencial en la atmósfera superior es un contaminante indeseable en la parte inferior de la atmósfera (tropósfera). Es muy reactivo y tóxico, el respirar aire que contiene cantidades apreciables de ozono es peligroso para quienes sufren de asma, para quienes realizan ejercicio y para personas de avanzada edad.

Además de los óxidos de nitrógeno y del monóxido de carbono, un motor de automóvil también emite como contaminantes hidrocarburos que no entraron en combustión.

Las reacciones entre los hidrocarburos que no fueron quemados y otros contaminantes del aire crean una mezcla compleja de sustancias. En la Tabla 5 se presentan concentraciones típicas de constituyentes traza de esmog fotoquímico.

La reducción o eliminación del esmog requiere que los ingredientes indispensables para su formación sean eliminados de las emisiones de los automóviles. Los convertidores catalíticos están diseñados para reducir los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos. No obstante, los sistemas de control de emisiones, son ineficaces en automóviles con mal mantenimiento.

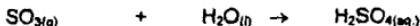
Tabla 5. Concentraciones comunes de contaminantes en esmog fotoquímico (los niveles varían de una ciudad a otra).

Constituyente	Concentración en aire, ppm
NO <sub>x</sub>	0.2
NH <sub>3</sub>	0.002
CO	40
O <sub>3</sub>	0.5
CH <sub>4</sub>	2
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0.5
Olefinas superiores*	0.25
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (acetileno)	0.25
Aldehídos	0.6
SO <sub>2</sub>	0.2

\* Una olefina es un hidrocarburo que contiene un doble enlace entre átomos de carbono.

**Dióxido de Azufre.**- El dióxido de azufre es considerado el más perjudicial para la salud de entre todos los contaminantes, sobre todo para personas con problemas respiratorios. Los estudios de las historias médicas de grandes núcleos de población en los ambientes urbanos, han demostrado claramente que las personas que viven en las partes de la ciudad con mayor contaminación tienen mayores niveles de enfermedades respiratorias y una esperanza de vida menor. La quema de petróleo crudo, carbón de hulla y de minerales son la principal fuente de emisión de dióxido de azufre.

No todo el daño es provocado por el  $\text{SO}_2$  mismo; de hecho, el  $\text{SO}_3$  formado por oxidación del  $\text{SO}_2$  es igualmente un agente nocivo. Una vez formado el  $\text{SO}_3$ , se disuelve en agua formando ácido sulfúrico:



El fenómeno de la lluvia ácida se conoce desde hace mucho tiempo. El principal constituyente que contribuye a la acidez de la lluvia es el ácido sulfúrico. El acidez ha provocado que disminuyan grandes poblaciones de peces en lagos de agua fresca y ha alterado en forma importante otras partes de la red de interdependencia entre especies vivientes de los lagos.

**Acido Sulfidrico.**- Este es un gas tóxico, la máxima concentración permisible es de 20 ppm (ver tabla 1), es incoloro; el gas tiene un olor fétido, desagradable y se detecta aún a muy bajas concentraciones.

Los estándares de calidad de aire son establecidos con la finalidad de proteger al ser humano y su entorno por la presencia de contaminantes en el aire, previniéndose y reduciendo el daño ecológico al mínimo posible, protegiéndose primordialmente el bienestar público y laboral.

Un estándar primario de calidad del aire es aquel valor que permite un adecuado margen de seguridad para proteger la salud pública. Un estándar secundario es aquel que se requiere para proteger al público de cualquier efecto adverso conocido asociado con la presencia de contaminantes en el aire ambiental. Para establecer los estándares primario y secundario como se ilustra en la Tabla 6 tanto de la calidad del aire como los reglamentos que lo controlan, se tiene como base los siguientes factores:

1. La calidad del aire debe ser tal que no provoque efectos adversos al hombre y su ambiente (su persona, sus posesiones, su circunvecino, considerando también toda la flora y fauna).

2. **Registro de la composición de aire en un lugar donde se haya determinado que con dicha calidad de aire no se afecta al ambiente. Dicha composición servirá para establecer los patrones de calidad del aire.**
3. **Dichos patrones de calidad del aire, deberán basarse sobre la mejor información disponible, referente a la concentración de contaminantes en el ambiente para la cual se producen efectos adversos conocidos o sus indicios.**
4. **Prevenir el advenimiento de un nuevo contaminante.**
5. **Con excepción de aquellos patrones de calidad establecidos por efectos conocidos sobre la salud humana, no necesariamente coincidirán dichos patrones en diversos países, estados, etc.**
6. **Las reglamentaciones aplicarán al aire que en su totalidad mantengan el mismo comportamiento de flujo y esté sujeto al mismo índice de contaminación.**
7. **Las reglamentaciones que se diseñan para proteger zonas vírgenes y prevenir la degradación de áreas sin asentamientos, son limitadas por el interés y deseo del público en cumplirlas.**
8. **La contaminación del aire no respeta fronteras políticas, de tal forma que se requiere en la actualidad de muchos proyectos de esfuerzo común entre diferentes naciones, estados, etc.**

TABLA 6 Estándares Nacionales de Calidad de Aire Primario y Secundario<sup>(1)</sup>

Contaminante	Periodo de Medición	Estándar Primario		Estándar Secundario	
		micro g/m <sup>3</sup>	ppm	micro g/m <sup>3</sup>	ppm
Oxidos de Azufre (como SO <sub>2</sub> )	Media Aritmética Anual	80	0.03	--	--
	24 hrs.promedio*	365*	0.14	--	--
	3 hrs.promedio*	--	--	1300	0.5*
Partículas de Materia	Media Geométrica Anual	75	--	60	--
	24 hrs.promedio*	260*	--	150	--
Oxidantes Fotoquímicos (como O <sub>3</sub> )	1 hr. promedio*	160*	0.08*	160	0.08*
Hidrocarburos (como CH <sub>4</sub> )	3 hrs.( 6 a 9 a.m.)	160*	0.24*	160	0.24*
Dióxido de Nitrógeno (NO <sub>2</sub> )	Media aritmética Anual	100	0.05	100	0.05
Monóxido de Carbono (CO)	8 hrs. promedio*	10(mg/m <sup>3</sup> )	9*	10(mg/m <sup>3</sup> )	9
	1 hr. promedio	40(mg/m <sup>3</sup> )	35*	40(mg/m <sup>3</sup> )	35*

\* Dicho valor no deberá alcanzarse más de una vez por año.

### 1.3. Estudio de Riesgo Ambiental.

El estudio de riesgo, es el documento mediante el cual se identifican y jerarquizan todos los riesgos potenciales de una instalación dada, y una vez realizado esto, se plantean las medidas de mitigación, control y prevención de los mismos.

El estudio de riesgo se clasifica en tres modalidades:

#### A) Informe Preliminar de Riesgos.

Tiene como objetivo el contar con la información suficiente para identificar y evaluar las actividades riesgosas, en cada una de las fases que comprende el proyecto que dadas sus características, se pueden catalogar como de bajo riesgo y con esto poder incorporar las medidas de seguridad, tendientes a evitar y minimizar los efectos potenciales a su entorno en caso de accidentes.

### **B) Análisis de Riesgos.**

Viene a representar el nivel donde se requiere de una información más precisa y extensa para el análisis y evaluación de proyectos, que se pueden identificar como de riesgo moderado.

### **C) Análisis Detallado de Riesgos.**

Es el nivel en el cual se requiere de toda la información detallada con el apoyo de metodologías sofisticadas de análisis de riesgo ambiental, para evaluar las posibles repercusiones que tendría una instalación de alto riesgo sobre su entorno.

Para cada una de estas modalidades existen guías para su elaboración, cuya diferencia es la profundidad de la información solicitada.

Las etapas generales involucradas en la elaboración de un estudio de riesgo son:

1ª etapa: conocer a detalle las características de los procesos, los materiales utilizados y su entorno para la identificación primaria de la existencia de posibles riesgos reales y potenciales.

2ª etapa: identificar los riesgos específicos existentes.

3ª etapa: evaluar la magnitud del evento y cuantificar sus posibles consecuencias, así como su probabilidad de ocurrencia.

4ª etapa: establecer las medidas preventivas necesarias para eliminar o minimizar el riesgo hasta el grado de aceptación del mismo.

Las técnicas específicas a aplicar en cada una de las etapas, dependerán de cada paso en particular y del grado de profundidad requerido.

### 1.3.1. Técnicas para la Identificación de Riesgos.

Algunas de las técnicas más comunes para la identificación de riesgos son:

- \* Lista de Comprobación.
- \* Qué-Si (What-If).
- \* Hazop.
- \* Arbol de Fallas.
- \* Índice Dow.
- \* Índice Mond.
- \* Auditorías de Seguridad.

Se verán cuatro ejemplos:

#### 1.- Lista de comprobaciones.

Es un conjunto de preguntas cuya finalidad es la identificación de los riesgos en plantas y, como resultado de la contestación de las cuestiones planteadas, deberán mejorarse las medidas de seguridad de la instalación sobre todo en aquellos aspectos en los cuales las respuestas obtenidas señalaron deficiencias en los sistemas de seguridad originalmente considerados en el diseño.

#### 2.- Estudio de Riesgo y Operabilidad (HAZOP).

(Hazard and Operability Estudios)

Es un herramienta desarrollada con el propósito de poder detectar posibles riesgos en instalaciones de alta complejidad.

Es una técnica que permite a la gente liberar su imaginación y revisar en todas las formas posibles en que los riesgos y/o problemas de operación pudieran surgir.

La técnica al ejecutarse en forma sistemática, reduce las posibilidades de que algo se pase sin analizar.

El HAZOP se efectúa analizando y discutiendo en un grupo interdisciplinario, los efectos de las variaciones que pudiesen presentarse tanto en forma accidental como predeterminada, en los parámetros operacionales de la instalación.

Como guías para este análisis se utilizan las palabras clave:

- NO -
- MAS -
- MENOS -
- MAS QUE -
- PARTE DE -
- OTRO QUE -
- INVERSO -

Estas palabras clave se deben aplicar a las condiciones del proceso, actividades, sustancias, tiempo y lugar del mismo.

El grupo de discusión para la realización del HAZOP debe conformarse incluyendo:

- Gerente del Proyecto.
- Ingeniero de Proceso.
- Ingeniero Instrumentista.
- Coordinador (Experto Externo)

### 3.- Arbol de Fallas.

El análisis de árbol de fallas es una técnica deductiva, que se enfoca sobre un accidente particular o una falla en un sistema principal, y provee un método para determinar las causas del evento. Esta técnica es un modelo gráfico que muestra varias combinaciones de fallas de equipos y errores humanos, que pueden resultar en una falla del sistema principal de interés. Esto permite implementar medidas para

prevenir o mitigar causas significantes de fallas, y así reducir la probabilidad de un accidente.

Un análisis de árbol de fallas, produce modelos de sistemas de fallas lógicas que usan entradas lógicas Booleanas (es decir, conectores lógicos como AND (Y), OR (O)) para describir cómo fallas en equipos y errores humanos se pueden combinar para causar una falla en el sistema principal bajo análisis.

En esta técnica usualmente se resuelve cada modelo lógico para generar una lista de fallas, llamada "conjunto mínimo de corte" que puedan resultar en la falla del sistema principal. La inspección de estas listas de conjuntos mínimos de corte revela sistemas de diseño u operación débiles para los cuales el analista puede sugerir alternativas de seguridad a implementar.

#### 4.- Auditorías de Seguridad.

Las Auditorías de Seguridad son una herramienta dinámica de diagnóstico de riesgo de gran aplicación en instalaciones en sus pruebas de arranque, operación o de reinicio de operación como consecuencia de algún paro parcial o total.

Tienen también como finalidad el identificar riesgos a fin de que se apliquen las medidas de prevención y abatimiento correspondientes.

La realización de auditorías de seguridad es recomendable en los siguientes casos:

- a) En el período de arranque de operaciones.
- b) Al reinicio de operaciones de paros totales o parciales por mantenimiento o por la presentación de algún accidente.
- c) Al modificarse sustancialmente la instalación.
- d) En un período no mayor de tres años.

Para la realización de una auditoría de seguridad es conveniente integrar un grupo de análisis que incluya:

- Gerente de Planta.
- Representante del Depto. de Seguridad.
- Ingeniero de Proyecto encargado del diseño o de las modificaciones.
- Ingeniero de Mantenimiento.
- Ingeniero de Servicios.
- Ingeniero de Proceso.
- Ingeniero de Instrumentación y Control.

La Auditoría de Seguridad debe cubrir fundamentalmente tres aspectos:

- 1) Revisión de la seguridad del proceso.
- 2) Evaluación de los procedimientos de operación y mantenimiento.
- 3) Inspección ocular de la instalación.

Una vez que se han identificado los riesgos, es necesario que la empresa manifieste en su estudio de riesgo, todos los riesgos potenciales. Una vez identificados, se deben cuantificar. Esta cuantificación permite obtener dos parámetros fácilmente utilizables:

- Probabilidad
- Consecuencias

Así el riesgo queda definido como  $\text{riesgo} = (\text{probabilidad})(\text{consecuencias})$ .

**Probabilidad.-** La probabilidad que se presente un evento está determinada por los antecedentes y registros estadísticos que se tengan documentados.

Así, en principio un riesgo puede ser clasificado como de probabilidad:

- Baja.
- Media.
- Alta.

Consecuencias.- Es un parámetro que nos sirve para la clasificación de los riesgos de acuerdo a sus consecuencias pudiendo ser ésta la afectación a la vida humana y/o equipos. Obteniéndose una clasificación como la siguiente:

- Catastróficas.
- Máximas.
- Marginales.
- Insignificantes.

Una vez que se tiene esta información, es posible ahora clasificar cuantitativamente a los riesgos identificados como:

- Riesgos mayores.
- Riesgos intermedios.
- Riesgos menores.

Los promoventes de los proyectos de análisis deben incluir en el estudio de Análisis de Riesgo que presentan ante SEDESOL, todos los riesgos identificados y cuantificados, así como una explicación detallada de las medidas implementadas o por implementar para la prevención y atención de los mismos.

De los riesgos clasificados como mayores se debe presentar una modelación para determinar el radio de afectación, es decir, si el evento modelado rebasa los límites de propiedad de la empresa.

**El público muestra interés para participar en las decisiones que afectan al ambiente, es una preocupación creciente y constante ver como se está minando éste. Se necesitarán muchos más estudios y análisis globales de los efectos potenciales en las industrias, tanto para procesos nuevos en plantas como en reestructuraciones, el factor económico es predominante en este aspecto.**

**Tal información acelera la toma de decisiones y auxilia para reafirmar las conclusiones propias al caso. Inevitablemente el estudio de Impacto Ambiental, en la predicción o evaluación, será una parte integral de la reglamentación y control de contaminantes, y que en un futuro será mucho más completo.**

**La industria tendrá que satisfacer las necesidades del público y el gobierno haciendo buenas evaluaciones, se tendrán mejoras en el ambiente y esos serán utilizados en la planeación, diseño y construcción de otras industrias.**

## **Capítulo 2.**

### **Factores que Afectan la Dispersión.**

En este capítulo se hace un estudio de cómo y porqué varían las condiciones climatológicas, en función de la temperatura y viento, posteriormente se describen los conceptos de dispersión a razón de las influencias ejercidas por las condiciones atmosféricas. Estos aspectos nos dan un marco de referencia, para obtener conocimiento de los parámetros que se encuentran involucrados en un caso de dispersión de contaminantes, con la finalidad de estimar la concentración máxima a nivel de piso.

En el desarrollo de este capítulo al finalizar un punto de relevante importancia, se adiciona un comentario subsecuente al mismo.

#### **2.1. Condiciones Ambientales.**

Los tres factores más importantes involucrados en cualquier parte del mundo para la dispersión de gases son: la temperatura, el viento y la precipitación. Para nuestros propósitos; sin embargo, los principales son: temperatura y viento.

##### **2.1.1. Temperatura.**

El registro de temperaturas mayor y menor en la República Mexicana son de 50°C y -15°C, pertenecientes a los estados de Sonora y Chihuahua, respectivamente; la temperatura varía considerablemente con el transcurso del día.

La mayoría de las variaciones de temperatura es provocada por el cambio anual en el ángulo de incidencia de los rayos solares (la variación de la temperatura ambiente es apenas perceptible en las zonas próximas al Ecuador de la tierra, y se hace más notable conforme disminuye la distancia hacia los polos de la tierra). Otra variación importante,

es causada por la presencia de grandes masas de tierra o de océanos. De este modo, las variaciones de temperatura más grandes por estación de año y en el transcurso del día, ocurre en las proximidades de grandes extensiones de tierra, la cual absorbe calor rápidamente en el verano y lo radia (pierde) con facilidad en el invierno. Esto es especialmente cierto en la mayoría del territorio de América del Norte.

La distribución horizontal de la temperatura del aire, por grandes o pequeñas áreas se muestra por medio de isotermas (líneas trazadas sobre mapas para conectar puntos de igual temperatura). Sobre el mapa, las isotermas muestran una distribución irregular, la cual varía notablemente de verano a invierno y de uno a otro continente.

Los datos generales de la intemperie de los Estados Unidos Mexicanos (incluyen temperatura, precipitación pluvial y velocidad del viento) los proporciona el centro meteorológico Nacional. Datos climatológicos más completos se obtienen en lugares que son equipados previamente por SEDESOL, proporcionando un servicio de datos ambientales. Los datos evaluados por monitoreo incluyen un estándar de 30 años promedio para temperatura, precipitación pluvial y velocidad de viento.

#### Variaciones de Temperatura Anual (Estaciones del Año).

En cualquier localidad, las diferencias de temperatura por estación del año, son causadas primordialmente por el ángulo de incidencia de los rayos solares hacia la tierra. En verano, los rayos del sol son más perpendiculares que en el invierno. Conforme los rayos solares son más perpendiculares, las horas con luz solar y la energía radiante recibida por la corteza terrestre aumentan.

El rango de variación de temperatura por estación del año va de poca en el Ecuador, (donde el promedio mensual de variación no excede los 5°F), a altas variaciones en las cercanías del polo norte, donde mensualmente en promedio llegan a ser de 100°F o más.

### Variaciones de Temperatura Durante el Día.

Las variaciones de temperatura en el transcurso del día se debe a la energía radiante recibida del sol durante las horas con luz solar y disipada por la superficie terrestre en la noche. Estas variaciones usualmente son mayores en verano que en invierno y son, mínimas cuando el cielo se encuentra nublado.

Por otro lado, las temperaturas atmosféricas más altas se dan generalmente entre las 13:00 hrs. y las 16:00 hrs; las temperaturas menores ocurren en las proximidades del amanecer. Las variaciones más pronunciadas de temperatura en un día se dan en áreas desérticas llegando a superar los 120°F, las menos pronunciadas ocurren en áreas boscosas o húmedas que suelen ser de 10°F.

#### **2.1.2. Viento.**

Cuando la temperatura desciende, tienden a reunirse las partículas de aire ejerciendo lógicamente mayor presión que cuando la temperatura es alta y las partículas se hallan dispersas.

Al haber diferente temperatura y presión entre dos lugares, se origina el viento, que puede definirse como: el aire en movimiento horizontal, es decir, con curso paralelo a la superficie de la tierra.

En las zonas de mayor presión se presenta una densidad superior y debido a esto sus partículas buscan un camino más libre en el medio que las rodea, por tanto, el viento siempre se dirige de una zona de alta presión a otra de baja presión.

En base a los elementos termodinámicos del clima (temperatura, presión y vientos) activados por la insolación (cantidad de energía solar absorbida por la superficie de la corteza terrestre), se ha formulado un modelo de circulación atmosférica.

Tomando en consideración que los rayos solares inciden en la tierra con diferente inclinación, se dividió a la misma en franjas de diferentes temperaturas y por lo tanto, diferente presión. De ahí que se entienda por circulación general de la atmósfera como

el movimiento que siguen las masas de aire en función de la distribución de franjas regulares de alta y baja presión, como modelo teórico.

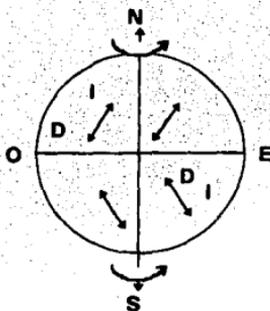
Para comprender la dinámica del aire se requiere recordar la idea de que los vientos se dirigen de zonas de alta presión a las de baja presión.

Se parte de la zona ecuatorial en donde el aire asciende hasta cierto límite a causa del paulatino descenso de la temperatura. Al llegar a este punto cambia su movimiento convectivo ascendente a movimiento advectivo.

Movimientos del aire	}	Convectivos	Movimientos perpendiculares, ya sea en ascenso o descenso.
		Advectivos	Movimientos paralelos al plano de referencia, hacia la derecha o hacia la izquierda.

Al llegar aproximadamente a los 30° de latitud (es la distancia en grados desde el Ecuador a un punto de la superficie terrestre, se mide a lo largo de los meridianos; el Ecuador se considera que está a 0° de latitud y desde el Ecuador a cada uno de los polos hay 90° de latitud) norte o sur según el hemisferio, las masas de aire descienden debido a las características de presión. Ya en superficie, una parte se encauza hacia la región de baja presión ecuatorial, cerrando un circuito y otra parte a la región de alta presión subpolar.

Si se adiciona a la anterior descripción la influencia del movimiento de rotación del planeta, en el hemisferio norte los vientos se desvian hacia la derecha y en el hemisferio sur hacia la izquierda, porque las masas de aire se desalojan en sentido contrario al movimiento de la tierra (ver fig. 1).



**Figura 1.**  
**Dirección de los vientos.**

En Ingeniería Química es común encontrar dos clasificaciones de viento: **vientos dominantes**, que se refieren a los vientos más fuertes en velocidad que se presentan en una zona, independientemente de la dirección que estos lleven; y por otra parte los **vientos reinantes** se refieren a los vientos cuya dirección es más frecuente en la zona, independientemente de su velocidad.

#### Formación de Vientos Turbulentos.

El flujo de aire es un movimiento en dirección horizontal que se caracteriza por ser un flujo laminar. Cuando se presentan las condiciones necesarias para deshacerlo se causa turbulencia, dichas condiciones son:

- **Efectos Friccionales**, los cuales pueden producirse por irregularidades topográficas (montes, cerros o superficies de piso irregular) o por barreras artificiales (construcciones y chimeneas industriales, etc.).
- **Cambios Térmicos**, los cuáles se producen cuando la superficie de la tierra es más caliente o más fría que el aire lo cual resulta en una corriente de aire.

- Masa de Aire, son indicadores de un cambio de clima. Los disturbios frontales pueden ser débiles o fuertes, son muy comunes en algunas áreas y raros en otras.

### 2.1.3. Categorías de Estabilidad Climáticas.

Para propósitos de estimaciones de dispersión atmosférica, la estabilidad del viento es categorizada en los siguientes 6 tipos; según Pasquill<sup>(4)</sup>:

- 1) Extremadamente inestable (A).
- 2) Moderadamente inestable (B).
- 3) Ligeramente inestable (C).
- 4) Condición neutral (D).
- 5) Ligeramente estable (E).
- 6) Moderadamente estable (F).

A continuación se muestran (ver Tabla 7) las velocidades típicas del viento cerca de la fuente emisora categorizando el tipo de turbulencia (estabilidad ambiental) basándose a 10 m de altura y en función de la radiación que coexiste en el día y por la noche.

TABLA 7 Categorías de Estabilidad Climatológica<sup>(4)</sup>

VELOCIDAD DEL VIENTO (A 10 m) m/s	DÍA			NOCHE	
	RADIACION 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

\* NOTA: Las fracciones se refieren a parámetros cualitativos, en cuanto a que la nubosidad se observe parcial o totalmente.

La categoría A representa una condición extremadamente inestable con alto grado de mezclado mientras que la categoría F es la más estable con poco mezclado. Las categorías A y B, también llamadas superadiabáticas, son típicas de vientos ligeros con insolación que se observan en las tardes de verano. La categoría C es una condición ligeramente inestable muy similar a A y B con vientos de moderados a fuertes. La categoría D es una condición neutra con vientos fuertes durante el día o la noche. Las

- Masa de Aire, son indicadores de un cambio de clima. Los disturbios frontales pueden ser débiles o fuertes, son muy comunes en algunas áreas y raros en otras.

### 2.1.3. Categorías de Estabilidad Climáticas.

Para propósitos de estimaciones de dispersión atmosférica, la estabilidad del viento es categorizada en los siguientes 6 tipos; según Pasquill<sup>(4)</sup>:

- 1) Extremadamente inestable (A).
- 2) Moderadamente inestable (B).
- 3) Ligeramente inestable (C).
- 4) Condición neutral (D).
- 5) Ligeramente estable (E).
- 6) Moderadamente estable (F).

A continuación se muestran (ver Tabla 7) las velocidades típicas del viento cerca de la fuente emisora categorizando el tipo de turbulencia (estabilidad ambiental) basándose a 10 m de altura y en función de la radiación que coexiste en el día y por la noche.

TABLA 7 Categorías de Estabilidad Climatológica<sup>(4)</sup>

VELOCIDAD DEL VIENTO (A 10 m) m/s	DÍA			NOCHE	
	RADIACION 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

\* NOTA:

Las fracciones se refieren a parámetros cualitativos, en cuanto a que la nubosidad se observe parcial o totalmente.

La categoría A representa una condición extremadamente inestable con alto grado de mezclado mientras que la categoría F es la más estable con poco mezclado. Las categorías A y B, también llamadas superadiabáticas, son típicas de vientos ligeros con insolación que se observan en las tardes de verano. La categoría C es una condición ligeramente inestable muy similar a A y B con vientos de moderados a fuertes. La categoría D es una condición neutra con vientos fuertes durante el día o la noche. Las

categorías estables E y F ocurren durante la noche con brisas ligeras de cielos despejados o con baja nubosidad.

La presencia de niebla, smog, llovizna o bruma son indicios claros de aire estable. Bajo tales condiciones el humo de las chimeneas industriales después de perder su calor y su velocidad inicial se rastrea a lo lejos en un plano horizontal, las emisiones de los automóviles y otros vapores permanecerán sobre la superficie, aumentando así la concentración de contaminantes. En una atmósfera estable existe poca o nula actividad vertical para el ascenso de humo, polvo y otros contaminantes, los cuales se acumulan en la parte más baja de la atmósfera impidiendo una visibilidad aceptable.

En aire inestable se cuenta con dispersión vertical, la cual dispersa humo, polvo y otros productos de emisión peligrosa. Una buena visibilidad es indicio de condición atmosférica inestable.

#### **2.1.4. Razón de Falla.**

La Razón de Falla puede definirse como un gradiente de temperatura vertical. Se refiere a la distribución vertical de temperatura en la atmósfera. La temperatura de la atmósfera generalmente cae (disminuye) o "falla", con el incremento de la altitud debido a que aumenta la distancia de la fuente de calor que es la superficie terrestre.

La razón de falla normal o promedio es de  $-6.5^{\circ}\text{C}/\text{Km}$  para aire que no presenta movimiento vertical. Este gradiente de temperatura vertical muestra variaciones notables de un lugar a otro y periódicamente también es variable en la misma localidad.

#### **Razón de Falla Adiabática Seca.**

Si a un pequeño volumen de aire se le rastrea en su ascenso vertical en la atmósfera, dicho gas se encuentra con menor presión y por lo tanto se expande y se enfría. Ya se mencionó que la disminución de la temperatura con la altura se conoce como razón de falla. Si el aire estuviera seco y el proceso fuese adiabático, entonces la velocidad de

decremento de temperatura tendría un valor particular el cual se conoce como razón de falla adiabática seca de temperatura. Aunque tal proceso no ocurre en la atmósfera, esta razón de falla provee un patrón de comparación para condiciones reales atmosféricas. La velocidad de cambio de temperatura con la altura  $dT/dZ$  bajo condiciones adiabáticas es aproximadamente de  $-10^{\circ}\text{C}/\text{Km}$ , es decir,  $dT/dZ = -1^{\circ}\text{C}$  por cada 100 m.

La condición adiabática (teórica) y algunas otras condiciones que ocurren en la atmósfera se ilustran en la fig.2.

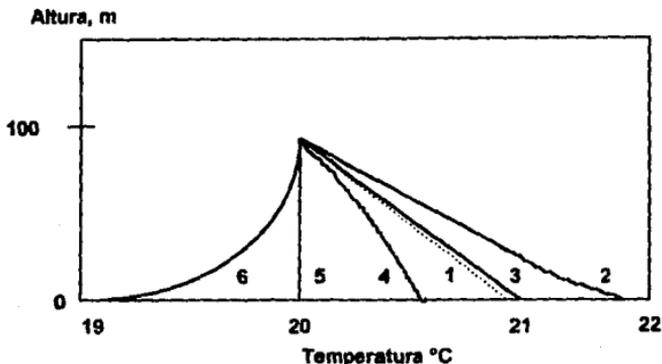


Figura 2. Perfiles de temperatura vertical y razón de falla.

La línea 1 de la figura anterior muestra una condición adiabática seca. La curva 2 muestra una condición superadiabática que puede resultar de una radiación solar (insolación), o del paso de aire frío sobre una superficie caliente, ambas situaciones promueven movimientos por convección del aire y con esto se favorece la inestabilidad. La curva 3 muestra una condición neutral la cual se asocia con cielos nublados y velocidades de moderadas a fuertes. La curva 4 muestra una condición subadiabática la cual favorece condiciones estables de la atmósfera. La figura 5 es para un proceso isotérmico, el cual favorece fuertemente la estabilidad. La curva 6 muestra una condición de inversión que suprime la convección y favorece aún más la estabilidad.

Del párrafo anterior resalta el hecho de que las razones de falla mayores a la adiabática seca representarán condiciones de estabilidad climática inestables, mientras que las que resulten menores serán condiciones estables.

#### **2.1.5. Capa de Inversión.**

Existen varios tipos de inversión. Uno de estos tipos de inversión es a nivel de superficie terrestre como el mostrado en la curva 6 de la fig. 2. Este caso tiende a ocurrir en noches de cielos despejados y vientos ligeros, en cuyo caso la superficie (suelo) y el aire pierden calor por radiación. Esta condición es igualmente llamada inversión por radiación.

Otro tipo de inversión es la llamada la inversión elevada (ver fig. 3). Cuando una gran masa de aire frío fluye hacia una zona con poca altitud que se encuentre entre valles, ésta masa desplaza al aire caliente del lugar a una altura que va de los 500 m a 1 Km. La temperatura de aire por lo tanto, disminuye de manera normal del nivel de piso hasta alguna altura, supóngase 600 m. Cuando el aire frío que se encuentra en la parte inferior de la atmósfera alcanza al aire caliente que se ubica arriba del mismo, la temperatura del aire aumenta con la altura. A esta región de incremento de la temperatura con la altura se le llama capa de inversión. El aire contaminado denso y frío que se encuentre debajo de esta capa no podrá ascender o elevarse; la capa de inversión actúa como una especie de pared o tapa, con la consecuente presencia de contaminantes a niveles elevados, (ver figs. 3a y 3b).

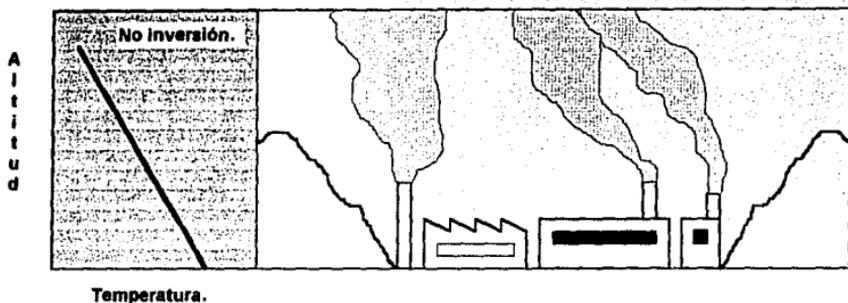


Fig. 3a) Dispersión de contaminantes bajo condiciones atmosféricas normales.

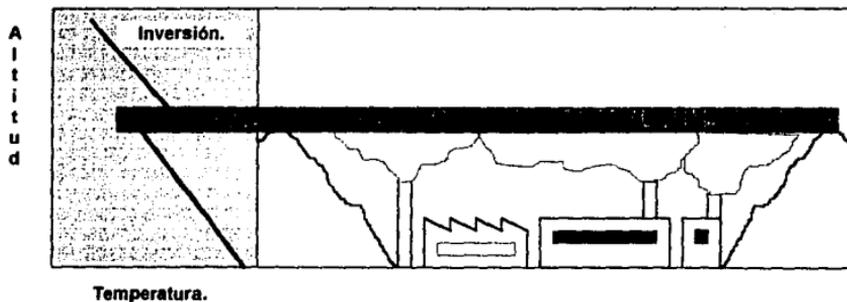


Fig. 3b) Contaminantes atrapados bajo la capa de inversión.

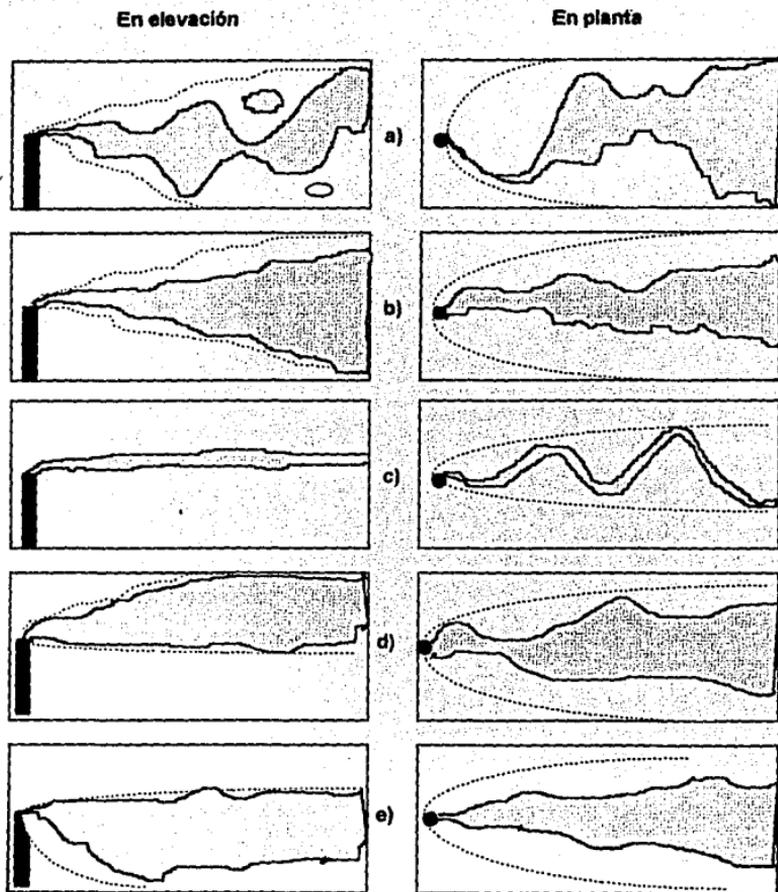
## **2.2. Influencia de las Condiciones Atmosféricas en la Dispersión.**

En dispersión de gases, a la trayectoria que siguen los gases y/o humos a la salida de una chimenea industrial o fuente de emisión, se le llama pluma o penacho del contaminante.

La dispersión atmosférica de contaminantes y las posibles trayectorias de los mismos, es decir las plumas, dependen y son gobernadas por las condiciones de estabilidad existentes en la atmósfera. Las mejores condiciones atmosféricas para la dispersión son la inestabilidad y la neutralidad. Como se ha mencionado, estas condiciones están determinadas por la relación entre la razón de falla existente y la falla adiabática seca.

Varios tipos de pluma resultan de las distintas condiciones atmosféricas. Aunque las siguientes descripciones no son del todo exactas, son aplicables a plumas que se encuentren a una altura no mayor de 300 m. Los principales tipos de comportamiento de plumas se ilustra en la fig. 4. La descripción de dichas plumas es:

- **Sinuoso.-** Se presenta en condiciones inestables, es característico que la pluma ascienda y descienda alternativamente al salir de la chimenea, (ver fig. 4a).
- **Enconado.-** Se presenta en condición neutral o cercanamente estable, se observa una pluma que debido a la velocidad moderada del viento (típico en dichas condiciones), se tiene la forma de un cono estrecho y alargado, la línea central horizontal de la pluma es por lo general inclinada y en desviación hacia abajo, (ver fig. 4b).
- **Retardado.-** Se observa en condiciones estables, se trata de una pluma estrecha y alargada en dirección del viento, (ver fig. 4c).
- **Fumigado.-** Es característica de una capa de inversión sobre el nivel de chimenea o fuente de emisión. Bajo estas condiciones la pluma tiende a dirigirse hacia alturas próximas a nivel de piso, (ver fig. 4e).
- **Elevado.-** Este tipo de pluma se forma cuando la inversión es por debajo del nivel de la salida de la chimenea, se asemeja al tipo fumigado y al retardado, aunque esta aparece a bajas velocidades de viento, (ver fig. 4d).



a) Inestable (Sinuoso), b) Neutral (Enconado), c) Estable (Retardado)  
d) Estable (Elevado), e) Muy estable (Fumigado).

Figura 4. Tipos de plumas.

En vista de la importancia que tiene la estabilidad atmosférica, es conveniente revisar el orden de los factores de estabilidad de A a la F. Pasquill ha categorizado la estabilidad atmosférica en seis rangos, desde A (fuertemente inestable) a la F (muy estable). Los parámetros que involucran la ecuación de dispersión (ver capítulo 3), cubren las variaciones existentes de las condiciones atmosféricas (ver tabla 7).

Todo sitio ambiental está sujeto por lo menos a dos de esas condiciones (ligeramente inestable C y neutral D) por un largo periodo de tiempo, pero en un proceso se encuentra frecuentemente tres o cuatro de esas condiciones.

Las condiciones atmosféricas de un lugar y temporal dados, cambia por uno o más tipos, cuando el movimiento es a nivel de piso hacia arriba, cerca de una altura de 810 m; el cambio de condición es solamente uno (por ejemplo: ligeramente inestable C a moderadamente inestable B), la predicción de concentración a nivel de piso cambia por un factor de 2 o más; por lo tanto, es esencial obtener lo más correctamente posible la condición de estabilidad inmediata y cercana a la altura de la chimenea cuando se descarga la emisión de gases.

Anderson<sup>(4)</sup>, Hippler<sup>(4)</sup> y Robinson<sup>(4)</sup> concluyen que el estado de cada una de esas clasificaciones de estabildades, son casi completamente empíricos, representando la mayor aproximación conocida que predice la dispersión de contaminantes.

### **2.2.1. Comentarios.**

Si la altura del venteo (o chimenea) es mayor de 10 m el análisis de este tipo de plumas indican que la inestabilidad es lo más deseable. En el tipo de pluma fumigado se encuentra una alta inversión y es probable que sea la condición menos deseable, porque la dispersión vertical se inhibe y la concentración es mayor sobre el piso esparciéndose por grandes áreas.

Un análisis completo no sólo debe basarse en las condiciones atmosféricas, sino también se incluya un cálculo de gas efluente y otros parámetros como, la velocidad del viento, los cortes del viento y el efecto de cualquier obstrucción.

### 2.3. Dilución de la Pluma.

La dilución, difusión y elevación de la pluma se presenta en términos de condiciones atmosféricas (estables e inestables) con respecto al movimiento del viento y de su velocidad horizontal y vertical. Bossanquet<sup>(4)</sup> establece que, el viento es una causa importante para diluir la pluma, la difusión completa o total es una función directa de la velocidad del viento.

La turbulencia de la atmósfera es un movimiento irregular del aire causado por remolinos de diferente magnitud actuando un régimen de viento dado.

El viento sirve para alterar las concentraciones de partículas contaminantes una vez que éstas han sido emitidas.

Una pluma incrementa su diámetro como resultado de la turbulencia actuando sobre su contorno externo. Conforme los remolinos producidos en el movimiento turbulento aumentan su tamaño, alcanzan un punto de tal magnitud que afectan a la pluma entera causando movimientos irregulares de la pluma. Normalmente en aire turbulento, se experimentan efectos combinados debido a que en dicho aire coexisten remolinos de diferentes tamaños, (ver fig. 5).

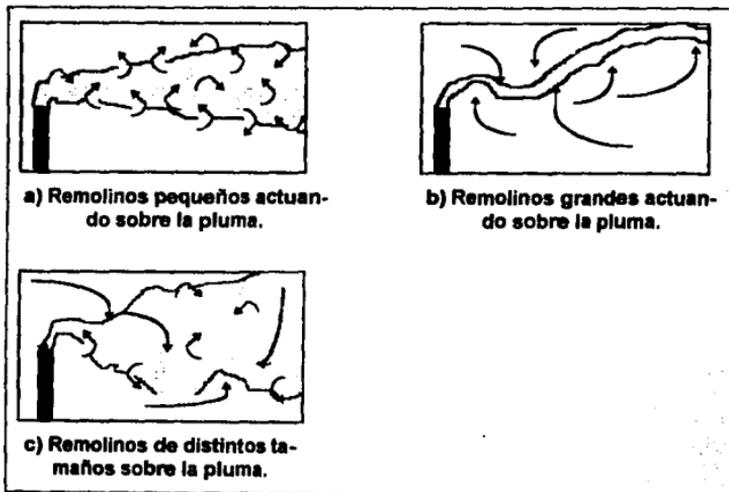


Figura 5. Interacción de remolinos con la pluma

Varias ecuaciones se han propuesto para describir la difusión de los contaminantes de una pluma en la atmósfera. Sin embargo, estas formulaciones resultan poco prácticas, debido a que los parámetros involucrados y el grado de turbulencia no permite realizar una evaluación sencilla del fenómeno. Smith<sup>(4)</sup> establece que una evaluación estadística generalmente es satisfactoria, esta aseveración la confirman diferentes autores (3,7,8,9,10,11 y 18).

## **2.4. Efectos de Obstrucciones sobre la Dispersión.**

Una obstrucción puede jugar un importante papel al determinar la elevación de la pluma y consecuentemente su dispersión, con una obstrucción no puede distribuirse el contaminante a favor del flujo de aire. Esta distribución afecta notablemente la dilución y difusión de la pluma.

Las obstrucciones no son solamente irregularidades naturales existentes sobre la superficie de la tierra en forma natural; por ejemplo: valles, litorales costeros, montes, depresiones y pisos ásperos poco comunes, sino también hay otro tipo de obstrucciones como los altos edificios situados en grandes áreas urbanas. Al tener un campo libre la dispersión se facilita; generalmente los efectos de obstrucción son contrarios, esto es, existe la tendencia del contaminante a dispersarse o irse a favor del viento, cuando encuentra una obstrucción en su camino aumenta la concentración a nivel de piso, se va acumulando la emisión. El grado de adversidad está en función de la razón de la altura de la fuente de emisión a la altura de obstrucción, es decir, si ésta es más alta que la fuente de emisión se inhibe la dispersión, por lo tanto, la concentración a nivel de piso aumenta, comparado con aquella obstrucción que es menor, con lo cual se favorece la dispersión.

### **2.4.1. Recomendaciones.**

Si se aumenta la altura de la obstrucción la pluma sufre un efecto dual: una desviación hacia abajo y la otra hacia arriba, la primera se presenta cuando una parte de la pluma fluye hacia la cimentación de la chimenea o de las construcciones adyacentes, mientras

que la otra parte de la pluma se eleva en sentido contrario a la dirección del viento, lo cual implica que el área cercana a la fuente de emisión se encuentra la mayor concentración a nivel de piso, esa obstrucción puede ser una estructura, tal como equipo de proceso o edificio, las altas torres fraccionadoras angostas u otros equipos de altura considerable cercanos, pueden también causar este doble efecto.

Para evitar ese efecto dual Hawkins<sup>(4)</sup> y Nonbebel<sup>(4)</sup> propusieron que la chimenea deberá tener una altura mínima y que la velocidad del efluente sea mayor a una velocidad crítica, la cual es función de la velocidad del viento. La regla con respecto a la altura mínima de la chimenea será de 2 ó 1½ veces la altura de la estructura adyacente. Además, cuando hay muchas estructuras y obstrucciones pueden producir efectos severos, los cálculos de la altura de chimenea deberá revisarse por expertos en simulaciones experimentales en campo.

Por lo que toca a la velocidad del efluente, la regla establece que su velocidad sea de 1.3 a 1.5 veces la velocidad del viento. Debido a que ésta última velocidad es variable, se puede asumir una velocidad del efluente de 1.4 veces la velocidad del viento, lo cual en un 98% de las veces, ofrece suficiente protección contra efectos adversos. Para obtener esta velocidad crítica, se puede implementar ya sea un diseño tipo venturi a la salida del efluente, o una forma cónica. Dicho propósito se logra a expensas de una ligera caída de presión, (ver fig. 6).

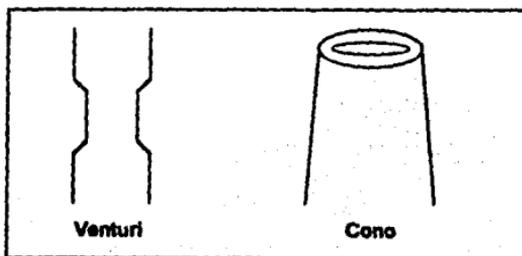


Figura 6.

#### **2.4.2. Comentarios.**

Las pérdidas por fricción en los tipos de salida mostrados anteriormente son menores en el tipo cono y aumentan en el tipo venturi.

#### **2.5. Túneles con Viento.**

Los estudios de túneles con viento son un medio conveniente para obtener datos acerca de la dispersión de efluentes emitidos por una chimenea, especialmente en aquellas situaciones donde los métodos teóricos producen resultados pobres.

Este tipo de estudios se utilizan con gran efectividad para interpretar la influencia que ejercen sobre la dispersión y comportamiento de las plumas, situaciones tales como: estructuras construidas próximas a la fuente de emisión, múltiples chimeneas, efectos topográficos poco comunes y un amplio rango de velocidades del efluente a la salida de la chimenea.

El esfuerzo que se requiere en este tipo de estudios, se concentra en poder reproducir a escala las estructuras y efectos topográficos que interesen para su estudio. Debido a que en la mayoría de los túneles con viento no existe gradiente de temperatura, el efecto de flotación del efluente producido por las energías térmica y cinética de la pluma no puede reproducirse. Por la tanto, estos estudios se limitan a casos en los cuales la configuración de las estructuras adyacentes a la fuente y las irregularidades topográficas tienen un marcado efecto sobre la dispersión.

Por lo general, los estudios en túneles con viento son más efectivos a altas velocidades de viento (es decir, velocidades mayores a 10 m/s), bajo esta condición los efectos térmicos o convectivos en el aire son pequeños comparados con la influencia que ejerce la velocidad del aire. Estructuralmente hablando, los túneles se construyen con una larga sección de prueba y con una altura de túnel de al menos 10 veces la altura de la chimenea usada.

### **2.5.1. Comentarios.**

Las categorías de estabilidad que estableció Pasquill, representan un concepto fundamental en el análisis de los modelos de dispersión, el modelo presentado en el siguiente capítulo no es la excepción, por lo que se debe recordar que la velocidad del viento en conjunción con los diferentes grados de insolación generan una o dos condiciones de estabilidad (ver tabla 7). Dicho arreglo no se antoja caprichoso, por el contrario, tiene mucha lógica.

Obsérvese que la condición A (extremadamente inestable) con una insolación fuerte, favorece la formación de masas de aire con alto grado calórico, debido a esto se originan movimientos convectivos ascendentes (al tener una menor densidad es consecuencia directa de una mayor temperatura). Por otro lado, con una velocidad de viento baja ( $V < 2$  m/s) se asegura que el movimiento ascendente del aire con insolación fuerte, no tenga fuerzas contrarias que limiten dicho movimiento. Para entender mejor ésto último; imaginece un vector ascendente vertical que se ve disminuido con vectores horizontales, al no tener éstos, el vector vertical es máximo, por lo tanto, la ascendencia libre de masas de aire indica la condición de mayor inestabilidad.

### Capítulo 3.

#### Modelo de Dispersión Gaussiana

#### Análisis de Nube Explosiva.

En general, el objetivo en el modelaje de la contaminación del aire, es calcular la concentración del contaminante en un punto dado  $(X, Y, Z)$  en dirección a favor del viento desde una fuente emisora del pululante (ver figura 3.1), la coordenada  $X$  se tomará en dirección del viento a partir del centro de la fuente,  $Y$  es la distancia transversal al eje  $X$  y  $Z$  es la distancia en la dirección vertical medida a partir del nivel de piso. La altura del venteo o chimenea es denotada por  $H_s$ , y  $\Delta H$  es el incremento de la pluma, es decir, la distancia vertical por encima de la parte superior del venteo a la cual la pluma experimenta elevación debido a su momentum vertical así como por su energía térmica. La altura efectiva de la chimenea  $H$ , será la suma de  $H_s$  y  $\Delta H$ .

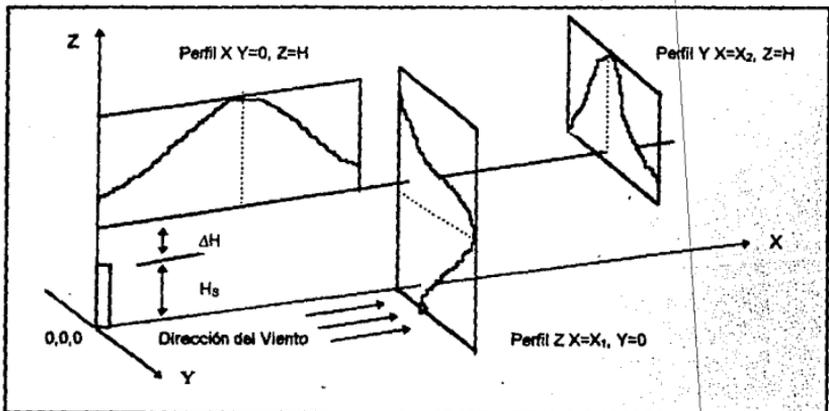


Figura 3.1 Modelo de Isoconcentración (X;Y;Z)

La emisión de gases por chimeneas sufre un acarreo por las corrientes de aire que van diluyendo la concentración de los contaminantes en la atmósfera en la medida que se expande y se aleja de la fuente. De los mecanismos de transporte; difusión molecular, difusión turbulenta y transporte por viento, este último es el más importante.

En los bordes de la pluma la concentración se considera próxima a la concentración diluida máxima (usualmente asumida como cero), mientras que en el centro de la pluma, la concentración será máxima. El propósito de un modelo es proveer una descripción cuantitativa del perfil de concentración del contaminante. En muchos modelos no se intenta resolver las ecuaciones fundamentales(diferenciales) que describen el proceso de difusión, sino que están basados en observación experimental, cuyo perfil indica que su predicción es razonablemente aproximada por una función de distribución normal, la cual, por cierto, es ampliamente usada en una derivación de las matemáticas que es la estadística. Es decir, los modelos más utilizados se basan en suponer una distribución bidimensional gaussiana, para todas las partículas contaminantes situadas en el plano normal a la dirección del viento. Todos estos modelos de dispersión de contaminantes son generalmente denominados como modelos gaussianos.

Los modelos de dispersión de contaminantes tienen múltiples aplicaciones, pueden usarse en el diseño de chimeneas cuidando que tengan la altura suficiente para una buena dispersión de contaminantes en capas altas de la atmósfera. En este caso se busca mitigar los efectos adversos sobre el ambiente y en la población además del cumplimiento de las normas sobre niveles permisibles de emisiones. Los modelos de dispersión son particularmente útiles para la predicción de situaciones de emergencia, producidas por condiciones meteorológicas desfavorables. Así como una ayuda en la elaboración de normas de emisión y la planeación de instalaciones industriales cercanas a las ciudades.

Entre las fuentes de emisión de origen industrial, las chimeneas y/o venteos son de los casos más frecuentes. Estas son fuentes de emisión puntual a diferencia de las fuentes bidimensionales; como ocurre en los derrames y tiraderos de basura; así como las

fuentes tridimensionales que se manifiestan durante los incendios. Otro ejemplo de emisión puntual son las denominadas emisiones fugitivas que se presentan en las rupturas de equipos y tuberías, en las cuales se desfoga un contaminante de manera gradual e intermitente. En las chimeneas la emisión se considera de tipo continua.

En este capítulo se describe un modelo de dispersión en un proceso y sus variables, incluyendo las ecuaciones con sus respectivas unidades. Las suposiciones dadas son descritas brevemente y la metodología de cálculo del modelo se detalla en el siguiente capítulo, estructurando el pseudocódigo en el anexo cuatro siguiendo una secuencia lógica programada.

Respecto al análisis de nube explosiva se describe la secuencia de cálculo, donde se detallan las variables con las unidades respectivas. Las correlaciones obtenidas de la gráfica de sobrepresión tienen el 98% de confiabilidad para obtener la sobrepresión generada al detonar el material (ver gráfica Anexo 3).

Para este estudio se debe realizar previamente la dispersión con respecto a la fuente emisora y cantidad de masa, con sus respectivos límites de explosividad analizando el evento y así predeterminar las consecuencias de la detonación si es el caso.

Después de obtener los perfiles de concentración, se realiza el cálculo de equivalentes de TNT, obteniéndose consecuentemente el perfil de sobrepresión en función de alguna distancia y la cantidad de TNT equivalente.

### **3.1 Modelo Gaussiano: Posición (X,Y,Z) Isoconcentración.**

El modelo se basa en la consideración de que el contaminante emitido se dispersa siguiendo una distribución gaussiana, en las direcciones axial y vertical. Los modelos más utilizados (Gaussianos) se basan en suponer una distribución bidimensional gaussiana para todas las partículas situadas en el plano normal a la dirección del viento.

Dichos modelos involucran expresiones de curvas de probabilidad desarrolladas por el matemático Karl Gauss.

Función de Distribución Normal. Una distribución normal en una variable, por ejemplo Z, se muestra en la fig. 3.2.

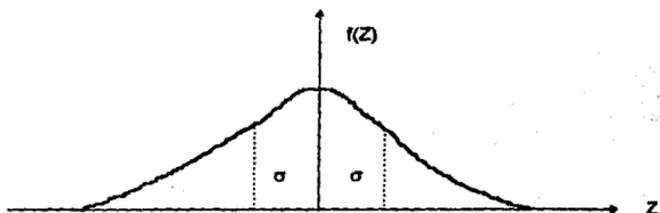


Figura 3.2 Curva Normal Gaussiana

La distribución depende de dos parámetros, la media ( $\mu$ ) y de la desviación estándar ( $\sigma$ ). La media especifica la posición del centro de la distribución, mientras que la desviación estándar especifica la amplitud de la distribución. La ecuación que describe la distribución normal es:

$$f(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{Z-\mu}{\sigma}\right]^2\right\} \quad (1)$$

El coeficiente  $\{1/(2\pi)^{0.5}\sigma\}$  es un factor de normalización que tiene la función de hacer el área bajo la curva igual a la unidad; es decir,

$$\text{Área bajo la curva} = \int_{-\infty}^{+\infty} f(Z) dZ = 1 \quad (2)$$

Para dos variables independientes, Z e Y, la función de distribución bivariable normal es simplemente el producto de las dos funciones de una variable, es decir,

$$f(Y,Z) = f(Y) f(Z) \quad (3) \text{ ó}$$

$$f(Y,Z) = \frac{1}{2\pi\sigma_y\sigma_z} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{(Y-\mu_y)}{\sigma_y}\right]^2\right\} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{(Z-\mu_z)}{\sigma_z}\right]^2\right\} \quad (4)$$

donde los subíndices z e y sobre  $\sigma$  y la  $\mu$  son usados para denotar los parámetros de cada distribución de una variable.

Se desprende de la ecuación 2 que:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(Y,Z) dZ dY = 10 \quad (5)$$

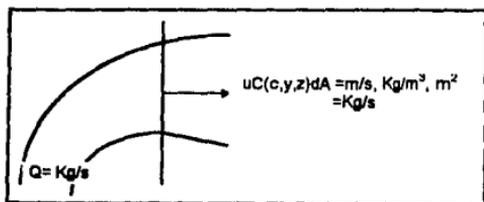
La ecuación 4 es el punto de partida para el modelo de dispersión gaussiana.

Existe una ecuación de dispersión gaussiana para una fuente de emisión elevada (por encima del nivel de piso). Esta ecuación se obtiene suponiendo que el perfil de concentración del contaminante en cualquier posición en la dirección X, tiene la forma de la ecuación 4. Puesto que los perfiles de distribución llegan a ser más planos y más anchos en el centro de la distancia en dirección del viento, las desviaciones estándar también se incrementan con distancia X. Se puede por tanto escribir que:

$$C(X,Y,Z) = \frac{K}{2\pi\sigma_y\sigma_z} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{Y}{\sigma_y}\right]^2\right\} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{(Z-H)}{\sigma_z}\right]^2\right\} \quad (6)$$

Donde K es una constante de proporcionalidad. La ecuación 6 se obtiene haciendo  $\mu_y$  igual a cero y  $\mu_z$  es igual a H en la ecuación 4, ya que la distribución se centrará sobre el eje de la pluma, en la cual  $\mu_y = 0$  y  $Z=H$ .

La constante de proporcionalidad, puede evaluarse por medio del balance de materia para el contaminante en la pluma. Esto es, la velocidad con la cual el contaminante penetra en la pluma una vez emitido de la chimenea, es igual a la velocidad con la cual el contaminante sale a través de cualquier sección transversal de la pluma, (ver fig.4).



$$Q = \iint_A uC(X, Y, Z) dA \quad (7)$$

Figura 3.3 Balance de Materia sobre una sección de la Pluma.

$$Q = uK \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{2\pi\sigma_y\sigma_z} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{Y}{\sigma_y}\right]^2\right\} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{Z-H}{\sigma_z}\right]^2\right\} dA \quad (8)$$

Pero el valor del término integral de la ecuación 8 es igual a la unidad, por lo que:

$$Q = uK \quad (9)$$

$$K = \frac{Q}{u} \quad (10)$$

Sustituyendo el valor de K en la ecuación 6, se obtiene:

$$C(X, Y, Z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left[\frac{Y}{\sigma_y}\right]^2\right] \exp\left[-\frac{1}{2}\left[\frac{(Z-H)}{\sigma_z}\right]^2\right] \quad (11)$$

La ecuación 11 es válida para emisiones de un venteo a una distancia en dirección del viento en la cual la interseca al piso. En este punto, generalmente se asume que la pluma es refractada por el piso. Esto último es cierto para la mayoría de los gases, los cuales no son absorbidos por la superficie terrestre. El efecto de la refracción es incrementar la concentración del contaminante en la región de la refracción. Este incremento es exactamente igual al que se generaría por una pluma emitida por un venteo imaginario a una distancia H debajo del piso. La ecuación para la pluma imaginaria se obtiene sustituyendo -H por H en la ecuación 11. Sumando las ecuaciones para las dos plumas, se obtiene finalmente:

$$C(X, Y, Z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left[\frac{Y}{\sigma_y}\right]^2\right] \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{Z-H}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{Z+H}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \quad (12)$$

Para concentraciones a nivel de piso (Z=0) se tiene:

$$C(X, Y, Z) = \frac{Q}{\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left[\frac{Y}{\sigma_y}\right]^2\right] \exp\left[-\frac{1}{2}\left[\frac{H}{\sigma_z}\right]^2\right] \quad (13)$$

Si aparte de hacer Z=0, se considera que las máximas concentraciones se obtienen a lo largo de la línea central de la pluma, Y=0, se obtiene:

$$C(X, Y, Z) = \frac{Q}{\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[ \frac{H}{\sigma_z} \right]^2 \right\} \quad (14)$$

### Coefficientes de Dispersión.

Los valores de las desviaciones estándar  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  que aparecen en las ecuaciones 11, 12, 13 y 14 fueron obtenidas empíricamente de estudios utilizando gas trazador. Los conjuntos de coeficientes de dispersión (desviaciones estándar) más ampliamente usados son los coeficientes de Pasquill-Gifford, algunas veces llamados solamente coeficientes de Pasquill.

Los coeficientes de dispersión dependen de la distancia a la fuente emisora, del tipo de estabilidad atmosférica y del tipo de escenario, ya sea localidad rural o urbana. Para el caso de escenarios rurales se emplean los coeficientes de dispersión de Pasquill-Gifford. Estos conjuntos de coeficientes se muestran gráficamente en los anexos II y III. En forma de ecuaciones paramétricas se muestran en el pseudocódigo que se presenta como anexo IV. En el caso de localidades urbanas la determinación de los coeficientes se basa en los resultados de Mc Elroy y Poleer<sup>(8)</sup>.

Los coeficientes de dispersión, corresponden a un tiempo de muestreo de 10 min., por lo cual los valores de concentración obtenidos con las ecuaciones 11 a 14 están referidos a este período, para otros períodos se utiliza la siguiente ecuación:

$$C_2(X, Y, Z) = C_1(X, Y, Z) \left( \frac{t_1}{t_2} \right)^{0.165} \quad (15)$$

Donde:

$C_1(X, Y, Z)$ : Es la concentración obtenida con el modelo en un período de 10 min.

$C_2(X, Y, Z)$ : Es la concentración del contaminante a un período  $t_2$ .

$t_1$  : Período de tiempo estándar (10 min).

$t_2$  : Tiempo a que se desee referir la concentración.

### Incremento o Elevación de la Pluma.

Otra variable que se requiere para determinar la concentración del gas contaminante en cualquier punto de alcance de la pluma es H (ver ecus. 11 - 14), que se refiere a la altura efectiva de la pluma. Como se mencionó al inicio del capítulo, este valor corresponde a la altura física de la fuente ( $H_s$ ) más la altura de la pluma o penacho ascendente ( $\Delta H$ ):

$$H = H_s + \Delta H \quad (16)$$

El incremento de  $\Delta H$  se calcula por el método de Briggs<sup>(8)</sup>. Este investigador propone el siguiente método:

El penacho de contaminante de una fuente elevada de emisión experimenta, en los tramos iniciales de su recorrido y como su impulso dinámico y convectivo, un empuje vertical. Este empuje decrece hasta llegar a una altura de equilibrio, momento en el cual se considera que ha alcanzado la altura de emisión efectiva. El parámetro de flotabilidad termoconduktiva, F, es fundamental para el cálculo del ascenso de la pluma:

$$F = \left(\frac{g}{4}\right) \frac{VD^2(T_s - T)}{T_s} \quad (17)$$

Donde:

g: aceleración gravitacional, 9.8 m/s<sup>2</sup>.

D: diámetro interno del venteo a la salida, m.

V: velocidad del gas a la salida del venteo, m/s.

$T_s$ : temperatura del gas, °K.

T: temperatura ambiente, °K.

La velocidad del fluido es calculada como:

$$V = \frac{4Q}{\pi (D)^2} \quad (18)$$

Donde:

Q: Flujo volumétrico, m<sup>3</sup>/s.

D: Diámetro interno, m.

Se calcula la distancia  $X_F$ , a la cual la pluma ya no experimenta elevación alguna, en metros:

$$X_F = 49(F^{5/8}) \quad \text{Si } F < 55 \quad (19)$$

$$X_F = 119(F^{2/5}) \quad \text{Si } F \geq 55 \quad (20)$$

Así se tienen dos casos para el cálculo de  $\Delta H$ , donde X es la distancia a analizar:

$$\Delta H = \frac{18(F^{1/3})(X^{2/3})}{u} \quad \text{Si } X < X_F \quad (21)$$

$$\Delta H = \frac{18(F^{1/3})(X_F^{2/3})}{u} \quad \text{Si } X \geq X_F \quad (22)$$

Donde:

u: velocidad del viento, m/s.

En el caso de condiciones climáticas estables, calcular el factor F con la ecuación 17 y el parámetro S, según sea el caso:

$$\text{Para condición E: } S = \frac{0.02 \text{ g}}{T} \quad (23)$$

$$\text{Para condición F: } S = \frac{0.035 \text{ g}}{T} \quad (24)$$

Donde:

T: temperatura, °K.

Calcular  $X_F$  según sea el caso con las siguientes ecuaciones:

$$X_F = \frac{3.14 \text{ u}}{\sqrt{S}} \quad (25)$$

$$\text{Si } X < X_F \text{ entonces: } \Delta H = \frac{16 (F^{1/3}) (X^{2/3})}{u} \quad (26)$$

$$\text{Si } X \geq X_F \text{ entonces: } \Delta H_1 = \frac{24 (F^{1/3})}{uS} \quad (27)$$

$$\Delta H_2 = \frac{5.0 (F^{1/4})}{S^{3/8}} \quad (28)$$

Si  $\Delta H_1 < \Delta H_2$  Se toma a  $\Delta H_1$  para el cálculo de elevación, de lo contrario se toma  $\Delta H_2$ .

Otra ecuación utilizada para el cálculo del incremento de la pluma es propuesta por Holland<sup>(4)</sup>. Esta ecuación representa una aproximación menos rigurosa en comparación

con la secuencia de ecuaciones propuesta por Briggs. Para condiciones de estabilidad atmosférica neutral o ligeramente inestable, Holland propone que:

$$\Delta H = \frac{VD}{u} \left[ 15 + 2.68 \times 10^{-3} P \left( \frac{T_S - T_a}{T_S} \right) D \right] \quad (29)$$

Donde;

V: velocidad del fluido a la salida del venteo o chimenea, m/s.

D: diámetro interno del venteo o chimenea, m.

u; velocidad del viento, m/s.

P: presión atmosférica, mbars.

T<sub>a</sub>: temperatura atmosférica, °K.

T<sub>s</sub>: temperatura del fluido, °K.

Holland recomienda usar factores de seguridad para la ecuación 29; para condiciones de estabilidad atmosférica inestables usar un factor de 1.1 ó 1.2 y para condiciones estables usa un factor de 0.8 ó 0.9.

Cuando se estudia la dispersión de los contaminantes durante la combustión de los mismos, el mayor problema radica en calcular la altura efectiva de la emisión, es decir, dónde empezarán a dispersarse los contaminantes.

La siguiente ecuación es una aproximación empírica para calcular la altura efectiva:

$$H = H_S + \Delta H + \Delta F_L \quad (30)$$

Donde:

$\Delta F_L$ : componente vertical de la longitud de la flama, (ver fig. 3.4).

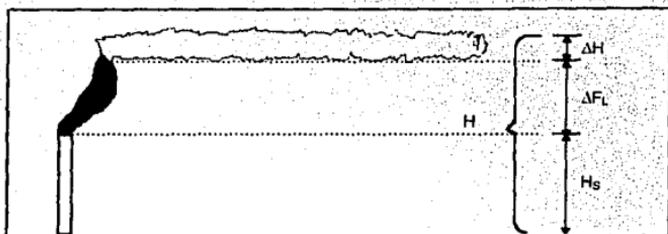


Figura 3.4 Combustión y dispersión de una pluma.

El término  $\Delta F_L$  es calculado como:

$$\Delta F_L = F_L \Sigma \frac{\Delta Y}{L} \quad (31)$$

$F_L$ : longitud de la pluma, generalmente se asume que es 120 veces el diámetro del quemador, por lo que:

$$F_L = 120 D \quad (32)$$

El término  $\Sigma \Delta Y/L$  se calcula conociendo la relación:

$$\frac{u_w}{u_o} = \frac{\text{vel del viento}}{\text{vel del gas}} \quad (33)$$

Con esta relación y haciendo uso de la fig. 3.5, se calcula la componente vertical de la flama.

Se puede elaborar un programa con algunas de las ecuacionews desde la 12 a la 29, las ventajas son: rapidez, solución precisa y dependiendo del análisis deseado se elegirán las ecuaciones a utilizar.

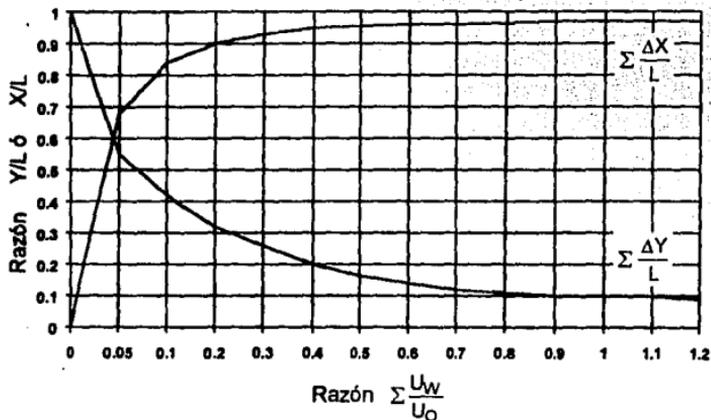


Figura 3.5 Distorsión de una flama por la velocidad del viento

El modelo de isoconcentración implica las siguientes suposiciones:

- La dispersión gaussiana utiliza el método de Briggs para el cálculo de la altura efectiva de la pluma.
- Se considera la emisión de un contaminante en un venteo no involucrando la combustión del mismo.
- La pluma posee una distribución gaussiana de la concentración de contaminante, en las direcciones axial y vertical con desviaciones estándar de  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$ .
- 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 reacciona con el mismo.
- La dispersión del contaminante en la dirección x es despreciable comparada con el transporte ocasionado por el viento.
- El modelo es aplicable en zonas con topografía plana sin obstáculos físicos importantes.
- La condición de estabilidad es un dato analizado por el usuario, lo cual implica el análisis de insolación crítica del evento en estudio.

#### **Restricciones del Modelo:**

- Desde el punto de vista predictivo, la restricción más seria es la suposición de uniformidad de las condiciones meteorológicas.
- Otra restricción en el uso del modelo Gaussiano es la suposición de uniformidad en las propiedades turbulentas-dispersivas de la atmósfera.
- El modelo no tiene la sutileza para acertar cuando hay fenómenos tales como los efectos de construcciones de altura considerable.
- El modelo Gaussiano no puede procesar emisiones de hidrocarburos reactivos de manera real.

### **3.2. Análisis de Nubes Explosivas (Método Gráfico).**

Durante muchos años se consideró que sólo era posible la formación de sobrepresión por combustión de vapores o gases inflamables, en una reacción de combustión confinada.

Actualmente se han fijado ciertos parámetros y conceptos en base a los accidentes suscitados a últimas fechas, por lo que ahora se observa el sentido tan vago que se tenía, porque al analizar una nube de gases pueden suceder diferentes eventos.

Dependiendo de la concentración de dicha nube explosiva, de los límites de flamabilidad, y de las condiciones de estabilidad climáticas entre otros factores podrá la nube sufrir una reacción de propagación.

**Las reacciones de propagación** son las que inician el proceso en un punto específico en el material propagándose desde ese punto y después continúa a través del mismo.

Dichas reacciones pueden ser la **deflagración** o la **detonación**

Una **deflagración** se propaga a velocidades subsónicas, para mezclas de hidrocarburos con aire, la velocidad de deflagración es típicamente del orden de 1m/s. En una **detonación** su velocidad es supersónica en la cual el frente de la flama viaja como una onda de choque seguida por una onda de combustión, la cual libera energía para nutrir a la onda de choque, la velocidad aproximada de la onda de choque es de 2000 a 3000 m/s. Se han hecho varios estudios en los cuales se ha concluido que para producirse tales eventos es necesario que coexistan las condiciones para deflagrar o detonar y son:

- 1°- La concentración del gas (debe encontrarse dentro de los límites de flamabilidad).
- 2°- La cantidad estequiométrica requerida del oxígeno para la reacción.
- 3°- Presencia de una fuente de ignición (como por ejemplo un chispazo o calor).

En otros tiempos la fuga de gases o líquidos detonantes se tomaban en cuenta sólo como un problema de incendio, no se consideró el potencial explosivo de nubes de gases o vapores inflamables en espacios abiertos, hasta que ocurrieron diversas explosiones potentes en el año de 1948.

Hace algunos años el International Risk Institute ha reconocido que una fuga de grandes cantidades de gases inflamables forman una nube explosiva en espacios abiertos causando severos o catastróficos daños en extensas áreas de una planta; por tal motivo se ha desarrollado un método de cálculo para determinar el potencial explosivo aproximado de una nube detonante y los daños que puede llegar a ocasionar.

En la actualidad se han hecho diversos estudios, basados en las experiencias sufridas, definiendo clara y detalladamente el daño potencial de una nube explosiva proponiendo métodos de análisis por las pérdidas sufridas después de los desastres suscitados. Estos métodos incluyen datos como: la velocidad de la emisión, velocidad y dirección del viento, así como las condiciones atmosféricas críticas. Sin embargo, en el análisis estimativo de un desastre potencial, estas variables son imprecisas y debe determinarse una aproximación conservadora y práctica que reduzca sus efectos al máximo.

El análisis lleva implícito las siguientes consideraciones:

- a) El material emitido se encuentra en fase gaseosa y la nube se forma a nivel de piso, de acuerdo a las condiciones termodinámicas del gas.
- b) La nube adquiere una forma elipsoide cuya altura es su eje vertical. No se consideran distorsiones ocasionadas por viento o por estructuras y edificios presentes, el comportamiento de la nube a nivel de piso se considera la mitad de una elipsoide.
- c) La nube tiene una composición uniforme y su concentración en el aire se encuentra dentro de los límites inferior y superior de flamabilidad del material.
- d) Se tomará el calor de combustión del trinitrotolueno TNT (2015 Btu/lb) para convertir la masa detonable del material en cuestión a un peso equivalente de TNT.

El análisis de una nube explosiva debe ser hecho sólo por personal con conocimiento de la planta y del proceso, como un Ingeniero Químico especializado en: Análisis de Riesgos o de Manifestación de Impacto Ambiental.

La secuencia de cálculo permite estimar el daño máximo probable (DM) y el daño catastrófico probable (DC), esta secuencia es aplicable para todas y cada una de las unidades de proceso con mayor riesgo de nubes explosivas. Los resultados de este

análisis, permitirán evaluar los riesgos de ampliaciones, así como el proyecto y la planeación de nuevas plantas.

Otro concepto en el análisis es el espaciamiento entre equipos y edificaciones al utilizar este método, considerando el criterio de todos los puntos siguientes:

- a) Una nube explosiva originada en una determinada área, no deberá afectar ninguna parte de los edificios o procesos de una área vecina.
- b) Todos los edificios y equipos mayores de una área deberán estar fuera de la esfera de una onda expansiva de 3 psi de sobrepresión producida por la explosión de una nube explosiva de otra área.
- c) Todos los edificios y equipos afectados por ondas expansivas entre 1 y 3 psi de presión deberán estar diseñados para resistir una onda expansiva de 2 psi, considerando un factor de explosividad de  $f = 0.02$ .

Las áreas alcanzadas sólo por la esfera de una onda expansiva de 1 psi, pueden considerarse como separadas del área peligrosa. A continuación se presentan los criterios comunes al presentarse un análisis de probable fuga, para determinar el daño máximo probable (DM) y el catastrófico (DC):

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

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

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

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

- a) El tamaño de la emisión dependerá del contenido del mayor recipiente del proceso o serie de recipientes conectados entre sí. No se considerará la existencia de válvulas automatizadas.
- b) Deberá considerarse la destrucción o daño grave de tanques de mayor almacenamiento como formadores de nubes explosivas catastróficas.
- c) Se considera también fugas en tuberías de gran capacidad, alimentadas desde las instalaciones remotas propias o exteriores. Suponiendo que la tubería es dañada seriamente, se considerará el área, flujo másico, la densidad del gas y el tiempo de despresurización.
- d) Tampoco se considerará la posibilidad de limitación de la formación de una nube por fuentes de ignición cercanas.

A continuación se describe la secuencia para estimar la sobrepresión originada por una nube detonante:

Partiendo de la ecuación 14 y aplicando el concepto de la concentración al centro de la pluma, suponiendo que se encuentra a nivel de piso y que la pluma no experimenta flotabilidad, se llega a:

$$X_{CL} = \frac{Q}{\pi \sigma_Y \sigma_Z u} \quad (34)$$

Donde:

$X_{CL}$  : Concentración a lo largo de la línea central de la pluma, % vol

$Q$  : Flujo volumétrico, m<sup>3</sup>/s STP.

El primer paso consiste en determinar la distancia a la cual se tiene la concentración mínima de la pluma, es decir, al límite inferior de flamabilidad con la ecuación 34. Donde  $X_{CL}$  será sustituido por valor de dicho límite a la vez de susutituir las ecuaciones paramétricas de los coeficientes de dispersión, (ver ejemplo 4.2).

Las líneas del contorno de la pluma detonante a los límites pobre y rico (inferior y superior de flamabilidad) se encuentran a una cierta distancia de la fuente de emisión al centro de línea de la pluma, sustituyendo la ecuación 34 en la ecuación 12 y considerando una  $H = 0$ .

$$X_{cont} = X_{CL} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[ \left( \frac{Y}{\sigma_Y} \right)^2 + \left( \frac{Z}{\sigma_Z} \right)^2 \right] \right\} \quad (35)$$

De la ecuación anterior fijando  $X_{cont}$  al valor del límite inferior de flamabilidad, sustituyendo el valor  $X_{CL}$  y determinando primero la amplitud de la pluma ( $Z=0$ ), se obtiene el ancho de la pluma al límite pobre  $Y_p$  como sigue:

$$Y_p = \sigma_Y \sqrt{\ln \left( \frac{X_{CL}}{LIF} \right)^2} \quad \leftrightarrow \quad LIF \leq X_{CL} \quad (36)$$

Haciendo analogía pero ahora con el límite rico y siguiendo con el ancho de la pluma, se obtiene  $Y_R$  con la siguiente ecuación:

$$Y_r = \sigma_Y \sqrt{\ln\left(\frac{X_{CL}}{LSF}\right)^2} \leftrightarrow LSF \leq X_{CL} \quad (37)$$

Siguiendo los mismos pasos de  $Y_p$  y de  $Y_n$ , para la determinación de la altura de la pluma se considera  $Y = 0$  se obtienen las siguientes relaciones de  $Z_p$  y  $Z_r$ :

$$Z = \sigma \sqrt{\ln\left(\frac{X}{LIF}\right)} \leftrightarrow LIF \leq X \quad (38)$$

$$Z_r = \sigma_Z \sqrt{\ln\left(\frac{X_{CL}}{LSF}\right)^2} \leftrightarrow LSF \leq X_{CL} \quad (39)$$

Calcular el volumen total ( $V_{TOT}$ ) de la nube considerando los contornos de la pluma en su límite pobre, como sigue:

$$V_{TOT} = \frac{2}{3} \pi a_p b_p c_p \quad (40)$$

Donde:

$a_p$ :  $\frac{1}{2}$  (Longitud a lo largo de la línea central del límite pobre, pie).

$b_p$ : máxima amplitud o ancho de la pluma al límite pobre, pie.

$c_p$ : máxima altura de la pluma al límite pobre, pie.

Calcular el volumen en el límite rico, con la siguiente ecuación:

$$V_r = \frac{2}{3} \pi a_r b_r c_r \quad (41)$$

Donde:

$a_r$ :  $\frac{1}{2}$  (Longitud a lo largo de la línea central del límite rico, pie).

$b_r$ : máxima amplitud o ancho de la pluma al límite rico, pie.

$c$ : máxima altura de la pluma al límite rico, pie.

Calcula el volumen detonable ( $V_D$ ), será aquel que se encuentre entre los límites de flamabilidad, calculándose como sigue:

$$V_D = V_{TOT} - V_f \quad (42)$$

La concentración promedio del detonante en la nube explosiva, es el promedio de los límites de flamabilidad, de la siguiente forma:

$$X_{---} = \frac{LIF + LSF}{x}$$

Con lo anterior se determina el volumen del contaminante a la concentración detonable ( $V_c$ ), como:

$$V = X_{---} \times V$$

La masa detonable  $W_s$  (lb), se obtiene considerando condiciones estándar:

$$W = V \left( \frac{PM}{\Delta H} \right)$$

Al tener el cálculo la masa detonante se procede a determinar los equivalentes de TNT, representando la energía desprendida por una nube explosiva, con la siguiente ecuación:

$$W = \frac{f W \Delta H}{\Delta H}$$

Donde:

f: factor de explosividad, adimensional.

$\Delta H_c$ : calor de combustión del material, Btu/lb.

$\Delta H_{TNT}$ : calor de combustión del trinitotolueno (2015 BTU/lb)

El factor de explosividad (f) de materiales varía de 0.01 a 0.1<sup>(3)</sup> y depende de la capacidad del material a detonar, el valor calculado del factor de explosividad es de 0.1 para propelentes de cohetes con oxígeno líquido; para las nubes explosivas el factor varía de 0.01 a 0.05 o más en caso de catástrofes, por lo tanto; se dan los siguientes criterios:

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

Para el cálculo de DC se tomará  $f = 0.1$

La sobrepresión generada por la explosión se obtiene por medio de una gráfica ilustrada en el Anexo III, con el dato de distancia escalada e intersectando con la curva de sobrepresión experimental se obtiene la lectura correspondiente de sobrepresión, un ejemplo se analiza en el capítulo 4 de este trabajo.

Las distancias escaladas ( $D_e$ ) se encuentran con respecto al punto de explosión en pies, obteniéndose con la siguiente ecuación:

$$D = \frac{D_e}{W} \quad (47)$$

La sobrepresión se calcula por medio de correlaciones matemáticas obtenidas de la gráfica de sobrepresión, la cual se encuentra en el Anexo III de este trabajo, proponiéndose utilizar como limitante la sobrepresión de 0.25 psi para determinar la distancia de seguridad a personal mínima requerida, dado que con esta sobrepresión ya se puede causar daños.

## Efectos de nube explosiva en Refinerías.

Tabla 8 Cuartos de control construcción de concreto y estructura de fierro con respecto a la magnitud de la onda expansiva<sup>(3)</sup>.

Sobrepresión (psi)	Efecto causado
0.5	roturas de ventanas.
1.0	deformación de la estructura.
1.5	derrumbe de muros de concreto.
3.5	derrumbe de muros de concreto.
10.0	derrumbe de estructuras de acero.

Tabla 9 Torre rectangular: estructura de concreto<sup>(3)</sup>.

Sobrepresión (psi)	Efecto causado
5.5	fractura de la estructura de concreto
7.0	derrumbe de la estructura.

Tabla 10 Torre de vacío octagonal: estructura de concreto<sup>(3)</sup>.

Sobrepresión (psi)	Efecto causado
7.5	fractura de la estructura.
7.5	ruptura de anclaje de la torre y caída de ella.

Tabla 11 Torre fraccionadora: montada sobre pedestal de concreto<sup>(3)</sup>.

Sobrepresión (psi)	Efecto causado
4.5	aflojamiento de tuercas de anclaje.
7.0	caída de la torre.

Tabla 12. Torre de regeneración: estructura de acero<sup>(3)</sup>.

Sobrepresión (psi)	Efecto causado
5.5	deformación de la columna.
7.0	caída de la torre.

Tabla 13. Torre de regeneración: estructura de concreto.

Sobrepresión (psi)	Efecto causado
8.5	fractura de la estructura.
16.5	derrumbe de la estructura de la torre.

Tabla 14 Reactor rectangular de cracking catalítico: estructura de concreto<sup>(3)</sup>.

Sobrepresión (psi)	Efecto causado
8.5	fractura de la estructura.
12.0	derrumbe de la estructura de la torre.

Tabla 15 Desisobutanizador: montado sobre el pedestal y zapatas<sup>(3)</sup>

Sobrepresión (psi)	Efecto causado
9.5	caída de reactor.

Tabla 16 Unidad de recuperación de vapor: con estructura rectangular de acero<sup>(3)</sup>

Sobrepresión (psi)	Efecto causado
6.0	derrumbe de la estructura.

Tabla 17. Horrio de tubos fijos<sup>(3)</sup>

Sobrepresión (psi)	Efecto causado
1.5	desplazamiento ligero de su posición original.
6.0	caída de chimenea.
6.5	derrumbe del horno.

Tabla 18. Edificio de mantenimiento<sup>(3)</sup>

Sobrepresión (psi)	Efecto causado
0.3	caída de techo de asbesto corrugado.
3.0	deformación de la estructura.
5.0	derrumbe de muros (de tabique), deformación de la estructura.
6.0	derrumbe de la estructura.

Tabla 19. Torre de enfriamiento de agua<sup>(3)</sup>

Sobrepresión (psi)	Efecto causado
0.3	caída de lumbrenas de asbesto corrugado.
3.5	derrumbe de la torre.

Tabla 20 Tuberías: soportadas por estructura de acero<sup>(3)</sup>

Sobrepresión (psi)	Efecto causado
3.5	deformación de la estructura.
6.0	derrumbe de la estructura y rompimiento de la tubería.

Tabla 21 Tuberías: soportada por estructura de concreto<sup>(3)</sup>

Sobrepresión (psi)	Efecto causado
3.5	fractura de la estructura.
5.0	derrumbe de la estructura y rompimiento de líneas.

Tabla 22 Tanques de almacenamiento: techo cónico y techo flotante<sup>(3)</sup>

Sobrepresión (psi)	Efecto causado
1.5	levantamiento de tanques vacíos.
3.5 a 6.5	ruptura de anclaje de la torre y caída de ella.

Tabla 23 Tanques de almacenamiento esféricos<sup>(3)</sup>.

Sobrepresión (psi)	Efecto causado
7.0	deformación de la estructura de tanques llenos.
7.5	deformación de la estructura de tanques vacíos.
9.0	derrumbe de tanques llenos.
9.5	derrumbe de tanques vacíos.

Tabla 24 Daños en Estructuras<sup>(3)</sup>.

Daños en Estructuras %	Sobrepresión (psi)	Daños
1	0.25	-Rompiendo de vidrios.
2	0.9	-Rompiendo de ventanas y daños menores en estructuras de casas
50	3.0	-Rompiendo y distorsión de equipo pequeño. Distorsión de estructuras de casas. -50% destrucción en casas de ladrillo. -Movimiento de maquinaria y equipo peso (<3000 lb).
99	5.0	-Destrucción de casas.
	9.0	-Demolición de carros de carga y trenes.
	10.0	-Daños graves y movimientos de maquinaria y equipo pesado (7000-12000 lbs)

Tabla 25 Daños por Onda de Choque en Humanos<sup>(3)</sup>.

Probabilidad de Fatalidad %	Sobrepresión (psi)
1	35 a 45
50	45 a 55
99	55 a 65

Tabla 26 Daños letales debido a Hemorragias<sup>(3)</sup>.

Probabilidad de Fatalidad %	Sobrepresión (psi)
1	14.5
10	17.5
50	20.5
90	25.5
99	29.5

Tabla 27 Daños Parciales como Ruptura del Tímpano<sup>(3)</sup>

Probabilidad de Ruptura del Tímpano %	Sobrepresión (PSI)
1	2.4
10	2.8
50	6.3
90	12.2

Tabla 28 Límites de Flamabilidad de algunos compuestos comunes en procesos petroquímicos<sup>(2)</sup>.

MATERIAL	LÍMITES EN AIRE % EN VOLUMEN		MATERIAL	LÍMITES EN AIRE % EN VOLUMEN	
	INFERIOR	SUPERIOR		INFERIOR	SUPERIOR
Acetona	3.0	11.0	Dicloruro de Etileno	3.8	15.4
Acetilino	2.5	81.0	Hidrógeno	4.0	75.0
Benceno	15.0	28.0	Metano	5.3	14.0
Butano	1.9	8.5	Propano	2.2	9.5
CS <sub>2</sub>	1.25	44.0	Propileno	2.4	10.3
CO	12.5	74.0	Estireno	1.1	6.1
Ciclohexano	1.3	8.0	Tolueno	1.4	6.7
Etano	3.0	12.5	Gas Natural	3.8	17.0
Etileno	3.1	32.0			

Tabla 29 Factor de Sanidad<sup>(5)</sup>

Material	Calor de Combustión $\Delta H_c$ (Btu/lb)	Factor Sanidad
Acetona	12300	1
Acetileno	20700	3
Amoniaco	8000	1
Benceno	17300	2
Butano	19700	1
CS <sub>2</sub>	6100	2
CO	4300	2
Ciclohexano	18700	1
Etano	20400	1
Etileno	20800	1
Dicloruro de Etileno	4600	2
Oxido de Etileno	11700	2
Hidrógeno	51600	0
Metano	21500	1
Propano	19900	1
Propileno	19700	1
Estireno	1700	2
Tolueno	17400	2
Cloruro de Vinilo	8000	2
Oxígeno	—	-

Tabla 30 Efectos por Intensidad de Radiación en Seres Humanos<sup>(6)</sup>

Intensidad de Radiación (Btu/Hr. Ft <sup>2</sup> )	Tiempo de Umbral de Dolor (Segundos)
440	infinito
550	60
740	40
920	30
1500	16
2200	9
3000	6
3700	4
6300	2

Tabla 31 Daños por Radiación en Humanos<sup>(6)</sup>

Radiación (BTU/Hr Ft <sup>2</sup> )	Tiempo de Exposición (segundos)	Daños
2000	8	Dolor
2000	20	Quemaduras de primer grado.
2000	>20	Quemaduras de segundo grado.
7500	6	Quemaduras de tercer grado.

## CAPITULO 4

### USO DEL MODELO

En este capítulo se detalla la secuencia de cálculo utilizada en el pseudocódigo mostrado en el Anexo IV, así como el conjunto de ecuaciones citadas en la literatura para el cálculo de concentraciones de gases emitidos a la atmósfera. Completando esta secuencia, se presenta el cálculo de sobrepresión generada en el caso de una nube detonante.

#### 4.1. Validación del Modelo de Isoconcentración con respecto a una publicación<sup>(9)</sup>.

Se simula el ejemplo de Finch y Serth<sup>(9)</sup> en el cual se presenta la emisión de Monóxido de Carbono (CO) y otros gases de un venteo con 2 m de diámetro y 50 m de altura. El venteo es de una industria ubicada en un terreno plano de zona rural. El flujo de gases es de 62.83 m<sup>3</sup>/s a 200°C y la emisión de CO es de 10 Kg/s. Durante una tarde de verano con baja nubosidad, la temperatura ambiente es de 30°C y la velocidad del viento es de 3.6 m/s. Estimar la concentración de CO promedio a nivel del piso que se tendría a una distancia de 1.5 Km en la dirección del viento. Determinar si hay posibilidad de que ocurra el evento de detonación.

Solución.

##### 1. Determinación de los coeficientes de dispersión.

Para una tarde de verano con poca nubosidad y con vientos moderados, la clase de estabilidad B es adecuada. Los coeficientes  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$  se pueden determinar en las gráficas de Pasquill-Gifford que se muestran en el anexo "2", entrando con el valor de 1.5 Km sobre el eje X, se interseca con la curva de estabilidad "B", obteniéndose para cada caso:

$$\sigma_y = 220 \text{ m}$$

$$\sigma_z = 170 \text{ m}$$

2. Cálculo del aumento en la elevación de la pluma, primero se procede a determinar la velocidad de salida del effluente con la ecuación 18:

$$V = \frac{4 (\text{Flujo Volum.})}{\pi (\text{Diam. Venteo})^2} = \frac{4 (62.83)}{\pi (2)^2} = 19.99 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Usando la ecuación 17, se determina el factor F:

$$F = \frac{9.81(20)(2)^2}{4} \left[ \frac{473 - 303}{473} \right] = 70.5 \frac{\text{m}^4}{\text{s}^3}$$

Como  $F > 55$ , se usa la ecuación 20:

$$X_F = 119 (70.51^{2/5}) = 652.92 \text{ m}$$

Puesto que  $X = 1500 \text{ m} > X_F$ , se emplea la ecuación 22:

$$\Delta H = \frac{16 (70.51)^{1/3} (652.92)^{2/3}}{3.6} = 138.19 \text{ m}$$

3. Calcular la altura efectiva, vía la ecuación 16:

$$H = H_S + \Delta H = 50 \text{ m} + 138.19 \text{ m} = 188.19 \text{ m}$$

4. La concentración a nivel de piso se calculada con la ecuación 14:

$$C(X, Y, Z) = \frac{10}{\pi(3.6)(220)(170)} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{188.14}{170} \right)^2 \right] = 128 \text{E} - 5 \left( \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right) = 12.81 \left( \frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right)$$

El valor obtenido es bastante similar con el reportado por Finch y Serth de  $13.0 \text{ mg/m}^3$ .

En la publicación de NFPA<sup>(2)</sup> se reportan los siguientes límites de flamabilidad para el CO:

Límite Inferior de Flamabilidad (LIF) = 12 %v/v  
Límite Superior de Flamabilidad (LSF) = 75 %v/v

5. Se requiere saber si la concentración calculada de 12.81 mg/m<sup>3</sup> se encuentra entre los límites de flamabilidad, para esto, es necesario expresar dichos límites en unidades de mg/m<sup>3</sup>. Se puede demostrar que:

$$\text{LIF} \left( \frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right) = \frac{1218.788 (\text{LIF})^2 (\text{PM. gas})}{T}$$

Donde T está en °K.

A su vez para LSF:

$$\text{LSF} \left( \frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right) = \frac{1218.788 (\text{LSF})^2 (\text{PM. gas})}{T}$$

Sustituyendo para LIF:

$$\text{LIF} = \frac{1218.788 (12)^2 (28)}{303} = 16,218.32 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3}$$

Sustituyendo para LSF:

$$\text{LSF} = \frac{1218.788 (75)^2 (28)}{303} = 633,528.41 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3}$$

Como la concentración 12.81 mg/m<sup>3</sup> no está entre LIF y LSF, no existe la posibilidad de que ocurra la detonación de CO en ese punto en particular, (1500, 0, 0).

#### 4.2. Análisis de una Nube Explosiva.

Si en una gasera se ventea inadecuadamente propano a la atmósfera con un flujo de 25.485 m<sup>3</sup>/s y considerando como condición crítica climática "F", realizar el análisis de nube detonante al ocurrir dicha emisión.

Para realizar dicho análisis se realizarán los cálculos con los siguientes datos:

Fluido:	Propano.
Flujo Volúmetrico:	25.485 m <sup>3</sup> /s
% Peso:	100
LIF:	2.8 %v/v
LSF:	7.0 %v/v
Presión Atmosférica	14.7 psia
Temp. Atmosférica	15 °C
Peso Molecular:	44 g/gmol
Condición de Estabilidad:	F
Velocidad Viento:	2.44 m/s

Consideraciones:

- Como situación crítica del análisis, no se considera la altura del venteo por lo que será a nivel de piso, debido a que en este caso se obtienen mayores concentraciones de la nube detonante.
- Como forma geométrica de la nube se considera semielipsoide.
- Se considera el caso de diseño catastrófico en el cálculo de la sobrepresión el cual implica un factor de explosividad de 0.1

Solución.

1. Se calcula la distancia a la cual se obtiene la dilución casi infinita de la pluma que se considerará en el límite inferior (pobre) de flamabilidad, utilizando la ecuación (34):

$$X_{CL} = \frac{Q}{\pi \sigma_Y \sigma_Z u}$$

Donde  $X_{CL}$  será el valor del límite pobre y los coeficientes de dispersión se sustituirán por sus respectivas ecuaciones paramétricas, en este caso corresponden a la condición de estabilidad F (en el pseudocódigo aparece como Condición de Estabilidad 6), (ver Anexo IV):

$$0.028 = \frac{25.485}{\pi (0.067 X^{0.9}) (0.057 X^{0.8}) (2.44)}$$

Despejando X:

$$X = \left( \frac{25.485}{0.028 \times 0.02928} \right)^{1/1.7} = 439.44 \text{ m}$$

2. La distancia anterior es la máxima a analizar para este evento, se repite el mismo procedimiento para el límite rico. Posteriormente se toman valores arbitrarios de distancias que sean menores a 439.44 m, calcular el valor de los coeficientes de dispersión para a su vez determinar las concentraciones en dichos puntos, lo anterior se resume en la siguiente tabla:

Distancia (m)	$\sigma_Y$ (m)	$\sigma_Z$ (m)	$X_{CL}$ (%v)
91.44	3.90	2.11	0.4037
152.40	6.20	3.20	0.1694
213.36	8.36	4.16	0.0956
265.18	10.17	4.95	0.0700
304.80	11.53	5.53	0.0522
426.70	15.60	7.24	0.0294
439.44	16.60	7.53	0.0280

3. Con las concentraciones obtenidas ( $X_{CL}$ ) se calculan los contornos de la pluma a sus límites rico y pobre para el ancho de la pluma así como para su altura con las ecuaciones 37 a 39 para cada distancia. Sustituyendo para la primer distancia 91.44 m se tiene:

$$Y_p = 3.9 \sqrt{\ln\left(\frac{0.4037}{0.028}\right)^2} = 9.0 \text{ m}$$

$$Y_r = 3.9 \sqrt{\ln\left(\frac{0.4037}{0.07}\right)^2} = 7.3 \text{ m}$$

$$Z_p = 2.11 \sqrt{\ln\left(\frac{0.4037}{0.028}\right)^2} = 4.86 \text{ m}$$

$$Z_r = 2.11 \sqrt{\ln\left(\frac{0.4037}{0.07}\right)^2} = 3.94 \text{ m}$$

4. Haciendo lo mismo para los puntos restantes se genera la siguiente tabla:

Distancia (m)	Distancia Horizontal (m)		Distancia Vertical (m)	
	Al límite rico ( $Y_r$ )	Al límite pobre ( $Y_p$ )	Al límite rico ( $Z_r$ )	Al límite pobre ( $Z_p$ )
91.44	7.30	9.01	3.94	4.86
152.40	8.23	11.74	4.26	6.07
213.36	8.59	13.09	3.27	6.50
265.18	0.00	13.34	0.00	6.47
304.80	---	12.86	---	6.16
426.70	---	4.87	---	2.22
439.44	---	0.00	---	0.00

5. Se calculan los volúmenes con las ecuaciones 40 y 41, para posteriormente determinar el volumen detonable con la ecuación 42:

$$V_{TOT} = \frac{2}{3} \pi (0.5 \times 439.44 \times 13.34 \times 6.5) = 39,902.25 \text{ m}^3$$

$$V_r = \frac{2}{3} \pi (0.5 \times 265.18 \times 8.23 \times 4.26) = 9,736.0 \text{ m}^3$$

$$V_D = 39902.25 - 9736.0 = 30,166.25 \text{ m}^3$$

Se determina la concentración promedio del detonante con ecuación 43:

$$X_{CL} = \frac{7.0 + 2.8}{2 \times 100} = 0.049$$

Se calcula el volumen de la pluma con concentración detonable promedio como:

$$V_C = 0.049 \times 30,166.25 = 1,478.15 \text{ m}^3$$

Para obtener la masa detonable  $W_S$  (lb), se convierten los  $1,478.15 \text{ m}^3$  a  $\text{pies}^3$  (debido a que la gráfica de sobrepresión de la gráfica 3 está dada en sistema inglés) y sustituyendo en la ecuación 45:

$$W_S = 52,200.37 \left( \frac{44}{359} \right) = 6,397.82 \text{ lb}$$

El siguiente paso será calcular la masa equivalente de TNT, esto se hará con la ecuación 48 como sigue:

$$W_{TNT} = \frac{0.1 \times 6,397.82 \times 19,900.0}{2015} = 6,85174 \text{ lb}_{TNT}$$

Fijando sobrepresiones de interés se obtienen los valores de las distancias escaladas ( $D_E$ ) que se encuentran en el Anexo III y despejando la distancia de la ecuación 47:

$$D = D_E \times 6,85174^{1/3}$$

Por ejemplo, fijando una sobrepresión de 0.25 psi en la gráfica del Anexo III se determina una distancia escalada de 110 pie/lb<sup>1/3</sup>, por lo que la distancia que debe tenerse como seguridad es de:

$$D = 110 \frac{\text{pie}}{\text{lb}^{1/3}} \times (6,85174 \text{ lb})^{1/3} = 2,089.26 \text{ pie} = 636.81 \text{ m}$$

Para otras sobrepresiones se procede de igual forma, en la siguiente tabla se muestran dichos resultados:

Sobrepresión, lb/pulg <sup>2</sup>	Distancia, pie (m)
0.25	2089.26 (636.81)
3.0	313.39 (95.52)
5.0	237.42 (72.36)
9.0	151.95 (46.31)
10.0	144.35 (44.00)

Para ver efectos de estas sobrepresiones generadas ver tablas finales del capítulo 3.

Finalmente, con los datos de los contornos de la nube detonante se puede graficar la misma, mostrando la región de los límites pobre y rico tanto para la altura como para el ancho de la pluma.

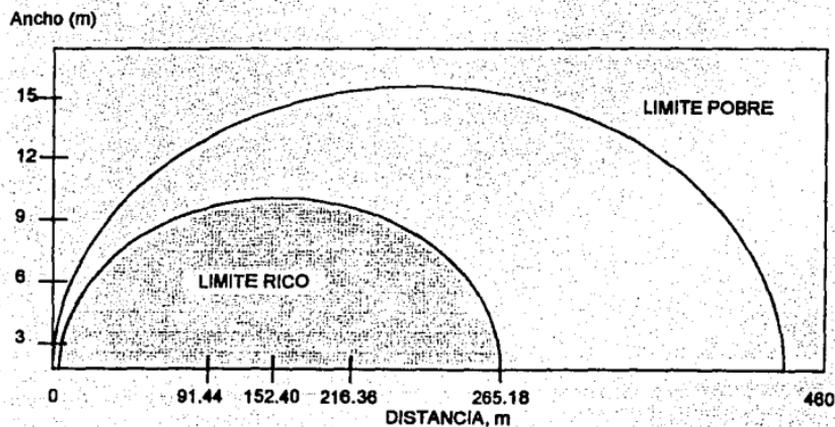
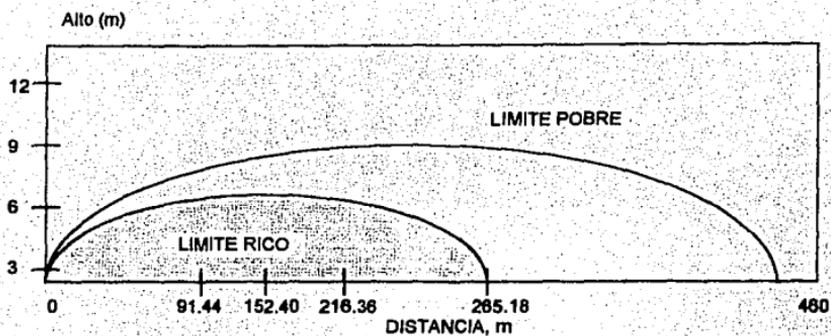


Fig.4 Contornos de la Pluma

## CAPITULO 5

### RESULTADOS Y CONCLUSIONES.

#### 5.1 Análisis de Resultados.

Se tomaron los datos de un artículo publicado por el Hydrocarbon Processing<sup>(8)</sup>, la comparación de resultados es la siguiente:

	PUBLICACION*	MODELO**
Coef. dispersión $\sigma_y$	220 m	220 m
Coef. dispersión $\sigma_z$	170 m	170 m
Factor F	70.44 m <sup>4</sup> /s <sup>3</sup>	70.51 m <sup>4</sup> /s <sup>3</sup>
Distancia $X_d$	652.6 m	652.92 m
Incremento $\Delta H$	138 m	138.19 m
Altura efectiva H	188 m	188.19 m
Concentración Calculada.	13.0 mg/m <sup>3</sup>	12.81 mg/m <sup>3</sup>

\* Resultados que aparecen en la referencia 8.

\*\* Resultados que aparecen en el punto 4.2. de este trabajo.

Se simularon los datos con el mismo modelo (Isoconcentración), siguiendo la lógica del pseudocódigo mostrado en el Anexo IV; el resultado que se obtuvo fue muy semejante al reportado por el artículo citado, la diferencia que se obtuvo al comparar ambos resultados fué del 3%, lo cual es bastante aceptable y en este sentido el modelo es confiable.

## 5.2 Conclusiones Generales.

Algo de lo más relevante del presente estudio es que permite analizar un evento con el cual, simulando el modelo de Isoconcentración y su detonación (si es el caso), se visualizan los riesgos probables en forma global.

Referente al cálculo del aumento de la elevación de la pluma, se optó por el método de Briggs para estimar la altura efectiva de la chimenea o venteo, siendo éste uno de los parámetros sensibles en cuanto a diseñar o reestructurar la fuente emisora, ya que de ésta depende el cálculo de concentración máxima, muchas ecuaciones empíricas y semiempíricas han sido desarrolladas para estimar esta elevación; la ecuaciones de Briggs son de las más usadas en otros modelos simulados, ejemplo de esto se muestra en la publicación de Arce y Saldaña<sup>9</sup>. De igual manera SEDESOL eliminó el cálculo de elevación de pluma que utilizaba la ecuación de Holland y adoptó el método de Briggs, ya que con la primera se producía un sobrediseño en la altura física de chimeneas o venteos<sup>9</sup>, implicando esto último altos costos de construcción.

El trabajo desarrollado en esta tesis deja abierta la posibilidad de ampliar o profundizar varios aspectos. Uno de estos puntos que se sugiere es el referente al tratamiento para gases más pesados que el aire.

PROGRAMA DE TESIS PROFESIONAL  
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUT.

PRESENTAN:

MARIO PEREZ MARIN.  
RODOLFO ZENDEJAS LOERA.

LA SIMULACION DE DISPERSION DEL MODELO DE ISOCONCENTRACION.

DATOS DE ENTRADA:

FLUJO MASICO TOTAL (LB/HR):	79295.15
VELOCIDAD DEL VIENTO (M/SEG):	3.60
FRACCION PESO DEL CONTAMINANTE:	1.00
ALTURA DEL QUEMADOR (M):	50.00
PRESION ATMOSFERICA (PSIA):	14.70
TEMPERATURA DEL FLUIDO (GC):	200.00
TEMPERATURA AMBIENTE (GC):	30.00
PESO MOLECULAR PROMEDIO :	28.00
DIAMETRO INTERNO DEL QUEMADOR (PULG):	78.74
FLUJO VOLUM (M3/S):	62.83

\*\*\*\*\* R E S U L T A D O S \*\*\*\*\*

PERFIL DE CONCENTRACIONES - MODELO DE DISPERSION EN VENTEO

CONTAMINANTE: MONOXIDO DE CARBONO.  
VELOCIDAD DE EMISION DEL CONTAMINANTE (M/SEG): 19.9994  
FLUJO DEL CONTAMINANTE (G/SEG): 9999.118

LONGITUD (M): 1500.0  
ALTURA (M): .0

CONDICION DE VIENTO : 2 CONCENTRACION (MICRO GR/M3) : 13412.93  
ALTURA EFECTIVA DE QUEMADOR (M): 188.11

DESCRIPCION

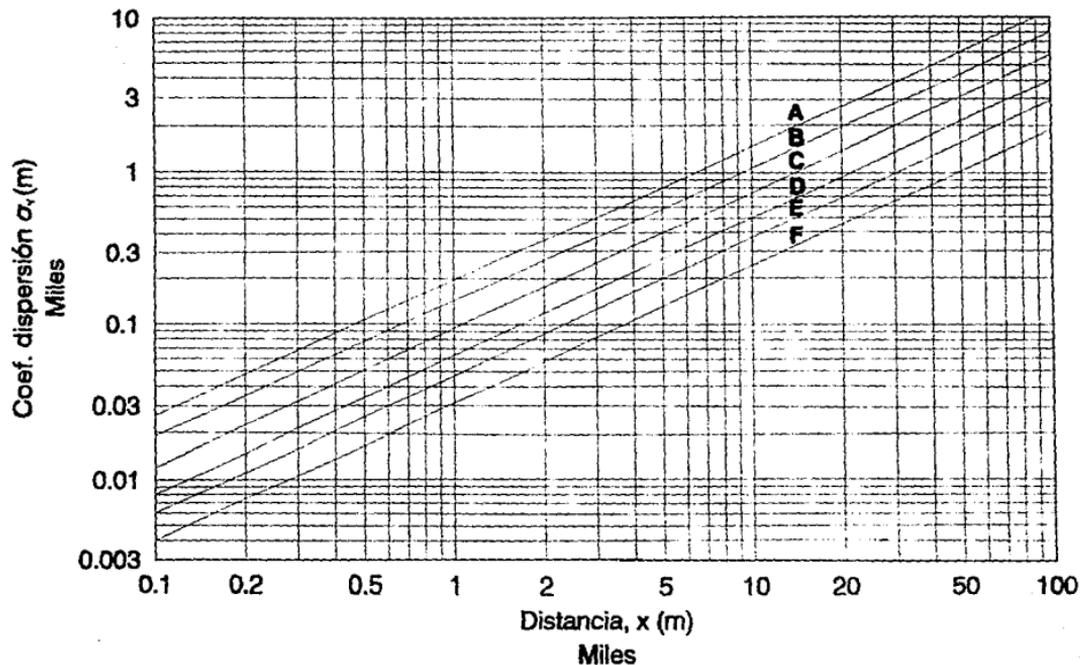
CONDICION DE VIENTO:

- 1:VIENTO MUY INESTABLE.
- 2:VIENTO MODERADAMENTE INESTABLE.
- 3:VIENTO LIGERAMENTE INESTABLE.
- 4:VIENTO NEUTRO.
- 5:VIENTO LIGERAMENTE ESTABLE.
- 6:VIENTO MODERADAMENTE ESTABLE.

ANEXO I

# ANEXO II.A

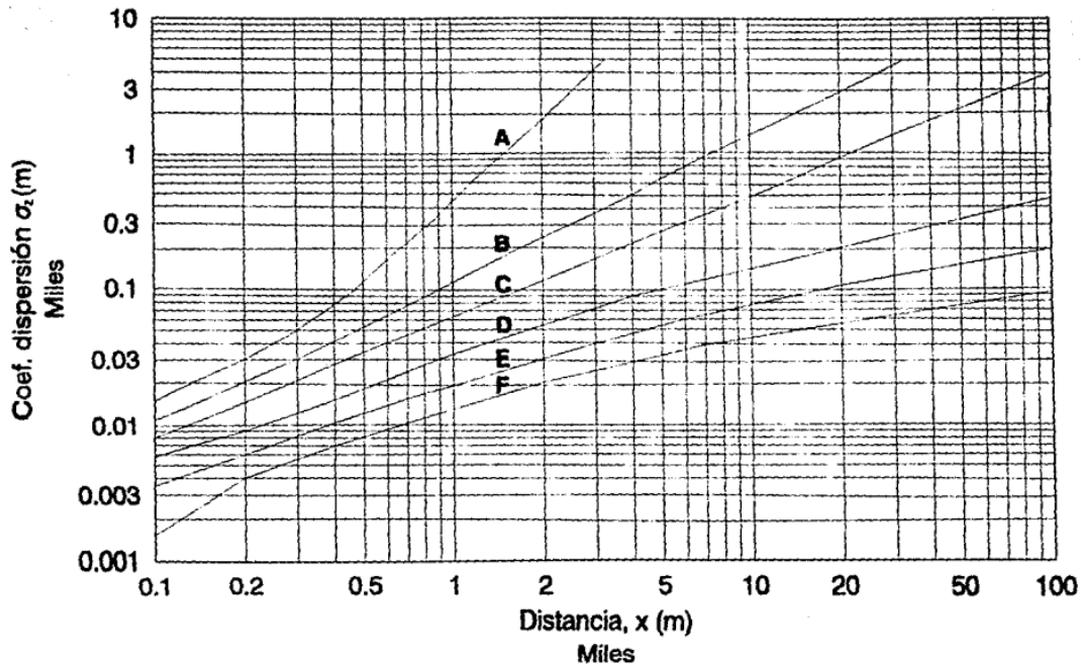
## GRAFICA DE COEFICIENTE DE DISPERSION EN EJE Y.



Parámetros meteorológicos referidos a las categorías de Pasquill.

## ANEXO II.B

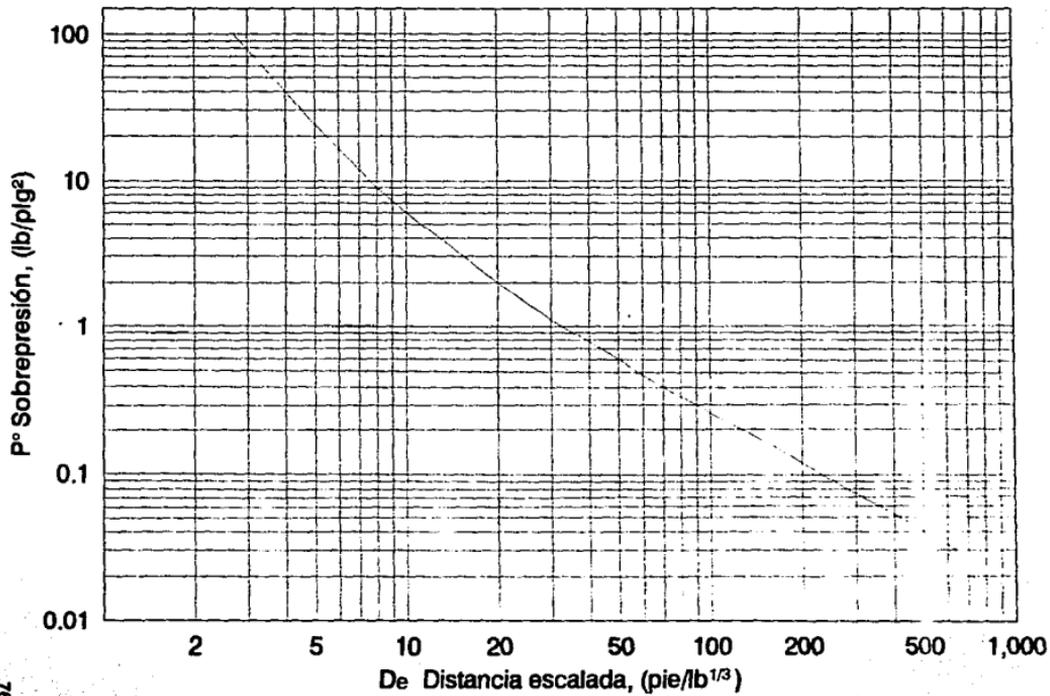
### GRAFICA DE COFICIENTE DE DISPERSION EN EJE Z.



Parámetros meteorológicos referidos a las categorías de Pasquill.

# ANEXO III

## GRAFICA DE SOBREPRESION.



## ANEXO IV

### PSEUDOCODIGO DEL PROGRAMA.

En este anexo se presenta el pseudocódigo del programa desarrollado en este trabajo, tomando como base las memorias de cálculo desarrolladas en el capítulo 4. se eligió el pseudocódigo en lugar del diagrama de flujo por considerarse éste último obsoleto, ya que con el primero su implantación a cualquier lenguaje estructurado de alto nivel es casi inmediata.

IMPRIMIR : "Presentación".

ESCRIBIR : "Proporcione los siguientes datos en el orden en que se piden. Tecleando ENTER después de introducir cada uno :

<CON>	Contaminante
<Q1>	Flujo Másico Total (lb/hr)
<V>	Velocidad del Viento (m/s)
<X>	Fracción Peso del contaminante (%wt)
<HS>	Altura Física del Venteo (m)
<LX>	Distancia Máxima a Analizar (m)
<LZ>	Altura a Analizar (m)
<B>	Número de Puntos Requeridos en el Eje X
<M>	Número de Puntos Requeridos en el Eje Z (altura)
<P>	Presión Atmosférica (psia)
<TF>	Temperatura del Fluido (°C)
<TA>	Temperatura Ambiente (°C)
<PM>	Peso Molecular Promedio (g/gmol)
<DQ>	Diámetro Interno del Venteo (pulg)
<C>	Condición Atmosférica del Viento
<FV>	Flujo Volúmetrico (m <sup>3</sup> /s)
<LIF>	Límite Inferior de Flamabilidad (%v/v)
<LSF>	Límite Superior de Flamabilidad (%v/v)*

LEER : CON,Q1,V,X,HS,LX,LZ,B,M,P,TF,TA,PM,DQ,C,FV,LIF,LSF

## CALCULO DE DISPERSION

$$Q = Q1 \times 0.1261$$

$$Q2 = Q \times X$$

$$TFI = TF + 273$$

$$TAI = TA + 273$$

$$P1 = \frac{P}{14.7}$$

$$D1 = DQ \times 0.0254$$

$$W = \frac{4 \times FV}{\pi \times D1^2}$$

$$F = \frac{9.8 \times W \times D^2}{4} \left( \frac{TFI - TAI}{TFI} \right)$$

SI ( C es diferente de 5  $\cup$  C es diferente de 6 ) ENTONCES

SI ( F mayor de 55 ) ENTONCES

$$XA = 119F^{\frac{2}{5}}$$

DE LO CONTRARIO

$$XA = 49F^{\frac{5}{8}}$$

FIN DE SI

SI ( XA mayor que LX ) ENTONCES

$$DH = \frac{1.6 \times F^{\frac{1}{3}} \times LX^{\frac{2}{3}}}{V}$$

DE LO CONTRARIO

$$DH = \frac{1.6 \times F^{\frac{1}{3}} \times XA^{\frac{2}{3}}}{V}$$

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

FIN DE SI

DE LO CONTRARIO

SI ( C igual que 5 ) ENTONCES

$$S = \frac{0.02 \times 9.8}{TAI}$$

DE LO CONTRARIO

$$S = \frac{0.035 \times 9.8}{TAI}$$

FIN DE SI

$$XA = \frac{3.14 \times V}{\sqrt{S}}$$

SI ( XA mayor que LX ) ENTONCES

$$DH = \frac{1.6 \times F^{\frac{1}{3}} \times LX^{\frac{2}{3}}}{V}$$

DE LO CONTRARIO

$$DH1 = \frac{2.4 \times F^{\frac{1}{3}}}{V \times S}$$

$$DH2 = 5 \times F^{\frac{1}{4}} \times S^{\frac{3}{8}}$$

SI ( DH1 mayor que DH2 ) ENTONCES

$$DH = DH2$$

DE LO CONTRARIO

$$DH = DH1$$

FIN DE SI

FIN DE SI

FIN DE SI

ESCRIBIR : Q1,V,X,HS,P,TF,PM,DQ,FV,LIF,LSF,CON,W,Q2

$$I = 0$$

$$10 \quad I = I + \frac{LX}{B}$$

$$Z2 = 0$$

$$121 \quad Z2 = Z2 + \frac{LZ}{M}$$

ESCRIBIR : "Longitud (m)" : I  
"Altura (m)" : Z2

SI ( C igual a 1 ) ir a 13

SI ( C igual a 2 ) ir a 15

SI ( C igual a 3 ) ir a 17

SI ( C igual a 4 ) ir a 18

SI ( C igual a 5 ) ir a 20

SI ( C igual a 6 ) ir a 22

$$13 \quad H = HS + DH$$

SI ( I mayor que 300 ) IR a 14

$$\sigma_y = 0.493 \times I^{0.68}$$

$$\sigma_z = 0.087 \times I^{1.10}$$

IR a 24

$$14 \quad \sigma_y = 0.493 \times I^{0.68}$$

$$\sigma_z = 10^{(-1.67 + 0.90 \text{LOG}(I) + 0.011(\text{LOG}(I))^2)}$$

IR a 24

$$15 \quad H = HS + DH$$

SI ( I mayor que 500 ) IR a 16

$$\sigma_y = 0.337 \times I^{0.68}$$

$$\sigma_z = 0.135 \times I^{0.198}$$

IR a 24

$$16 \quad \sigma_y = 0.337 \times I^{0.68}$$

$$\sigma_z = 10^{(-1.25 + 1.09 \text{LOG}(I) + 0.0011(\text{LOG}(I))^2)}$$

IR a 24

17  $H = HS + DH$

$$\sigma_Y = 0.195 \times I^{0.90}$$

$$\sigma_Z = 0.112 \times I^{0.91}$$

IR a 24

18  $H = HS + DH$

SI ( I mayor que 500 ) IR a 19

$$\sigma_Y = 0.128 \times I^{0.90}$$

$$\sigma_Z = 0.093 \times I^{0.85}$$

IR a 24

19  $\sigma_Y = 0.128 \times I^{0.90}$

$$\sigma_Z = 10^{(-1.22 + 1.08 \text{LOG}(I) - 0.061(\text{LOG}(I))^2)}$$

IR a 24

20  $H = HS + DH$

SI ( I mayor que 500 ) IR a 21

$$\sigma_Y = 0.091 \times I^{0.91}$$

$$\sigma_Z = 0.082 \times I^{0.82}$$

IR a 24

21  $\sigma_Y = 0.091 \times I^{0.91}$

$$\sigma_Z = 10^{(-1.19 + 1.04 \text{LOG}(I) - 0.07(\text{LOG}(I))^2)}$$

IR a 24

22  $H = HS + DH$

SI ( I mayor que 500 ) IR a 23

$$\sigma_Y = 0.067 \times I^{0.90}$$

$$\sigma_Z = 0.057 \times I^{0.80}$$

IR a 24

23  $\sigma_Y = 0.067 \times I^{0.90}$

$$\sigma_Z = 10^{(-1.91 + 1.37 \text{LOG}(I) - 0.119(\text{LOG}(I))^2)}$$

IR a 24

$$24 \quad A = \frac{1E6 \times Q2}{2\pi\sigma_1\sigma_2V} \left\{ \exp \left[ \frac{-1 \left( \frac{Z2-H}{\sigma_2} \right)^2}{2} \right] + \exp \left[ \frac{-1 \left( \frac{Z2+H}{\sigma_2} \right)^2}{2} \right] \right\}$$

ESCRIBIR : C,A,H

$$RI = 1,218.788 \times PM \times LIF^2 / T$$

$$RS = 1,218.788 \times PM \times LSF^2 / T$$

ESCRIBIR : RI,RS

SI (A mayor que RI  $\cap$  A menor que RS) ENTONCES

ESCRIBIR : "Existe la Posibilidad de Explosión, pues la Concentración se Encuentra entre Lím.Inf.Flam. y Lím.Sup.Flam."

DE LO CONTRARIO

ESCRIBIR : "No Existe la Posibilidad de Explosión, pues la concentración no está entre Lím.Inf.Flam. y Lím.Sup.Flam."

FIN DE SI

SI (Z2 menor que LZ) IR a 121

SI (I menor que LX) IR a 10

ESCRIBIR : "

Descripción :

Condición de Viento 1 : Viento Muy Inestable  
 Condición de Viento 2 : Viento Moderadamente Inestable  
 Condición de Viento 3 : Viento Ligeramente Inestable  
 Condición de Viento 4 : Viento Neutro  
 Condición de Viento 5 : Viento Ligeramente Estable  
 Condición de Viento 6 : Viento Moderadamente Estable "

IR a 41

41 DETENER

FIN DEL PROGRAMA

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 1.- American Petroleum Institute. RP-931, Chapter 3. Limits and Regulations. 1974.
- 2.- National Fire Protection Agency. 325 M, 1977.
- 3.- Dinámica Heurística S.A. Sistema de Información Rápida de Impacto Ambiental (S.I.R.I.A.). México, 1986. Vols. I y II.
- 4.- American Petroleum Institute. RP-931, Chapter 6. Dispersion of Gases. 1974.
- 5.- Less, P Frank. Loss Prevention Process, Vol. I y II. Ed: Butterflows, London, 1985.
- 6.- American Petroleum Institute. Sizing Valves Relief. RP-520, 1992.
- 7.- J. C. Mecklenburgh. Process Plant Layout. George Godwin, New York, 1985.
- 8.- Arca y Saldaña. Un Modelo de Fácil Uso para Evaluar la Dispersión de Gases Contaminantes a través de Microcomputadoras. (memorias de 1983, Tabasco), México, I.M.I.Q., 1993.
- 9.- Finch and Serth. Model Air Emission Better. Hydrocarbon Processing, Enero. 1980. U.S.A..

- 10.- Bouzas, Fraguero y Figueiras. Estudios de Dispersión de Contaminantes Atmosféricos. Ingeniería Química, Núm. 299 Abril de 1993, Madrid.
- 11.- American Petroleum Institute. RP-952. Estudios Modelos Dispersión. 1980.
- 12.- Diario Oficial de la Federación. Miércoles 28 de marzo de 1990. y Lunes 4 de mayo de 1992. México
- 13.- Meyer, Eugene. Chemistry of Hazardous Materials. Prentice Hall, New Jersey, 1989.
- 14.- Institute Toxic International. Toxic and Hazardous Industrial Chemicals Safety Manual. Tokio, 1988.
- 15.- Rábago Villaseñor, Jesús. Ingeniería en Prevención de Riesgos en Plantas Industriales. U.N.A.M. (Faculta de Ingeniería), México, 1994.
- 16.- García Nava, Rafael; Carlos Alonso Leyva. Análisis de Riesgos en Plataformas Marinas. Revista del Instituto Mexicano del Petróleo, Vol. XX, No. 1, Enero 1988.
- 17.- Cepeda, Ricardo; Noé Arenas Dávila; Norah Medina López. Ciencias de la Tierra I. Módulos I a III. Colegio de Bachilleres. Editorial Patria, México, 1985.
- 18.- Burgess & Zabetakis. Detonation of Flammable Cloud Following a Propane Pipeline Break. National Bureau Mines, Washington, 1970.