



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLÁN**



V N A M

DISEÑO DE QUEMADORES ELEVADOS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUIMICO

P R E S E N T A N

ALMA PATRICIA CALIZ MORALES

EDUARDO MONROY GAMBOA

ASESOR: I. Q. ARIEL BAUTISTA SALGADO

CUAUTITLÁN IZCALLI EDO. DE MÉXICO

1993

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



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.

CONTENIDO

- I. *Introducción*
- II. *Objetivos*
- III. *Antecedentes*
 - III.1. *Sistema de Desfogue*
 - III.2. *Objetivos del Sistema de Desfogue*
 - III.3. *Causas de Sobrepresión*
 - III.3.1. *Fallas operacionales*
 - III.3.2. *Fuego en Planta*
 - III.4. *Clasificación del Sistema de Desfogue*
 - III.4.1. *Sistema Abierto*
 - III.4.2. *Sistema Cerrado*
 - III.4.3. *Sistema de Recuperación o Recirculación*
 - III.5. *Elemento final del Sistema Cerrado (Quemadores)*
- IV. *Quemadores Elevados*
 - IV.1. *Generalidades*
 - IV.2. *Ventajas y Desventajas de los Quemadores Elevados*
 - IV.3. *Componentes del Sistema de Desfogue*
 - IV.4. *Tipos de Soportes de Quemadores Elevados*
 - IV.4.1. *Autosoportados*
 - IV.4.2. *Soportados con Estructura*
 - IV.4.3. *Cableados*
 - IV.4.4. *Costos relativos de acuerdo al tipo de soporte*
 - IV.5. *Características del Quemador Elevado*
- V. *Variables de Diseño*
 - V.1. *Capacidad Máxima del flujo a relevar*
 - V.1.1. *Estimación de flujo a Relevar por fallas Operacionales*
 - a) *Descarga Bloqueada*
 - b) *Falla agua de Enfriamiento*

- c) *Falla de Reflujo*
- d) *Ruptura de Tubos*
- e) *Expansión Hidráulica de Líquidos*
- f) *Falla de energía eléctrica*
- g) *Falla de instrumentos por falta de aire.*
- h) *Reacción Química*
- V.1.2. *Estimación de flujo a Relevar por fuego en planta.*
 - a) *Area Mojada*
 - b) *Calor absorbido*
- V.1.3 *Criterios de reduccion de masas a relevar.*
- V.2 *Propiedades del flujo a relevar*
 - V.2.1 *Propiedades Físicas del Fluido*
 - a) *Densidad*
 - b) *Presión de vapor.*
 - c) *Punto de flasheo y Limite de flamabilidad*
 - i) *Límite Mínimo de flamabilidad*
 - ii) *Límite inferior de flamabilidad*
 - u) *Temperatura de Autoignición*
 - V.2.2 *Propiedades Químicas del Fluido*
 - a) *Calor de Reacción*
 - V.2.3 *Propiedades Fisiológicas del Fluido*
 - a) *Toxicidad*
 - b) *Olor*
 - c) *Ruido*
- V.3 *Velocidad del Fluido*
 - V.3.1 *Número de Mach*
 - V.3.2 *Tipos de Flamas*
 - V.3.3 *Patrón de Flujo*
- V.4 *Condiciones atmosféricas del Medio Ambiente*
 - V.4.1 *Características de la zona*
 - V.4.2 *Temperatura y Presión Atmosférica*
 - V.4.3 *Viento*

- V.5 *Fenómenos Difusionales (Dispersión de de Contaminantes)*
 - V.5.1 *Descripción del Fenómeno*
 - V.5.2 *Dispersión de Gases venteados a la atmósfera*
 - V.5.3 *Dispersión de Gases productos de una combustión atmosférica*
 - V.5.4 *Algoritmo de Cálculo*
- V.6 *Radiación*
 - V.6.1 *Fenómenos de Radiación*
 - V.6.2 *Emisividad de Flamas Luminosas*
 - V.6.3 *Emisividad de Flamas no Luminosas*
 - V.6.4 *Efectos de la Radiación en el Ambiente*
 - V.6.5 *Umbral del dolor por Radiación en los seres humanos*
- V.7 *Localización del Quemador*
 - V.7.1 *Quemador elevado como fuente de ignición*
 - V.7.2 *Quemador elevado como fuente de emisión de Radiación y efluentes tóxicos o flamables.*
 - V.7.3 *Localización en Planta Nueva*
 - V.7.4 *Localización en Planta Existente*

VI *Métodos de Cálculo*

- VI.1 *Método de Kent*
 - VI.1.1 *Diámetro del Quemador*
 - VI.1.2 *Altura del Quemador*
 - a) *Caso de viento Tranquilo*
 - b) *Caso distorsión de la flama por efecto del viento*
 - VI.1.3 *Algoritmo de Cálculo*
- VI.2 *Método "American Petroleum Institute"*
 - VI.2.1 *Diámetro del Quemador*
 - VI.2.2 *Altura del Quemador*
 - VI.2.3 *Dispersión de Contaminantes (Método Gráfico)*
 - VI.2.4 *Algoritmo de Cálculo*

- VI.3 Método de Soe Tan
 - VI.3.1 Diámetro del Quemador
 - VI.3.2 Altura del Quemador
 - VI.3.3 Algoritmo de Cálculo
- VI.4 Método Brzustowski
 - VI.4.1 Diámetro del Quemador
 - VI.4.2 Altura del Quemador
 - VI.4.3 Algoritmo de Cálculo
- VI.5 Comparación de los Métodos de Dimensionamiento
 - VI.5.1 Diámetro
 - VI.5.2 Centro de Flama
 - VI.5.3 Deformación de la flama por efecto del viento .

VII Características de Operación

- VII.1 Emisión de Humo
 - VII.1.1 Oxígeno en la zona de Quemado
 - VII.1.2 Temperatura en la zona de Combustión
 - VII.1.3 Tipo de Fluido a Quemar
 - VII.1.4 Control de humo
- VII.2 Generación de Ruido
 - VII.2.1 Ondas de Frecuencia
 - VII.2.2 Generación de Ruido por la Combustión
 - VII.2.3 Efectos en la intensidad del ruido por la inyección de vapor.
 - VII.2.4 Condensación súbita de humedad
 - VII.2.5 Oscilaciones en el Tanque de Sello

VIII Especificaciones

- VIII.1 Consideraciones generales
- VIII.2 Tanque de remoción de condensados del gas a quemador (knock-out Drum)
- VIII.3 Prevención del retroceso de flama
 - a) Sello Molecular
 - b) Sello fluidoico
 - c) Arrestador de Flama

	UJ	Bases de purga
VIII.4		Pilotos
VIII.5		Materiales de Construcción
VIII.6		Normas
IX.		Ejemplo de Aplicación
IX.1		Planteamiento
IX.2		Condiciones de Operación
	IX.2.1	Bases de Operación
	IX.2.2	Bases de Proceso
	IX.2.3	Capacidad de la planta y especificación de los productos
	IX.2.4	Bases de Diseño del Sistema de Desfogue y Quemadores
	IX.2.5	Condiciones climatológicas
IX.3		Causas del Desfogue
	IX.3.1	Análisis de Fallos
IX.4		Condiciones críticas
IX.5		Cálculo del Quemador
	IX.5.1	Método KENT
	IX.5.2	Método A.P.I.
	IX.5.3	Método TAIN
	IX.5.4	Método Brzustowski
	IX.5.5	Simulaciones
IX.6		Cálculo de la altura del Quemador por Dispersión de contaminantes
	IX.6.1	Reacción de Combustión
	IX.6.2	Planteamiento de los Eventos Posibles para la emisión de contaminantes
	IX.6.3	Cálculo de la altura del Quemador para el evento A
	IX.6.4	Método Riguroso para el Evento A
	IX.6.5	Método Gráfico para el Evento A
	IX.6.6	Cálculo de la altura del Quemador para el Evento B
	IX.6.7	Método Riguroso para el Evento B
	IX.6.8	Método Gráfico para el Evento B
IX.7		Conclusiones al Ejemplo
X.		Conclusiones Generales

XI Bibliografía

XII Apéndices

- XII.1 Niveles máximos permisibles de concentración de contaminantes (Sólidos, líquidos y gases)**
- XII.2 Propiedades de Compuestos Olorosos**
- XII.3 Efectos en la salud de Compuestos Olorosos**
- XII.4 Perfiles de Emisión en función de la estabilidad del viento y la altura efectiva de emisión**
- XII.5 Correlaciones para el cálculo de Coeficientes de dispersión**
- XII.6 Conversión de partes por millón (ppm) en volumen a microgramos por metro cúbico.**
- XII.7 Prontuario de Normas Oficiales Mexicanas en materia de contaminación**
- XII.8 Prontuario de Normas y disposiciones Legales derivadas de la reglamentación de La Ley General del Equilibrio Ecológico y la protección al ambiente.**

C A P I T U L O I
I N T R O D U C C I O N

I. INTRODUCCION

En los tiempos Modernos, en los que se ha dado gran importancia a los asuntos ecológicos, el Ingeniero Químico Diseñador debe asumir una actitud renovada por realizar diseños de mayor productividad y eficiencia que logren el objetivo del Proceso Productivo Industrial con el menor impacto ambiental posible y sin menoscabo de la Seguridad tanto del personal, como de la infraestructura de la Planta.

Actualmente la mayor fuente de contaminación que produce la Industria Química y Petroquímica está relacionada con el manejo de los desechos sólidos, líquidos y/o gaseosos que se obtienen durante la operación normal de la planta o durante eventos extraordinarios del proceso.

El adecuado manejo de estos desechos en planta es una responsabilidad compartida entre los departamentos de Proceso, Mantenimiento y Seguridad Industrial, sin embargo, muchos de los problemas ecológicos actuales deben atacarse no solo durante la operación, si no desde el diseño mismo de los sistemas de manejo, control y disposición de estos desechos.

La Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) a través de la Procuraduría Federal del Medio Ambiente, ha restringido considerablemente los Niveles Máximos Permisibles de emisión de contaminantes sólidos o gaseosos a la atmósfera, lo cual hace necesario analizar las opciones de manejo de los desechos en la Industria actual y futura.

Específicamente, en el área Química y Petroquímica se tiene un gran interés en disponer de manera segura y con el menor impacto ambiental, de los desechos emitidos a la atmósfera, principalmente gases contaminantes como Bióxido de Carbono (CO₂), Acido Sulhídrico (H₂S), Bióxido de Sulfuro (SO₂) e Hidrocarburos, debido a los problemas de degradación atmosférica que se viven actualmente no solo en la Cd. de México, si no en todo el mundo.

Dentro de esta industria se tienen considerados tres tipos de sistemas que se utilizan para el manejo de los desechos líquidos, gaseosos o líquido-gas, los cuales son :

- * Sistemas Abiertos
- * Sistemas Cerrados
- * Sistemas de Recuperación o Recirculación

El primer sistema consiste en disponer de los desechos de la planta directamente hacia el medio ambiente (llámese aire, agua o suelo) y aunque es utilizado cuando las sustancias dispuestas no representan un peligro potencial al mismo, este tipo de sistemas tiende a desaparecer.

El segundo sistema se refiere a una infraestructura, tuberías y equipos de seguridad, básicamente diseñados para el manejo seguro de los desechos que pueden ser peligrosos tanto al personal como al medio ambiente y es utilizado para disponer de sustancias tóxicas o flamables.

El tercer sistema, como su nombre lo indica tiene como objetivo recuperar o reciclar los desechos de la planta, ya sea para su reutilización, almacenamiento, venta o disposición segura de ellos.

Cada sistema consiste en diferentes equipos de seguridad, transporte y manejo final de los fluidos de desecho.

El sistema abierto solo consta de los dispositivos de seguridad que envían los fluidos al ambiente, los cuales pueden ser válvulas de seguridad, discos de ruptura, venteos, etc.

Los sistemas cerrados y de recirculación o recuperación, consisten básicamente de tres secciones :

- a) Dispositivos de Seguridad (Válvulas de seguridad, control, etc)
- b) Tuberías de Transporte (Cabezales y subcabezales)
- c) Dispositivos de Manejo (Equipos de recuperación, reciclación, o Quemadores)

Los dispositivos de manejo de los sistemas cerrados son los quemadores, los cuales tienen la función de disponer de manera segura de los desechos tóxicos o flamables a través de la combustión controlada de los mismos para convertirlos en fluidos menos riesgosos.

En términos generales los quemadores pueden ser de 2 tipos:

- Quemadores de Fosa
- Quemadores Elevados

El presente trabajo está enfocado al diseño adecuado de un Equipo de Seguridad llamado Quemador tipo Elevado que es el elemento final de un Sistema Cerrado de disposición de Desechos gaseosos dentro de una planta. Cabe mencionar que un Quemador Elevado es un equipo diseñado para manejar en forma segura los desechos gaseosos provenientes del Sistema Productivo, mediante la transformación a través de la combustión controlada de dichos desechos tóxicos o inflamables en sustancias menos agresivas al medio ambiente.

Para lo cual se realiza un análisis detallado de cada una de las variables Físicoquímicas y Termodinámicas de las sustancias a disponer, así como de las variables ambientales, topográficas y físicas de la planta donde se requiera instalar este tipo de equipos, siempre con la finalidad de realizar un diseño óptimo, redituable, productivo y actualmente ecológico, hasta donde sea posible.

C A P I T U L O I I
O B J E T I V O S

II. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Estudiar y analizar los factores de diseño que intervienen en el dimensionamiento de un quemador elevado, así como analizar comparativamente los métodos de cálculo existentes.

OBJETIVOS PARTICULARES

1. Estudiar y analizar los Factores Termodinámicos de Diseño que intervienen en el dimensionamiento básico de un Quemador Elevado.
2. Estudiar y analizar los Factores Ambientales y Físicos de la planta que intervienen en el dimensionamiento básico de un Quemador Elevado.
3. Conocer los Métodos de Cálculo existentes para el dimensionamiento Básico del Quemador Elevado.
4. Analizar los Problemas de Operación que pueden presentarse durante la operación de un Quemador Tipo Elevado.
5. Tener conocimiento de las Normas Nacionales e Internacionales que deben considerarse en el diseño de estos equipos.
6. Realizar un ejemplo de aplicación del diseño de un Quemador Elevado, considerando datos reales de la Industria Actual.

C A P I T U L O I I I
A N T E C E D E N T E S

III. ANTECEDENTES

III. 1.) Sistema de Desfogue

Los sistemas de seguridad que existen en toda planta de Proceso para proteger al personal, al equipo y a las instalaciones durante un funcionamiento anormal del proceso son llamados Sistemas de Desfogue.

Estos sistemas son instalaciones utilizadas para manejar en forma adecuada los fluidos provenientes de los dispositivos de seguridad de la planta, los cuales actúan generalmente como respuesta a sobrepresiones del sistema.

El aumento de presión puede ser causado por las condiciones intrínsecas del proceso o por situaciones de emergencia tales como fuego, expansiones térmicas o fallas de servicios auxiliares.

La forma más práctica de proteger tanto al personal como al equipo es a través de válvulas de seguridad o alivio de presión, las cuales serán diseñadas para operar a una presión determinada, tomando en cuenta la presión de diseño del equipo o línea que se desee proteger.

Existen otros dispositivos de seguridad que pueden ser utilizados de acuerdo con el tipo de Proceso y fluido a manejar. Por ejemplo, se pueden colocar venteos atmosféricos o discos de ruptura cuando el fluido a manejar no sea tóxico o no presente peligros de explosión o en casos extremos, en que no se disponga del equipo necesario para su manejo adecuado.

III. 2.) Objetivos del Sistema de Desfogue

En cada proceso los dispositivos de seguridad pueden ser distintos, pero en todos los casos el Sistema de desfogue debe cumplir con los siguientes objetivos :

- * Proteger al personal
- * Prevenir explosiones e incendios
- * Proteger el equipo mayor y las instalaciones
- * Proteger el medio ambiente y las poblaciones circunvecinas
- * Cumplir con Códigos y Normas Locales e Internacionales
- * Reducir las pérdidas de materiales durante el desfogue
- * Disminuir al mínimo los eventos de paro de planta
- * Reducir las indemnizaciones y las Primas de seguros por accidentes

Estos objetivos nos hacen ver que un sistema de desfogue adecuadamente diseñado puede ser determinante en la Vida Útil de la planta, por lo tanto es de suma importancia la selección de los dispositivos de seguridad. Para realizar esta selección se deben prevenir y analizar las posibles causas del desfogue dependiendo del tipo de proceso y del fluido que maneja.

III. 3.) Causas de Sobrepresión

Las principales causas de sobrepresión del sistema pueden ser clasificadas en 2 grupos :

GRUPO I. Fallas Operacionales

GRUPO II. Fuego en Planta

III. 3.1.) Fallas Operacionales

Las fallas Operacionales típicas son causadas por descargas bloqueadas en recipientes, apertura inadvertida de válvulas y fallas en servicios, entre otras.

El cierre inesperado de una válvula de bloqueo a la descarga de un recipiente puede causar que la presión del mismo exceda la presión máxima permisible y por lo tanto dé lugar a posibles fracturas o explosión del recipiente.

De la misma manera una válvula de bloqueo abierta bruscamente desde una fuente de muy alta presión, por ejemplo una corriente de vapor de alta, conectado a un sistema de baja presión puede causar una sobrepresión peligrosa en el sistema si excede a la presión de trabajo máxima permisible.

Las fallas de Servicios son extremadamente peligrosas ya que pueden afectar a diferentes equipos a la vez y provocar desfogues de alto flujo y presión.

A continuación se listan las fallas de Servicios más comunes y los equipos que se ven afectados por tal situación.

TABLA 3.1
FALLAS DE SERVICIOS

FALLA DE SERVICIO	EQUIPO AFECTADO
Energía Eléctrica	<ol style="list-style-type: none"> 1. Bombas de agua de enfriamiento, alimentación a calentadores o reflujo. 2. Ventiladores para intercambiadores Aire-Agua de enfriamiento o torres de enfriamiento. 3. Compresores para gas de proceso, Aire de instrumentos, vacío o refrigeración. 4. Instrumentos eléctricos. 5. Válvulas operadas por motor.
Agua de Enfriamiento	<ol style="list-style-type: none"> 1. Condensadores de proceso o de servicios. 2. Enfriadores de fluidos de proceso, aceites lubricantes o de sello para bombas o compresores. 3. Enchafetado en equipo reciprocante o rotatorio.
Aire de Instrumentos	<ol style="list-style-type: none"> 1. Transmisores y controladores. 2. Válvulas para regulación de proceso. 3. Sistemas de alarma y paro.
Vapor	<ol style="list-style-type: none"> 1. Turbinas para bombas, compresores o generadores. 2. Rehervidores. 3. Bombas reciprocantes. 4. Inyección de vapor usada directamente en el proceso. 5. Eyectores.
Combustible	<ol style="list-style-type: none"> 1. Caldera de vapor de proceso. 2. Rehervidores. 3. Calentadores de proceso. 4. Calentadores de Servicios. 5. Turbinas de gas.

Otras causa de relevo por fallas operacionales están dadas por las siguientes situaciones inesperadas:

- Fallas de reflujo en Columna de Destilación
- Falla en tubos de Intercambiador de calor.

- * Explosión Interna
- * Reacción Química
- * Expansión Térmica
- * Acumulación de Incondensables

III.3.2.) Fuego en Planta

Los desfuegos causados por fuego en planta, se presentan en cualquier equipo de proceso que maneje gases o líquidos inflamables, que pueden estar expuestos al fuego o a alguna fuente de ignición en cualquier momento durante su operación normal.

Es una situación de fuego, el calor generado será absorbido por el recipiente u otro equipo expuesto a las flamas.

Si esta absorción de calor continúa se desarrollará una sobrepresión dentro del recipiente por generación de vapor o expansión del fluido. Por lo tanto se requiere una válvula de relevo para proteger al recipiente y desfogar el vapor generado de manera segura.

III.4.) Clasificación del Sistema de Desfogue

La Selección del sistema depende del tipo de proceso, de las propiedades físicas y químicas de los fluidos y de su influencia sobre el medio ambiente.

Los sistemas de desfogue se clasifican básicamente en 3 grupos :

- * Sistema Abierto
- * Sistema Cerrado
- * Sistema de Recuperación o Recirculación

III.4.1.) Sistema Abierto

Se utiliza en el manejo de sustancias que no presentan reacción con el aire, que no forman mezclas explosivas o inflamables con el mismo y que no sean tóxicas, ya que el sistema abierto consiste en desfogar el fluido relevado directamente a la atmósfera, cuando se presenta la situación de emergencia. Por lo tanto el sistema de desfogue abierto está compuesto únicamente de dispositivos de seguridad directos a la atmósfera, como son :

- * Ventosas
- * Válvulas de Seguridad
- * Discos de Ruptura

III.4.2) Sistema Cerrado

Generalmente son usados cuando los fluidos a manejar son sustancias tóxicas o inflamables, ya que este sistema tiene como objetivo conducir el fluido relevado a instalaciones más seguras para su manejo a quemado adecuado. Este sistema está compuesto por :

- * Dispositivos de seguridad
- * Cabezales y subcabezales
- * Sistema de Separación Líquido-vapor
- * Quemador

III.4.3) Sistema de Recuperación o Recirculación

Un sistema de recuperación se utiliza para productos de alto valor económico o que su combustión puede resultar riesgosa. De esta forma el fluido es conducido hacia un sistema o proceso de recuperación (física o química), recirculación, neutralización o formación de productos menos riesgosos. Este sistema está integrado por :

- * Dispositivos de seguridad
- * Cabezales y ramales
- * Equipo para el proceso de recuperación o neutralización

III.5.) Tipos de Quemadores

Existen básicamente 2 tipos de Quemadores para los *Sistemas Cerrados* :

- a) Quemador Elevado
- b) Quemador de Fosa

En el sistema de quemador elevado las reacciones de combustión son llevadas a cabo en la punta de la chimenea, donde se localizan el quemado e ignición. El quemador de fosa está equipado en forma similar a excepción de que el lugar de la combustión está a nivel de piso (fosa).

En general se utilizan 3 tipos de quemadores de fosa :

1. El tipo que utiliza un rociado de agua (spray) para dispersar el fluido de combustión, generalmente líquido-gas.
2. El tipo venturi, que depende de la energía cinética disponible en los gases de desecho para llevar a cabo la mezcla proporcional de gas-aire.

3. El tipo Multijet, donde le flujo de los gases de desecho es distribuido a través de muchos quemadores pequeños.

Más adelante se describirán algunos aditamentos que se le han agregado a los quemadores para aumentar su eficiencia de combustión, como son el efecto coanda, entre otros.

C A P I T U L O I V
Q U E M A D O R E S E L E V A D O S

IV. QUEMADORES ELEVADOS

IV.1.) Generalidades

Los quemadores elevados son ampliamente usados en la industria de refinación y petroquímica para quemar desechos de gas combustible y su uso ahora se ha incrementado en la industria química de proceso.

Los primeros quemadores consistían en una línea elevada que quemaba continuamente gases de desecho, pero debido a los problemas de ruido, humo, retroceso de flama e inseguridad que presentaron, se vieron modificados poco a poco hasta llegar a los Quemadores Elevados que se conocen hoy en día.

El diseño completo del Quemador involucra un número importante de consideraciones como altura, configuración de la chimenea, pilotos, sistemas de ignición y reducción de humo, entre otras. El sistema de desfoque cerrado surge a raíz de que las regulaciones ambientales determinaron que los efluentes de hidrocarburos no deberían ser venteados a la atmósfera. Además con el incremento de los costos de materias primas en la Industria Química y de Refinación, se pensó en la necesidad de crear métodos de manejo y recuperación de materiales, de tal forma que las pérdidas por este concepto fuesen mínimas.

El Quemador Elevado surge como dispositivo final de un sistema de desfoque cerrado, para convertir los vapores tóxicos, flamables o corrosivos a compuestos menos riesgosos a través de su transformación por medio de la combustión.

Aunque en términos generales el quemador elevado debe estar diseñado para manejar la mayor cantidad de fluido en la emergencia más crítica, también es posible realizar una separación de la corriente, de tal forma que una parte de esta pueda ser reutilizada en distintos procesos y la otra sea enviada totalmente al quemador, reduciendo así las pérdidas de materiales.

Los quemadores no son diseñados para operar continuamente bajo condiciones normales de proceso, sin embargo, durante el arranque o paro de una planta pueden estar operando en forma continua durante 6 o 7 días, debido a que el sistema no se encuentra bajo condiciones estables y los productos no están a las especificaciones deseadas, por lo cual se hace necesario el desfoque.

En ocasiones los quemadores de fosa resultan atractivos desde el punto de vista económico, con respecto a los quemadores elevados; pero la

posibilidad de que el quemador de fosa se apague por condiciones atmosféricas (viento) y se presenten concentraciones de contaminantes peligrosas a nivel de piso, es una gran desventaja de este tipo de quemadores.

Aunque estos problemas por viento también pueden presentarse en Quemadores elevados, las fallas por esta causa pueden prevenirse considerando un Quemador suficientemente alto, que evite así explosiones o concentraciones tóxicas de gases no quemados a nivel de piso o a otros niveles de operación en el momento de la falla de flama por viento.

En algunos casos otros factores como daño potencial a estructuras cercanas al quemador, determinan una chimenea más alta.

La conveniencia de colocar un quemador en planta depende de muchos factores como son :

- * Propiedades del gas a quemar
- * Composición
- * Cantidad de fluido
- * Niveles de presión y temperatura
- * Disponibilidad de espacio
- * Costos de Inversión y mantenimiento

Estas consideraciones son más estrictas cuando la planta se encuentra cercana a zonas residenciales debido a los problemas de contaminación por humo, ruido y luminosidad de la flama principalmente.

IV.2) Ventajas y Desventajas de los Quemadores Elevado

Las principales ventajas que los quemadores elevados ofrecen son :

- * Requieren menor área con respecto al Quemador de Fosa.
- * Por su misma elevación, estos pueden ser colocados dentro del área de proceso o en la periferia de la planta.
- * Los efectos de radiación y las concentraciones de contaminantes a nivel de piso pueden mantenerse dentro de límites permisibles.
- * Los costos del tendido de líneas son menores debido a que los recorridos son más cortos.

- * La distancia entre el punto de descarga del dispositivo de seguridad y el quemador es menor que en el caso de quemador de fosa.

Los problemas o desventajas que presenta el quemador elevado son :

- * El costo inicial y de operación es más alto.
- * El mantenimiento es difícil y tedioso.
- * Alta visibilidad de la flama, que en ocasiones causa objeción por parte de la comunidad local.
- * Requiere más cantidad de vapor para evitar humo.
- * Los niveles de ruido son relativamente altos.

IV.3) Componentes del Sistema

Un sistema típico de desfogue cerrado con quemador elevado está constituido de la siguiente forma :

1. Válvulas de seguridad, relevo y/o depresurizantes.
2. Cabezales de relevo que conducen el fluido desalojado por la válvula a la unidad de quemado.
3. Tanque separador localizado antes del quemador con el fin de separar condensados o líquidos de los vapores relevados.
4. Quemador elevado consistente en la estructura elevada, sello molecular y la chimenea.

A continuación se da una descripción de estos componentes.

a) ESTRUCTURA ELEVADA

Normalmente consiste en 2 o más secciones. En la sección baja entra el cabezal proveniente del separador, el cual en ocasiones presenta una inclinación para que cualquier condensado acarreado no llegue al quemador. En esta parte baja también puede encontrarse un tanque de sello (normalmente de agua) que protegerá de la misma manera al quemador contra posibles retrocesos de flama. Este tanque de sello podrá estar o no integrado al quemador.

b) SELLO MOLECULAR

Está unido a la sección alta. Proporciona un sello contra la entrada de aire al interior de la chimenea y minimiza la posibilidad de formación de mezclas explosivas en el sistema. Específicamente se asemeja a un plato de borboteadores que ocasiona un sello usando la boyanza del gas de purga para crear una zona donde la presión es mayor a la presión atmosférica.

c) CHIMENEA

El extremo de la chimenea está unido completamente a la salida del sello molecular. Los accesorios en el extremo de la chimenea incluyen alrededor de 3 ó 4 pilotos de gas, dependiendo del diámetro de la boquilla, un número similar de pilotos de mezcla gas-aire ensamblados, y una boquilla de suministro de vapor para la inyección de este.

En la figura 4.1 se muestra un sistema de desfogue cerrado con quemador elevado.

El gas colectado de las válvulas de relevo y seguridad es llevado a un tanque horizontal o vertical (dependiendo de la relación líquido-gas) a través del cabezal principal. Cualquier condensado acarreado junto con los gases es separado aquí. El líquido es bombeado a un tanque de desperdicios o a instalaciones recuperadoras de aceites.

El gas del tanque separador es llevado al quemador. En la parte baja del mismo se encuentra el sello, pero otra alternativa consiste en que el sello puede estar entre el tanque y el quemador. Un sello de agua es muy seguro cuando se tiene un buen control de nivel.

La chimenea consiste de una sección alta, sello molecular y el (los) piloto(s) en la punta. En la parte de arriba, están los pilotos, los cuales prenden automáticamente de un control remoto a través de la línea de ignición o mediante arco eléctrico. La conexión de vapor es para quemado sin humo y la conexión de gas de purga es por mantener el sistema libre de aire y prevenir el retroceso de flama manteniendo la presión del sello molecular más alta que la presión atmosférica.

IV.4) Tipos de soportes

Generalmente existen 3 tipos de soportes para quemadores de tipo Elevado :

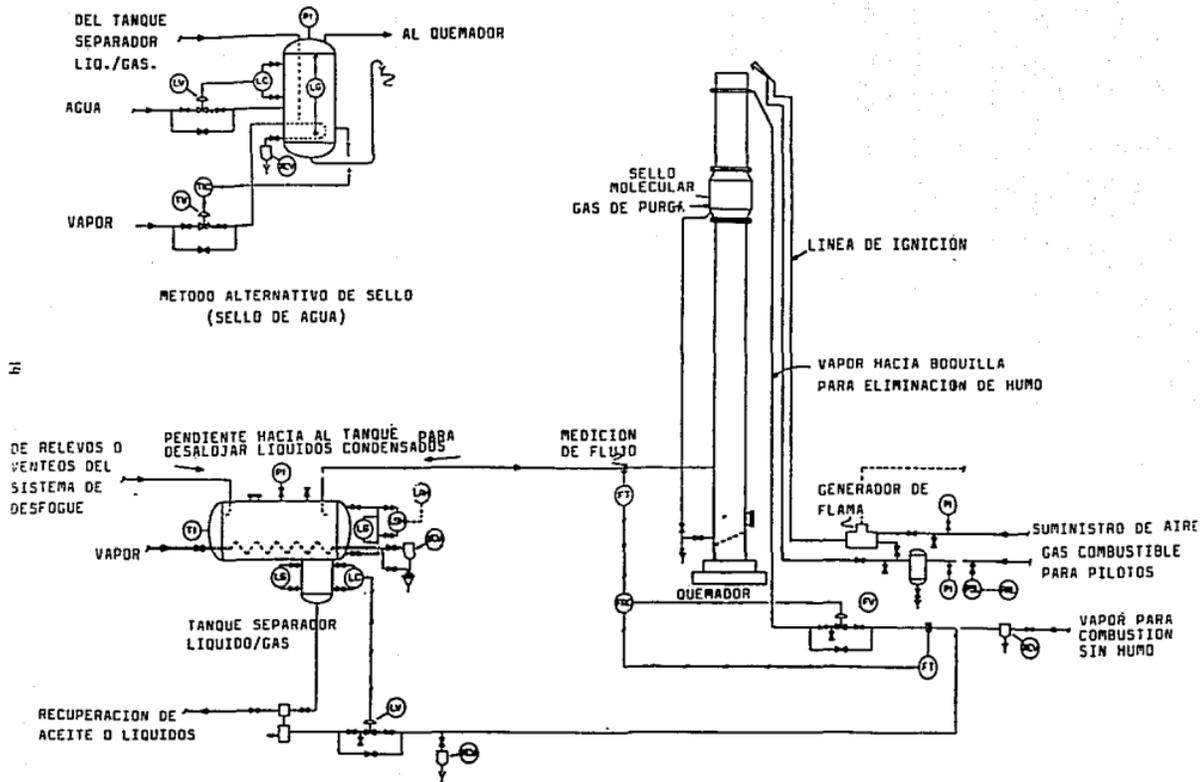


Fig. 4.1 Esquema típico de un Sistema Cerrado de Desfogue con Quemador Elevado.

IV.4.1) Autosoportados

Este tipo de estructura se utiliza cuando los requerimientos de altura del quemador no es mayor de 150 ft (45 m), con lo cual es posible diseñar la estructura desde el punto de vista mecánico, tomando en consideración las condiciones más críticas de viento en la zona en que será instalado el quemador. En la Figura 4.2 se muestra un ejemplo de este tipo de estructura.

IV.4.2) Soportados con Estructura (tipo Torre)

Se llaman tipo torre ya que se construye una torre metálica que ayuda a sostener la chimenea del quemador desde su base. Este tipo de soporte es recomendable cuando la altura del quemador está entre los 150 ft y 200 ft (45 - 60 m.) aproximadamente o cuando el diámetro del mismo es pequeño y no es posible soportarse a sí mismo. Un ejemplo se muestra en la Figura 4.3 .

IV.4.3) Cableados

Cuando el quemador rebasa la altura de 200 ft (60 m) se debe considerar un soporte del quemador a través de cables para evitar el desplome del mismo. Este tipo de soporte es el que requiere mayor espacio ya que el radio ocupado por los cables llega a ser prácticamente igual a la altura del quemador. (ver Figura 4.4).

IV.4.4) Costos de tipo de soporte

De forma muy general se enunciaron los rangos de aplicación para cada tipo de soporte, sin embargo, existen otras variantes de importancia que originan la elección de un tipo de soporte en un diferente rango de aplicación.

Estas variantes se resumen en tres características :

- Area disponible
- Ubicación
- Costo

La importancia o prioridad entre ellas es consecuencia de situaciones muy particulares de cada proyecto, por ejemplo, si por necesidades de la



Fig. 4.2 Quemador Autosoportado

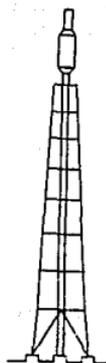


Fig. 4.3 Quemador Soportado con estructura (Tipo Torre)



Fig. 4.4 Quemador Soportado Con Cables

planta el quemador debe instalarse dentro de la misma y muy cerca de otros equipos o de personal, aunque por la altura requerida sea recomendable un soporte cableado, se elegirá un soporte tipo torre dadas la ventajas de espacio que éste ofrece.

A continuación se mencionan algunas características de área, ubicación y costo de cada tipo de soporte.

a) *SISTEMA TIPO TORRE*

Este soporte es ideal para instalaciones dentro de la planta, donde la elevación del quemador es necesaria para minimizar o reducir la radiación en equipos cercanos donde el espacio entre sí es limitado.

Generalmente puede construirse sin ningún problema hasta alturas de 150 a 200 Ft, este sistema suele ser el más costoso y se incrementa conforme aumenta la altura debido a los requerimientos de materiales y mano de obra para construir la torre. La selección de este tipo de soporte está basada fundamentalmente en el espacio que ocupa su base.

b) *SISTEMA AUTOSOPORTADO*

Este tipo de soporte puede aplicarse para alturas menores de 150 Ft, comúnmente no es más económico ni fácil de erigir que el tipo torre pero es seleccionado para espacios muy reducidos de instalación. Para una altura de 150 Ft la base de un quemador autosoportado es de un diámetro aproximado de 12 Ft, comparado contra los 24 Ft que requiere un sistema de igual altura con soporte tipo torre. Esta característica lo hace importante en sitios de áreas muy pequeñas y junto a equipos en planta.

c) *SISTEMA CABLEADO*

Este sistema es construido para alturas mayores a 200 Ft y para proteger grandes áreas en caso de relevos extremadamente grandes.

La principal desventaja de este sistema es la gran cantidad de área que requiere, lo que lo descarta fácilmente para instalaciones cercanas o dentro de la planta, sin embargo puede recortarse el radio que utiliza para anclar los cables y competir con los otros tipos de soporte donde la radiación no es muy restrictiva. Este sistema es el más barato en costo de instalación y equipo que sus homólogos.

A continuación se esbosa una comparación económica de los 3 tipos de soportes. Se tabulan costos de materiales y costo por trabajo de instalación en función de la altura del quemador.

TABLA 4.1
CAPITAL INVERTIDO

POR EQUIPO

C O S T O	150 FT (45 M)	(61 M)	200 FT (60 M)
MENOR ↓ HAYOR	- TIPO TORRE - AUTOSOPORTADO	- TIPO TORRE - CABLEADO	- CABLEADO - TIPO TORRE
	- CABLEADO	- AUTOSOPORTADO	- AUTOSOPORTADO

POR INSTALACION

C O S T O	150 FT (45 M)	(61 M)	200 FT (60 M)
MENOR ↓ HAYOR	- AUTOSOPORTADO - CABLEADO	- TIPO TORRE - CABLEADO * - AUTOSOPORTADO*	- CABLEADO - TIPO TORRE
	- TIPO TORRE		- AUTOSOPORTADO

* APROXIMADAMENTE IGUAL COSTO

Si se analiza la tabla para rangos de altura de 0 a 45 m parece no existir una relación fácil del costo, aunque para este rango se recomienda el tipo autoportado el costo más bajo en lo que a equipo se refiere es el tipo torre; esto es probable debido a que permite ubicar el quemador en áreas pequeñas y el trazado de líneas es corto y poco robusto pues el peso será soportado por la estructura. Este tipo de soporte con estructura incrementa su costo por instalación debido a la dificultad de armar y trabajar alturas grandes.

Si se compara contra el costo del equipo de un soporte cableado éste último es mayor básicamente por el área que ocupa, no así el costo de instalación que sería más bajo que el tipo torre.

En conclusión para rangos de altura de 45 m y menores el soporte idóneo por costo es el tipo torre seguido del autoportado.

Conforme se incrementa la altura se observa que el soporte más económico en costo por equipo e instalación es el cableado, siguiendo a éste el tipo torre y el autoportado como se ilustra en la tabla.

IV.5) Características del Quemador Elevado

Una de las características del quemador elevado es que durante una falla operacional grande puede mantener una flama estable.

El quemador elevado produce en ocasiones demasiado humo, pero esto puede evitarse proporcionando una adecuada cantidad de oxígeno y distribuyéndolo en la zona de combustión. También se utiliza la inyección de vapor, y si se inyecta correctamente dentro de la corriente de quemador humeante, la cantidad de humo disminuirá notablemente. Pero la inyección de vapor se debe controlar ya que produce altos niveles de ruido.

En realidad el ruido del quemador tiene 2 componentes :

- i) Ruido de la combustión
- ii) Ruido del jet

El primero se refiere al ruido intrínseco de la reacción química que se lleva a cabo durante la combustión. Mientras que la segunda se debe al paso del gas o vapor a través de la boquilla de restricción.

Las flamas intensamente turbulentas son inherentemente ruidosas, mientras que una flama estable produce bajos ruidos.

Para disminuir los niveles de ruido se deben tomar en cuenta las dos aportaciones que tiene el quemador al respecto, y por lo tanto si el mayor ruido es causado por la combustión, se debe mezclar mejor el sistema gas-aire o inyectar moderadamente vapor, y si el ruido es provocado por la restricción en la boquilla entonces se debe considerar un diseño especial de esta, de tal forma que se vea disminuida la contaminación por ruido.

Finalmente podemos decir que el quemador elevado puede operar :

- * Con Humo
- * Sin Humo (con inyección de vapor)

Y que de acuerdo con las legislaciones locales respecto a nivel de ruido permisible, pueden ser :

- * Con ruido (sin accesorios adicionales)
- * Sin ruido (disminuido por diseño de boquilla especial)

Estas características de operación se explicaran con mayor detalle mas adelante.

- Con Humo
- Sin Humo (con inyección de vapor)

Y que de acuerdo con las legislaciones locales respecto a nivel de ruido permisible, pueden ser :

- Con ruido (sin accesorios adicionales)
- Sin ruido (disminuido por diseño de boquilla especial)

Estas características de operación se explicarán con mayor detalle más adelante.

C A P I T U L O V

V A R I A B L E S D E D I S E Ñ O

V. VARIABLES DE DISEÑO

El diseño de un quemador surge como solución a la necesidad de disponer de manera segura una determinada cantidad de gases de desfogue generados por una sobrepresión del sistema, por lo tanto lo primero que debe hacerse para dar solución a esta necesidad, es conocer todas aquellas variables que intervienen de manera directa e indirecta en el diseño del quemador propiamente dicho.

Las principales variables que están involucradas como criterios de dimensionamiento del quemador tipo elevado son :

1. Capacidad máxima de flujo a relevar
2. Características del fluido
3. Velocidad de salida del fluido
4. Condiciones atmosféricas del medio ambiente
5. Fenómenos difusionales
6. Radiación Emitida
7. Localización

La influencia de cada variable sobre las dimensiones del quemador, se detallan a continuación.

V.1) Capacidad máxima de flujo a relevar

Para calcular la cantidad de gas que puede en un momento dado manejar el quemador en la situación de mayor emergencia en planta, es necesario analizar detalladamente el tipo de falla y la masa de fluido que relevará cada dispositivo de seguridad en el momento de la emergencia.

El sistema de desfogue se dimensionará para aquella causa que provoque la máxima carga en la peor emergencia, tomando en cuenta la duración de la descarga, así como los flujos o cargas menores que se presenten.

Es importante aclarar que la carga máxima no es aquella que proporcione el mayor número de lb/hr, sino la que ocasione un mayor diámetro de cabezal de desfogue.

La máxima carga de un sistema es la suma de las cargas de todos los dispositivos conectados individualmente bajo el mando de la condición de emergencia.

Debemos entender que para un sistema, la carga máxima será aquella que de acuerdo a las condiciones de presión y temperatura del desfogue genere el

diámetro mayor en el dimensionamiento del cabezal principal, cumpliendo con los requisitos de presión y contrapresión designadas para dicho sistema. Si recordamos la carga de un sistema está compuesta por :

- * Carga estática
- * Diferenciales de presión
- * Carga por fricción

La carga estática es producto de la diferencia de altura entre el punto de descarga de un dispositivo y el punto final del desfogue.

La diferencial de presión es la diferencia existente entre la presión del equipo a proteger y la contrapresión generada por otros equipos.

La carga por fricción es inherente al flujo del fluido en la tubería, válvulas, accesorios y otros componentes del sistema. Estas pérdidas varían más o menos proporcionalmente al cuadrado del flujo manejado.

En función de estas cargas y el de cumplir con las presiones requeridas en cada punto del sistema de desfogue, el diámetro de tuberías y accesorios es ajustado para la carga máxima.

Un ejemplo de carga máxima es un flujo de vapor de 100,000 lb/hr de peso molecular 19 a 300° F que desarrolla una mayor caída de presión, que una corriente de gas de 150,000 lb/hr de peso molecular 44 a 100° F, debido al volumen ocupado en cada caso.

El primer paso en el análisis del sistema es el de colocar en un diagrama, todos los dispositivos de relevo y depresurización, agregando a éste los datos físicos como :

- * Peso molecular
- * Presión de descarga
- * Temperatura del fluido
- * Velocidad de flujo

Los datos presentados de esta manera permiten combinar las diferentes causas de emergencia y determinar la cantidad y el tipo de flujos generados, los cuales pueden ser clasificados como se muestra en la tabla 5.1 .

TABLA 5.1
CLASIFICACION DE FLUJOS

GRUPO	CLASIFICACION	CARACTERISTICAS
I	FLUJO CONTINUO	FLUJOS QUE POR LO GENERAL SON PARTE DEL PROCESO Y DURAN LARGOS PERIODOS DE TIEMPO
II	FLUJOS SEMICONTINUOS	NORMALMENTE SE DAN EN SITUACIONES DE ARRANQUE Y PARO DE LA PLANTA Y SU DURACION ES CORTA.
III	VENTEOS	FLUJOS POR POCO TIEMPO Y BASICAMENTE CONTROLADOS
IV	FLUJOS DE EMERGENCIA	FLUJOS GENERALMENTE DESCONTROLADOS, DE GRAN VOLUMEN Y EN CONDICIONES IMPREVISTAS. DE BAJA PROBABILIDAD

V.1.1) Estimación de flujos a relevar por fallas Operacionales

a) Descarga bloqueada

Existe esta causa de sobrepresión en un equipo o recipiente cuya salida o descarga pueda estar bloqueada por cualquier razón imprevista y que a la vez está recibiendo un fluido a una presión que puede llegar a ser mayor que aquella para la cual se diseñó .

Ejemplos de esta situación puede ser un intercambiador de calor en el cual una de la corrientes es alimentada a través de una bomba y su descarga se encuentra cerrada, o en el caso de un compresor cuando la salida es bloqueada y éste continúa en operación. En estas situaciones la cantidad de material a relevar deberá ser igual a la cantidad de material que está entrando al sistema bloqueado y la válvula deberá abrir a una presión menor de la presión de diseño del equipo.

b) *Falla de agua de Enfriamiento*

Quando falla el agua de enfriamiento en un condensador, aumenta el volumen de vapor debido a que no hay una condensación adecuada. Esto provoca que haya en los equipos un aumento de presión que debe ser aliviada. Como masa a relevar en este caso, normalmente es confiable tomar la masa total de vapor que entra al condensador. En el caso de una Torre fraccionadora, la capacidad de relevo requerida, es igual al total de gas y vapor que entra a la torre, más el generado ahí, menos el vapor condensado por una corriente o algún reflujo lateral enfriado por algún medio que no sea de agua de enfriamiento. Estas fallas pueden soportarse durante un periodo de 10 minutos.

$$M_{\text{a relevar}} = M_{\text{tot vap}} + M_{\text{vap gen}} - M_{\text{vap cond}}$$

M : masa

c) *Falla de Reflujo*

Continuando con el ejemplo de la Torre de destilación, normalmente la masa a relevar por falla de reflujo será la masa que sale del domo en operación normal. En el caso de que existan rehervidores, la masa a relevar sería la masa normal del domo más la masa de vapores alimentados por el rehervidor. Si la fuente calor es la alimentación misma, se deben estimar los vapores producidos en la zona inmediata a la alimentación.

d) *Ruptura de tubos*

En caso de existir una ruptura de tubos en un intercambiador de calor, se protege a la envolvente; cuando la presión de operación de uno de los lados es mayor que la presión de diseño del otro lado, por lo menos 1.5 veces.

Para líquidos, se tiene la siguiente ecuación para calcular el gasto volumétrico a desfogar :

$$Q = 34.8 \frac{d^2}{s} (\Delta P^{0.5}) \quad \text{Ec. 5.1}$$

para vapores :

$$W = 1580 d^2 \left(\frac{\Delta P^{0.5}}{S} \right) \quad \text{Ec. 5.1.A}$$

donde :

- Q : gasto volumétrico en GPM
- ΔP : diferencia de presiones en psi (entre envolvente y tubos)
- W : gasto en lb/hr
- d : diámetro interno del tubo en pulg.
- S : densidad relativa del líquido

e) *Expansión hidráulica de líquidos*

Cuando de alguna manera se bloquea un líquido en un recipiente o cambiador de calor, y existe una fuente de calor en contacto con el líquido, este tenderá a expandirse en mayor o menor grado, produciendo un incremento fuerte de presión que deberá relevarse.

Para el cálculo de la masa a relevar, se puede utilizar la siguiente ecuación :

$$Q = \frac{\beta H}{500 \delta C_p} \quad \text{Ec. 5.2}$$

donde :

- Q : capacidad requerida en GPM
- H : calor suministrado en BTU/hr
- δ : densidad relativa del líquido
- Cp : capacidad calorífica del líquido a Presión cte.
en BTU/lb °F
- β : coeficiente de expansión volumétrico

valores de β en °F⁻¹ para las siguientes sustancias :

TABLA 5.2
COEFICIENTES DE EXPANSION VOLUMETRICA

SUSTANCIAS	β
AGUA	0.001
HIDROCARBUROS LIGEROS	0.001
GASOLINA	0.008
DESTILADOS	0.006
RESIDUOS	0.0004

f) Falla de energía eléctrica

En muchas plantas, ciertos equipos y controles son operados por corriente eléctrica y si esta llega a fallar, dichos controles quedan inutilizados. Este tipo de fallas trae consecuencias que pueden relacionarse con las ya mencionadas, por ejemplo, si la bomba que maneja el reflujo de una torre, llegara a fallar, esta se reduce a una falla de reflujo y la masa a relevar se calculará de la misma manera que se mencionó en la sección de esta falla. La falta de suministro de Energía eléctrica ocasiona simultaneidad de fallas y generalmente son las que provocan los mayores flujos. Pero deben analizarse todas y cada una de ellas para determinar la cantidad de fluido a desfogar.

g) Falla de control por falta de aire de Instrumentos

La masa a relevar, será el resultado de un cuidadoso y detallado análisis acerca de los flujos, presiones, temperatura, etc., de las corrientes relacionadas con la falla y sobretodo considerar la acción de la válvula al suspenderse el suministro de aire, es decir, la posición que tomará al ocurrir la falla (apertura o cierre).

h) Reacción Química

Los reactores pueden ser sobrepresionados debido a un desequilibrio de la reacción, especialmente si ésta es exotérmica. Para algunas reacciones químicas es posible predecir la posibilidad de una explosión y colocar discos de ruptura especiales para desalojar rápidamente los vapores

producidos, pero normalmente, los controles son muy sofisticados y son utilizados simultáneamente con una válvula de seguridad; de tal forma que la masa que se relevará en este caso dependerá de las características de los reactivos y productos de la reacción y de sus condiciones de temperatura y presión durante la falla, los cuales deberán analizarse para llegar al resultado deseado.

V.1.2) *Estimación de flujos a relevar por fuego en planta*

En este caso se deberá calcular la cantidad de líquido que puede pasar a fase vapor a causa de fuego, considerando todos los recipientes existentes que deberán ser desfogados por los respectivos dispositivos de relevo. Para realizar el análisis de la cantidad de vapor que podrá generarse durante una situación de fuego, se deben manejar los conceptos que a continuación se describen.

a) *Area mojada*

Es el área efectiva del recipiente que está expuesta al fuego y que a su vez está en contacto con el fluido, es decir, es el área de transferencia de calor entre el fuego y el fluido que contiene internamente el recipiente.

En este renglón es importante aclarar que la altura máxima que puede alcanzar una flama es de 25 Ft misma que debe compararse contra la altura del nivel normal de líquido del recipiente para considerar qué proporción del líquido sería afectado por el fuego en caso de existir éste.

Las áreas superficiales típicas de recipientes utilizadas en las operaciones de proceso son :

- * **Recipientes de agitación y reflujo**

La superficie mojada será calculada utilizando la altura del nivel de líquido o utilizando la altura del nivel al 50% del área total del recipiente.

- * **Recipientes de separación**

Los recipientes de separación generalmente operan con pequeños niveles de líquido, por lo tanto normalmente el área es calculada utilizando el nivel de la alarma por alto nivel.

* Columnas Fraccionadoras

Las columnas fraccionadoras generalmente operan con un nivel normal de líquido en el fondo de la columna, además del nivel en cada plato. Entonces, el área mojada se limita a la altura máxima de la flama.

b) Calor Absorbido

Es el calor de intercambio entre la fuente de calor y el fluido a través del área mojada considerada. Este calor se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$Q = 21000 F \cdot A^{0.82} \quad \text{Ec. 5.3}$$

Donde :

Q : Calor total absorbido en BTU/hr

F : Factor de aislamiento

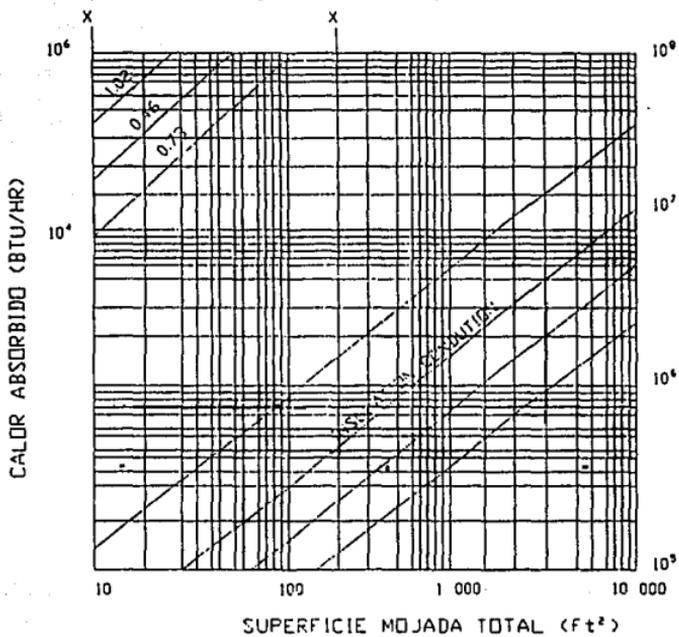
A : Area mojada expuesta al fuego en ft²

T A B L A 5.3
FACTOR DE AISLAMIENTO

TIPO DE AISLAMIENTO	CALOR ABSORBIDO * (BTU/HR)	FACTOR DE AISLAMIENTO
Sin aislamiento	20,000	1.0
Aislamiento de 1"	10,000	0.3
Aislamiento de 2"	6,000	0.15
Aislamiento de 4"	3,000	0.075

* VALORES ESTIMADOS (VER GRAFICA 5.1)

Para equipos que no tienen aislamiento, pero que están protegidos con otros dispositivos se tienen los siguientes valores de F :



Graf. 5.1 Superficie mojada total contra Calor Absorbido.

TABLA 5.4
**FACTOR DE AISLAMIENTO PARA OTROS DISPOSITIVOS
 DE PROTECCION**

DISPOSITIVO DE PROTECCION	FACTOR DE AISLAMIENTO
Recipientes con sistema de regadera	1.0
Servicios de depresuramiento y vaciado	1.0
Recipientes bajo suelo, cubiertos con tierra	0.0
Recipientes sobre suelo cubiertos con tierra	0.03

La masa que se deberá relevar está en función del calor absorbido por el recipiente y del calor latente de vaporización del líquido.

$$W = \frac{Q}{\lambda} \qquad \text{EC. 5.4}$$

Donde :

- W : Masa a relevar en lb/hr
- Q : Calor absorbido en BTU/hr
- λ : Calor latente de vaporización en BTU/lb

V.1.3) Criterios de reducción de masas

En la actualidad el diseño de sistemas de desfogue está orientado a minimizar las descargas de materiales, propiciado por lo altos costos que implican disponer de estos materiales (separar, reciclar, recuperar o quemar), aunado a los grandes problemas de contaminación que generan dichas operaciones.

Se ha comprobado que con inversiones mayores en el diseño inicial de la planta es posible ahorrar cantidades considerables de material al reducir o evitar posibles causas de desfogue.

Dentro de las principales acciones en el diseño de equipo se pueden considerar las siguientes opciones :

- * Predicción de fallas operacionales, para actuar de manera oportuna y minimizar las cantidades a relevar.
- * Incremento de la presión de diseño de los equipos.
- * Instalación de alarmas de tipo preventivo antes de llegar a niveles de operación críticos.
- * Sistemas eléctricos dobles altamente confiables con sistemas

automáticos para fallas de energía.

- * Sistemas paralelos de suministro de agua y aire que actúan en caso de falla de los principales.
- * Secuencias automatizadas para paro ordenado de planta.
- * Recuperación de desfuegos.
- * Recirculación de vapores a los sistemas de combustión para su aprovechamiento.

El objetivo de estas acciones es minimizar la cantidad de flujos a relevar en la planta, lo que permiten que el dimensionamiento final de cabezales y quemador sean menores, lo cual se ve reflejado en una reducción en los costos de estos equipos y un ahorro notable en las pérdidas de materiales que finalmente justifican una inversión inicial mayor en el montaje y diseño de la planta pero que será recuperada durante la operación de la misma.

V.2) *Propiedades del fluido a relevar*

Hay miles de compuestos y mezclas químicas que presentan en alguna forma mayor o menor riesgo en el manejo del sistema de desfogue. Para controlar estos riesgos deben conocerse y determinarse sistemáticamente las propiedades químicas y físicas más importantes durante una condición de relevo o desahogo causada por una emergencia.

Con esta evaluación puede diseñarse correctamente el sistema, eliminando o controlando los riesgos y evitando el desperdicio de productos químicos valiosos y lesiones graves al personal.

V.2.1) *Propiedades físicas del fluido*

El conocimiento de las propiedades físicas como Presión de vapor, Densidad, Punto de Flashco, Límite de explosividad y Temperatura de Ignición, entre otras, representan en sí información valiosa tanto para la economía del proceso como para la seguridad de la planta y el personal.

a) *Densidad*

La comparación de la densidad de un gas o vapor con respecto al aire será indicio para predecir si el gas o vapor se elevará en forma continua hacia la atmósfera o descenderá hasta el nivel más bajo posible. Esto

toma singular importancia al producirse la combustión de los gases de desfogeo en el quemador o los gases emitidos por el mismo en caso de que el quemador se encuentre apagado accidentalmente y el sistema de desfogeo esté operando, generando así una nube tóxica o explosiva que se elevará o cubrirá la planta o el área cercana.

Para determinar la densidad de gases a bajas presiones se utiliza comúnmente la ecuación de los gases ideales, ya que la combustión se lleva a cabo generalmente a condiciones atmosféricas.

El fluido de desfogeo es generalmente una mezcla de gases provenientes de muchas corrientes a distintas condiciones de operación, en estos casos de mezclas complejas es muy útil y práctico tratar en primera instancia a los componentes como sustancias individuales y posteriormente considerar las propiedades de la mezcla como propiedades promedio en función de las características de los componentes.

b) Presión de vapor

Todos los líquidos tienen moléculas de vapor por encima de ellos y a una temperatura determinada, las moléculas en el estado de vapor ejercen una presión definida que se conoce como presión de equilibrio de vapor del líquido. La presión de vapor es independiente de la cantidad de material en cada fase, y solo depende de la temperatura siendo única para cada temperatura.

c) Punto de Flasheo y Límite de flabilidad

El punto de flasheo de un líquido es la temperatura mínima en la cual se tiene el suficiente vapor para formar una mezcla flamable con aire cerca de la superficie del líquido o en el interior de un recipiente.

El punto de flasheo de un líquido flamable es una importante y fundamental propiedad relativa a los riesgos de fuego y explosión de este líquido en presencia de fuentes de ignición. Desafortunadamente es muy común confundir esta propiedad con la Temperatura de autoignición, que es la temperatura requerida para que una sustancia se encienda (produzca una explosión).

Dada la importancia de esta característica física del fluido, es conveniente conocer la forma de estimar su valor.

De acuerdo con algunos de los métodos experimentales para determinar puntos de flasheo, estos pueden estimarse con la siguiente ecuación

propuesta :

$$t_f = 0.683 t_b - 71.7 \quad \text{Ec. 5.5}$$

Donde :

t_f : Temperatura de punto de flasheo en °C

t_b : Punto inicial de ebullición en °C

Un incremento en la presión del sistema aumenta el punto de flasheo y un decremento en la presión, baja el punto. Los efectos de los cambios en la temperatura de punto de flasheo por cambios de presión suelen ser importantes cuando el fluido es muy volátil.

c.1) Límite mínimo de flamabilidad

El límite mínimo de flamabilidad es la mínima concentración de vapor o gas en aire u oxígeno que por debajo de esta no ocurre una propagación de flama aún en contacto con una fuente de ignición.

La importancia del criterio de límite mínimo de flamabilidad reside en mostrar la capacidad de una flama para que ésta se propague al contacto con una fuente de ignición. Los límites mínimos de flamabilidad (L) son comúnmente expresados en por ciento en volumen y un incremento en el peso molecular, decrece los L's; estos pueden ser expresados en masa para compuestos de hidrocarburos (mg/l) a 0 °C y 101.325 KPa en aire.

Para estos compuestos se cumple que a bajos pesos moleculares los valores de los límites (L) decrecen.

T A B L A 5.5

UNIFORMIDAD DE LIMITES MINIMOS DE FLAMABILIDAD EN BASE A MASA

SUSTANCIA	PEÑO MOLECULAR	L % (V/V)	L mg/l aire *
Etano	30	3.0	41.0
Propano	44	2.2	44.0
Hexano	86	1.1	43.0
Tolueno	92	1.2	50.0

* A 0 °C Y 101.325 KPa

"(V/V) volumen de la sustancia / volumen de aire"

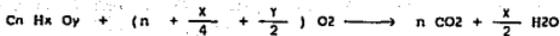
También puede ser utilizada la regla de Le Chatelier para calcular el límite inferior de flamabilidad de mezclas :

$$L_{mezcla} = \frac{100 \% V/V}{\frac{C1}{L1} + \frac{C2}{L2} + \frac{C3}{L3} + \dots + \frac{Cn}{Ln}} \quad \text{Ec. 5.6}$$

Donde :

- C1 , C2 , ... Cn: Porcentajes del volumen total de combustible
- L1 , L2 , ... Ln: Límite mínimo de flamabilidad de cada componente en % en volumen
- 1 , 2, ... n: Componente

Experimentalmente se ha encontrado que la mayoría de los compuestos orgánicos tienen un límite mínimo (L) cercano a 45 mg/l de aire a las condiciones ya mencionadas. Muchos autores han coincidido en señalar que estos límites oscilan en aproximadamente el 55 % de la concentración estequiométrica en aire (Cst). La combustión de compuestos orgánicos contienen solamente carbón, hidrógeno y oxígeno, de tal manera que se ha llegado a proponer el siguiente método para el cálculo de esta concentración y determinar entonces el límite mínimo de flamabilidad; a continuación se presenta dicho método :



$$\text{Aire} = 4.77 \left(n + \frac{x}{4} + \frac{y}{2} \right) \frac{\text{MOL}}{\text{MOL COMBUSTIBLE}}$$

$$\text{Nitrógeno del Aire} = 3.77 \left(n + \frac{x}{4} + \frac{y}{2} \right) \frac{\text{MOL}}{\text{MOL COMBUSTIBLE}}$$

$$Cst = \frac{100 \% \text{ V/V}}{4.77n + 1.19x - 2.38y + 1}$$

$$L = \frac{55 \% \text{ V/V}}{4.77n + 1.19x - 2.38y + 1}$$

Para Tolueno ($C_6H_5CH_3$) :

$$n = 7$$

$$x = 8$$

$$y = 0$$

$$Cst = 2.28 \% \text{ V/V}$$

$$L = 1.25 \% \text{ V/V}$$

$$L = 52 \text{ mg/l}_{\text{aire}} \text{ a } 0^\circ \text{C y } 101.325 \text{ KPa}$$

c.2) Límite Superior de Flamabilidad

El límite superior de flamabilidad (U) es la máxima concentración de vapor o gas en aire en la cual por encima de esta no ocurre una propagación de flama en contacto con una fuente de ignición.

El rango de concentraciones entre los límites bajo y superior, es conocido como el rango de flamabilidad. Lo ideal para la prevención de explosiones, es trabajar fuera de este rango. Sin embargo se pueden desarrollar condiciones de fuego y explosión si los combustibles son desfogados cuando aparentemente se encuentran por encima del límite superior.

Para muchos compuestos el límite superior de flamabilidad se encuentra arriba de 3.5 veces la concentración estequiométrica en aire (Cst).

Los límites de flamabilidad en aire están basados en las condiciones

normales de temperatura y presión atmosféricas, por lo tanto las variaciones en el medio ambiente afectan notablemente estos valores.

** Efectos de temperatura y presión sobre los límites de flamabilidad*

El límite inferior de flamabilidad en aire disminuye aproximadamente un 8 % por aumento en la temperatura.

El límite superior de flamabilidad se incrementa un 8 % por un aumento en la temperatura de 100 °C; entonces para corregir los límites de flamabilidad por cambios de temperatura, se tiene :

$$L_t = L_{25} - (0.8 L_{25} * 10^{-3})(t - 25) \quad \text{Ec. 5.7}$$

$$U_t = U_{25} + (0.8 U_{25} * 10^{-3})(t - 25) \quad \text{Ec. 5.8}$$

Donde t está dada en °C .

La presión tiene solo un ligero efecto en los límites mínimos de flamabilidad (L), los cuales son prácticamente constantes a baja presión, alrededor de 5 KPa.

Inversamente una presión elevada incrementa mucho los límites superiores de flamabilidad (U). Para diversos hidrocarburos saturados la variación de 0.1 a 20.7 MPa, implica una variación del límite superior con respecto a la presión de la siguiente manera :

$$U_p = U + 20.6 (\log P + 1) \quad \text{Ec. 5.9}$$

Donde :

P : Presión absoluta en MPa

U : Límite superior evaluado a 0.101 MPa

d) Temperatura de autoignición

La temperatura de autoignición (TAI) de una sustancia es la temperatura a la cual los vapores se encienden espontáneamente con el calor del medio ambiente.

La temperatura de autoignición depende de muchos factores a saber :

- * Concentración de vapores
- * Efectos ambientales
- * Contenido de oxígeno en aire
- * Superficie del equipo

Por lo tanto la TAI debe ser considerada cuando existe un venteo a la atmósfera o cuando el sistema de desfogue opera y el quemador se encuentra apagado, ya que pueden producirse explosiones de consecuencias catastróficas.

T A B L A 5.6
TEMPERATURA DE AUTOIGNICION DE HIDROCARBUROS EN AIRE A101.325 KPa

SUSTANCIA	TAI °C
Metano	537.0
Etano	515.0
Propano	466.0
N-Butano	405.0
I-Butano	462.0
N-Pentano	258.0
N-Hexano	223.0
N-Heptano	223.0
N-Octano	220.0
N-Nonano	206.0
I-Decano	208.0
N-Dodecano	204.0
N-Hexadecano	205.0

V.2.2) *Propiedades químicas del fluido*

a) *Calor de reacción*

El fuego o combustión es una reacción química en el cual un material llamado combustible, es oxidado rápidamente produciendo calor. La combustión no ocurre si no existen las condiciones de combustible y oxidante apropiadas. El combustible debe estar en forma de gas o vapor en una mezcla apropiada con el oxidante. La temperatura de la mezcla debe ser lo suficientemente alta para que se efectúe o inicie la reacción química.

La existencia de fuego puede ser esquematizada como un triángulo y/o como una pirámide. El triángulo del fuego consta de tres componentes para iniciar la reacción : combustible, oxidante y fuente de ignición . Algunas veces la reacción es incluida como un componente más, produciendo un cuarto elemento y formando una pirámide.



Fig. 5.1 Componentes del Fuego

La esquematización de estos compuestos ayuda a visualizar que para suprimir o evitar un fuego es necesario solo remover uno de los 4 lados o componentes.

El término poder calorífico se usa ampliamente como sinónimo de calor de reacción en los procesos de combustión.

Cuando un hidrocarburo combustible se quema en un proceso de combustión aparece agua en los productos. La máxima energía que puede desprenderse se obtiene cuando toda el agua en los productos debida a la combustión está en estado líquido; en tales casos el calor de reacción se denomina poder calorífico superior (HHV). En forma semejante, puede observarse un calor de reacción más bajo cuando toda el agua de los productos debido a la combustión está en estado vapor, en tal caso se dice que se obtienen un poder calorífico inferior (LHV).

T A B L A 5.7

PODER CALORIFICO SUPERIOR DE ALGUNOS HIDROCARBUROS

S U S T A N C I A	KCAL/g mol	BTU/Lb mol/
Hidrógeno	- 68.317	- 122.97
Carbono	- 94.054	- 169.29
Monóxido de Carbono	- 67.636	- 121.75
Metano	- 212.80	- 383.04
Acetileno	- 310.62	- 559.12
Etileno	- 337.23	- 607.01
Etano	- 372.82	- 671.08
Propileno	- 491.99	- 855.88
Propano	- 530.60	- 955.07
N-Butano	- 687.65	-1237.80
N-Pentano	- 845.16	-1521.30
N-Hexano	-1002.57	-1804.60
N-Octano	-1160.01	-2088.00
Benceno	-1317.45	-2371.40
Tolueno	- 789.08	-1420.30
Alcohol Metílico	- 943.58	-1698.40
Alcohol Etilico	- 336.82	- 328.70

Las reacciones de combustión son extraordinariamente complejas y no se han dilucidado en forma detallada. Existen muchos productos intermedios parcialmente oxidados y se tiene la certeza de que comprenden numerosos pasos de cadenas de radicales.

Es importante puesto que se desprende calor en la combustión de hidrocarburos, mencionar que la estructura del hidrocarburo nos proporciona información valiosa sobre el calor de reacción que genera al quemarse, ya que la combustión libera una cierta cantidad de calor que es dependiente del número de átomos de carbono que estén presentes y el tipo de enlace (energía de enlace) que estén formando con otros átomos de carbono u otro compuesto (en su mayoría hidrógeno y oxígeno).

El calor de reacción es un dato muy importante en el diseño del quemador elevado, específicamente en su altura, ya que con este valor se conoce el calor total liberado por la combustión y por lo tanto los niveles de radiación que emitirá el quemador.

V.2.3) Propiedades fisiológicas del fluido

Las características fisiológicas del fluido a relevar son las que se refieren al daño que pueden causar a la salud de los seres Humanos, ya sea en su manejo o en la combustión misma.

a) Toxicidad del fluido

El grado en que una sustancia es venenosa es llamada toxicidad, los límites de toxicidad denotan, el grado de concentración de la sustancia que pueden ser toleradas en el aire un tiempo determinado de contacto sin peligro de efectos tóxicos.

La toxicidad de un producto químico es una de sus propiedades inherentes, pero hay que determinar el riesgo por la frecuencia y duración de la exposición y la concentración del producto químico.

Así, determinar las propiedades tóxicas de cualquier producto químico que se vaya a desfogar es muy importante, particularmente cuando la toxicidad de una sustancia puede conducir a un envenenamiento crónico. También es importante considerar la manera en que la sustancia entra al cuerpo, lo cual puede ser por inhalación, absorción, contacto, etc., esto determina las formas de control de tóxicos.

La toxicidad de una sustancia se mide a través del límite máximo permisible en aire de dicha sustancia (LMP o TLV por sus siglas en inglés), expresado en partes por millón; esto representa las condiciones a que se vería expuesto el personal en condiciones adversas. Entre la información valiosa que el LMP proporciona están :

- i) Índice relativo de riesgos o toxicidad.
- ii) Evaluación de perjuicios por contaminación del aire.
- iii) Estimación del potencial tóxicos.

(ver Apéndice A)

Debe aclararse que el LMP está definido como la concentración en el que en un tiempo ponderable de 8 horas de trabajo-día o 40 horas-semana el personal puede ser expuesto a la sustancia día tras día sin sufrir efectos adversos.

Otro tipo de LMP es referido como el valor tope, el cual nunca debe ser excedido para evitar daños serios a la salud del personal.

La exposición para más de una sustancia es medida por la adición de relaciones de las concentraciones en la mezcla con la concentración permisible de cada sustancia. Esto es expresado como :

$$\frac{C_1}{L_1} + \frac{C_2}{L_2} + \frac{C_3}{L_3} + \dots + \frac{C_n}{L_n} \leq 1 \quad \text{Ec. 5.10}$$

donde :

- C : Concentración del componente en la mezcla en ppm
L : Concentración permisible de la sustancia (LMP) en ppm

La suma de estas relaciones no debe exceder la unidad, para que sea una mezcla permisible de exposición en 8 horas de trabajo. Obviamente si esto excede la unidad, excede la exposición permisible.

La duración de la exposición es importante, pues los efectos tóxicos de las sustancias son acumulativos. Para estimar la exposición total máxima permisible de una sustancia o mezcla en un tiempo de 8 horas se puede utilizar la siguiente ecuación :

$$E = \left[\frac{C_1 T_1 + C_2 T_2 + C_3 T_3 + \dots + C_N T_N}{8} \right] \quad \text{Ec. S.11}$$

donde :

- E : exposición total
T : tiempo en horas de exposición para la concentración
C : Concentración de la sustancia tóxica
1,2,...,N : Componente tóxico

Es claro que la presencia de sustancias tóxicas en una condición de desfogar es originada por dos causas, como ya se ha mencionado :

- i) Producto de la combustión del fluido a desfogar.
- ii) Emisión de sustancias a la atmósfera en caso de existir una falla del sistema de ignición del quemador.

Debe considerarse entonces en el diseño del quemador estas causas de contaminación para que exista una concentración permisible en caso de presentarse estas fallas.

La concentración de la sustancia en aire depende de muchos factores entre los citables podemos enumerar :

- i) Condición del viento (estabilidad)
- ii) Velocidad y dirección del viento
- iii) Propiedades del efluente
- iv) Velocidad de emisión
- v) Altura de la fuente de emisión
- vi) Difusividad de la sustancia
- vii) Condiciones atmosféricas

El control de la concentración de una sustancia es entonces reducido a ajustar la velocidad de emisión, a través del diámetro de la chimenea y la altura del punto de emisión a lo largo de la altura del quemador. La dispersión y concentración del contaminante se discutirá más adelante a detalle.

b) Olor del fluido

El olor de una sustancia es una característica intrínseca de la materia, algunas de ellas pueden no presentar olor por sí solas, pero al combinarse con otras se obtienen mezclas con olores reconocibles aún a bajas concentraciones; esta característica puede manejarse de manera positiva en la detección de fugas de gases tóxicos o inflamables, sin embargo, representa una forma de contaminación del aire.

Aunque el olor es solo una manifestación molesta sobre el sentido del olfato del hombre debido a la presencia de sustancias olorosas en la atmósfera, el daño que estas sustancias pueden provocar sobre su salud son variadas, pérdida del sueño, irritación de ojos y vías respiratorias, mareos y náuseas, entre otras.

Entre los productos y subproductos de desecho de plantas de refinación que presentan olores se encuentran ácidos, gases de "cracking", fenoles, sulfuros, compuestos amoniacales, aldehídos, cetonas, sulfuros de hidrógeno y mercaptanos.

El índice de detección de olor es una medida propuesta para detectar el potencial de olor. Este índice se obtiene a través de la relación entre la presión de vapor del gas presente y el límite de concentración mínimo detectable por instrumentos o métodos específicos, los cuales están reportados por el API (Apéndice A).

En función de estos índices se ha llegado a clasificar a las sustancias que presentan olor en tres categorías.

TABLA 5.8
CLASIFICACION DE SUSTANCIAS POR SU OLOR

CATEGORIA	INDICE DE OLOR (IO)	OBSERVACIONES
I	$IO \geq 10^8$	Alto olor potencial
II	$10^5 \leq IO \leq 10^6$	Olor potencial moderado
III	$IO < 10^5$	Bajo olor potencial

En el apéndice A se presentan los límites de detección de olor para algunos compuestos que pueden ser encontrados en plantas químicas.

La toxicidad relativa y los efectos sobre la salud también se presentan en esta tabla.

El valor límite de toxicidad (LMP) está basado en las concentraciones máximas permisibles de una sustancia tóxica que evite daños a la salud. Sin embargo los límites de sustancias tóxicas por olor para tiempos cortos de exposición pueden ser generalmente mucho mayores que los límites por toxicidad.

De acuerdo con la información disponible, se sabe que los desagradables olores de mercaptanos, sulfuros y fenoles son tóxicos a concentraciones relativamente altas y por su olor se detecta su presencia antes de que se alcancen concentraciones peligrosas. Desafortunadamente a concentraciones solo ligeramente mayores que los límites de detección estos materiales pueden producir efectos en la salud, como irritación de mucosas nasales, irritación de ojos, mareos y náuseas.

El control de olores en una planta puede llevarse a cabo a través de 2 métodos básicamente :

- i) Métodos organolépticos
- ii) Métodos físicos

Los métodos organolépticos están basados en el estudio de los efectos que las sustancias olorosas provocan sobre los sentidos de los seres humanos; mientras que los métodos físicos se basan en el estudio de las propiedades de las sustancias olorosas en el aire, como puede ser colorimetría, espectrofotometría, etcétera. Resulta lógico pensar

entonces, que el control de esos olores en una planta, depende del método utilizado para su detección. En algunas plantas se implantan métodos específicos para la eliminación de olores en sus productos.

c) Ruido producido por el fluido

Cuando se produce una perturbación periódica en el aire se originan ondas sonoras longitudinales. Un oído que actúa como receptor de estas ondas periódicas, las interpreta como sonido.

El término sonido se usa en dos formas diferentes, los fisiólogos lo definen en términos de las sensaciones auditivas producidas por perturbaciones longitudinales en el aire. Por otro lado, la física se refiere a las perturbaciones en sí más que a las sensaciones producidas: el sonido es una onda mecánica longitudinal que se propaga a través de un medio elástico.

Dos cosas deben de existir a fin de que se produzca una onda sonora, una fuente mecánica de vibración y un medio elástico a través del cual se puede propagar la perturbación. Esta definición es muy amplia y no restringe la frecuencia del sonido. El fisiólogo se interesa básicamente en las ondas que son capaces de afectar el aparato auditivo por eso, es útil dividir el espectro del sonido de acuerdo con las siguientes definiciones:

TABLA 5.9
CLASIFICACION DE SONIDO

TIPO DE SONIDO	C A R A C T E R I S T I C A S
SONIDO AUDIBLE	Se refiere a las ondas sonoras en el intervalo de 20 a 20,000 Hertz.
INFRASONIDO	Son las ondas sonoras que tienen frecuencias debajo de la gama audible.
ULTRASONIDO	Son las ondas de sonido que tienen frecuencias por arriba del intervalo audible.

La intensidad I del sonido audible apenas perceptible es del orden de $10^{-16} \text{ W / cm}^2$. Esta intensidad, la cual se refiere al umbral de audición, ha sido adoptada por los expertos en acústica como el cero de la intensidad del sonido.

El umbral de audición representa el cero normal de la intensidad de sonido. Su valor es 10^{-10} microwatts por cm^2 ($\mu\text{W/cm}^2$) para una frecuencia de 1000 Hertz (Hz).

Es enorme el intervalo de intensidades que el oído humano es capaz de percibir. Se extiende desde el umbral de audición I_0 hasta una intensidad tan grande como 10^{12} veces mayor. El extremo superior representa el punto en el que la intensidad es intolerable para el oído humano. La sensación se vuelve dolorosa en lugar de meramente auditiva. La sensación desagradable de un sonido es denominada ruido.

El umbral del dolor por ruido representa la intensidad máxima que el oído promedio puede registrar sin sentir dolor. Su valor es $100 \mu\text{W/cm}^2$:

$$I_p = 100 \mu\text{W/cm}^2 = 10^{-4} \text{ W/cm}^2$$

I_p : Intensidad de umbral del dolor

En vista de este amplio intervalo de intensidades al que es sensible el oído, es más conveniente establecer una escala logarítmica para medir las intensidades del sonido.

El intervalo de intensidades de sonido se reduce a una escala que va de 0 a 120 dB. Sin embargo debe recordarse que la escala es logarítmica. Un sonido de 40 dB es mucho mayor que el doble de intensidad de un sonido de 20 dB. Un sonido que es 100 veces más intenso que otro, solo será 20 dB mayor.

De esta manera el efecto de la intensidad sobre el oído humano se manifiesta como volumen y en general las ondas sonoras más intensas también suelen ser las de mayor volumen o sonoridad, empero el oído no es igualmente sensible a los sonidos de todas las frecuencias. Por tanto, un sonido de alta frecuencia no puede parecer tan fuerte como uno de menor frecuencia con la misma intensidad, esto está referido entonces al tono y al timbre de un sonido.

Existe un rango limitado de frecuencias dentro de las cuales somos capaces de escuchar sonidos. En la Figura 5.2 que a continuación se presenta, se dan los rangos de frecuencias e intensidades dentro de las cuales una persona de oído normal puede detectar los sonidos. La magnitud de sonido también puede medirse en términos de presión y en función de

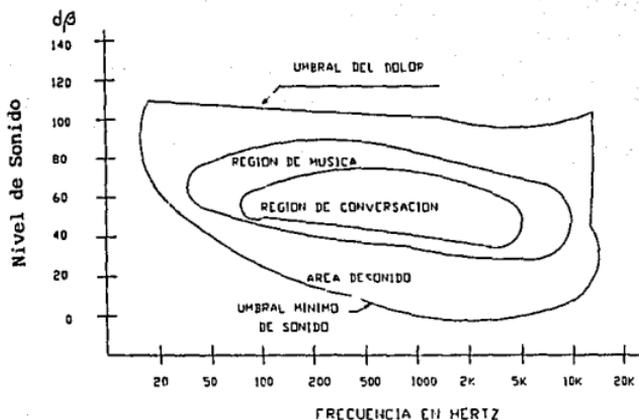


Fig. 5.2 Rangos de Frecuencias e Intensidades para el oído humano.

estos niveles audibles van desde 0.00002 hasta 20.0 N/m².

El quemador elevado puede ser considerado como una fuente de emisión de ruido o sonido, en fuentes de emisión como estas, se considera que la emisión de ruido es puntual y que a su alrededor se disipa la energía de presión (ondas de sonido).

El nivel de presión es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia existente entre la fuente de emisión y el receptor, expresado como :

$$L_1 = 10 \text{ Log } \left(P_1^2 / P_0^2 \right) = 20 \text{ Log } \left(P_1 / P_0 \right) \quad \text{Ec. 5.12}$$

Donde :

- L₁ : Nivel de presión de sonido en dB
- P₁ : Presión 1 en N/m²
- P₀ : Presión de referencia (0.00002 N/m²)

Entonces, el nivel de presión por sonido se reduce conforme la distancia respecto a la fuente de emisión se incrementa.

Es posible calcular el nivel de sonido de un punto con respecto a otro mediante la siguiente ecuación :

$$L_2 = L_1 - 20 \text{ Log } \left(d_1 / d_2 \right) \quad \text{Ec. 5.13}$$

donde :

- d₁ y d₂ : son las distancias en metros de la fuente de emisión

El sistema de quemador elevado genera dos tipos de ruido que se clasifican como :

- i) Ruido inherente al proceso de combustión
- ii) Ruido producido por el paso de un fluido a alta velocidad a través de una restricción o boquilla

El ruido producido por la combustión está en relación a la ruptura de enlaces de los gases quemados y la formación de los productos.

V.3) Velocidad de Salida del fluido

La velocidad de salida del gas en la punta del quemador presenta importantes efectos en la estabilidad de la flama. El diámetro del quemador influye en las características de quemado y es dimensionado en

base a la velocidad que fije o proporcione las mejores características de quemado y tipo de flama.

Otro factor importante es la caída de presión a lo largo de la chimenea. Comúnmente el dimensionamiento del quemador es referenciado para una velocidad de 0.2 MACH durante la operación normal, permitiéndose una velocidad de 0.5 MACH máximo durante una emergencia en la condición máxima de flujo a relevar; esta condición es poco frecuente y se presenta en periodos de tiempo pequeños.

Es entonces necesario para iniciar el estudio, definir el Número de MACH.

V.3.1) Número de MACH

El número de MACH es la relación de la velocidad del fluido y la velocidad de propagación del sonido en el mismo :

$$\text{No. MACH} = v = \frac{\text{VELOCIDAD DEL GAS}}{\text{VEL. SONIDO EN EL GAS}} \quad \text{Ec. 5.14}$$

La velocidad sónica de propagación en un gas está dada por :

$$v_s = \left(\frac{K P}{\rho} \right) = \left(\frac{K T R}{M} \right) \quad \text{Ec. 5.15}$$

donde :

- K : Relación de calores específicos del gas (C_p/C_v)
- T : Temperatura absoluta del fluido
- R : Constante universal de los gases ideales
- M : Peso molecular del gas
- ρ : Densidad del gas
- v_s : Velocidad sónica en el gas

Y la velocidad del gas está dada por :

$$v_g = \left(\frac{4 Q}{\pi d^2} \right) \quad \text{Ec. 5.16}$$

donde :

- Q : Flujo volumétrico
- d : diámetro interno de la boquilla

Los efectos de la velocidad de salida del gas pueden ser clasificados de acuerdo a las características que presenta la flama y las ventajas y desventajas de estas, generadas en la operación.

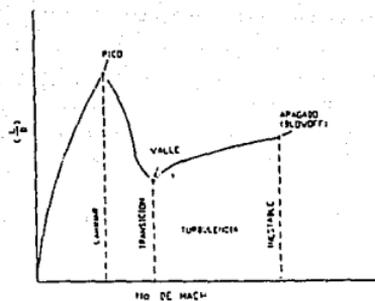
En la gráfica 5.2 se presentan los tipos de flama y las zonas de transición y de inestabilidad de la misma.

Cuando la velocidad es baja el flujo es laminar y genera una flama con longitudes mayores de 120 veces el diámetro del quemador. Este tipo de flama genera gran luminosidad (humo) lo que provoca problemas de contaminación mayores. La reducción de humo se logra al inducir un premezclado del aire-combustible con inyección de vapor de agua, evitando así la formación de olin. Una velocidad baja puede generar que el mezclado aire-gas se efectúe ligeramente abajo del extremo superior de la chimenea, alojando la flama en el interior con riesgos de explosión o daños al equipo mismo (boquillas, pilotos, sellos, accesorios, etc.) por sobrecalentamiento.

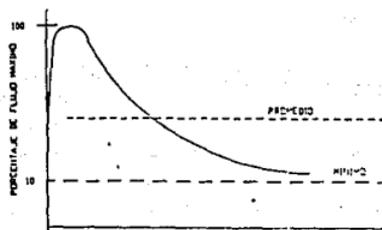
Por otro lado velocidades muy bajas a la salida forman mezclas explosivas (límites de flamabilidad) que pueden ser encendidas por los pilotos generando posibles retrocesos de flama (*flasback*) al disminuir o terminar el flujo del desfogue. Para evitar esta situación de peligro se utilizan accesorios que reducen la probabilidad del regreso de flama o gases inertes de purga para desalojar la mezcla flamable y mantener siempre una presión positiva en el quemador, de tal manera que se evite la entrada de aire y el regreso del gas a quemar.

Conforme se incrementa la velocidad del fluido se presenta la flama turbulenta (flujo turbulento). Una velocidad alta en la salida del quemador ofrece diversas ventajas:

- a) Aereación de la flama producida por el efecto *jet* obteniéndose una combustión estable y longitudes de flama cercanas a 120 veces el diámetro del quemador.
- b) Reducción del calor disipado por radiación al no generarse partículas de olin. Al aumentar la velocidad del fluido la intensidad de la luz disminuye en calor y se reduce el grado de humo .
- c) Facilita la combustión de pequeñas gotas formadas en el gas. El tamaño de estas gotas se reduce debido a la turbulencia del fluido. La posibilidad de que estas gotas escapen a la combustión es muy baja, con lo cual se garantiza que estas dañen superficies aledañas y



A) Tipos de Flamas



B) Padrón de velocidade de flujo.

Gráf. 5.2 Tipos de flamas y zonas de transición.

eviten gotas encendidas cayendo como lluvia.

- d) El costo de instalación y estructura también se ven reducidos al incrementar la velocidad de salida, ya que implica a su vez una reducción en el diámetro del mismo. Los niveles de radiación disminuyen directamente al elevarse más la flama por efectos de la velocidad y por lo tanto disminuye la altura requerida.

A velocidades cercanas de 0.2 *Mach* la flama se convierte en inestable e inicia lo que se conoce como levantamiento de la flama o *Blowoff*, es decir, la flama se separa de la punta del quemador. A medida que se incrementa la velocidad, la combustión se efectúa a una distancia mayor por encima de la punta de la chimenea, alcanzando la máxima distancia a un valor de 12 veces el diámetro.

Se ha demostrado y sugerido que el No. de *Mach* no exceda el valor de 0.2 para la velocidad de descarga del quemador y evitar las condiciones de levantamiento de la flama (*blowoff*).

La velocidad de levantamiento de la flama puede extenderse mediante anillos de retención especiales para estabilizar la flama y reducir la posibilidad de apagado.

V.3.3) Patrón de Flujo

El máximo flujo en el sistema es el resultado de un contratiempo súbito en la operación de la planta, tal como una falla de agua de enfriamiento, fuego local y otras fallas ya mencionadas. Es de esperarse que la situación de flujo máximo sea poco frecuente y se presente en intervalos cortos de tiempo. El flujo normal del sistema es causado por la apertura de alguna válvula de seguridad y la depresurización frecuente de equipo de proceso. La cantidad de flujo normal es generalmente considerada como el 10 % del flujo máximo de diseño.

La gráfica 5.3 propuesta por Kent muestra el patrón de la velocidad de flujo probable que podría presentarse cuando ocurre el máximo flujo al quemador.

En dicha gráfica se observa un súbito pico de la velocidad de flujo para después decrecer rápidamente; este decaimiento del flujo puede ser aproximado por una función logarítmica.

Tomando como velocidad promedio del gas en la descarga a través del quemador como 0.2 Mach y considerando que en la situación de máxima descarga se excede la velocidad de levantamiento de flama por un intervalo de tiempo corto se estima la velocidad de flujo promedio para el quemador en una condición de descarga máxima.

$$\text{VELOCIDAD PROMEDIO DEL FLUJO} = \frac{100 - 10}{L \cdot \frac{100}{10}} = 39.2 \text{ \& } 40 \text{ \&}$$

La velocidad máxima a la salida del quemador es definida entonces como :

$$U_m = \frac{0.2}{0.4} \text{ Mach} = 0.5 \text{ Mach}$$

Se han mencionado ya las ventajas resultantes de una velocidad alta en la punta del quemador. Forstall and Gaylord investigaron la mezcla resultante de fluidos por efecto *jet*, es decir, el efecto de mezclado que aparece cuando uno de los fluidos circula a una velocidad alta *in situ* de otro fluido en calma; además estudiaron las relaciones existentes entre la fracción de volumen axial (v) y la velocidad de salida del fluido (U) con respecto a la distancia de la boquilla de salida (a). Estos experimentos fueron aplicados para líquidos; sin embargo Hottel reporta resultados similares para flujos *jet* en aire.

El patrón de flujo puede observarse en la figura 5.3.

De acuerdo a esto, es razonable considerar que la combustión de la descarga de gas se inicie cuando la velocidad axial está abajo de 0.2 Mach. Gaylord indica que existe un perfil entre la velocidad y la fracción volumen aproximada por una función coseno; se pueden establecer entonces las siguientes relaciones para la velocidad de salida del fluido a través de la boquilla:

$$\frac{U_m}{U_o} \left(\frac{a}{D} \right) = 6.4$$

$$U_a = \frac{\pi U_m}{4}$$

Sustituyendo y despejando para a :

$$a = \frac{6.4\pi D}{4} \left(\frac{U_o}{U_a} \right)$$

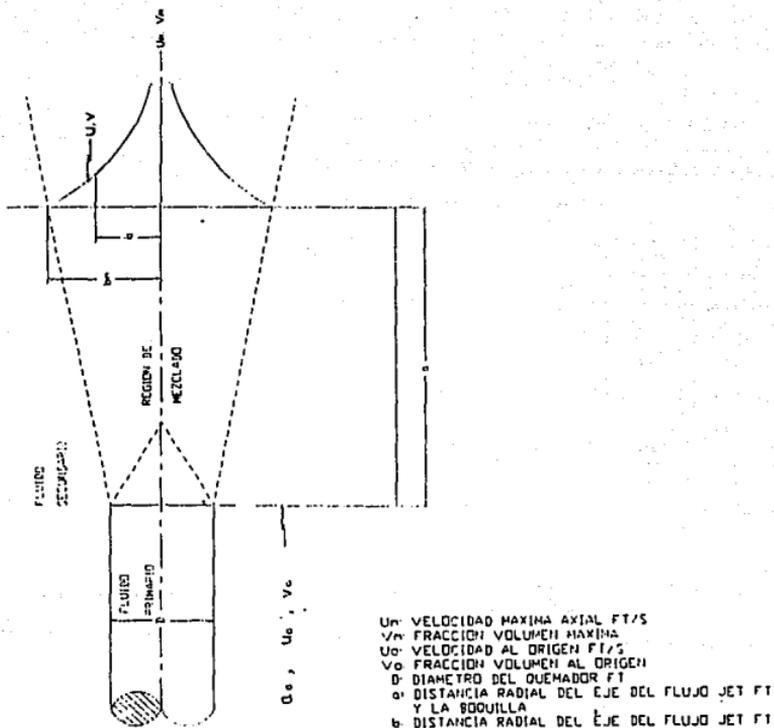
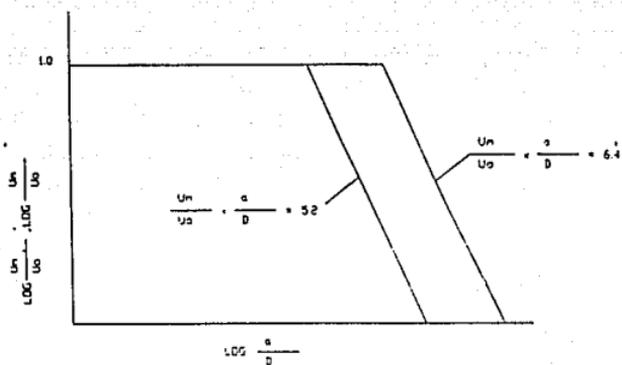


Fig. 5.3 Patrón de flujo de mezclado a la salida del Quemador.



Gráf. 5.3 Perfil de velocidad y fracción volumen contra distancia del jet.

Por diseño :

$$\frac{V_o}{V_a} = \frac{0.5}{0.2} Mach$$

$$\Delta \quad a = 12.57 D$$

Ec. 5.17

Donde :

a : Distancia entre la boquilla y la altura o separación donde se efectúa la combustión

Cálculo para la fracción volumen (V) :

$$\frac{V_m}{V_o} \left(\frac{a}{D} \right) = 5.2$$

$$V_a = \frac{\pi V_m}{4}$$

$$\Delta \quad V_a = \frac{5.2 \pi V_o D}{4a}$$

Ec. 5.18

Pero :

$$V_o = 1.0$$

$$a = 12.27 D$$

$$\Delta \quad V_a = 0.325$$

Fracción volumen promedio

Hottel presentó relaciones existentes entre la longitud de la flama y el diámetro de la boquilla y la relación aire-combustible. Esta relación puede ser expresada como :

$$\frac{L}{D} = \frac{150 W_f}{W_a}$$

Ec. 5.19

Donde :

W_f : Flujo de combustible (Lb/hr)

W_a : Flujo de aire (Lb/hr)

L : Longitud de la flama (Ft)

D : Diámetro del quemador (Ft)

Del desarrollo anterior se tiene que la fracción volumen de combustible en el punto de ignición ($V_a = 0.2 Mach$) designado es mezclado en aire con una fracción volumen de $(1 - V_a)$.

$$\frac{W_f}{W_a} = \frac{mf V_a}{28.9 (1 - V_a)} = \frac{0.325 mf}{28.9 (1 - 0.325)} = 0.0167 mf$$

mf : Peso molecular del combustible

Cuando ocurre el escape de la flama en la punta del quemador :

$$D = D_a$$

$$\frac{L}{D_a} = (150) (0.167 \text{ mf}) = 2.5 \text{ mf}$$

Se ha encontrado que el máximo valor de (L/D_a) para una velocidad de flujo promedio de 0.2 *Mach* es de 118.

A velocidades cercanas a 500 Ft/s es aspirado suficiente aire por la boquilla, que ocasiona que la concentración de combustible esté por abajo de los límites de flamabilidad y la flama se extinga o apague. Esta zona se conoce como flama inestable. Para determinar los límites entre las zonas y tipos de flama pueden utilizarse la gráfica 5.5 en la figura 5.4. De la gráfica 5.5 se distinguen dos tipos de curvas, las cuales representan el rango de aparición y características de quemado de los tipos de flamas mencionadas; estas características son utilizadas en el dimensionamiento del quemador.

La figura 5.4 muestra la transición de la flama de un tipo a otro como una función de la velocidad de salida en el quemador.

Para realizar estas gráficas se utilizaron los criterios siguientes :

PICO	Número de Reynolds	3,000
VALLE	Número de Reynolds	5,000
LEVANTAMIENTO	Número de <i>Mach</i>	0.2

(*Blowoff*)

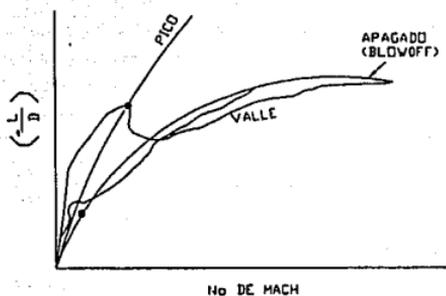
Cada uno de los criterios están referidos al estado del gas (antes de la combustión) en la salida del quemador.

Es importante aclarar que todas estas consideraciones para los tipos de flama y zonas de combustión, están basadas en estudios realizados para emisiones en viento tranquilo. El efecto del viento se presenta en la flama inclinándola y modificando los rangos en que aparecen cada tipo de flama. Una de estas modificaciones es la reducción del valor de No. de *Mach* al cual se presenta el fenómeno de levantamiento de la flama.

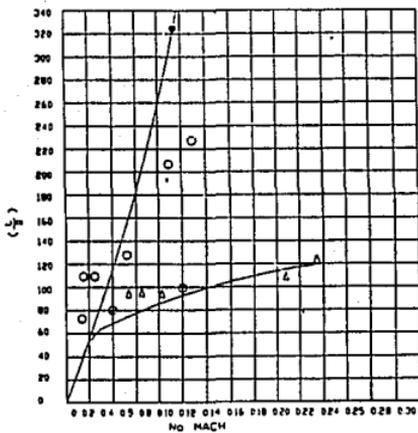
V.4) Condiciones atmosféricas del medio ambiente

La forma e inclinación de la flama de un quemador tipo elevado depende en gran medida de las condiciones meteorológicas del área de ubicación, por lo cual es importante estudiar este tipo de fenómenos naturales.

Las condiciones meteorológicas que influyen tanto a la dispersión de contaminantes como a la estabilidad de la flama, ambos emitidos por el quemador, son :



Gráf. 5.4 No. de MACH contra la relación L/D.



Gráf. 5.5 Características de quemado de los tipos de flamas.

- i) Características de la zona (Valles, Montañas, etc.)
- ii) Temperatura y presión de la atmósfera
- iii) Vientos

La tierra tiene características propias que contribuyen a la formación del clima. El giro sobre su propio eje de Oeste a Este determinan la dirección predominante de los vientos y de las corrientes de los océanos. Por otro lado su forma esférica achatada por los polos determina profundas diferencias de temperatura en diversas partes de la tierra.

La atmósfera que cubre la tierra es una mezcla fluida de gases con capas concéntricas de espesor y densidad variable. Estas características son las que determinan, como se verá más adelante, las condiciones de viento que rodearán la flama del quemador.

Debido a que en la atmósfera siempre hay diferencias de temperatura, se producen variaciones de presión, el gradiente de presión de aire incluye remolino, corrientes de convección, ascenso convergente y disminuciones o calmas, que puedes arrastrar la flama hasta apagarla, produciendo además nubes de contaminantes que pueden llegar a zonas habitadas causando problemas serios.

V.4.1) Características de la zona

La deferencia inicial de los vientos resulta básicamente de la fuerza ejercida por la diferencia de presiones, sin embargo, tan pronto como el aire empieza a trasladarse a lo largo de la superficie dela tierra su dirección se altera por otros factores que actúan juntos.

A lo largo de la superficie de la tierra, el viento no se mueve libremente en un plano horizontal, las irregularidades en el terreno y las diferencias locales en la convección térmica causan un movimiento irregular de aire que ocasiona cambios abruptos en la velocidad y dirección del aire.

La fuerza deflexiva debida a la rotación de la tierra sobre su eje es una de las influencias más fuertes sobre la dirección del viento, la cual es debida al efecto resultante del movimiento rotacional de la tierra y de los movimientos de aire relativos a ésta.

Es importante realizar un estudio topográfico y ambiental de la zona para predecir las condiciones que rodearán el quemador y realizar un diseño adecuado, tanto estructural como operativo.

V.4.2) Temperatura y presión de la atmósfera

Las variables físicas más importantes del aire son su densidad y su humedad. Ambas varían con la temperatura y la presión, es decir, una columna de aire que se calienta se dilata; sus moléculas se apartan mutuamente y por consiguiente ejercen menor presión. Con esto se entiende que cualquier gas (hidrocarburo) libre se expande y tiende a moverse de una región de mayor presión a otra de menor presión (difusión). En la expansión o difusión si no existe un intercambio de calor con los alrededores, el gas se enfriará y su densidad aumentará, pero si se llega a una mezcla de gas-aire estequiométrica como para provocar una explosión con un pequeño aumento de temperatura natural (por efecto del sol) o inducida por alguna fuente de ignición, esta puede ocurrir, obteniéndose incluso resultados drásticos.

También se presenta una situación de peligro cuando el aire está en equilibrio con el gas, es decir, cuando el punto donde la densidad de la columna de aire-gas es igual a la del aire circundante, lo cual podría provocar que la nube de gas no se moviese, pudiendo incluso llegar a asfixiar una determinada zona ya sea en planta o en lugares cercanos, siendo esto de peligro para el personal o los habitantes de la zona.

V.4.3) Vientos

Las mediciones de frecuencia y velocidad de los vientos, nos han llevado a distinguir dos tipos de vientos :

- i) Vientos Dominantes
- ii) Vientos Reinantes

Los vientos reinantes se refieren a los vientos cuya dirección es más frecuente en la zona, independientemente de su velocidad.

Los vientos dominantes se refieren a los vientos más fuertes en velocidad que se presentan en la zona, independientemente de la dirección que estos lleven. Es obvio decir, que los vientos dominantes y reinantes no necesariamente tienen la misma dirección.

Además de la dirección de los vientos y de su velocidad, estos pueden clasificarse de acuerdo con su estabilidad; una de las clasificaciones más aceptadas es la propuesta por Pasquill en la cual se consideran 6 estabilidades, a saber :

- A. Viento extremadamente inestable
- B. Viento moderadamente inestable
- C. Viento ligeramente inestable
- D. Viento a condiciones neutras de estabilidad
- E. Viento ligeramente estable
- F. Viento moderadamente estable

Estas condiciones tienen su mayor influencia en la estabilidad y forma de la flama del quemador y en la posibilidad de que este se apague accidentalmente durante su operación, causando una fuga de gas tóxico o flamable.

Específicamente en México, el Servicio Meteorológico Nacional ha clasificado a los vientos en función de su velocidad en

T A B L A 5.10
CLASIFICACION DE VIENTOS

V I E N T O	R A N G O
Débil	1.8 - 14.4 Km/hr
Moderado	14.5 - 28.9 Km/hr
Algo Fuerte	29.0 - 43.2 Km/hr
Fuerte	43.3 - 57.6 Km/hr
Violento	57.7 - 108.0 Km/hr
Viento en calma	Menor de 1.8 Km/hr
Huracán	Mayor de 108.0 Km/hr

* Datos proporcionados de los registros de la Estación Meteorológica de Dos Bocas.

V.5) Fenómenos Difusionales (Dispersión de Contaminantes)

En el inciso anterior (V.4) se analizaron los fenómenos atmosféricos y su influencia dentro de la operación del quemador elevado.

En este inciso se analizará el Fenómeno difusional atmosférico de las sustancias emitidas por el quemador durante su operación, ya que son determinantes para calcular la altura requerida para que ésta sea segura para el personal.

Básicamente la altura de un quemador tipo elevado está determinada por 2 aspectos importantes, el primero es por los niveles de Radiación emitidos durante su operación y el segundo por los niveles de

contaminación alcanzados en los alrededores del mismo.

Los efectos de las nubes tóxicas o explosivas producidas por el quemador sobre los humanos dependen básicamente del fenómeno de difusión de contaminantes, el cual a su vez está relacionado con la composición de contaminantes en el gas a quemar, el flujo del mismo y las condiciones ambientales, entre otros.

V.5.1) Descripción del Fenómeno

Desde el punto de vista Fisicoquímico, la difusión se define como el movimiento macroscópico de los componentes de un sistema que precede a una diferencia de concentración.

En el diseño de quemadores elevados es muy importante analizar la difusión de los gases que se desean quemar en dos situaciones posibles :

- i) Cuando el quemador se encuentre apagado accidentalmente y el sistema de desfogue esté operando (fuga de gas).
- ii) Cuando el quemador está en operación y se emiten nubes contaminantes producto de la combustión.

La primera situación implica que si el quemador está accidentalmente apagado (por falla en el sistema de ignición), entonces los gases del desfogue estarán siendo venteados directamente a la atmósfera, siendo de graves consecuencias si en la composición del gas de desfogue se encuentran sustancias tóxicas. Por otro lado si el quemador está en operación, se emitirán gases producto de la combustión que también representan un problema ecológico de magnitud variable, dependiendo de la composición del gas. Los principales productos de la combustión son el Dióxido de carbono (CO_2) y el vapor de agua (H_2O); también puede agregarse a estos productos el Dióxido de azufre (SO_2) si el gas quemado contenía ácido sulfhídrico (H_2S).

En ambas situaciones los efectos de la contaminación dependen principalmente de dos variables no controlables por el hombre :

- i) Condición del viento
- ii) Velocidad del viento

El fenómeno de Difusión de contaminantes en un quemador elevado se basa en considerar a éste como una fuente puntual de emisión de contaminantes y al primero como un fenómeno espontáneo e irreversible de la naturaleza. En estudios y mediciones realizados por Pasquill y otros autores, se encontró que el Fenómeno difusional se comporta como una distribución gaussiana desde la fuente de emisión y en la dirección del viento.

La curva de concentración del contaminante dependerá entonces de la combinación de las condiciones termodinámicas del fluido y de las condiciones atmosféricas de la zona.

Ya se ha mencionado en incisos anteriores que la condición de viento está referida a la estabilidad o inestabilidad de este en la atmósfera. La condición de viento tiene su mayor influencia en la forma en que la nube de contaminantes se irá desvaneciendo.

La estabilidad o inestabilidad del viento es una función de la temperatura ambiente, la estación del año, la dirección de los vientos, la humedad y la forma del terreno, el cual puede producir variaciones bruscas de viento. En las siguientes ilustraciones pueden observarse los tipos de dispersión que se cree ocurre para cada condición de viento, propuesta por Pasquill (ver ilustraciones en la figura 5.4) .

El comportamiento gaussiano de la concentración de contaminantes y las formas de dispersión de las nubes en función de la estabilidad del viento nos hacen vislumbrar que la variación en la altura del quemador (fuente de emisión) causará una variación de la concentración del contaminante y por lo tanto podrá determinarse la altura adecuada para no exponer al personal a concentraciones mayores a las permitidas por SEDESOL en México.

Cuando se estudia la dispersión de contaminantes en una planta, se tiene básicamente un punto de interés, conocer la concentración de contaminantes a cierta distancia del quemador, la cual generalmente es una distancia X en la dirección horizontal a la base del quemador y en la misma dirección del viento. Existen algunos métodos para calcular la concentración de un contaminante a nivel de piso en función de la altura de la chimenea que lo ventea, pero la técnica de mayor uso y la más confiable hasta este momento es la propuesta por *THE AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (API)*, la cual será descrita a continuación.

El primer paso es calcular la altura efectiva de la fuente de emisión y posteriormente calcular la concentración a nivel de piso del componente contaminante.

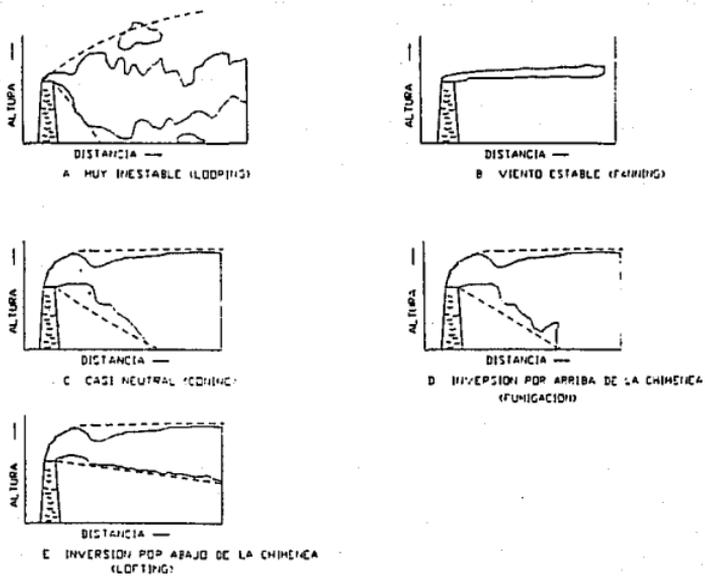


Fig. 5.4 Condiciones de viento de Pasquill.

La dispersión de contaminantes es quemadores será analizada para dos casos, el primero se refiere a gases venteados directamente a la atmósfera y el segundo a los gases producto de una combustión atmosférica.

V.5.2) *Dispersión de gases venteados a la atmósfera*

Este caso se presenta cuando existe una falla del Sistema de Ignición del quemador y entonces los gases del desfogeo sean relevados directamente a la atmósfera.

Para esta situación la concentración de un contaminante a nivel de piso, depende, además de la condición y velocidad del viento, de los siguientes factores :

- i) Flujo de gas venteado
- ii) Concentración de contaminantes en el venteo
- iii) Velocidad de salida del gas
- iv) Densidad y Temperatura del gas
- v) Diámetro de la chimenea
- vi) Altura de la chimenea
- vii) Temperatura ambiente

El gas venteado a través de la chimenea tenderá a formar una pluma de gas, que en condiciones neutrales de viento se levantará sobre la chimenea debido a la energía cinética del sistema. Esta energía se ve reflejada en el movimiento ascendente en dirección vertical de la pluma. La energía cinética es producto de la velocidad de salida del gas, pero existe también una energía térmica debida a la diferencia de temperaturas entre el gas de salida y el medio ambiente; esta energía térmica tiende a provocar un movimiento descendente que finalmente redunda en un efecto de boyanza entre la energía térmica y la energía cinética.

La diferencia de alturas provada por la diferencia de energías sería la representación de la altura de la pluma. Por lo tanto la altura efectiva de la chimenea, es decir, la altura real de la fuente puntual de emisión a la cual empieza la dispersión, estaría dada por esta ecuación :

$$H = H_s + \Delta H \qquad \text{Ec. 5.20}$$

Donde :

H : Altura efectiva de emisión

H_s : Altura de la chimenea física (quemador)

ΔH : Altura de la pluma

En algunos experimentos se ha demostrado que la altura de la pluma es inversamente proporcional a la velocidad del viento, aunque el grado de proporcionalidad varía con la condición atmosférica del mismo.

Existen distintas ecuaciones para relacionar la altura de la pluma con la velocidad del viento, pero en general esas relaciones indican que todas las ecuaciones son aproximaciones de una ecuación aplicada universalmente.

Briggs encontró que las plumas boyantes siguen la ley de '2/3' para una distancia considerable en la dirección del viento a lo largo de la chimenea (pero sin exceder más de 10 veces la altura de la misma). Sin embargo, después de amplias investigaciones y de un variado número de ecuaciones propuestas, las autoridades en la materia han llegado a la conclusión de que la ecuación de Holland involucra los términos más adecuados para calcular la altura efectiva de la pluma y por lo tanto la altura requerida de la chimenea.

La ecuación está dada para condiciones de viento moderadamente inestable y neutral, pero puede corregirse por un factor para las demás condiciones :

$$\Delta H = \frac{\omega d}{\mu'} \left[1.5 + 2.68 P \left(\frac{T_g - T_a}{T_g} \right) d \right] \quad \text{Ec. 5.21}$$

Donde :

ω : Velocidad de salida del gas (m/s)

d : Diámetro de la chimenea (m)

μ' : Velocidad del viento a la altura de la chimenea (m/s)

P : Presión atmosférica (atm)

T_g : Temperatura del gas ($^{\circ}$ K)

T_a : Temperatura ambiente ($^{\circ}$ K)

(ver figura 5.5)

Ecuación corregida para viento estable y extremadamente inestable :

$$H = H_s + f * H \quad \text{Ec. 5.22}$$

CONDICION DE VIENTO	FACTOR DE CORRECCION (f)
Inestable	1.1 - 1.2
Estable	0.8 - 0.9

Estos factores son recomendados por Holland para condiciones extremas de estabilidad o inestabilidad de la atmósfera.

La velocidad de viento crítica para cualquier condición atmosférica es aquella que causa una máxima concentración de contaminantes a nivel de

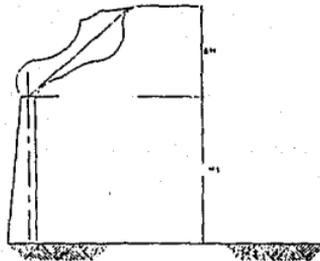


Fig. 5.5 Altura efectiva.

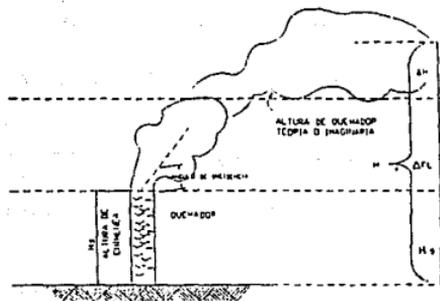


Fig. 5.6 Determinación de la altura efectiva del Quemador.

piso. Ya que la ecuación de Holland y otros autores indican que la altura de la pluma es una función inversa de la velocidad del viento, contrariamente, el efecto de dilución es mayor cuando la velocidad del viento se incrementa, pero existe una velocidad de viento específica en la cual estas dos fuerzas contrarias encuentran un punto de equilibrio en donde se presenta la máxima concentración a nivel de piso.

Esta velocidad de viento crítica se determina fijando una altura propuesta de chimenea y calculando la concentración del contaminante para distintas velocidades de viento hasta encontrar aquella en que la concentración sea mayor que en las demás.

V.5.3) *Dispersión de gases producto de una combustión atmosférica*

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

El contaminante más peligroso es el hidróxido de azufre (SO₂) producto de la combustión del H₂S. La contaminación por esta sustancia se debe principalmente a sus efectos por toxicidad, olor y humo. Estos normalmente son eliminados o disminuidos por algunas técnicas específicas para mejorar la combustión.

El cálculo de la altura efectiva de emisión y la dispersión atmosférica de los efluentes es relativamente complicada. Estos cálculos son regularmente más complejos para el gas quemado, en cuyo caso el gas efluente de la chimenea es quemado antes de la dispersión final y el calor relevado es externo al quemador.

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

$$H = H_s + \Delta FL + \Delta H \qquad \text{Ec. 5.23}$$

Donde :

H : Altura efectiva

H_s : Altura de la chimenea

ΔFL: Componente vertical de la longitud de la flama

ΔH : Elevación de la pluma después del quemado completo

La longitud de la flama puede ser considerada como :

$$FL = 120 d \qquad d : \text{Diámetro del quemador}$$

(ver figura 5.6)

además :

$$\Delta FL = FL \frac{\Sigma \Delta Y}{L}$$

De acuerdo con API RP - 521 éstas ecuaciones son directamente aplicables a velocidades sónicas de 0.2 Mach, la cual es generalmente la base del diseño (gráfica 5.6).

La longitud de la flama varía con la velocidad del gas y su temperatura, las que a su vez están relacionadas con las características del gas a quemar. Para determinar la componente vertical de la longitud de la flama, se recomienda el uso de la gráfica donde se obtiene $\Sigma \Delta Y$.

Para obtener el valor de $\frac{\Sigma \Delta Y}{L}$ se requiere la relación :

$$\frac{\mu_w}{\mu_o} = \frac{\text{Velocidad del viento crítico}}{\text{Velocidad de salida del gas}}$$

Para el cálculo de H se recomienda la utilización de la ecuación de Holland, ya mencionada; pero corrigiendo la temperatura del gas T_g por la temperatura de los gases de combustión T_{se} (también conocida como la temperatura imaginaria de los gases de salida). Para estimar esta temperatura es posible utilizar la ecuación :

$$T_{se} = T_l + H_c + H_r \quad \text{Ec. 5.24}$$

donde :

T_l : Temperatura del gas a la salida del quemador antes de la combustión

H_c : Calor de combustión

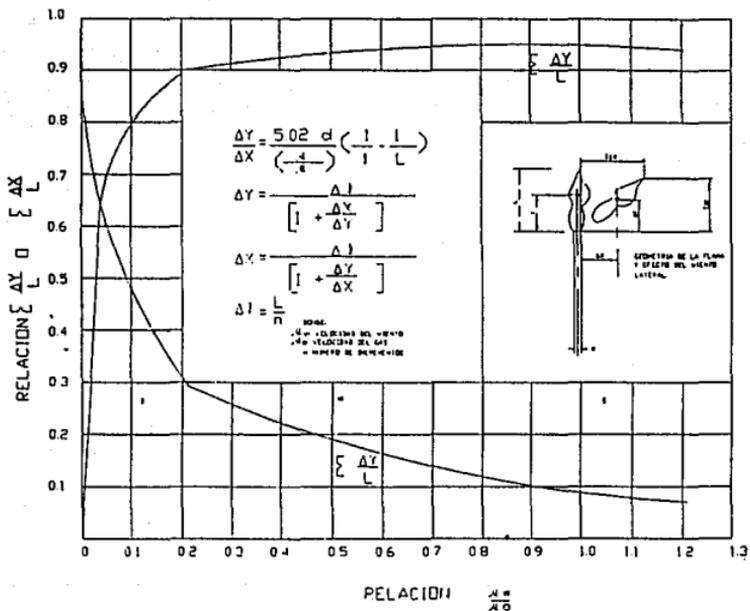
H_r : Pérdidas de calor por radiación

De acuerdo con este procedimiento, la altura de emisión calculada es la que se muestra en la figura 5.6'.

$$H = H_s + \Delta FL + \Delta H$$

Ya que se ha estudiado la forma de calcular la altura efectiva de emisión, se debe calcular la concentración de sustancias tóxicas a nivel de piso, en función de la dispersión de estas en la atmósfera.

Las ecuaciones básicas que han sido presentadas por varios autores, incluyendo Sutton y Bosanquet, son modificaciones a las propuestas por Pearson, Pasquill, Turner y Gifford. En general estas ecuaciones no varían mucho e involucran expresiones de las curvas de probabilidad



Gráf. 5.6 Distorsión de la flama por efecto del viento lateral y la velocidad del jet.

desarrolladas por Karl Gauss. Las curvas gaussianas fueron originalmente aplicadas para indicar desviaciones de valores conocidos involucrando estudios estadísticos y experimentales.

Estas curvas han sido aplicadas en muchas condiciones para la determinación de concentraciones atmosféricas en dirección del viento resultado de un venteo. Las ecuaciones que más adelante se presentarán asumen una distribución gaussiana en los planos horizontal y vertical de la dispersión, es decir, las ecuaciones de desviación incorporadas sobre una probabilidad, σ_y y σ_z , horizontal y vertical respectivamente.

La mayor diferencia entre las distintas ecuaciones propuestas está en los coeficientes de dispersión y la forma como estos varían con la estabilidad atmosférica y la distancia en dirección del viento.

La curva gaussiana es aplicada para la distribución de contaminantes como se muestra en la figura 5.8, en la cual 'Y' (valor de concentración relativa) varía de 0 a 100 % cuando son graficados contra los valores de $\left[\frac{x - \bar{x}}{\sigma} \right]$. El valor de x representa cualquier punto en dirección del viento y del flujo del venteo, y \bar{x} representa la distancia en metros del punto x .

Las ecuaciones para determinar la concentración de partículas de gas dependen de la altura efectiva de la chimenea (H) y son aplicables para fuentes simples de emisión, partículas iguales o menores de 20 micrones y cuando no existe deposición de partículas o reacción en la superficie de la chimenea.

$$X(x, y, z, H) = \frac{Q_c}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\}$$

Ec. 5.25

Donde :

- X : Concentración a cualquier punto particular del espacio en g/m^3 de contaminante
- x : Distancia viento abajo (m)
- y : Distancia transversal al viento, del eje x (m)
- z : Distancia vertical sobre el piso (m)
- Q_c : Velocidad másica uniforme de emisión en g/s de contaminante
- σ_y : Desviación estándar de la difusión de la pluma en la dirección horizontal
- σ_z : Desviación estándar de la difusión de la pluma en la dirección vertical

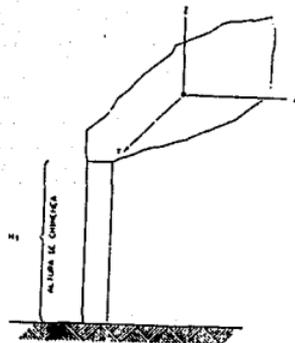


Fig. 5.7 Difusión en tres dimensiones.

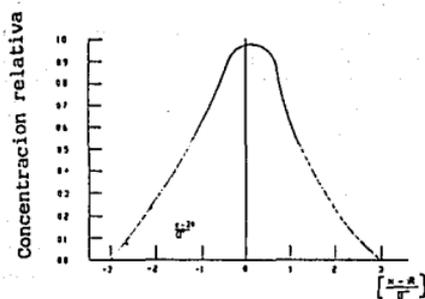


Fig. 5.8 Curva de distribución Gaussiana.

μ : Velocidad del viento en m/s

H : Altura efectiva de emisión (m)

De acuerdo con esta ecuación, y como era de esperarse, la difusión de sustancias tóxicas en aire se lleva a cabo en 3 direcciones y es dependiente de la altura sobre el nivel de piso de la fuente de emisión (x, y, z y H respectivamente).

De tal forma, que si se desea calcular la difusión en el plano horizontal (nivel de piso) y además se calcula la concentración a lo largo del centro de línea de la pluma, entonces :

$$z = 0$$

$$y = 0$$

Por lo tanto la ecuación final simplificada es :

$$X(x, 0, 0, H) = \frac{Q_c}{\mu \sigma_y \sigma_z} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z}{\sigma_z} \right)^2 \right] \quad \text{Ec. 5.26}$$

De esta última ecuación los únicos valores que se desconocen son los coeficientes de difusión. Estos coeficientes, generalmente están basados en 10 minutos de tiempo de muestreo para la distribución gaussiana, pero si el muestreo dura menos tiempo se obtienen concentraciones mayores e inversamente si el tiempo es mayor se obtienen concentraciones menores. Para condiciones de viento neutral y ligeramente inestable los mayores valores son aproximadamente de 10% para 3 minutos, mientras más largo sea el tiempo de muestreo pueden existir decrementos en las concentraciones de aproximadamente un 50% en cuatro horas. Estas variaciones ocurren debido a los cambios de la pluma por efecto del viento. Finalmente, estadísticamente se tiene que el coeficiente de dispersión en el plano horizontal (σ_y) se incrementa con el incremento en el tiempo de muestreo. Algunos autores han demostrado que el valor máximo de concentración se presenta cuando $\sigma_z = (H/\sqrt{2})$, este valor máximo es obtenido por la ecuación :

$$X_{max} = \left(\frac{2 Q_c}{e \pi \mu H^2} \right) \left(\frac{\sigma_z}{\sigma_y} \right) \quad \text{Ec. 5.27}$$

$$e : 2.718$$

Para calcular la concentración de una sustancia tóxica a nivel de piso a cualquier distancia del quemador en dirección del viento, es necesario determinar el valor de los coeficientes de difusión horizontal y vertical. La exactitud de este cálculo depende ahora de la exactitud del método para estimar estos valores.

La desviación estándar o coeficientes de difusión además de variar con la turbulencia atmosférica también varían con la velocidad del viento, con

la topografía del terreno y con el incremento de la distancia respecto a la fuente de emisión.

Para cada una de las 6 estabildades o condiciones de turbulencia propuestos por Pasquill, los valores de los coeficientes de dispersión están expresados como una función de la distancia en dirección del viento. Las gráficas para estas condiciones son mostradas en las figuras de la siguiente página. Estas gráficas representan la difusión causada por la fuerza horizontal dada por la dirección del viento y por la fuerza vertical, determinada por la estabilidad o inestabilidad del viento. Los datos presentados en estas gráficas consideran que la dispersión se lleva a cabo en lugar abierto y que la altura de la chimenea no excede los 100 metros sobre el nivel del piso. Además estos valores son más exactos para zonas suburbanas que para áreas urbanas, donde pueden existir interferencias con otras construcciones, aunque pueden tomarse como una aproximación.

V.5.4) Algoritmo de cálculo

Un algoritmo de cálculo propuesto para estimar la altura del quemador que no exceda los límites máximos permitidos por las Normas de seguridad, se dá a continuación. (algoritmo 5.1)

Este método es aplicable para calcular la concentración a nivel de piso como una función de la distancia entre un punto en dirección del viento y el quemador elevado; pero también puede calcularse gráficamente la distancia a la cual se presentará la máxima concentración de contaminante ya que como se ha dicho hasta ahora, la dispersión está regida por una distribución gaussiana; lo cual quiere decir que la concentración máxima se presentará en el punto donde el máximo de la campana de gauss toque el piso.

Para el cálculo gráfico de esta concentración máxima, la ecuación es :

$$X_{\max} = \left[\frac{\alpha \mu}{Q_{\max}} \right] \left[\frac{Q_c}{\mu} \right] \quad \text{Ec. 5.28}$$

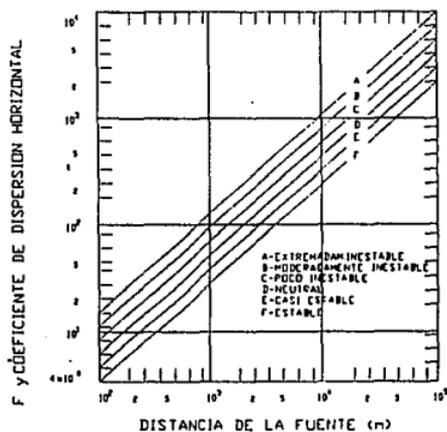
donde :

Q_c : Cantidad de contaminante emitido (g/s)

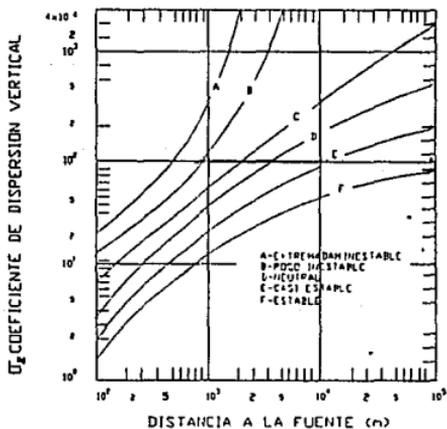
μ : Velocidad del viento en m/s

X_{\max} : Concentración máxima en g/m³

$\left[\frac{\alpha \mu}{Q_{\max}} \right]$: Relación obtenida de Gráfica 1 Apéndice A

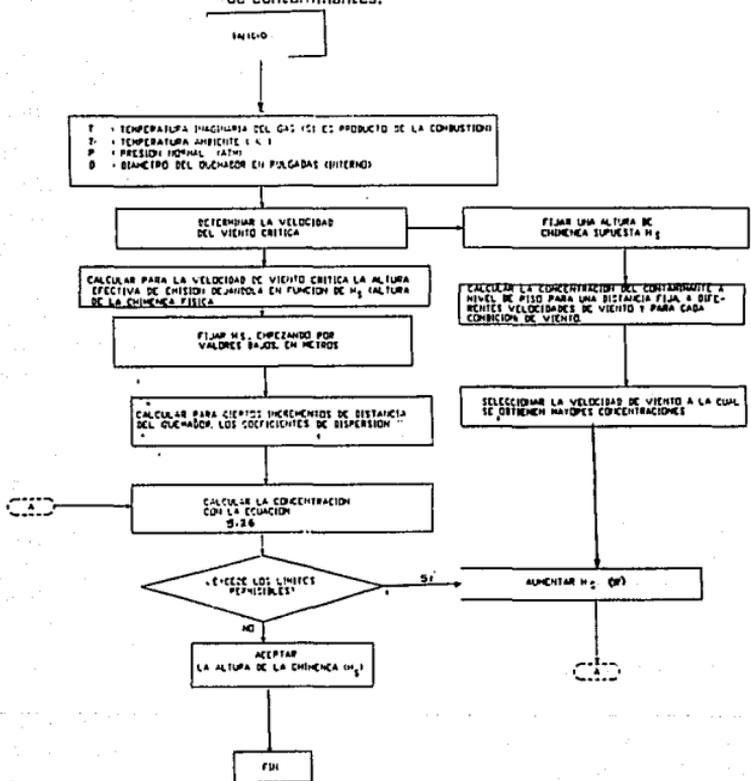


Gráf. 5.7 Difusión lateral (Y) contra dirección del viento.



Gráf. 5.8 Difusión vertical (Z) contra dirección del viento.

Algoritmo 5.1 Cálculo para estimar la altura de Quemador por Dispersión¹ de contaminantes.



Algoritmo 5.1 Cálculo de Dispersión de contaminantes (Método Riguroso).

Para estimar el valor de esta relación se requiere de dos datos :

- i) Altura efectiva de emisión (H) en metros
- ii) Seleccionar una condición de viento

Con estos dos valores se localiza en la gráfica A.1 del Apéndice A el punto correspondiente, trazando una vertical sobre ese punto, se encuentra el valor de $\left[\frac{\sigma \mu}{Q_{max}} \right]$ y se sustituye en la ecuación anterior para conocer la concentración máxima; trazando una horizontal se localiza la distancia en Km a la cual se obtiene dicho valor.

V.6) Radiación

El principal factor que deberá considerarse en el diseño del Quemador es la protección al personal y al equipo, por lo tanto es importante determinar los niveles de radiación que emitirá el quemador cuando se presente el flujo máximo esperado. Esto hace necesario conocer la naturaleza de la radiación y aplicar el mejor criterio para su cálculo, dependiendo de la configuración del sistema de desfogue y de la ubicación y distribución de la planta.

A continuación se hará el análisis Físicoquímico de este fenómeno para obtener las ecuaciones de interés para el cálculo del quemador, y posteriormente se estudiarán los efectos de la Radiación en el medio ambiente, considerando a ésta como una forma de contaminación térmica.

V.6.1) Fenómeno de Radiación

El término radiación se refiere a la emisión continua de energía en forma de ondas electromagnéticas que se originan a nivel atómico. Algunos ejemplos de este tipo de energía son los rayos gama, rayos X, ondas de luz, rayos infrarrojos, ondas de radio y ondas de radar; estas solo difieren unas de otras en su longitud de onda.

La parte que nos interesa es la Radiación Térmica, la cual consta de ondas electromagnéticas emitidas por un sólido, líquido o gas en virtud de su temperatura.

Todos los objetos emiten energía radiante en forma continua. A temperaturas bajas la rapidez de emisión es pequeña, y la radiación es predominantemente de longitudes de onda larga. A medida que la temperatura se incrementa, la velocidad de emisión aumenta más

rápidamente, y la radiación predominante se corre hacia longitudes de onda más cortas.

Mediciones experimentales demuestran que la velocidad con la cual se irradia energía térmica desde una superficie varía directamente con la cuarta potencia de la temperatura absoluta del cuerpo radiante. Por lo tanto, si se duplica la temperatura de un objeto, la velocidad con la cual emite energía térmica se incrementará 16 veces .

$$v_{\text{rad}} \propto T_{\text{abs}}^4$$

Un factor adicional que debe considerarse al calcular la rapidez de transferencia de calor por radiación es la naturaleza de las superficies expuestas. Objetos que son buenos emisores de radiación térmica también resultan ser buenos absorbedores de la misma. Un absorbedor ideal o un radiador ideal es algunas veces conocido como cuerpo negro. Una medida de la capacidad del cuerpo para absorber o emitir radiación térmica, es comúnmente conocida como *ABSORBANCIA (EMISIVIDAD)*, la cual es una cantidad adimensional y cuyo valor oscila entre 0 y 1.

0 : Mínima absorbanca

1 : Máxima absorbanca

La rapidez de radiación de un cuerpo se define formalmente como la energía radiante emitida por unidad de área por unidad de tiempo.

Como se expuso anteriormente esta velocidad depende de dos factores, la temperatura absoluta y la emisividad del cuerpo radiante. La radiación es el factor que controla la transmisión térmica a temperaturas muy altas, tal como las que se presentan en la punta del quemador.

Para determinar la radiación de la flama es necesario conocer su emisividad, la cual depende del tipo de flama emitida por el Quemador. En la combustión de mezclas flamables se presentan dos tipos de flamas, las que son Luminosas y las que no lo son; y cada una de ellas tiene un valor de emisividad distinta.

V.6.2) *Emisividad de flamas luminosas*

Las flamas luminosas son las que se producen de mezclas de gas combustible que al quemarse se forman partículas de ollín y grandes cantidades de humo. Este desprendimiento de partículas aumenta la emisividad de una flama, por lo cual requiere para su determinación un método donde se introduzca la emisividad de las partículas de ollín que aumentan la emisividad total de la flama.

La temperatura máxima que alcanza la flama es a la cual se llega a su mayor grado de emisividad. Para establecer la temperatura de la flama se puede utilizar la gráfica 5.9, para ello se requiere conocer el peso molecular del gas o su poder calorífico (LHV).

Se ha encontrado que la temperatura promedio de las temperaturas de flama reportadas, generalmente oscila en un valor de 4100 °R. Esta temperatura puede utilizarse en caso de no tener un valor exacto de ella para el gas a quemar.

Las bases para el análisis de la emisividad de una flama radican en el poder de emisividad del cuerpo negro, definida como :

$$E_b = \sigma T^4 \quad \text{Ec. 5.29}$$

Donde :

- E_b : Emisividad del cuerpo negro
- σ : Constante de Stefan-Boltzman
- T : Temperatura absoluta (°R)

Sustituyendo el valor de la constante y considerandola temperatura de la flama como T_f se tiene la siguiente expresión :

$$E_b = 0.1713 \left(\frac{T_f}{100} \right)^4 \quad \text{Ec. 5.29 A}$$

La emisividad de una flama está en función de la longitud de ésta; aunque puede suponerse una longitud promedio debido a las variaciones de flujo. Para explicar la radiación de una flama se sugiere considerar el modelo que estudia esta radiación como una esfera de cuya superficie emana ésta. Entonces, como el concepto de cuerpo negro considera que no hay pérdidas de calor, se puede igualar el calor total liberado por la flama con la emisividad de la misma.

$$4\pi r^2 E_b = Q \quad \text{Ec. 5.30}$$

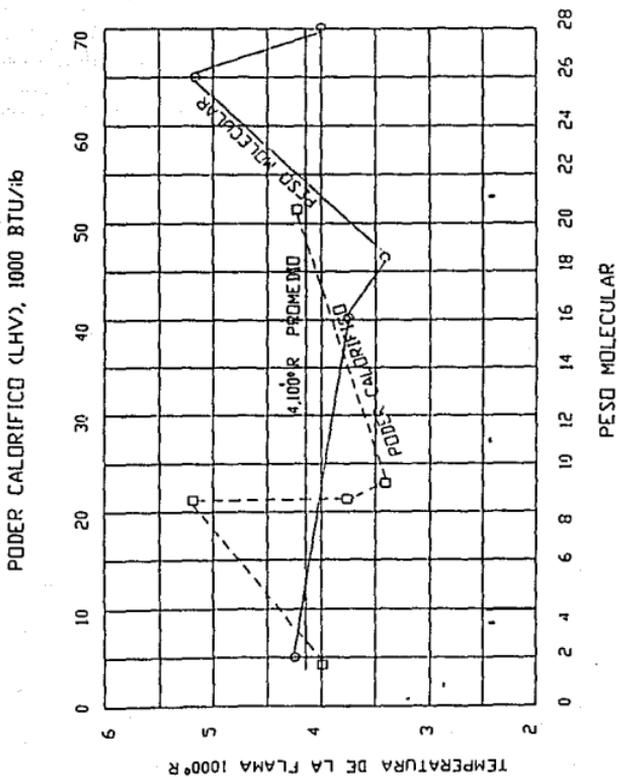
donde:

- Q : Calor total liberado (BTU/hr)
- r : Longitud media de la flama (Ft)
- E_b : Emisividad del cuerpo negro

por tanto :

$$E_b = \frac{Q}{4 \pi r^2} \quad \text{Ec. 5.31}$$

sustituyendo en la ecuación 5.29 y resolviendo para r :



Gráf. 5.9 Peso molecular contra temperatura de la flama.

$$r = \frac{Q^{1/2}}{1.47 \left(\frac{T_f}{100} \right)^2} \quad \text{Ec. 5.32}$$

si se utiliza la temperatura de flama promedio de 4100 °R

$$r = \frac{Q^{1/2}}{2470} \quad \text{Ec. 5.33}$$

Si se toma como referencia el poder emisor del cuerpo negro, entonces el poder emisor de un cuerpo cualquiera, será una fracción de éste, dependiente de su emisividad :

$$E = c E_b$$

donde :

- E : Poder emisor de un cuerpo
- E_b : Poder emisor del cuerpo negro
- c : Emisividad

La emisividad depende de la composición del gas a quemar y del grado de premezclado con aire para su ignición.

Para gases de hidrocarburos los productos de la combustión son CO₂, H₂O, N₂ y ollín (para flamas luminosas).

Entonces la flama tendrá una emisividad que puede ser expresada :

$$c_n = c_c + c_w - \Delta c \quad \text{Ec. 5.34}$$

donde :

- c_n : Emisividad total
- c_c : Emisividad del CO₂
- c_w : Emisividad del H₂O
- Δc : Corrección espectral por el traslape o parte común del rango de emisividad del CO₂ y H₂O

En los productos de la combustión, el gas nitrógeno no es considerado como contribuidor de la emisividad de la flama.

Para flamas luminosas, la fracción de descarga de partículas de ollín (partículas de carbón) incrementan la emisividad de la flama. Considerando la fracción peso del ollín formado como f_s y su emisividad es, la emisividad total de la flama se expresaría como :

$$c_t = c_n (1 - f_s) + c_s f_s \quad \text{Ec. 5.35}$$

donde :

- f_s : Fracción peso de ollín
- c_n : Emisividad total de la ecuación 5.48

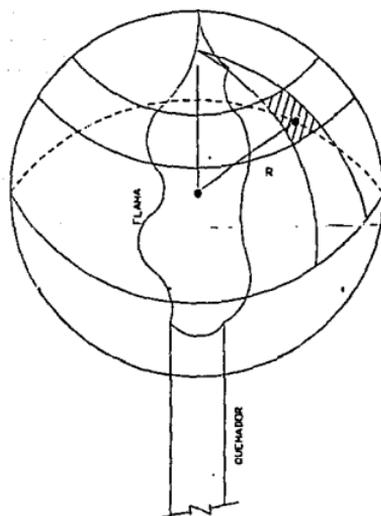


Fig. 5.9 Modelo de Esfera de Radiación.

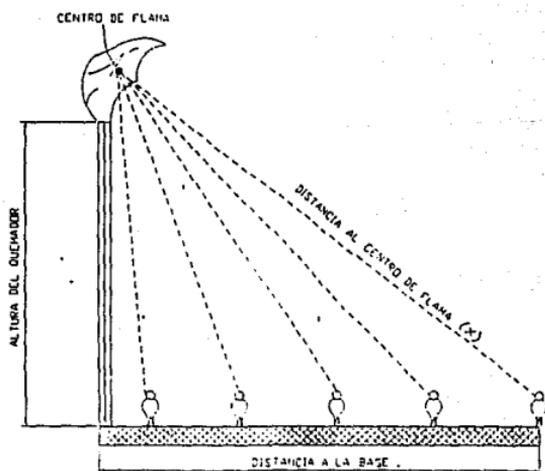


Fig. 5.10 Altura del Quemador contra distancia a la base.

c_n : Emisividad del oolín

c_t : Emisividad total de la flama luminosa

La radiación por unidad de área a una distancia x de una flama puede ser determinada por la siguiente ecuación, de acuerdo con el modelo de la esfera (figura 5.10)

$$4\pi x^2 q = 4\pi r^2 E$$

donde :

q : Calor absorbido por unidad de área (BTU/hr Ft²)

x : Distancia al centro de la flama (Ft) desde un punto cualquiera

r : Longitud media radial de la flama (Ft)

E : Poder emisivo de la flama

reduciendo :

$$q = E (r/x)^2 \quad \text{Ec. 5.36}$$

pero

$$E_b = \frac{Q}{4 \pi r^2}$$

entonces

$$q = \frac{c_t Q}{4 \pi x^2} \quad \text{Ec. 5.37}$$

La intervención de la atmósfera entre la radiación de la flama y el objeto expuesto absorbe algo del calor liberado por la misma; si se expresa la fracción de calor absorbido por la atmósfera como f_a , entonces la fracción de calor disponible para la superficie expuesta está determinada por :

$$q_t = q - f_a q$$

$$q_t = q (1 - f_a) \quad \text{Ec. 5.38}$$

entonces :

$$q_t = \frac{(1 - f_a) c_t Q}{4 \pi x^2} \quad \text{Ec. 5.39}$$

$$c_t = (1 - f_a) [c_n (1 - f_a) + c_n f_a] \quad \text{Ec. 5.40}$$

La ecuación general para determinar el calor absorbido por radiación es :

$$q_t = \frac{c_t Q}{4 \pi x^2} \quad \text{Ec. 5.41}$$

donde :

- q_t : Calor total absorbido por radiación (BTU/hr Ft²)
 e_t : Emisividad total incluyendo la disipada por la atmósfera
 Q : Calor total liberado por la combustión (BTU/hr)
 x : Distancia al centro de la flama (Ft)

e_t es entonces una fracción conocida como la emisividad total, que incluye los efectos de emisividad de la flama (luminosas y no luminosas) y las pérdidas de calor por intermediación de la atmósfera. Esta fracción también se conoce como la fracción de calor que se disipa por radiación (F), la cual no debe confundirse con la emisividad pura de una flama (ϵ), ya que ésta no considera las pérdidas por absorción de la atmósfera.

La fracción F es de esperarse que esté en función de la velocidad de descarga del fluido, el tipo de mezcla combustible, el grado de premezclado aire-combustible, entre otras.

De resultados experimentales se han reportado los siguientes valores para F :

T A B L A 5.11
 FACTOR F

S U S T A N C I A	(F) FRACCION DE CALOR DISIPADO
Hidrocarburos	0.40
Propano	0.33
Metano	0.20

No obstante se han propuesto algunas relaciones para estimar el valor de F, en donde se relaciona el poder calorífico (LHV) y la fracción de calor disipado.

El valor calorífico del gas es expresado en BTU/Ft³ a las condiciones normales de 14.7 PSIA y 60°F. La relación propuesta es :

$$F = 0.2 (hc / 900)^{1/2} \quad \text{Ec. 5.42}$$

$$hc = \text{LHV}$$

donde :

$$hc = 50 M + 100 \quad \text{Para hidrocarburos puros}$$

$$hc' = \sum_{i=1}^j n_i hc_i \quad \text{Para mezclas}$$

M : Peso molecular
 i : Componente i
 n_i : Fracción mol del componente i
 $h_{c,i}$: Poder calorífico del componente i

Con el valor de h_c para la mezcla del gas a quemar, se puede calcular entonces el valor del calor total liberado como :

$$Q = W \sum n_i h_{c,i} \frac{379}{M} \quad \text{Ec. 5.43}$$

V.6.3) Emisividad de flamas No Luminosas

Las reacciones de combustión para gases de hidrocarburos al aire pueden ser generalizadas de esta forma :



Considerando que para el aire :

20 % es Oxígeno (O₂)

80 % es Nitrógeno (N₂)

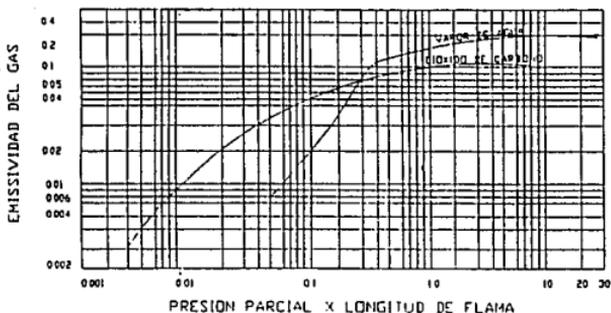
aire = 0.2 (O₂) + 0.8 (N₂)

5 (aire) = O₂ + 4 N₂

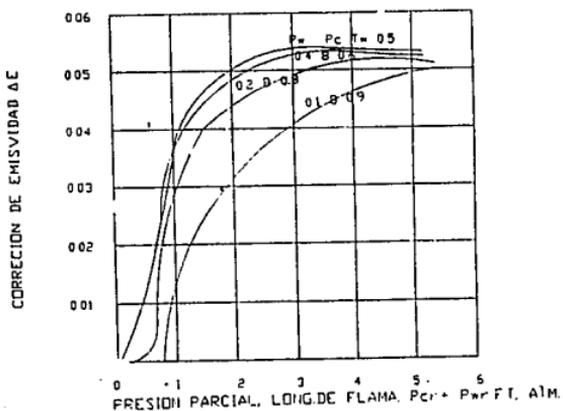
entonces :



Asignándole al coeficiente un valor de 1, es posible ajustar los coeficientes restantes a números comúnmente encontrados en las reacciones más frecuentes (véase la siguiente tabla).



Gráf. 5.10 Emisividadad para vapor de agua y CO2 a 4100 °R.



Gráf. 5.11 Corrección de emisividadad por traslape del espectro.

T A B L A 5.12
COEFICIENTES DE HIDROCARBUROS PARA LAS REACCIONES
MAS FRECUENTES

G A S	B	C	D	E
Hidrógeno	1/2	0	1	2
Metano	2	1	2	8
Acetileno	5/2	2	1	10
Etileno	3	2	2	12
Etano	7/2	2	3	14
Propileno	9/2	3	3	18
Propano	5	3	4	20
Butileno	6	4	4	24
Hexano	19/2	6	7	38

Para mezclas de gases multicomponentes, el resultado de los coeficientes para los productos de la combustión, son determinados por la multiplicación de sus respectivas fracciones mol para cada componente con el correspondiente coeficiente de la tabla.

La suma de los productos resultantes representa el total de moles para cada producto de combustión, por lo tanto :

$$\left. \begin{aligned}
 N_c &= \sum nC \\
 N_w &= \sum nD \\
 N_N &= \sum nE
 \end{aligned} \right\} \text{EC. 5.44}$$

donde :

N : Número de moles

c,w,N : Componentes (carbono, agua, nitrógeno)

Mc Adams ha recopilado datos para determinar la emisividad de CO₂ y de vapor de agua considerando 4100 °R como temperatura de la flama.

En las gráficas 5.10 y 5.11 se requiere de la presión parcial de los productos de la combustión y la distancia promedio de la flama. Para gases combustiónados a la atmósfera el volumen de gas y su temperatura pueden ser calculadas utilizando la ecuación de gas ideal.

$$P = \frac{n R T}{V}$$

$$P_t = P_c + P_w + P_N = 1$$

c : Carbono

w : Agua

N : Nitrógeno

$$N_t = N_c + N_w + N_N$$

$$N_t = \sum n D + \sum n F$$

Entonces

$$P_t = N_c / N_r$$

Ec. 5.45

$$P = N_w / N_r$$

donde :

P_t : Presión total

P_c : Presión parcial del CO₂ (atm)

P_w : Presión parcial del H₂O (atm)

P_N : Presión parcial del N₂ (atm)

C, D, F : Coeficientes de reacción

n : Fracción mol del componente

Por lo tanto, conociendo la presión parcial en atmósferas y la longitud media de la flama se puede determinar la emisividad (ϵ) para flamas no luminosas.

Para un gas que no contiene sólidos o gotas de líquidos, el máximo valor de concentración de ollín (f_{sm}) ocurre cuando este no es premezclado adecuadamente.

Para una estequiometría adecuada de la mezcla aire-combustible se asume que la fracción de ollín es cero ($f_s = 0$).

La fracción de ollín tiene una relación lineal con la relación en peso de aire-combustible (W_a/W_f)

$$f_s = f_{sm} \left[1 - \frac{(W_a/W_f)}{(W_a/W_a)_s} \right]$$

Ec. 5.46

donde :

(W_a/W_f) : Relación peso de aire-combustible sin la
producción de ollín

$(W_a/W_f)_s$: Relación peso de aire-combustible con
formación de ollín

V.6.4) Efectos de la Radiación en el ambiente

La intensidad de radiación que emite el quemador durante su operación puede causar muchos estragos en el medio ambiente que lo rodea. En términos generales se le considera como una forma de contaminación térmica que afecta principalmente a 3 grupos que pueden estar ocasional o frecuentemente rodeando al quemador :

- i) Humanos
- ii) Animales y/o vegetación
- iii) Equipo, estructuras y/o construcciones

Debido a la importancia que tiene el proteger a estos grupos de la radiación emitida, se hace necesario que el quemador se diseñe de manera que cumpla con los siguientes requisitos de seguridad :

- a) Que la radiación emitida no exceda los límites máximos permitidos para cada grupo.
- b) Que la emisión de sustancias tóxicas no sea mayor a los límites recomendados por las Normas Nacionales e Internacionales de calidad del aire.
- c) Que el ruido generado por la operación normal y máxima se encuentre dentro de los límites tolerables por el ser humano.
- d) Que el humo generado sea el mínimo posible.

V.6.5) Umbral del dolor por Radiación en Humanos

Los estudios e investigaciones sobre los efectos de Radiación en Humanos han llevado a los estudiosos del tema a concluir sus resultados en la tabla que a continuación se presenta.

T A B L A 5.13
UMBRAL DEL DOLOR

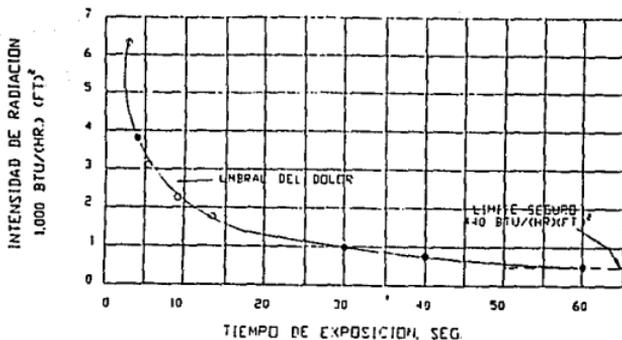
RADIACION (BTU/hr Ft ²)	TIEMPO PARA EL UMBRAL DEL DOLOR (SEG)	TIEMPO PARA AMPOLLAMIENTO (SEG)
440	infinito	
550	60	
740	40	
920	30	
1500	16	
2200	9	20
3000	6	
3700	4	
6300	2	5

Estos datos están basados en los resultados obtenidos de pruebas que consistían en emitir radiaciones sobre los brazos descubiertos de un grupo de hombres a temperatura ambiente. De estos exámenes se obtuvo que la intensidad de radiación que soporta un humano por tiempo ilimitado (infinito) de exposición es de 440 BTU/hr Ft² sin que se presenten daños en la piel.

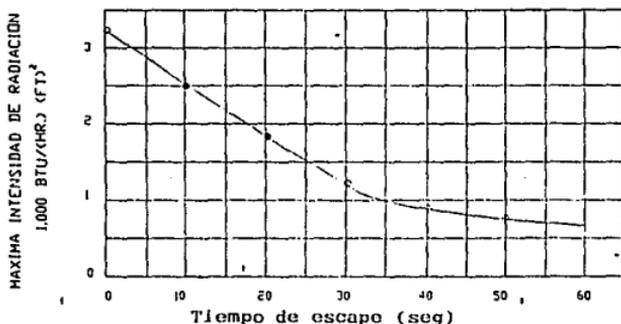
Como puede observarse en la tabla anterior, el tiempo de exposición es un factor muy importante en este renglón. Por lo tanto la intensidad de radiación emitida por el quemador deberá permitir a un humano alejarse de la fuente de calor en un tiempo razonable cuando se presente una súbita condición de relevo.

Para un escape normal de la fuente de calor se supone que no hay escudo de radiación dentro del área crítica (la base del quemador). Considerando para un individuo que se encuentra en la base del quemador cuando ocurre la falla (liberación de calor), un tiempo de reacción de 5 segundos, donde el individuo absorbe todo el calor radiado; inmediatamente después este se aleja de la base a una velocidad aproximada de 20 ft/s durante la cual la radiación disminuye continuamente hasta que la distancia con respecto a la base es suficiente para obtener una radiación de 440 BTU/hr- Ft².

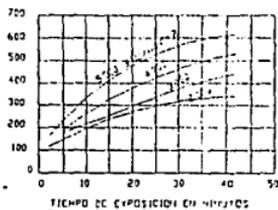
La cantidad de calor promedio absorbida por un individuo cuando ocurre el relevo es una función del tiempo que éste tarda en reaccionar y en alejarse de la fuente de calor y puede calcularse de la siguiente manera :



Gráf. 5.12 Intensidad de Radiación contra tiempo de Exposición.



Gráf. 5.13 Radiación máxima contra Tiempo de escape.



Gráf. 5.14 Temperatura contra Tiempo de exposición en equipos.

$$t_a q_a = t_r q_m + t_e \left(\frac{q_m q_m}{\ln (q_m / q_m)} \right) \quad \text{Ec. 5.47}$$

donde :

$$t_a = t_r + t_e$$

t_a : Tiempo total de exposición (seg)

t_r : Tiempo de reacción (seg)

t_e : Tiempo de escape (seg)

$t_a q_a$: Flujo total de calor/área, para el tiempo de exposición

q_m : Intensidad de radiación máxima (BTU/hr Ft²)

q_m : Intensidad de radiación mínima (BTU/hr Ft²)

De la Ec. 5.41 se observa que si la intensidad de radiación excede los límites tolerables para individuos, entonces deberá incrementarse la altura de la chimenea para que la distancia radial de emisión aumente y por lo tanto la radiación disminuya en ese punto.

De esta manera puede deducirse como valor máximo permisible para humanos una radiación de 1500 BTU/hr Ft² considerando que el individuo tiene un tiempo promedio de escape de 8-15 segundos, incluyendo el tiempo que tarde en reaccionar (3-5 segundos).

Por otro lado, el efecto de la radiación en la vegetación cercana al quemador principalmente se relaciona con la deshidratación y posterior ignición de la misma cuando las temperaturas alcanzadas son altas. Dado que la radiación es un fenómeno acumulativo que aumenta gradualmente la temperatura del objeto expuesto, es recomendable que la radiación que emita el quemador a condiciones normales de operación no exceda de 1000 BTU/hr Ft² (para operaciones continuas) como máximo y de 1500 BTU/hr Ft² para operaciones intermitentes para la vegetación cercana, debido básicamente a que si éste valor es constante, su temperatura aumentará de tal manera que pueda deshidratar las áreas verdes. Para situaciones de flujos críticos imprevistos se pueden tolerar radiaciones (instantáneas o de poca duración) de hasta 3000 BTU/hr Ft² situación que traerá como consecuencia que la vegetación cercana se seque e incluso, dependiendo de la duración del fenómeno, comenzará la ignición. Cuando se puedan prevenir este tipo de eventos, se recomienda hacer una zanja alrededor del quemador a la distancia a la cual se alcanzan estas radiaciones, cuando esto sea posible, para evitar la propagación de un incendio en caso de que éste se presente.

Los efectos de la radiación en Equipos se toman en cuenta para evitar dilataciones térmicas de los materiales de construcción por efecto del aumento de temperatura. Así como la posible cedencia del material de equipo cercano al quemador.

Además también se evitan las sobrepresiones dentro del equipo por vaporización de su contenido.

Los efectos de la radiación en equipos son registrados en la gráfica .

Cuando se esperan tener radiaciones mayores de 3000 y hasta 5000 BTU/hr Ft^2 , API RP-521 recomienda que los equipos cercanos al quemador tengan sistemas de espreado a los alrededores de los mismos para evitar grandes incrementos de temperatura en los materiales de construcción, o la vaporización de los fluidos contenidos.

V.7) Localización del Quemador

Para determinar la ubicación del quemador elevado en la distribución de la planta, se debe considerar a éste desde dos puntos de vista :

- i) Como fuente de ignición
- ii) Como fuente de emisión de :
 - * Radiación
 - * Efluentes tóxicos o flamables

V.7.1) Quemador Elevado como fuente de ignición

Los dispositivos de seguridad deben estar siempre en óptimas condiciones de funcionamiento y con la disponibilidad de servicios auxiliares que requieren en el momento de entrar en operación. El quemador elevado no es la excepción, y en este caso los requerimientos del mismo son que siempre tenga encendidos el o los pilotos. Esta característica hace que el quemador sea considerado como una fuente de ignición que en caso de existir una fuga de gas flamable en la planta, este puede provocar una explosión. Y es precisamente aquí donde cobra importancia la dirección y velocidad de los vientos en la localización del quemador.

Cuando se está en la etapa de diseño y planeación de una planta, se deben estudiar cuidadosamente las áreas que serán destinadas para el almacenamiento y manejo de fluidos flamables, los cuales, deberán concentrarse en una zona específica de la planta, cuando esto sea posible.

Una vez detectada esta zona en el plano de localización general de la

planta, el quemador deberá localizarse en aquel punto en donde por la dirección de los vientos, la nube explosiva generada por una posible fuga de fluidos inflamables, se dirija en dirección contraria a éste, con lo cual se estaría evitando una conflagración, ya que la nube explosiva no se encontraría con la fuente de ignición (el quemador).

V.7.2) Quemador elevado como fuente de emisión de Radiación y efluentes tóxicos o inflamables

La emisión de contaminantes del quemador elevado, también influye en su ubicación en la planta. Al realizar su localización dentro de la distribución de la misma no debe perderse de vista un objetivo muy importante : *la seguridad del personal*. Y en esta situación también son importantes la dirección y velocidad de los vientos ya que influirán básicamente en dos aspectos importantes del quemador :

- i) Niveles de Radiación por inclinación de la flama
- ii) Perfil de concentraciones a nivel de piso de contaminantes emitidos por el quemador

Esto nos conduce a pensar que la ubicación del quemador, deberá evitar que la flama de éste se acerque demasiado a áreas de tránsito de personal o a zonas de equipo, de la misma manera que se evitará en caso de presentarse una fuga de gases contaminantes de la chimenea, éstos lleguen a la planta en condiciones riesgosas y por el contrario se buscarán situaciones permisibles o idóneas para que los efectos sean mínimos o nulos en el personal .

Finalmente para proteger una zona determinada para el efecto de radiación o emisión de contaminantes se deben contemplar tres aspectos :

- * Altura del quemador
- * Distancia entre la fuente puntual de radiación y la zona de protección
- * Distancia entre la base del quemador y la zona de riesgo.

Esto da origen a una área mínima necesaria alrededor del quemador que deberá cumplirse para tener seguro el equipo y el personal.



FIG. 5.11 DISTANCIA BASE DEL QUEMADOR AL PUNTO DE PROTECCION

Si observamos la figura se forma un triángulo rectángulo que relaciona estas tres distancias, esto es útil para concluir que si se desea minimizar el área a proteger debe variarse una de las distancias, que normalmente es la altura.

De los conceptos mencionados se presentan dos situaciones de localización:

- a) Localización del quemador en Planta Nueva
- b) Localización del quemador en Planta Existente

V.7.3) Localización del Quemador en Planta Nueva

Es en esta situación donde se pueden aplicar todos los conceptos mencionados en la localización del quemador, debido a que es una nueva instalación y pueden simularse diferentes arreglos de ubicación estudiando las ventajas y desventajas de cada uno, eligiendo la alternativa seguridad-costos más adecuada, puede alejarse suficientemente el quemador de la planta cumpliendo con la protección del personal y el equipo para el efecto de radiación además de ubicarse en una zona adecuada para no ser considerado como una fuente de ignición; ahora, si es posible distanciar más el quemador fuera del sistema de la planta se generan opciones de escoger un soporte o estructura más económico teniendo alturas efectivas menores reduciendo los costos de equipo e instalación. Pueden seguirse estos pasos para la ubicación del sistema:

1. El quemador se localiza y ubica como fuente de

ignición.

2. Se analiza como fuente emisión de hidrocarburos y se estudian diferentes opciones (altura y condiciones de viento para la ubicación propuesta) para ver desplazamiento de contaminantes a través de la planta.
3. Se intentará alejar y restringir una área para el quemador en las inmediaciones de la planta.
4. Se evalúan dentro de las opciones más viables que cumplan con los requisitos de seguridad y protección y dentro de esta la más económica.

V.7.4) Localización en Planta Existente

El problema esencial en este caso es el área disponible para la instalación y ubicación dentro de la planta.

Como ya existe una distribución de los equipos en la planta, es necesario estudiar cual es la mejor opción que permita la condición mas segura.

La evaluación de la ubicación primordialmente es determinada por el riesgo de ser una fuente de ignición (Es posible que en la planta ya exista una zona destinada para equipos con característica similar). El proteger por radiación es resuelto incrementado la altura del sistema aunque esto signifique mayores costos por el tipo de soporte que ha de utilizarse al encontrarse dentro de la planta y tener áreas restringidas de operación.

El principal problema en la ubicación surge en la radiación que es emitida al personal y equipos por un desfogue. La dificultad es enfocada que existen zonas no diseñadas para estos efectos y arrojan alturas en el diseño muy grandes. Deben elegirse zonas en las que puedan utilizarse equipos de rociado y resguardos de personal y poco tránsito de estos últimos.

En la medida de lo posible se instalará conforme a los cuatro puntos que se mencionaron en el caso anterior solo se enfatiza que el área a utilizar será pequeña y esto implicará soportes más costosos.

C A P I T U L O V I
M E T O D O S D E C A L C U L O

VI. METODOS DE CALCULO

En el capítulo anterior se estudiaron las principales variables que afectan el diseño de un sistema de quemador elevado. Estas variables están relacionadas directamente con los siguientes parámetros :

Características del quemador :

- * Tipo
- * Tamaño

Propiedades del gas :

- * Composición
- * Temperatura
- * Presión
- * Flujos

Condiciones ambientales :

- * Velocidad del viento
- * Tipo de viento (estabilidad)
- * Humedad relativa

Factores de Localización

- * Espacio disponible
- * Equipos Aledaños
- * Cercanía con el Personal

En resumen todos estos parámetros generan tres dimensiones que conforman el quemador :

- a) Diámetro
- b) Altura
- c) Area mínima de seguridad requerida

El diámetro del quemador es diseñado en base al tipo de flama que se desea, así como a la velocidad y efecto en la longitud de la flama generada. Las recomendaciones generales indican que para flujos normales la velocidad de salida debe ser considerada como un 20% de la velocidad sónica del gas, mientras que para flujos máximos deberá considerarse un 50 % de ésta.

La altura del quemador es diseñada en base a un nivel de radiación que pueda ser tolerado por los equipos y el *personal*. Después de haber fijado la altura rquerida para un cierto nivel de radiación, se verifica para que cumpla dos condiciones :

- a) La máxima concentración de las sustancias generadas producto de la combustión debe ser menor a los límites máximos tolerables al ser humano y/o las regulaciones ambientales en las inmediaciones al quemador.
- b) La máxima concentración de las sustancias generadas producto de la combustión debe ser menor a los límites máximos permisibles al ser humano por toxicidad y evitar condiciones riesgosas (En caso de sustancias flamables, estar por debajo de los límites de flamabilidad) en las inmediaciones del quemador.

Respecto al área mínima requerida por el quemador, ésta se determina de acuerdo al tipo de soporte del quemador utilizado (cableado, autosoportado o soportado con estructura), al nivel de radiación y a la zona de seguridad requerida, así como a la situación de diseño del quemador (Planta nueva, área disponible en planta ya construida, adición de otro quemador, etc.).

Recordemos entonces que la Radiación es la información esencial para el diseño de quemadores considerando economía y seguridad en el sistema. Y cuando se analizó en el capítulo anterior, se consideró que el modelo que el modelo de distribución de la radiación y calor era una esfera de la cual emanaban las flamas. La distribución de calor y la estimación de la longitud de la flama, la ubicación del centro de flama, los parámetros que generan los diferentes métodos de diseño de quemadores elevados y que son el tema de este capítulo.

VI.1) Método de KENT (George R. Kent)

De acuerdo con Kent, los flujos al quemador son generados principalmente por dos fuentes; la primera es causada por operaciones normales de proceso, es decir, depresurizaciones de equipos, ventosas, etc., esta fuente es la que proporciona los flujos mínimos y continuos al quemador. La segunda fuente es causada por fallas ajenas al proceso (descargas bloqueada, falla de energía eléctrica, fuego, etc.) y causan los flujos máximos y las condiciones más riesgosas al equipo y al personal.

VI.1.1) Diámetro del quemador

En base a las características y ventajas de la velocidad de los gases en la boquilla del quemador y a los fenómenos generados, ya explicados en el

capítulo anterior, Kent sugiere las siguientes velocidades para el dimensionamiento del diámetro :

NO. DE MACH	CONDICIONES
0.2	Para flujos normales de operación y largos periodos de funcionamiento.
0.5	Para flujos máximos de operación y cortos periodos de funcionamiento. Con aplicación de sistemas de retención de flamas.

Bajo estas consideraciones, el diámetro será calculado mediante las siguientes ecuaciones :

$$\text{No. Mach} = \frac{u}{u_s}$$

$$u_s = \left(\frac{g K R T}{M} \right)^{1/2} \quad \text{VELOCIDAD SONICA} \quad \text{Ec. 6.1}$$

$$W = \rho \cdot v \cdot A \quad \text{FLUJO MASICO DEL GAS (LB/HR)} \quad \text{Ec. 6.2}$$

$$\text{No. Mach} = 1.702 \times 10^{-5} \left(\frac{W}{P d^2} \right) \left(\frac{T}{K M} \right)^{1/2}$$

donde :

- g : Constante gravitacional
- K : Relación de calores específicos (Cp/Cv)
- R : Constante de los gases ideales
- T : Temperatura absoluta del gas (°R)
- M : Peso molecular del gas
- A : Area transversal del quemador
- ρ : Densidad del gas
- v : Velocidad del gas en la boquilla del quemador

De estas ecuaciones se llega a la ecuación general de diseño :

$$d^2 = 1.702 \times 10^{-5} \left(\frac{W}{P \text{ Mach}} \right) \left(\frac{T}{K M} \right)^{1/2} \quad \text{Ec. 6.3}$$

donde:

W : Flujo en Lb/hr

T : Temperatura del gas en la boquilla ($^{\circ}$ R)

P : Presión del gas en la boquilla (PSIAS)

d : Diámetro del quemador en Ft

K : Relación de calores específicos

M : Peso Molecular del gas

Nach : Número de *Nach* propuesto

VI.1.2) Altura del quemador

La altura es dimensionada en base a la radiación absorbida por un individuo en un intervalo de tiempo, considerando que este se encuentra en la base del quemador en el momento que existe un relevo repentino de calor y que se aleja rápidamente de la fuente hasta tener una exposición de radiación segura. La variación de la intensidad resulta del alejamiento del individuo respecto a la fuente de calor.

Recordando la ecuación que calcula el calor promedio absorbido por un individuo como una función de su tiempo de escape :

$$t_a q_e = t_r q_H + t_e \frac{(q_H - q_m)}{\ln \left(q_H / q_m \right)}$$

Se encuentra entonces que la altura del quemador es dependiente del tiempo de escape; esto genera un proceso de cálculo en donde se fija un tiempo de escape para el cual se determina una radiación máxima y se calcula una altura, con lo que a su vez se determina una distancia radial de la base del quemador. Una vez conocida esta distancia se vuelve a calcular el tiempo de escape necesario para recorrerla; si la diferencia entre el tiempo de escape fijo y el calculado es mayor de un 5 % se reinicia el cálculo hasta que exista una convergencia en los resultados. Para el cálculo de la altura del quemador se presentan las siguientes situaciones :

ALTURA	}	FLUJO NORMAL <i>Mach</i> = 0.2	}	VIENTO TRANQUILO DISTORSION DE FLAMA POR EFECTO DEL VIENTO
		FLUJO MAXIMO <i>Mach</i> = 0.5	}	VIENTO TRANQUILO DISTORSION DE FLAMA POR EFECTO DEL VIENTO

Un análisis de estas situaciones arroja que la condición más crítica para la cual debe dimensionarse el quemador es para el flujo máximo o crítico y distorsión de la flama por efecto del viento. Esto debido a que en esta situación se genera la mayor liberación de radiación o calor, y el centro de la flama se aproxima más al área de protección de personal o equipo. Se mostrarán sin embargo todos los casos.

a) *Caso de viento Tranquilo (para ambos flujos)*

El modelo de Kent considera que la flama tiene un centro del cual emanan las flamas (Modelo de fuente puntual) y dicho centro está situado a la distancia media de la longitud total de la flama.

En base a los puntos anteriores y a las figuras 6.1 y 6.2 y utilizando la ecuación de intensidad de radiación tenemos :

$$q_H = \frac{f Q}{4 \pi X_H^2} \quad \text{Ec. 6.4}$$

donde:

- q_H : Calor o radiación máxima a la distancia mínima radial del centro de flama
- X_H : Distancia mínima radial del centro de flama
- Q : Calor total liberado por la flama
- f : Fracción de calor disipado

Considerando que el calor liberado por la flama es uniformemente distribuido a lo largo de la misma :

$$q_H = \frac{f}{4\pi} \int_H^{H+L} \frac{Q/L}{X_H^2} dx = \frac{f(Q/L)}{4\pi} \int_H^{H+L} \frac{dx}{X_H^2}$$

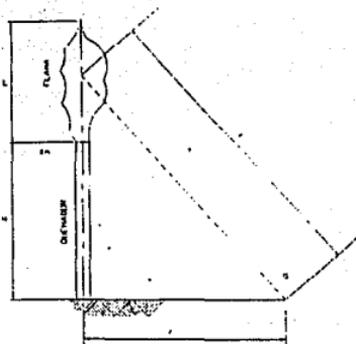


Fig. 6.1 Longitud de la flama con viento tranquilo (0.2 mach).

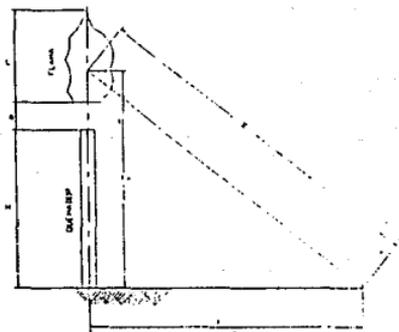


Fig. 6.2 Longitud de la flama con viento tranquilo (0.5 mach).

Resolviendo :

$$q_H = \frac{f (Q/L)}{4 \pi} \left[\frac{(H+L) - H}{H (H+L)} \right] = \frac{f Q}{4 \pi H (H+L)} \quad \text{Ec. 6.5}$$

donde :

L : Longitud de la flama

H : Altura del quemador

Con analogía entre las ecuaciones, se observa que la distancia mínima radial x_H está relacionada con la altura del quemador y la longitud de la flama :

$$x_H = [H (H + L)]^{1/2} \quad \text{Ec. 6.6}$$

Despejando el valor de la altura del quemador :

$$H^2 + H L - \frac{f Q}{4 \pi q_H} = 0$$

$$H = \frac{\left[L^2 + \frac{f Q}{\pi q_H} \right]^{1/2} - L}{2} \quad \text{Ec. 6.7}$$

Para calcular la distancia radial a partir de la base del quemador a un punto donde se requiera una intensidad de radiación determinada, se observa en la figura 6.1 que :

$$Y = \left[X^2 - x_H^2 \right]^{1/2}$$

$$Y = \left[(H + a) (H + a + L) \right]^{1/2} \quad \text{Ec. 6.8}$$

donde:

X : Es la distancia requerida desde el centro de flama por cumplir con una intensidad de radiación.

Aplicando las mismas condiciones para el caso de flujo crítico o máximo y recordando que para velocidades mayores de 0.2 Mach se presenta el alejamiento de la flama de la punta del quemador (*blow off*), y que este alejamiento es cercano a 12 veces el diámetro, se tiene :

$$q_H = \frac{f Q}{4 p (H + 2) (H + a + L)} \quad \text{Ec. 6.9}$$

$$x_H = \left[(H + a) (H + a + L) \right]^{1/2} \quad \text{Ec. 6.10}$$

$$H = \frac{\left[(2a + L)^2 + \frac{f_0}{\pi q_h} - 4a(a + L) \right]^{1/2} - (2a + L)}{2} \quad \text{Ec. 6.11}$$

$$Y = (X^2 - X_m^2)^{1/2} \quad \text{Ec. 6.12}$$

$$Y = (X^2 - (H + a)(H + a + L))^{1/2} \quad \text{Ec. 6.13}$$

donde:

a : Distancia de separación entre la punta del quemador
y la zona donde se efectúa la combustión

b) Caso de Distorsión de flama por efecto del Viento

El principal fenómeno que ocurre en presencia de vientos transversales, es la distorsión de la flama y su inclinación respecto al eje del quemador. Esto ocasiona que la flama se acerque al área de protección del equipo y se recorra el centro de flama originando que la máxima radiación no se presente justo en la base del quemador como en los casos anteriores (ver figuras 6.3 y 6.4) .

Se define que el ángulo de inclinación de la flama es el resultado de la suma de dos efectos, el efecto de la velocidad de salida y la velocidad del viento .

$$\tan \theta = \frac{\text{velocidad del viento}}{\text{vel. del gas en la boquilla}} = \frac{U_w}{U_0}$$

Resolviendo por identidades, se encuentran los valores para U_w y U_0

$$U_w = (X_m - H) \text{ sen } \theta$$

$$U_0 = (X_m - H) \text{ cos } \theta$$

$$Y = \left\{ X^2 - (H + U_0)^2 \right\}^{1/2} + U_w$$

$$Y = \left\{ X^2 - (H + (X_m - H) \text{ cos } \theta)^2 \right\}^{1/2} + (X_m - H) \text{ sen } \theta \quad \text{Ec. 6.14}$$

Considerando ahora el flujo crítico se tiene :

$$Y = \left\{ \left[(H + a) \left[(H + a) + L \right] \cdot H \right]^{1/2} \text{ sen } \theta + \left\{ X^2 - \left[H + (X_m - H) \text{ cos } \theta \right]^2 \right\}^{1/2} \right\}$$

Se ha encontrado que bajo las condiciones de velocidad del viento y velocidad del gas es razonable suponer :

$$\text{cos } \theta = 1$$

$$\text{sen } \theta = \tan \theta = \frac{U_w}{U_0}$$

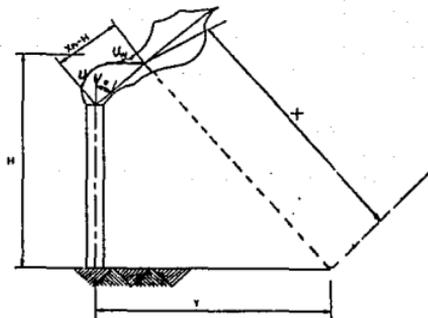


Fig. 6.3 Longitud de la flama por efecto del viento (0.2 mach).

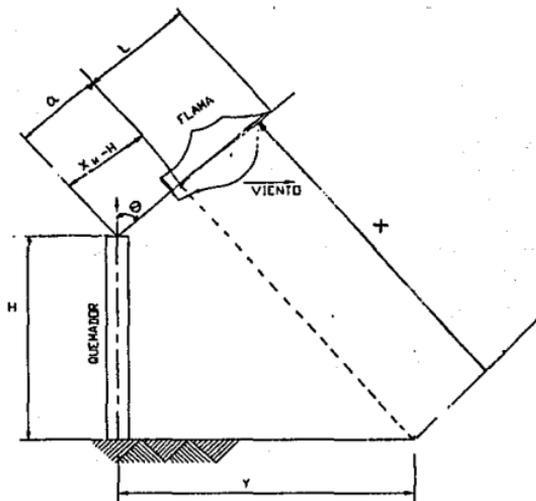


Fig. 6.4 Longitud de la flama por efecto del viento (0.5 mach).

entonces esta ecuación puede ser simplificada a :

$$Y = (X_m^* - H) \tan \theta + \left\{ X^2 - X_m^{*2} \right\}^{1/2} \quad \text{Ec. 6.15}$$

Del análisis realizado se puede concluir que el centro de flama se ubica a una distancia $(X_m - H)$ sen θ de la base del quemador, esto provoca que el área de seguridad requerida sea mayor al oscilar la fuente de calor puntual por efecto del viento.

La radiación máxima se presentará entonces justo debajo del centro de flama, y se determina mediante la ecuación :

$$q = \frac{f Q}{4 \pi [H + (X_m - H) \cos \theta]^2} \quad \text{Ec. 6.16}$$

Por último, es necesario aclarar que el Método de cálculo de Kent considera que el tiempo de escape no es afectado por los efectos generados por la deformación de la flama (ver Algoritmo de cálculo) .

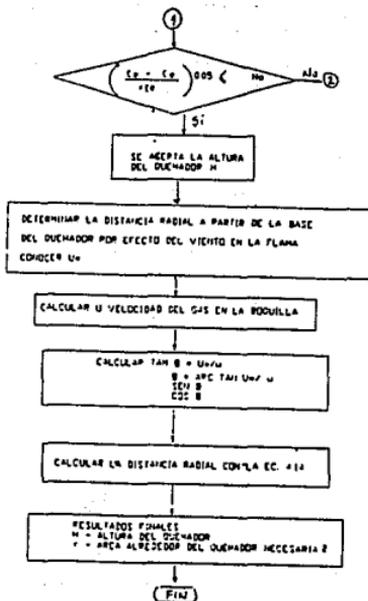
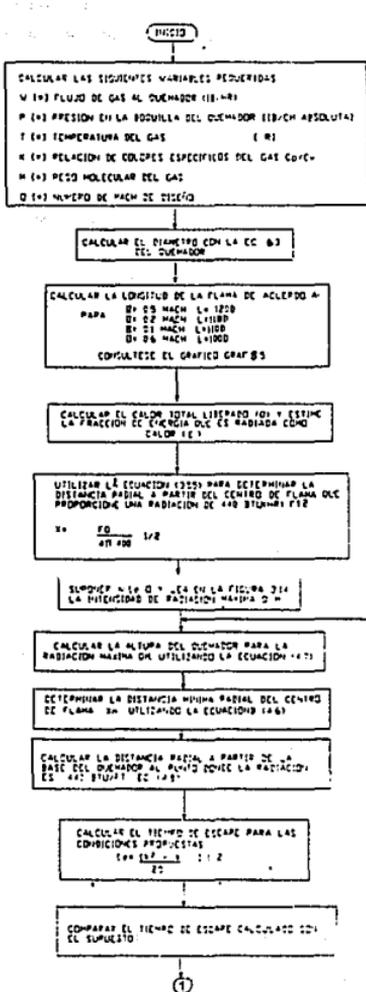
Una vez determinada la altura necesaria para cumplir con la radiación máxima permisible en la zona de seguridad, se efectúa el análisis de dispersión de contaminantes, es decir, se verifica que la altura del quemador cumpla con las condiciones de concentraciones máximas permisibles de las sustancias generadas por la combustión o por apagado accidental del quemador. Para lo cual se recomienda el método de dispersión de gases explicado en el punto anterior.

Es importante mencionar que al considerar el tiempo de escape, éste debe ser el menor tiempo, pues esto se refleja mucho en la altura del quemador, es decir, a un mayor tiempo de escape se requiere una altura mayor del quemador para obtener el menor tiempo de exposición y por lo tanto una menor cantidad de calor absorbido.

VI.1.3) Algoritmo de Cálculo

A continuación se presenta el algoritmo de cálculo propuesto por Kent para el diseño de Quemadores Elevados.

Algoritmo 6.1 Cálculo del Quemador por el Método KENT.



SUMAR R_{min} A R_{max} EN LA FIG. 314 LA INTENSIDAD DE RADIACION MAXIMA D = 2

VI.2) METODO A. P. I. (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE)

El Instituto Americano del Petróleo (A.P.I.) se ha caracterizado internacionalmente por sus amplios estudios experimentales realizados en casi todas las ramas de la Ingeniería Petrolera, y el quemador elevado no es la excepción, a continuación se explican los parámetros de diseño que el A.P.I. considera como resultado de sus estudios.

VI.2.1) Diámetro del quemador

El cálculo del diámetro del quemador elevado por este método está basado, al igual que el método de *Kent*, en la velocidad de salida del fluido y en la caída de presión permisible en la línea.

En este caso debe considerarse para el mayor flujo esperado en la peor emergencia, y para los flujos normales o de venteos continuos que esperen tenerse durante la operación de la planta.

Los criterios aceptados por A.P.I. son :

TABLA 6.1
CRITERIOS DE DISEÑO

FLUJO	No. DE MACH
Flujo máximo (Baja frecuencia)	0.5
Flujo normal o Flujo mínimo (Mayor frecuencia)	0.2

La ecuación utilizada es :

$$Mach = 1.702 \times 10^{-5} \frac{W}{P d^2} \frac{T}{K M} \quad \text{Ec. 6.3}$$

Y cuyas variables fueron definidas en el método anterior.

La caída de presión permisible en la línea a quemador es de 2 psi máxima. Una velocidad muy baja en el extremo superior de la chimenea

puede causar daños por calor o por corrosión tanto al equipo como a la estructura. Por otro lado, cuando la presión de salida del gas es baja puede causar que la combustión de los gases se lleve a cabo más abajo de la punta (10 ft o más) del quemador, lo cual ocasiona que los componentes corrosivos contenidos en el gas de relevo reaccionen con el metal más rápido de lo esperado, lo que implica que el material de la chimenea debe ser resistente a la corrosión por un espacio de 8 a 10 ft hacia abajo desde el extremo superior del quemador.

VI.2.2) Altura del Quemador

La altura del quemador está determinada por la Radiación emitida y la ecuación utilizada por el método A.P.I. es la que se dedujo en el capítulo anterior.

Esta expresión puede ser utilizada para determinar la distancia requerida entre un lugar de quemado y un punto de exposición donde el valor máximo de la radiación quiera ser controlada :

$$D' = \left[\frac{F Q}{4 \pi K} \right]^{1/2}$$

donde :

D' : Distancia mínima del centro de flama al objeto o punto a ser considerado (Ft)

F : Fracción de calor radiado

Q : Calor relevado (BTU/hr)

K : Radiación permisible (BTU/hr Ft²)

(Ver figura 6.5)

El factor F significa que no todo el calor liberado por la flama puede ser expresado como radiación (ver ecuación 5.41).

La altura del quemador se basa principalmente en la intensidad de radiación generado por la flama.

En la utilización de la ecuación anterior, se requieren de 2 valores :

K y F. Los valores de F dados en el capítulo anterior pueden ser utilizados.

Por otro lado para fijar el valor de la intensidad máxima de radiación (K) que se utilizará en la ecuación, se pueden considerar los siguientes criterios propuestos por este método:

1) 1500 BTU/hr Ft²

Utilizado por algunas compañías para áreas de operación donde el personal porte ropa especial de trabajo, y donde existan cubiertas protectoras.

2) 2000 BTU/hr Ft²

Para áreas abiertas donde no haya cubiertas, pero el área se encuentre libre para el escape del personal.

3) 5000 BTU/hr Ft²

Para estructuras y áreas de operación con protecciones seguras tanto para equipos como para personal.

La utilización de valores menores de 1500 BTU/hr Ft² se sugiere cuando el área cercana al quemador es muy transitada por personal o cuando la frecuencia de grandes relevos sea alta. Además deberá considerarse la radiación máxima solar esperada en la zona, es decir, que la radiación esperada por la operación del quemador con el flujo máximo más la radiación solar esperada en el verano, no exceda los límites antes mencionados.

La siguiente variable desconocida es la distancia existente entre el centro de la flama y el punto a proteger (D'), para ello es necesario determinar la altura de la chimensa que proporcione un valor satisfactorio de radiación en el punto a proteger. Sin embargo a pesar de que esta distancia puede obtenerse en forma sencilla para condiciones de viento tranquilo (casi estable), se obtienen resultados más cercanos a la realidad cuando se considera que la flama se encuentra inclinada por el viento debido principalmente a que el centro de flama se acerca más al área de protección y por lo tanto se presentan los valores de radiación más altos.

En este sentido, numerosos estudios y experimentos han encontrado que la fuerza ejercida por el viento sobre la flama le produce a ésta una inclinación y una velocidad axial (μ_a) respecto al quemador, que está relacionada con la distancia existente entre la boquilla del quemador y el centro de la flama (I) mediante la siguiente ecuación :

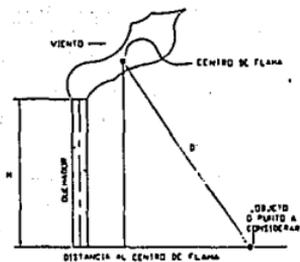


Fig. 6.5 Distancia a centro de flama.

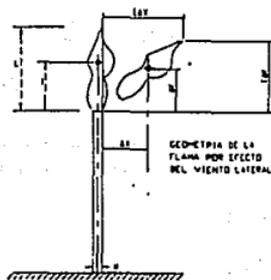


Fig. 6.6 Geometria de la flama por efecto del viento.

$$\mu_a = 1.6 \pi d_o \mu_o \left[\frac{1}{l} \right]$$

Ec. 6.17

donde :

μ_a : Velocidad axial de la flama inclinada

d_o : Diámetro de la boquilla (Ft)

l : Distancia desde la boquilla del centro de flama (Ft) , a lo largo del eje del jet

μ_o : Velocidad de salida del gas en la boquilla (Ft/s)

La influencia del viento sobre la flama es fácilmente observable en la figura 6.6 . De esta ilustración se puede deducir que a condiciones de viento tranquilo la velocidad axial es igual a cero $\mu_a = 0$ y que entonces la longitud a lo largo del eje del jet desde la boquilla (l) es igual a la longitud de la flama, $l = L$, sin embargo para condiciones de velocidades de viento mayores se presenta la inclinación de la flama y por lo tanto la variación de la velocidad axial por efecto del viento está dada por :

$$\int_0^{\mu_a} \mu_a = \int_L^l 1.6 \pi d_o \mu_o \left[\frac{1}{l} \right]$$

resolviendo :

$$\mu_a = 1.6 \pi d_o \mu_o \left[\frac{1}{l} + \frac{1}{L} \right]$$

Ec. 6.18

Esta ecuación es referida a una velocidad axial promedio, debido a las variaciones existentes en la velocidad del viento.

La función utilizada por A.P.I. para calcular la longitud de la flama (L) tomando como referencia el calor relevado por la combustión es :

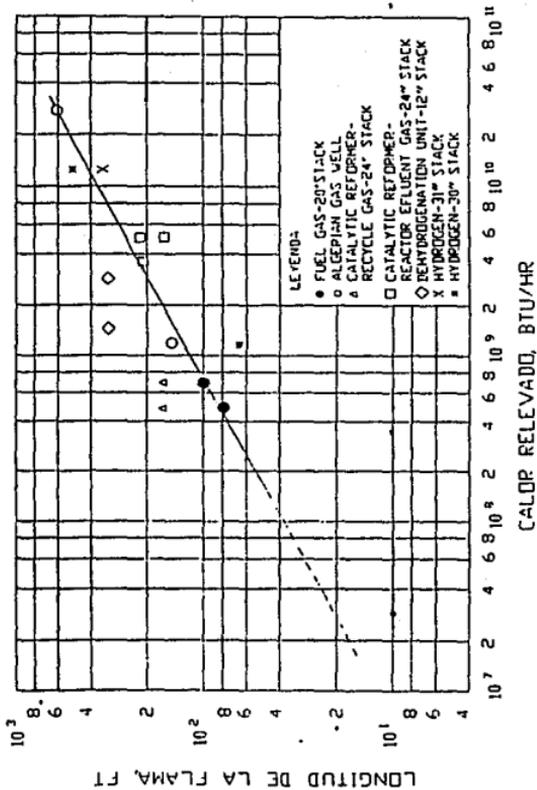
$$L = 0.004 \sqrt{Q}$$

Ec. 6.19

donde :

Q : Calor liberado por combustión

La representación gráfica de esta función se puede ver en la Gráfica 6.1. Ahora que ya se tiene definido como calcular la distancia mínima al centro de flama, es necesario localizar ese centro de flama para determinar entonces la altura del quemador requerida para cumplir con las condiciones de radiación impuestas al principio del diseño. A



Gráf. 6.1 Calor relevado contra longitud de la flama.

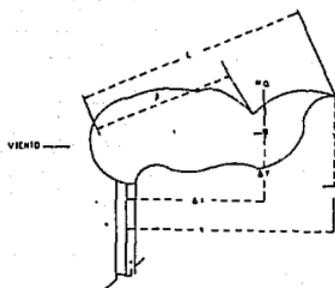


Fig. 6.7 Flama distorsionada por efecto del viento.

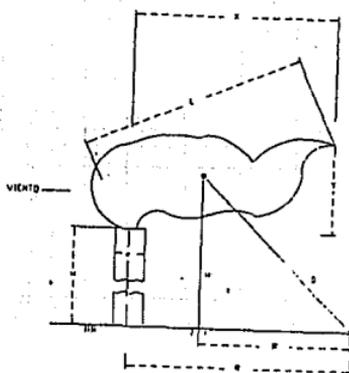


Fig. 6.8 Método Iterativo (A.P.I.) .

continuación se analizará la forma de localizar el centro de flama. La primera consideración de este método es que la longitud de la flama (L) permanezca constante bajo las condiciones de viento reinantes en el momento del relevo, y la segunda es que la velocidad del gas a la salida del quemador (μ_0) siempre sea en dirección vertical. Bajo estas condiciones es posible entonces calcular los incrementos o movimientos que el centro de flama tendrá por las variaciones de viento en los ejes X y Y (ΔX y ΔY), mediante las siguientes relaciones (ver ilustración).

$$\Delta X = \mu_w \Delta t \quad \text{Ec. 6.20}$$

$$\Delta Y = \mu_a \Delta t \quad \text{Ec. 6.21}$$

$$\Sigma \Delta l = L \quad (\text{cuando } \mu_a = 0) \quad \text{Ec. 6.22}$$

donde :

μ_w : Velocidad del viento

Δt : Incremento de tiempo necesario para moverse en X ó Y

ΔX : Incremento en X

ΔY : Incremento en Y

μ_a : Velocidad axial

sustituyendo expresiones en la ecuación :

$$\mu_a = \frac{\Delta Y}{\Delta X} \mu_w$$

$$\left[\frac{\Delta Y}{\Delta X} \right] = 1.6 \pi d_0 \frac{\mu_0}{\mu_a} \left[\frac{1}{L} - \frac{1}{L} \right] \quad \text{Ec. 6.23 A}$$

ó

$$\left[\frac{\Delta Y}{\Delta X} \right]^2 = \left[\frac{C_1}{L} - C_2 \right] \quad \text{Ec. 6.23 B}$$

donde :

$$C_1 = 1.6 \pi d_0 \left[\frac{\mu_0}{\mu_w} \right] \quad \text{Ec. 6.24}$$

$$C_2 = \left[\frac{C_1}{L} \right] \quad \text{Ec. 6.25}$$

Si se relacionan trigonométricamente los términos Δt , ΔY y ΔX , se obtiene:

$$\Delta t^2 = \Delta Y^2 + \Delta X^2$$

Desarrollando :

$$\Delta Y = \mu_a \left[\frac{\Delta X}{\mu_w} \right]$$

Sustituyendo :

$$\Delta \ell^2 = \Delta X^2 + \Delta X^2 \left[\frac{\mu_o}{\mu_w} \right]^2$$

$$\Delta X = \frac{\Delta \ell}{\left[1 + \left[\frac{\mu_o}{\mu_w} \right]^2 \right]^{1/2}}$$

Como $\left[\frac{\Delta Y}{\Delta X} \right] = \left[\frac{\mu_o}{\mu_w} \right]$

Entonces :

$$\Delta Y = \frac{\Delta \ell}{\left[1 + \left[\frac{\Delta Y}{\Delta X} \right]^2 \right]^{1/2}}$$

Ec. 6.26

Y por lo tanto :

$$\Delta Y = \frac{\Delta \ell}{\left[1 + \left[\frac{\Delta X}{\Delta Y} \right]^2 \right]^{1/2}}$$

Ec. 6.27

las coordenadas del centro de flama se determinan por :

$$X_r = \Sigma \Delta X \quad \text{Ec. 6.28}$$

$$Y_r = \Sigma \Delta Y \quad \text{Ec. 6.29}$$

Una vez determinadas éstas, es posible conocer la altura requerida por el quemador de acuerdo a los límites establecidos. En la figura 6.9 que a continuación se muestra, se pueden observar las relaciones requeridas para ello.

De la figura 6.8 :

$$H' = H + 0.5 Y$$

$$R' = R - 0.5 X$$

$$D'^2 = R'^2 + H'^2$$

Esto sugiere un método iterativo de cálculo para determinar la altura, el cual se explicará en el algoritmo de cálculo de este método.

VI.2.3) Dispersión de contaminantes (Método Gráfico)

La recomendación práctica que ofrece este método, es la de utilizar la ecuación que proporcione la concentración máxima del contaminante y la distancia a la cual se alcanzará dicho valor; todo esto basado en el análisis y estudios descritos en el punto del capítulo 5. La ecuación simplificada propuesta por A.P.I. es :

$$C_{max} = \frac{3697 V M D_z}{1w H^2 D_y^2}$$

Ec. 6.30

$$X_{max} = \left(\frac{H}{D_z} \right)^{2/(2-n)}$$

donde :

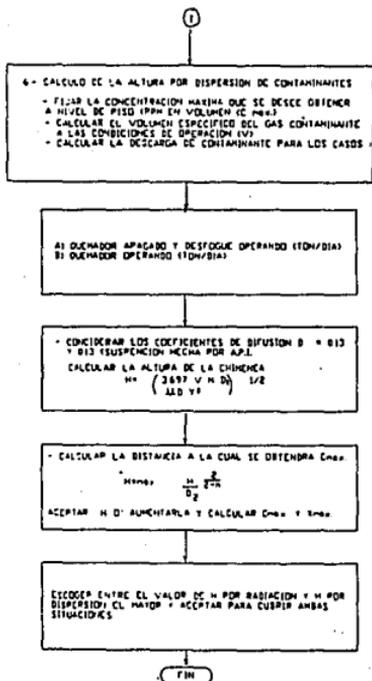
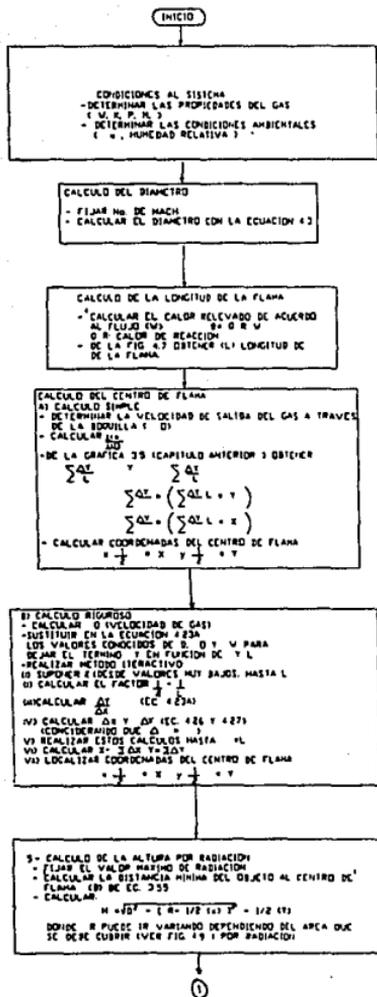
- C : Concentración del contaminante a nivel de piso
(en ppm en volumen)
- V : Volumen específico del gas (Ft³/Lb)
- M : Descarga del contaminante en peso (TON/día)
- D_z : Coeficiente de difusión vertical
- 1w : Velocidad del viento (mph)
- H : Altura de la chimenea (Ft)
- D_y : Coeficiente de difusión horizontal
- X_{max} : Distancia máxima de la chimenea al punto máximo de
concentración (Ft)
- n : Factor ambiental

Es importante aclarar que esta ecuación proporciona datos relativamente aproximados, que pueden tener una variación importante con los valores reales; esto depende básicamente de los datos de coeficientes considerados, así como del factor ambiental. Si se desean predecir las concentraciones de contaminantes con mayor aproximación se recomienda utilizar el método riguroso propuesto por A.P.I. RP-931 descrito en el capítulo anterior.

VI.2.4) Algoritmo de Cálculo

A continuación se presenta el algoritmo de Cálculo propuesto por A.P.I. para el diseño de Quemadores Elevados.

Algoritmo 6.2 Cálculo del Quemador por el Método A.P.I.



VI.3) METODO DE Soen H. TAN

El siguiente método de cálculo se basa en la utilización de Nomogramas para facilitar y agilizar los cálculos de diseño de Quemadores Elevados. La consideración general es que no toma en cuenta los efectos del viento que se producen en la flama del quemador.

VI.3.1) Diámetro del quemador

El método de Tan supone que la velocidad más recomendable para el dimensionamiento del diámetro se encuentra en el rango del 20 al 30 % de la velocidad sónica del gas. Tan, proporciona una ecuación para cálculo del diámetro considerando un 20 % de la velocidad sónica :

$$v = \frac{1}{2} \left(\frac{g K R T}{H} \right)^{1/2} \quad \text{Ec. 6.31}$$

Aplicando las ecuaciones de No. de Mach y de flujo másico, se obtiene una ecuación simplificada para calcular el diámetro :

$$d^2 = \frac{W}{1370} \left(\frac{T}{H} \right)^{1/2} \quad \text{Ec. 6.32}$$

donde :

- d : Diámetro del quemador (in)
- W : Flujo másico (lb/hr)
- T : Temperatura absoluta del gas (^oR)
- H : Peso molecular del gas

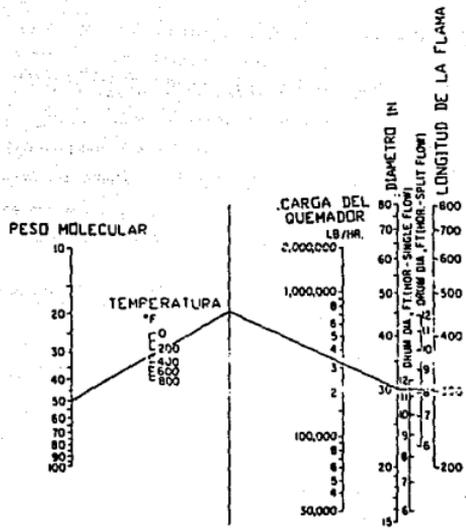
Basándose en la Ec. 6.32, Tan elaboró el siguiente Nomograma 6.1 para obtener el diámetro.

La Ec. 6.32 y la fig. 6.9 están basados en un valor de 1.2 para la relación de calores específicos del gas, sin embargo, para valores diferentes, el diámetro del quemador puede ser corregido al aplicarse la siguiente ecuación :

$$d_c = d_o K^{-0.25} \quad \text{Ec. 6.33}$$

donde :

- d_o : Diámetro del quemador evaluado con el nomograma
- d_c : Diámetro del quemador corregido
- K : Relación de calores específicos (Cp/Cv)



Nomograma 6.1 Cálculo del diámetro del quemador (Método TAN)

VI.3.2) Altura del Quemador

Recordando que la altura del quemador es diseñada para proporcionar el nivel de radiación seguro en un punto al cual se desea proteger. Tan, basa la radiación per misible en la base del quemador como 1500 BTU/hr Ft² máxima, fundamentado en los efectos provocados por la exposición a la radiación de equipo y del personal. Los daños principales que tienen los equipos son debidos al aumento de la temperatura de su superficie lo cual puede provocar alteraciones tanto en los materiales contenidos por los equipos como en los mismos materiales de construcción.

En el caso del personal, el tiempo en el que ocurre el umbral del dolor o ampollamiento en la piel, es el principal efectos que regula la radiación para este método.

De las situaciones anteriores se establece :

INTENSIDAD DE CALOR	PROTECCION REQUERIDA PARA
1500	Personal en operación
3000	Equipo

En la figura 6.10 se encuentran las áreas donde es requerida la protección contra la radiación para un quemador que tiene las siguientes características :

- d = 48 in
- H = 200 Ft
- W = 970,000 lb/hr
- M = 44.0

Para el cálculo de la altura del quemador, Tan estableció la utilización de nomogramas, para lo cual se aceptan las siguientes condiciones :

- a) La intensidad de radiación para un punto distantes del centro de la flama y una distancia X de la base del quemador está dada por :

$$q = \frac{c Q}{4 \pi R^2} \quad \text{Ec. 6.34}$$

b) La emisividad total es relacionada con el peso molecular del gas :

$$C = 0.048 \sqrt{H}$$

c) El calor liberado por la flama está expresado como :

$$Q = 20,000 W$$

donde : 20,000 es el calor de racción (HLV)
W es el flujo de gas (Lb/hr)

d) La distancia más corta del centro de flama a la base del quemador es :

$$y = (H (H + L))^{1/2}$$

donde :

H : Altura del quemador

L : Longitud de la flama, es función del diámetro

$$L = 120 D$$

D : Diámetro del quemador

Esto implica que, de acuerdo con la figura 6.9 y las condiciones descritas anteriormente, se tiene que la determinación de la distancia radial del centro de flama a un punto P, a cierta distancia X de la base del quemador es :

$$R^2 = X^2 + y^2 = X^2 + H (H + 120 \cdot D) \quad \text{Ec. 6.35}$$

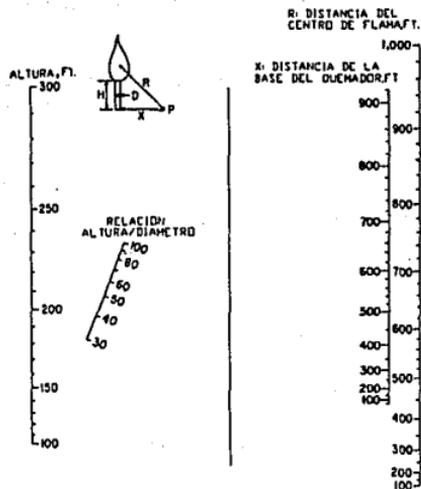
sustituyendo esta ecuación en la ecuación 6.34 se tiene :

$$q = \frac{960 W \sqrt{H}}{4 p (X^2 + H (H + 120 \cdot D))} \quad \text{Ec. 6.36}$$

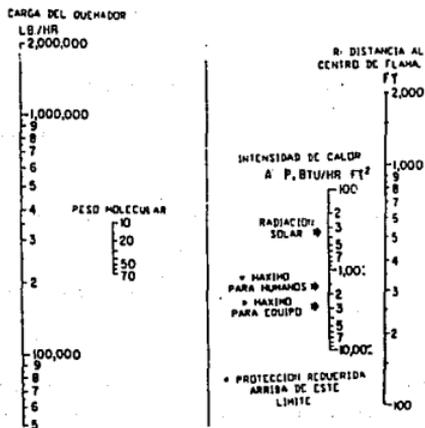
La altura del quemador se obtiene entonces de sustituir $q = 1500 \text{ BTU/hr Ft}^2$ máxima y $X = 0$.

$$H = \frac{(14,400 D^2 + 0.204 W H)^{1/2} - 120 \cdot D}{2} \quad \text{Ec. 6.37}$$

Los Nomogramas que se presentan enseguida fueron elaborados en base a las ecuaciones anteriores, y determinan la intensidad de radiación q, si la distancia X es conocida, para lo cual es necesario determinar primero el valor de R.



Nomograma 6.2

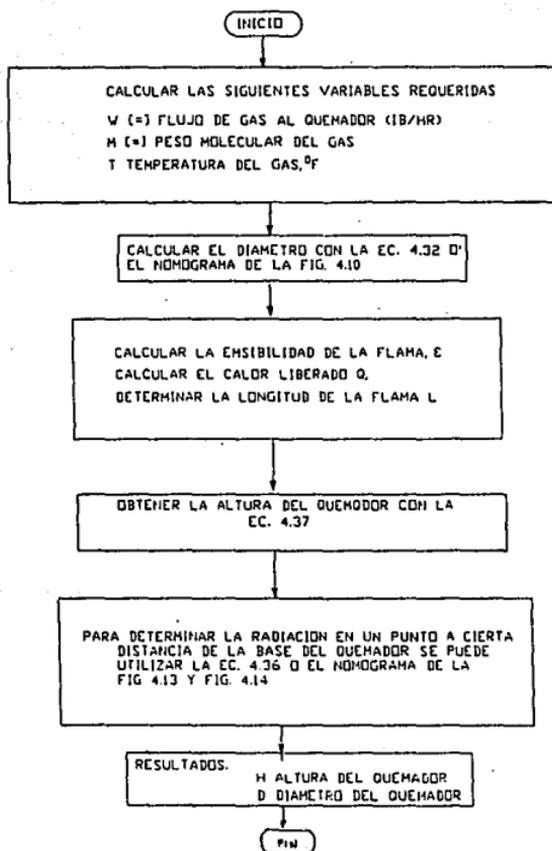


Nomograma 6.3

VI.3.3) Algoritmo de Cálculo

A continuación se presenta el algoritmo de cálculo propuesto por TAN para el diseño de Quemadores Elevado.

Algoritmo 6.3 Cálculo del Quemador por el Método TAN.



IV. D) METODO DE T. A. BRZUSTOWSKI

Este método fué deducido de datos experimentales obtenidos por T. A. Brzustowski, S. R. Gollahall y H. F. Sullivan . Inicialmente sus estudios de calcular alturas de plumas causadas por venteos de gases, es decir, donde no existe reacción química ni flamas. Estos experimentos se realizaron en túneles de viento para estudiar los efectos de éste sobre los gases venteados. De estas investigaciones se dedujo que la mayor influencia del viento sobre la pluma estaba dada por la relación de flux de momentum del gas de salida y del viento transversal :

$$R = \frac{M_j}{M_\alpha} = \frac{\rho_j U_j^2}{\rho_\alpha U_\alpha^2} \quad \text{Ec. 4.38}$$

donde :

- R : Relación de momentum's
- M : Flux de momentum
- ρ : Densidad
- U : Velocidad
- j : Referido al gas (jet)
- α : Referido al aire

Sin embargo, con experimentos posteriores de los mismo autores se comprobó que esta ecuación se cumple también en caso de flamas, es decir, gases que reaccionan con el aire.

Los experimentos especificos que realizaron las condiciones en las que se basaron son ciertamente amplias y complejas y no son el objetivo del presente trabajo, por lo cual basta decir que Brzustowski obtuvo las ecuaciones de su método mediante mediciones experimentales y correlaciones estadísticas de las mismas, lo cual hace que muchos autores consideren a este método como el más confiable y cercano a los valores reales de radiación que se obtienen en campo para quemadores elevados. Los resultados obtenidos por Brzustowski, y que son propiamente el método de cálculo de éste autor, se describirán a continuación, enfocándose básicamente a la localización del centro de flama para la determinación de la altura mínima de la chimenea por efectos de radiación.

VI.4.1) Diámetro del Quemador

El diámetro del Quemador es calculado de la misma forma que el descrito para el método KENT, por lo que no se repetirá en este inciso.

VI.4.2) Altura del quemador

El cálculo del centro de flama se basa en determinar las coordenadas horizontal y vertical de la misma, en función de la distorsión que presenta como resultado de la acción del viento.

En la figura 6.11 se muestra un esquema de los estudios realizados por Brzustowski, en donde :

- S : Distancia del centro de la boquilla a lo largo del eje de la flama inclinada
- N : Línea normal a S dependiendo de la inclinación
- X, Y, Z : Coordenadas de la flama

La dirección Z es una función de la velocidad de salida del gas :

$$Z = Z (I_w)$$

mientras que la dirección X lo es de la velocidad del viento :

$$X = X (I_w)$$

La consideración general del método es que la flama tiene una concentración de gases que varía a lo largo de la misma y que en la punta de la flama dicha concentración es muy baja; esto conduce a calcular el límite de flamabilidad promedio a lo largo de la flama mediante la siguiente ecuación :

$$\bar{C}_L = C_L \frac{U_j (P.M)_j}{U_\alpha (P.M)_\alpha} \quad \text{Ec. 4.39}$$

donde :

- C_L : Límite bajo de flamabilidad
- U : Velocidad
- P.M : Peso molecular
- j : Referido al gas
- α : Referido al viento

Basado en este valor se calcula la longitud relativa (\bar{S}_L) de la flama, dependiendo del valor obtenido de \bar{C}_L :

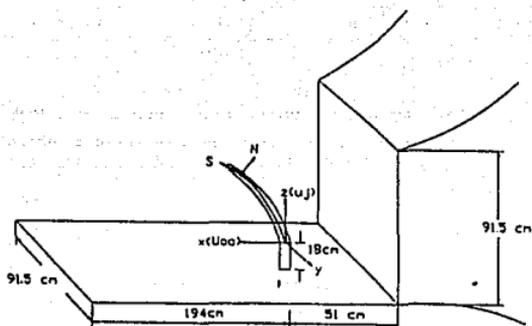


Fig. 6.11 Esquema del arreglo experimental (Brzustowski).

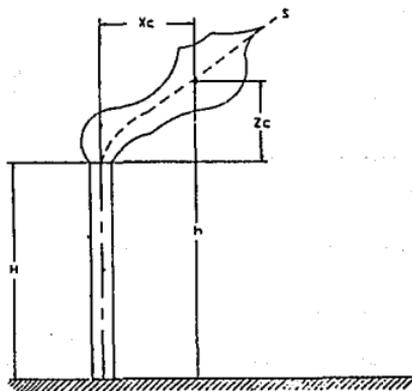


Fig. 6.12 Desplazamiento de la flama por efecto del viento.

Si $\bar{Cl} < 0.5$ Entonces $\bar{Sl} = \frac{2.04}{(\bar{Cl})^{1.03}}$ Ec. 6.40

Si $\bar{Cl} > 0.5$ Entonces $\bar{Sl} = \frac{2.51}{(\bar{Cl})^{0.625}}$ Ec. 6.41

Las coordenadas relativas del extremo de la flama, de acuerdo con Bruzostowski están dadas por las siguientes expresiones obtenidas de correlaciones estadísticas :

$$\bar{X}_l = \bar{S}_l - 1.65 \quad \text{Ec. 6.42}$$

$$\bar{Z}_l = 2.05(\bar{X}_l)^{0.28} \quad \text{Ec. 6.43}$$

donde :

\bar{X}_l : Coordenada adimensional del extremo de la flama

\bar{Z}_l : Altura del extremo de la flama

Ambas en dirección del viento

Entonces, las longitudes reales de la flama (X_l y Z_l) se calculan como una función de las coordenadas relativa y de la relación existente entre el impulso del gas a la salida de la boquilla y el impulso del viento :

$$X_l = \bar{X}_l d R_o \quad \text{Ec. 6.44}$$

$$Z_l = \bar{Z}_l d R_o \quad \text{Ec. 6.45}$$

donde :

$$R_o = \frac{U_j}{U_\alpha} \left[\frac{\rho_j}{\rho_\alpha} \right]^{1/2} \quad \text{Ec. 6.46}$$

d : Diámetro de la boquilla del quemador

j : Referido al gas

α : Referido al aire

Definiendo ahora las coordenadas del centro de flama como :

$$X_c = 1/2 (X_l) \quad \text{Ec. 6.47}$$

$$Z_c = 0.82 (Z_l) \quad \text{Ec. 6.48}$$

Lo cual quiere decir, que el centro de flama tiene un desplazamiento horizontal (X_c) igual a la mitad de la longitud horizontal que presenta la flama por efecto del viento y de 0.82 respecto a la longitud vertical de la misma.

Es importante aclarar este punto porque si se compara con los métodos de Kent y de A.P.I., se verá que difieren en la coordenada Z al localizar éstos el centro de flama a la mitad de la longitud de ésta en esa dirección (Z).

Una vez obtenida la posición del centro de flama se procede a calcular los niveles de radiación emitidos por el quemador para diferentes distancias y fijar con esto la altura del mismo.

La ecuación de referencia utilizada por Brzustowski para el cálculo de la radiación es :

$$K = \frac{F Q}{4 \pi D^2}$$

sin embargo, el resultado de sus observaciones lo llevó a concluir que el modelo de fuente puntual utilizado para predecir radiaciones se cumple satisfactoriamente en áreas cercanas a la flama, es decir, solo cuando la superficie iluminada se encuentra normal al rayo, pero a medida que el objeto expuesto a la radiación se aleja, se hace necesario corregir su valor debido al ángulo de incidencia que forma el rayo sobre el cuerpo expuesto a la radiación :

En la figura 6.13 :

- e : Angulo de incidencia
- n : Línea normal al cuerpo expuesto
- D : Distancia entre el centro de la flama y el objeto expuesto

Por lo tanto la ecuación corregida para el modelo de fuente puntual es :

$$K = \frac{F Q}{4 \pi D^2} \cos e \quad \text{Ec. 6.49}$$

Fijando la radiación máxima permitida (K) en un punto alrededor del quemador, de acuerdo a los límites permitidos, es posible determinar la altura del quemador requerida para ello.

$$H = (D^2 - X^2)^{1/2} - Z_c \quad \text{Ec. 6.50}$$

donde :

$$X_t = X + X_c$$

X_t : Distancia entre el pnto a proteger y la base del quemador (conocida)

D : Distancia del punto a proteger al centro de flama

Z_c : Coordenada Z del centro de flama

X_c : Coordenada X del centro de flama

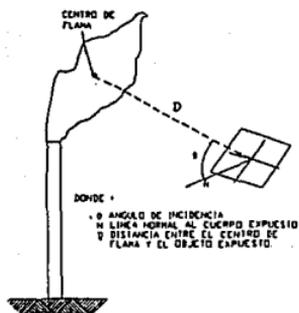


Fig. 6.13 Angulo de Incidencia.

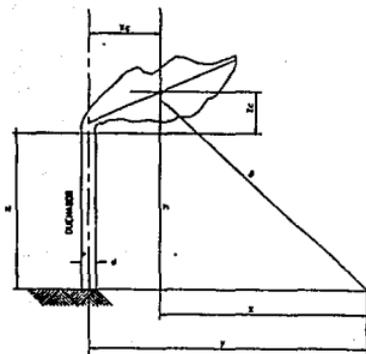


Fig. 6.14 Geometría de la Flama para el Método Brzustowski.

VI.4.3) Algoritmo de Cálculo

A continuación se presenta el algoritmo de cálculo para este método.

VI.5) Comparación de Métodos de Dimensionamiento

Hasta ahora se ha explicado que la forma de distribución de la Radiación y el calor es transferida siguiendo un modelo de fuente puntual. De esta conclusión se determinó que la diferencia entre los métodos de cálculo es la forma de predecir la longitud de la flama, así como la ubicación del centro de la misma, esto se refleja en la diferencia en los valores de radiaciones para un punto determinado.

Estas diferencias originan que cada uno de los métodos tenga un rango donde explique y prediga con mayor acercamiento las condiciones reales y se determine cual es el más adecuado para el diseño de rangos específicos o de uso general.

A continuación se hace una comparación de los principales parámetros de diseño intervienen el dimensionamiento adecuado del quemador de acuerdo con las consideraciones de cada método.

VI.5.1) Diámetro del Quemador

En todos los métodos descritos el dimensionamiento del diámetro es una función de la velocidad del fluido y se establecen las mismas condiciones o limitaciones para su cálculo.

De esta forma la única variante importante entre los métodos es la determinación de la caída de presión a través del quemador.

VI.5.2) Ubicación del Centro de Flama

En este rubro existen primeramente diferencias grandes en la determinación de la longitud de la flama y la variable de la que es dependiente o está relacionada.

En el método de KENT y TAN se basa la determinación de la longitud como una función del número de Mach contra la relación longitud de la flama/diámetro del quemador que básicamente se mantiene constante en el intervalo de operación y diseño del quemador.

Esta relación es típicamente $L = 118 d$ (Es decir la longitud de la flama es 118 veces el diámetro del Quemador). Esta característica implica que la longitud de la flama varía muy poco o nada, en flujos pequeños o grandes (en los rangos de diseño).

A.P.I. considera que la longitud de la flama es una función del calor liberado por el fluido durante la combustión, no considera que el diámetro pueda afectar el largo de la flama pero si el flujo al quemarse y liberar energía. Esta última observación indirectamente contempla las dimensiones del quemador.

Brzustowsky determina que la longitud de la flama es el resultado de la suma de los dos efectos, el momentum o flux por la salida del fluido a través de la boquilla y el flux creado por la difusión del gas al quemarse y expanderse.

Básicamente en todos los métodos la relación entre la longitud de la flama y el diámetro del quemador se puede expresar como :

$$L = k D$$

Donde k es una constante que puede incluir términos de composición, área de la boquilla, calor liberado, etcétera.

En la tabla que a continuación se presenta, permiten diferenciar la eficacia de las distintas ecuaciones planteadas por cada Método.

LONGITUD REAL (FT)	FORMULA A.P.I.	FORMULA BRZUSTOWSKY	FORMULA KENT	NUMERO DE MACH
89.0	134.0	77.0	154.0	0.20
102.0	175.0	98.0	154.0	0.35
142.0	205.0	115.0	154.0	0.49

VI.5.3) Deformación de la flama por efecto del viento

Otra variable importante en la determinación del centro de flama es la forma de la misma y su desplazamiento en la dirección del viento que la deforma.

TAN en su modelo de radiación considera que la deformación de la flama no tiene ningún efecto en la radiación emitida y por lo tanto no hay variantes en el cálculo bajo esta condición.

KENT si expresa que la inclinación de la flama al deformarse por el efecto del viento ésta es desplazada más cerca de la zona de protección lo que origina que la radiación aumente en este punto.

Se supone en este método que el centro de flama se encuentra en la mitad

de la longitud total de la flama y es esta consideración que modifica la forma de cálculo bajo esta situación. El ángulo de inclinación de la flama es determinado mediante relación entre las velocidades de salida del fluido y la del viento.

A.P.I. propone pequeñas deformaciones de la flama por efecto del viento en su longitud y en el desplazamiento en la dirección de éste. Estas pequeñas deformaciones continuas se integran en una resultante que nos ubica el centro de flama más cercano a la punta y como consecuencia la radiación emitida es mayor en comparación con los otros métodos para el mismo punto.

Esta diferencia implica que los modelos de cálculo consideren esta situación como la crítica en el diseño.

Brzustowsky estudió las deformaciones de la flama y enlazó otras propiedades además de los efectos de las velocidades del viento y del fluido con éstas. El modelo Brzustowsky en base a muchas observaciones a través de métodos estadísticos propuso ecuaciones que determinan la longitud y deformación de la flama junto con el centro de la misma. Este método es el que presenta los mejores resultados cuando se compara con datos de flamas y radiaciones emitidas por quemadores de campo en forma real.

A continuación se muestra una tabla comparativa entre los ángulos de inclinación de la flama y los observados en campo.

VALORES OBSERVADOS	A.P.I.	BRZUSTOWSKY	KENT	NUMERO DE MACH
15.9	33.5	21.2	1.5	0.20
20.1	28.1	12.7	1.0	0.35
3.9	20.6	11.0	0.7	0.49

Finalmente la radiación que predicen cada uno de los métodos de cálculo es la variable importante para comparar con valores reales ya que esto resume la forma de utilizar (longitud de flama, centro de flama, inclinación o deformación) la aplicación de cada método y las ventajas que estos ofrecen.

C A P I T U L O V I I

CARACTERISTICAS DE OPERACION

VII. CARACTERISTICAS DE OPERACION

En los capítulos anteriores se analizaron las variables y los factores que determinan las dimensiones (diámetro y altura) del quemador elevado de acuerdo a las necesidades de la planta, así como los métodos de cálculo que las definen; sin embargo, existen otras características operacionales del quemador que, aunque no interfieren en las dimensiones físicas del mismo, sí tienen relación con las condiciones de funcionamiento del sistema o de los accesorios o equipos adicionales requeridos para éste.

Estas características se refieren básicamente a la emisión de Humo y a la generación de Ruido durante la combustión de los gases del desfogue.

Con el análisis de estos factores es posible determinar las especificaciones adicionales que deberán requerirse del quemador además de su diámetro y altura específicos.

VII.1.) Emisión de Humo

Los quemadores elevados son utilizados en rangos muy amplios de flujos (desde 50,000 lb/hr), la gran versatilidad de estos sistemas y su economía en el manejo de grandes cantidades permite una diversidad de aplicaciones o usos en diferentes procesos (plantas de Refinación, Petroquímica, Explotación, etc.). Una gran desventaja de los sistemas elevados es que al quemar enormes cantidades de gas se obtiene un producto indeseable, el humo u ollín.

Una combustión sin humo se logra al suministrar una cantidad adecuadamente distribuida de oxígeno en la zona de quemado.

Si recordamos, cuando gas y aire son mezclados para quemarse, el inicio de la combustión se efectúa por una reacción de hidroxilación; los hidrocarburos y el oxígeno forman compuestos hidroxilados que se convierten rápidamente en aldehidos; la adición de calor y más oxígeno convierte los aldehidos en H_2 , CO , CO_2 , y H_2O .

Por otro lado una combustión con humo se produce si la moléculas de oxígeno se adicionan al hidrocarburo antes de entrar en la zona de combustión (romplimiento térmico). El hidrocarburo se convierte en carbón e hidrógeno y si este es mezclado con suficiente oxígeno forma CO_2 y H_2O . Pero el carbón y ollín aparecen si el oxígeno es insuficiente, presentando el humo peculiar en los procesos de combustión.

Los factores más importantes que regulan la emisión de humo son :

- * Cantidad y distribución de oxígeno en la zona de combustión
- * Temperatura en la zona de combustión
- * Tipo de hidrocarburo a quemar

VII.1.1) Oxígeno en la zona de quemado

La cantidad y distribución de oxígeno es el factor más crítico y determinante en la aparición de humo. Para lograr una combustión completa se requiere la cantidad estequiométrica de oxígeno (o su equivalente en aire) en la zona de quemado. La cantidad estequiométrica de aire necesaria varía con la clase y tipo de hidrocarburo, pero esencialmente es constante para cada clase.

El aire es suministrado a la flama en dos partes, aire primario es premezclado con el gas antes de la combustión y aire secundario es aspirado al seno de la flama (ver figura 5.3).

Para lograr una combustión sin humo de hidrocarburos parafínicos se necesita aproximadamente un 20 % de la cantidad estequiométrica de aire adecuadamente distribuido en la zona primaria de mezclado (véase tabla 7.1).

Para hidrocarburos olefínicos, la cantidad de aire primario se incrementa necesitando el 30 % en la zona de mezclado. El aire restante para efectuar la combustión es inducido por la aspiración de la flama. Si no se cumple con estas cantidades se presenta una oxidación incompleta y como consecuencia de ello se presenta el olin.

T A B L A 7.1
REQUERIMIENTOS ESTEQUIOMETRICOS DE AIRE

GAS		AIRE ESTEQUIOM.	
TIPO		ft ³ / Lb	lb / Lb DE COMBUSTIBLE
Etano	Parafinas	12.6	16.2
Propano		8.6	15.7
Butano		6.5	15.5
Etileno	Olefinas	13.5	14.8
Propileno		9.0	14.7
Sulfuro de Hidrógeno		11.1	6.1

VII.1.2) *Temperatura en la zona de combustión*

La temperatura es el segundo factor en importancia en la generación de humo. La temperatura afecta directamente en la cantidad de humo formado debido a la descomposición térmica (Cracking) del fluido, esta descomposición se incrementa con la temperatura, así mismo la cantidad de humo.

T A B L A 7.2
EFFECTOS DE LA TEMPERATURA EN LA DESCOMPOSICION DE HIDROCARBUROS

HIDROCARBURO	TEMPERATURA (°F)	DESCOMPOSICION (%)
N-butano	797.0	15×10^{-8}
	1202.0	57
N-pentano	797.0	24×10^{-8}
	1112.0	30

Si agua, aire o vapor se inyectan correctamente a la zona de mezclado, la cantidad de humo generalmente decrece.

La adición de cualquiera de estos elementos en la zona de combustión abate la temperatura disminuyendo la descomposición térmica, por la velocidad (turbulencia) con que son inyectados incrementan la cantidad de aire aspirado y mejoran su distribución.

Un efecto adicional en el caso de inyección de vapor o agua es la aparición de una reacción endotérmica Carbón -Agua regulando el carbón libre y absorbiendo calor :



VII.1.3) Tipo de fluido a quemar

El fluido o gas a quemar tiene una gran importancia en la generación de humo, su estructura determina el grado en que lo afecta la temperatura y el aire requerido para su combustión, esto provoca la utilización de mayor vapor, agua, gas o aire para lograr una operación sin humo.

Un ejemplo claro es la comparación entre hidrocarburos insaturados y saturados; los insaturados se descomponen fácilmente produciendo más humo que los hidrocarburos saturados, adicionalmente los compuestos insaturados requieren una cantidad de aire en la zona primaria de mezclado mayor (30 %). Consecuentemente, un quemador elevado diseñado para hidrocarburos insaturados requiere más aire por libra de gas a quemar que en un sistema operado para compuestos saturados.

T A B L A 7.3
EFFECTO DE LA TEMPERATURA EN LA DESCOMPOSICION
DE HIDROCARBUROS DE ACUERDO A SU SATURACION

HIDROCARBURO	TEMPERATURA (° F)	DESCOMPOSICION (%)
Etano	1057	0.00017
Etileno	1058	75.60
Propano	1067	0.0026
Propileno	1067	75.00

VII.1.4) Control de Humo

La reducción de humo en un quemador elevado se logra al suministrar el aire adecuado en la punta o zona de combustión. Los métodos más comunes de suministro son :

- Inyección de vapor
- Inyección de agua
- Inyección de aire
- Inyección de gas combustible

Los métodos más utilizados son la inyección de vapor (aire indirectamente) y aire. La inyección de vapor y agua trabajan en forma similar; se suministra vapor o agua a través de sistemas de boquillas en el seno de la zona de mezclado, la alta velocidad del vapor o agua inyectada crea una mayor turbulencia de los gases reactivos provocando una mayor aspiración de aire y una distribución adecuada en el gas a quemar.

La inyección de aire es suministrada por un sistema de tubos coaxiales en el cual el tubo anular transporta el gas a la punta y por el tubo exterior se inyecta aire comprimido.

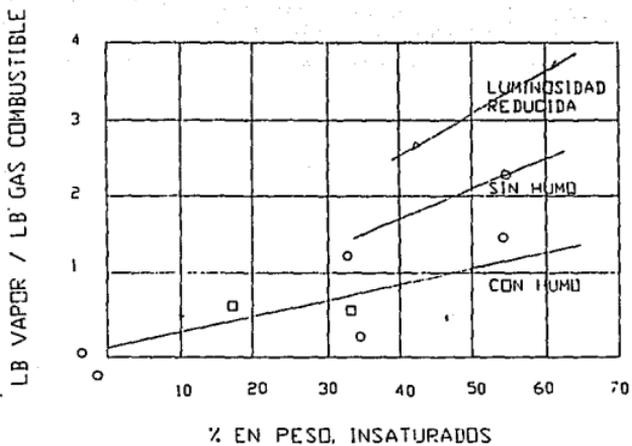
La inyección de gas es utilizada como promotora de la combustión, es decir, un gas que se consume más rápidamente que el gas a quemar, se inyecta a la zona de quemado produciendo una turbulencia y motivando la combustión del gas menos reactivo (ver figuras 7.1 y 7.2).

La selección y aplicación de cada uno de los sistemas de suministro de aire al quemador elevado son una función del flujo a quemar y del costo de este servicio principalmente, sin embargo, existen algunas otras consideraciones especiales como el tipo de hidrocarburo, tipo de boquilla a utilizarse, frecuencia de servicio, nivel de ruido, entre otras.

T A B L A 7.4
TABLA DE REQUERIMIENTOS EN LOS SISTEMAS DE INYECCION

TIPO	CONSUMO lb/lb _{Hid.}	NIVEL DE RUIDO	BOQUILLAS (USO)
Vapor	0.25	Medio	Sí
Agua	0.7 a 2.0	Muy bajo	Si
Aire	3.1	Bajo	No
Gas	0.7	Alto	Si

ver gráfica 7.1



Gráf. 7.1 Requerimientos de vapor para Quemadores Elevados.

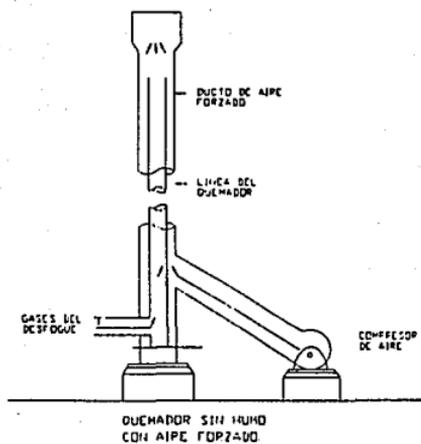


Fig. 7.1 Aire forzado para quemador sin humo.

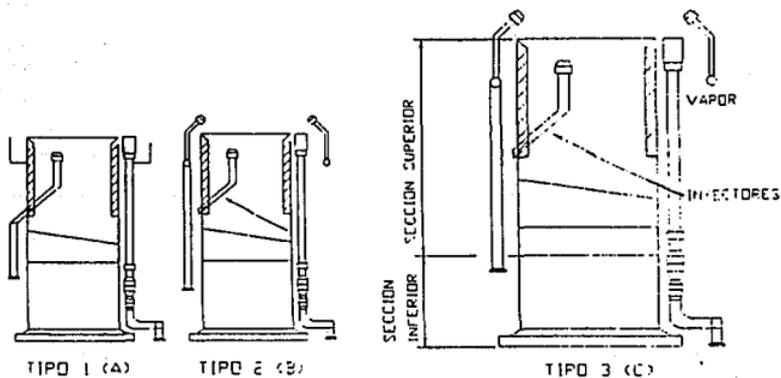


Fig. 7.2 Boquillas de inyección de vapor o gas.

T A B L A 7.5

UTILIZACION DE LOS SISTEMAS DE SUMINISTRO DE AIRE

TIPO	FLUJO DE HIDROCARBUROS (Lb/hr)
Vapor	900,000
Agua	100,000
Aire	250,000
Gas	105,000

T A B L A 7.6

COSTOS RELATIVOS DE QUEMADORES OPERACION SIN HUMO

TIPO DE QUEMADOR	COSTOS DE EQUIPO	
	12" ϕ	24" ϕ
Con Humo		
Punta normal	1.00	1.00
Sin humo		
Punta suministro vapor	1.25	1.25
Punta suministro agua	1.20	1.20
Punta suministro gas	1.30	1.30
Aire forzado	2.80	3.38

La inyección de vapor por ser la forma más económica y aplicada para grandes flujos de gases a quemar con respecto a los otros métodos de suministro de aire, es el más utilizado en la industria de Refinación y Petroquímica.

Existen varias formas de inyección, estas se utilizan de acuerdo al flujo a quemar y características del fluido.

El modo más sencillo es el tipo 1 (ver figura 7.2A), el vapor es suministrado por un soporte simple en el centro de la punta del quemador. Este tipo es el más barato y es utilizado para gases de bajo peso molecular y pequeñas cantidades de vapor. Además requiere pequeños periodos de uso (minutos).

El tipo 2 (ver figura 7.2B) es utilizado en quemadores pequeños, generalmente de diámetros menores a las 24 pulgadas.

El vapor es inyectado a la zona de combustión por un número de jets conectados a un anillo distribuidor. El vapor suministrado depende del flujo de gas a quemar.

El tipo 3 (ver figura 7.2C) es una combinación del tipo 1 y 2 resultando un sistema muy versátil y usado. Se aplica para diámetros mayores de 2 Ft, las características de este tipo permite manejar flujos pequeños y bajos pesos moleculares. Es utilizado en quemadores pequeños cuando el gas a quemar es muy pesado (alto peso molecular) o es altamente insaturado.

Este sistema dá buenos resultados en rangos de diámetros de 6 a 72 pulgadas.

La mayor desventaja de estos sistemas de suministro es la producción de ruido. A mayor consumo de vapor, mayor intensidad en ruido, como una solución a los requerimientos de consumo de vapor (para flujos grandes) y de niveles de intensidad de ruido, diferentes fabricantes ofrecen distintos tipos de boquillas que garantizan bajos niveles de ruido y manejo de grandes flujos de gas y vapor.

Algunas de estas boquillas serán descritas en el capítulo siguiente y se mencionarán algunas de sus características, como los efectos Coanda, Multipuertos, etc. (ver figura 7.3).

La cantidad de vapor requerida para una combustión sin humo si recordamos depende del flujo a quemar, características del fluido (insaturados, saturados, etc.) y el peso molecular. Para determinar el consumo de vapor existen algunos gráficos o correlaciones. La gráfica está basada en la composición o contenido de insaturados y fué obtenida con un sistema de inyección del tipo 1. Esta gráfica puede estimar la cantidad de vapor requerida en función de la cantidad de insaturados en los gases a quemar. La tendencia de los hidrocarburos a formar humo como se ha observado permite estimar empíricamente la cantidad de vapor con la siguiente fórmula :

$$W_{vap} = W_{HC} (0.68 - 10.8/M) \quad \text{Ec. 7.1}$$

donde :

W_{vap} : Flujo de vapor, Lb/hr

W_{HC} : Flujo de gas a quemar, Lb/hr

M : Peso molecular de gas a quemar

Ver Nomograma 7.1 .

En las siguientes gráficas 7.2, 7.3, 7.4, 7.5 se puede observar el inconveniente de la inyección de vapor, aire, agua para la eliminación de humo. Básicamente se encuentran las siguientes relaciones :

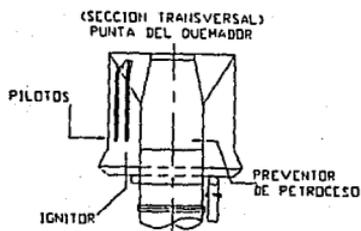
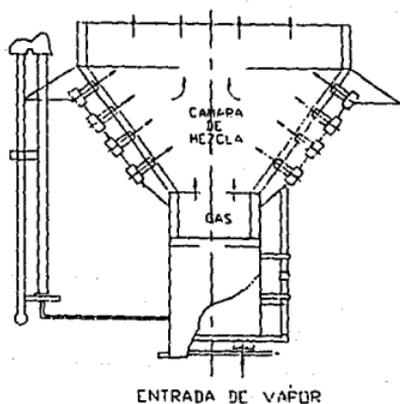
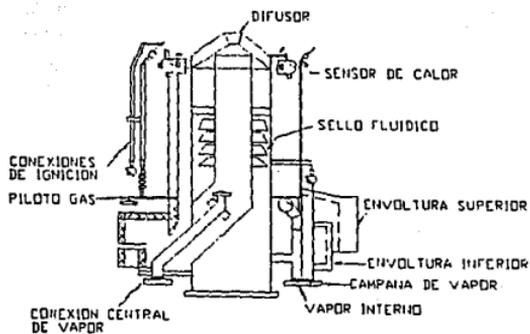
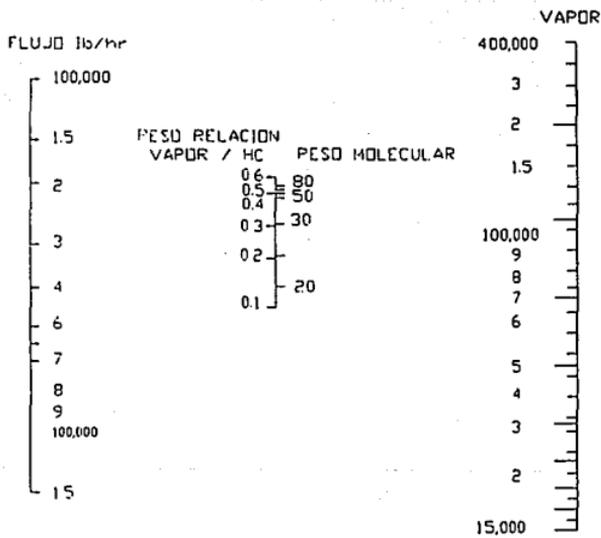
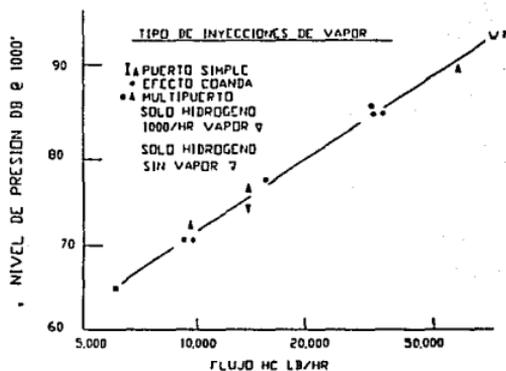


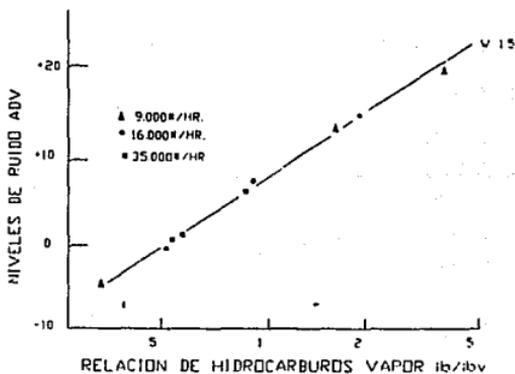
Fig. 7.3 Tipos de Boquillas.



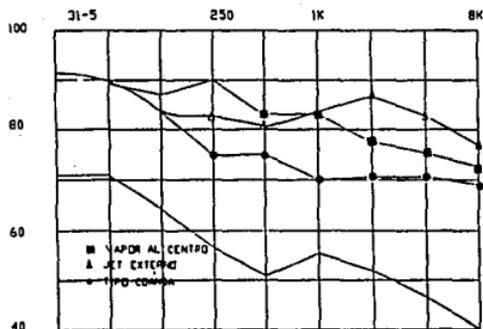
Nomograma 7.1 Estimación de los requerimientos de vapor para Quemador sin humo.



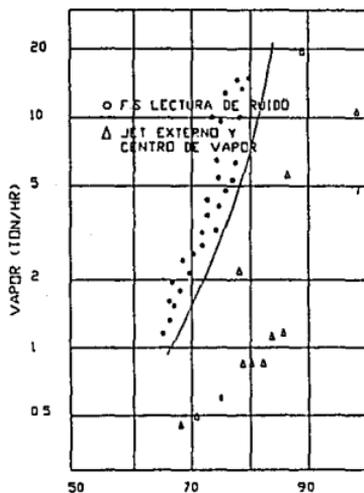
Gráf. 7.2 RUIDO EN QUEMADORES ELEVADOS V.S. FLUJO DE HIDROCARBUROS



Gráf. 7.3 EFECTO DE LA INYECCION DE VAPOR EN EL RUIDO POR COMBUSTION



GRÁFICA
 Gráf. 7.4 EFECTO DE DIFERENTES TIPOS DE INYECCION
 DE VAPOR EN EL ESPECTRO DE RUIDO
 POR COMBUSTION



DBA (CORREGIDOS) A 150 FT. DE LA FUENTE.
 GRÁFICA 7.5 RELACION DE SPL Y FLUJO DE VAPOR

- a) Incremento de ruido al aumentar el flujo a quemar.
- b) Efecto de la inyección de vapor en el ruido por combustión, incrementándose conforme aumenta la relación vapor/gas.
- c) La ubicación del inyector y tipo de boquilla para un flujo de gas y vapor constante afecta en la intensidad y frecuencia del ruido generado.

Estas características se estudiarán para prever el ruido generado por la combustión y proponer algunas alternativas de solución.

VII.2) Generación de Ruido

En el capítulo V se trató la naturaleza del sonido como un disturbio y vibración de las partículas de aire adyacentes a una fuente causadas por una variación en la presión normal atmosférica.

Estos cambios de presión, si tienen la magnitud suficiente y la frecuencia apropiada producen el efecto llamado sonido. Si este sonido es desagradable al oído humano, se denomina ruido.

Todos los sonidos se propagan y la velocidad con la que se propagan depende del medio de transmisión.

La magnitud del sonido es medida en dos formas:

- En términos de niveles de presión (percibida por el oído humano) entre el umbral de audición y dolor.
- Y en función de la energía transmitida por la fuente de sonido, esta forma es conocida como el poder acústico de la fuente.

Estas formas de medición tienen un amplio rango y requieren una escala logarítmica ya expuesta en el capítulo V.

De esta exposición se definió :

Nivel de presión del sonido

$$\text{SPL} = 20 \log \left(P / P_0 \right) \quad \text{Ec. 7.2}$$

donde :

P : Presión auditiva, N/m^2

P_0 : Presión de referencia, N/m^2

SPL : Nivel de presión del sonido, db

Nivel de potencia acústica o intensidad acústica

$$\text{PWL} = 10 \log \left(W / W_0 \right) \quad \text{Ec. 7.3}$$

donde :

W : Poder acústico, watts

W_0 : Poder acústico de referencia, 10^{-12} watts

PWL : Potencia acústica, db

VII.2.1) Bandas de Frecuencia

Es importante conocer las bandas de frecuencia pues los ruidos generados pueden ser de tonos bajos y se requiere cierto tratamiento o filtros para este tipo de banda, diferentes a las bandas altas.

Si recordamos el oído humano percibe diferentes intensidad-frecuencia del sonido, esto implica la evaluación de la máxima presión auditiva (dB permitidos) para cada banda de frecuencia el oído puede soportar sin daño a la salud.

Con la finalidad de corregir esta descompensación se creó una escala especial llamada decibeles integrados A, se abrevia dBA.

La integración A se refiere a un filtro que retira una proporción de las bajas frecuencias (y también ciertas frecuencias altas). Ver tabla 7.7

T A B L A 7.7

FRECUENCIA	ESCALA A MODIFICACIONES A LOS db
6,000	-6.6
8,000	-1.1
4,000	+1.0
2,000	+1.2
1,000	0
500	-3.2
250	-8.6
125	-16.1
63	-26.2
31.5	-39.4

Este filtro está incluido en dos campos : imita, en cierto modo, las características del oído humano y se ha encontrado empíricamente, que el dBA es la elección más útil de la escala de medición para los propósitos relacionados con la sordera ocupacional.

La siguiente tabla 7.8 nos presenta la duración máxima recomendable a la que puede exponerse el oído humano sin presentar daños a la salud. La tabla está descrita para las escalas normal e integradas de decibeles.

T A B L A 7.8

ESCALA DECIBELES INTEGRADOS		ESCALA NORMAL	
DURACION/DIA (HORAS)	NIVEL DE SONIDO (db) RESPUESTA ATRASADA	DURACION/DIA (HORAS)	NIVEL DE SONIDO (db)
8	90	16	80
6	92	8	85
4	95	4	90
3	97	2	95
2	100	1	100
1 1/2	102	1/2	105
1	105	1/4	110
1/2	110	1/8	115
1/4 O MENOS	115		

Por otra parte en la práctica muchas fuentes de sonido no se dispersan con igual intensidad en todas sus direcciones.

La medida de la variación de estos niveles es conocido como el *Índice de directividad de la fuente*, algunas veces denotado por D_{10} para indicar su dependencia del ángulo de referencia axial.

$$D_{10} = SPL_0 - SPL_s \quad \text{Ec. 7.4}$$

donde :

SPL_0 : Nivel de presión del sonido a la distancia R de la fuente en dirección 0

SPL_s : Nivel de presión que existiera a la distancia R de una segunda fuente que no es direccional.

En todo equipo en el cual es transportado un fluido a través de él genera un ruido al paso por este y se incrementa si existen reducciones bruscas, expansiones súbitas y se alcanzan velocidades sónicas.

Lamentablemente en los quemadores elevados todos estos factores de generación están presentes y se agravan aún más por el ruido generado de la combustión de los gases desfogados.

El rugir de los procesos de combustión es el problema más serio en los quemadores elevados. Potencialmente se agrava el nivel de ruido al incluir fuentes como la inyección de vapor, condensación súbita de humedad, burbujeo o chapaletos del líquido en el tanque de sello e inestabilidad en la combustión.

En la operación del quemador están presentes tres fuentes de generación de ruido :

- a) La inherente al paso de un fluido de alta velocidad a través de las restricciones de la boquilla.
- b) La producida por el proceso de la combustión.
- c) La adicionada por la utilización de inyecciones de vapor, agua para reducir el humo en la operación.

De esta exposición se concluye que es necesario contar con un método para estimar el grado e intensidad de ruido a generarse por la operación del quemador; de esta manera puede preverse la utilización de equipo o accesorios para reducir dichos problemas.

VII.2.2) Ruido por Combustión

El ruido por combustión es inherente al proceso y no es posible desligarlo, además este se incrementa con el flujo a quemar y realmente no puede disminuirse esta fuente de ruido. Generalmente no es factible incrementar la altura del quemador para disminuir el nivel de ruido en un punto en particular.

Se designa como el poder total de radiación del sonido de la fuente W , en Watts. El poder acústico a un punto dado como W en watts; esta es una fracción del poder total de sonido transmitido, de tal forma que se cumple :

$$W = \epsilon W_i$$

$$\text{Ec. 7.5}$$

Donde ϵ es conocido como la eficiencia acústica de la fuente, y para hidrocarburos combustibles, es estimada entre 10^{-7} y 10^{-9} . El término de poder de radiación de sonido total de la fuente está dado por :

$$Wt = \text{Flujo} \cdot \text{Calor de reacción} = 0.293 \text{ GHV} \quad \text{Ec. 7.6}$$

Donde :

GHV : Calor total liberado, BTU/Hr

G : Flujo másico del gas, Lb/Hr

Hv : Poder calorífico del gas, BTU/Lb

0.293 watts = 1 BTU/Hr

Considerando para hidrocarburos típicos, la eficiencia acústica para combustión en quemadores elevados es :

$$\epsilon = 5 \cdot 10^{-8}$$

$$W = 5(10^{-8}) (0.293 \text{ GHV}) \quad \text{Ec. 7.7}$$

puede estimarse el nivel de potencia acústica por :

$$\text{PWL} = 10 \text{ Log} \left\{ 5 (10^{-8}) (0.293 \text{ GHV}) / 10^{-12} \right\} \quad \text{en db}$$

$$\text{PWL} = 10 \text{ Log GHV} + 41.5 \quad \text{en dB} \quad \text{Ec. 7.8}$$

Ahora, la relación existente (a condiciones de campo libre) entre la potencia acústica de la fuente y el nivel de presión acústica de la misma para una distancia R de la fuente del origen del sonido está dada por :

$$\text{SPL} = \text{PWL} - 10 \text{ Log R} - 0.5 \quad \text{en dB} \quad \text{Ec. 7.9}$$

Esta relación debe corregirse por efectos de absorción atmosférica para distancias superiores a 100 Ft.

Consecuentemente el nivel de presión acústica para el proceso de combustión puede estimarse como :

$$\text{SPL} = 10 \text{ Log GHV} - 20 \text{ Log R} + 41$$

en dB a la distancia R de la fuente

Si se considera constante el poder calorífico del efluente a quemar y con un valor aproximado de 20,000 BTU/lb, las expresiones de nivel de ruido pueden simplificarse :

$$\text{PWL} = 10 \text{ Log G} + 84.5 \quad \text{Ec. 7.10}$$

$$\text{SPL} = 10 \text{ Log} (G/R^2) + 84 \quad \text{Ec. 7.11}$$

El ruido generado en la punta del quemador es el resultado de dos fuentes, la primera es la inherente a la combustión, la segunda es la producida por el paso de un fluido a alta velocidad a través de la restricción de la boquilla. El ruido por venteo es el resultado de la restricción y el mezclado turbulento del gas de desfogue con la atmósfera, de esta forma, el nivel de potencia acústica para ruido por venteo es expresado por :

$$W = n Wf$$

$$PWL = 10 \text{ Log } (n Wf/W) \quad \text{Ec. 7.12}$$

donde :

W : Potencia acústica de la fuente en un punto dado
Watta.

Wf : Potencia mecánica de la fuente

$$Wf = 1/2 m c^2$$

m : Flujo másico

c : Velocidad del fluido en la boquilla

n : Eficiencia acústica

Considerando la eficiencia acústica para venteos de hidrocarburos como :

$$n = 3(10^{-6})$$

$$PWL = 10 \text{ Log } G + 74 \quad \text{en db} \quad \text{Ec. 7.13}$$

$$SPL = 10 \text{ Log } (G/R^2) + 68 \quad \text{Ec. 7.14}$$

en dB a una distancia R en Ft.

Las frecuencias predominantes en los procesos de combustión son del orden de 10 a 500 Hz, por encima de este rango el espectro dominante es el del venteo del gas. Sin embargo la intensidad acústica del ruido por combustión es de 16 dB más alto que el ruido por venteo.

A continuación se muestran los espectros de cada banda de frecuencia del proceso de combustión y venteo, así como las ecuaciones que estiman su intensidad y el espectro resultante en ese intervalo de frecuencia (ver tabla 7.9)

Debemos corregir o adaptar estas ecuaciones a la escala de decibeles integrado para facilitar el análisis de los efectos y máximas intensidades alrededor del sistema del quemador.

$$SPL(A) = 10 \text{ Log } GHV - 20 \text{ Log } R + 25 \quad \text{en db(A)} \quad \text{Ec. 7.15}$$

$$SPL(A) = 10 \text{ Log } G - 20 \text{ Log } G + 68 \quad \text{en db(A)} \quad \text{Ec. 7.16}$$

$$SPL(A) = SPL - 16$$

(ver gráfica 7.5)

VII.2.3) *Inyección de vapor*

El quemador elevado es concebido y diseñado para manejar grandes cantidades de gases, generalmente con la velocidad de salida del gas y los flujos manejados, la combustión no se efectúa totalmente y se forman humo y partículas de carbón (ollín).

El camino del gas a través del quemador y la zona de combustión puede ser detallada como : Difusión de los gases en el seno de los alrededores de la punta del quemador para formar una mezcla combustible que pueda ser quemada y generación de la flama.

De acuerdo con lo anterior los gases salientes de la boquilla son precalentados por el efecto del calor radiado y transmitido por convección de la zona de quemado.

Dependiendo del tamaño de la flama y la naturaleza del gas, la temperatura de los gases salientes (no quemados) en un punto determinado puede producirse un rompimiento (cracking) térmico de las moléculas del gas. Esto produce hidrógeno y carbón libre antes de introducirse a la zona de quemado. Estos gases libres son cubiertos por la flama y consumidos rápidamente por la reacción con oxígeno, sin embargo, algo de este carbón puede no reaccionar lo suficientemente rápido, enfriarse y aparecer como humo.

La adición de vapor a estos gases afecta todo este proceso bajando la temperatura de los gases salientes en la boquilla (no quemados) retardando el rompimiento térmico.

La introducción de vapor entonces controla la relación carbón-hidrógeno, además de incrementar la velocidad de quemado; la creación de turbulencia de los gases reactivos provoca aspiración de aire reduciendo el tamaño de la flama.

Todos estos efectos son realmente deseables, desafortunadamente la inyección de vapor al mejorar la combustión incrementa el ruido de la misma, adicionalmente la inyección de vapor colabora con el ruido de los inyectores de vapor.

La alta presión del vapor inyectado (100 a 150 psig) genera un ruido típico de alta frecuencia con o sin la combustión. La inyección de vapor incrementa la eficiencia del proceso, consecuentemente la energía liberada en la combustión y la velocidad de quemado, resultando en un incremento del rugido de la combustión. Entonces el nivel de ruido generado está formado por tres componentes : ver gráficas 7.2 y 7.3

- * Baja frecuencia, ruido por combustión (SPL_{combustion})
- * Alta frecuencia. ruido inyección de vapor (SPL_{vapor})
- * Cambio en el ruido por combustión por adición de vapor a flujo constante de hidrocarburo (SPL_{relativo})

De acuerdo con estos componentes la resultante se puede resumir como :

$$SPL_{TOTAL} = 10 \left[\text{ANTILOG} \left\{ (SPL_{COMB.}) + (SPL_{REL.}) \right\} / 10 + \text{ANTILOG} \left\{ SPL_{VAP.} \right\} / 10 \right] \quad \text{Ec. 7.17}$$

$$SPL_{REL.} = 15 \text{Log} (GVAPOR/GGAS) + 10 \quad \text{en db} \quad \text{Ec. 7.18}$$

donde :

GVAPOR : Flujo másico del vapor inyectado

GGAS : Flujo másico del gas a quemar

El único componente que puede ser reducido es el ruido provocado por los sistemas de inyección de vapor. Esto se logra al utilizar diferentes tipos de soportes e inyectores.

Un ejemplo de esto es cambiar el tipo de boquilla esto se ilustra claramente en las fig. 7.4, 7.5, 7.6

Comúnmente el espectro de frecuencia dominante es de alrededor de 355 Hz para el ruido por combustión modificado por los efectos de inyección de vapor.

$$(SPL_{COMB.}) + (SPL_{REL.}) = \left[10 \text{Log} (GGAS/R^2) + 84 \right] + \left[15 \text{Log} (GVAPOR/GGAS) + 10 \right]$$

Con relaciones de $\left\{ \frac{GVapor}{Ggas} \right\}$ mayores de 0.2

Por encima de 355 Hz. el espectro de ruido predominante es solamente el del jet ocasionado por el vapor sin influencia del ruido por combustión.

La eficiencia acústica de la potencia mecánica de la corriente considerando una presión de suministro de 100 psig es de $n = 3(10^{-3})$, esta eficiencia se reduce al utilizar boquillas de suministro multipuertos y es de aproximadamente $n = 2(10^{-4})$.

$$SPL_{VAPOR} = 10 \text{Log} (GVapor/R^2) + 96 \quad \text{Ec. 7.19}$$

Las relaciones $\left\{ \frac{GVapor}{Ggas} \right\}$ varían entre un 25 % a 100 %.

Se muestran en las tablas 7.9 y 7.10 las expresiones y espectros de ruido para diferentes bandas y ecuaciones que predicen y ruido resultante.

Se mencionó que el componente de ruido por la inyección de vapor es

TABLA 7.9
ESPECTROS RESULTANTES DE RUIDO EN QUEMADORES ELEVADOS
POR COMBUSTION Y VENTEO

FRECUENCIA HZ	ESPECTRO DE RUIDO POR COMBUSTION Y VENTEO	ESPECTRO RESULTANTE
31.5	SPL(COMBUST)-5 = 10 LOG C/R ² + 79	SPL(COMBUST)-5
63	SPL(COMBUST)-4 = 10 LOG C/R ² + 80	SPL(COMBUST)-4
126	SPL(COMBUST)-9 = 10 LOG C/R ² + 75	SPL(COMBUST)-9
250	SPL(COMBUST)-15 = 10 LOG C/R ² + 69	SPL(COMBUST)-15
500	SPL(COMBUST)-23 = 10 LOG C/R ² + 61	
500	SPL(RESULTANTE) = 10 LOG C/R ² + 84	SPL(COMBUST)-20
500	SPL(VENTEO)-7 = 10 LOG C/R ² + 61	
1K	SPL(VENTEO)-5 = 10 LOG C/R ² + 63	SPL(COMBUST)-21
2K	SPL(VENTEO)-8 = 10 LOG C/R ² + 60	SPL(COMBUST)-24
4K	SPL(VENTEO)-12 = 10 LOG C/R ² + 56	SPL(COMBUST)-28
8K	SPL(VENTEO)-16 = 10 LOG C/R ² + 50	SPL(COMBUST)-34

ESPECTROS RESULTANTES DE RUIDO EN QUEMADORES ELEVADOS
POR INYECCION DE VAPOR Y COMBUSTION

FRECUENCIA HZ	ESPECTRO DE RUIDO POR COMBUSTION Y EFECTO JET POR INYECCION DE VAPOR
31.5	SPL(COMBUST)+SPL(RELAT)-5 = 10 LOG(GGAS/R ²) + 15 LOG(GVAPOR/GGAS) + 89
63	SPL(COMBUST)+SPL(RELAT)-4 = 10 LOG(GGAS/R ²) + 15 LOG(GVAPOR/GGAS) + 90
126	SPL(COMBUST)+SPL(RELAT)-7 = 10 LOG(GGAS/R ²) + 15 LOG(GVAPOR/GGAS) + 87
250	SPL(COMBUST)+SPL(RELAT)-11 = 10 LOG(GGAS/R ²) + 15 LOG(GVAPOR/GGAS) + 83
500	SPL(VAPOR)-10 = 10 LOG(GVAPOR/R ²) + 86
1K	SPL(VAPOR)-7 = 10 LOG(GVAPOR/R ²) + 89
2K	SPL(VAPOR)-5 = 10 LOG(GVAPOR/R ²) + 91
4K	SPL(VAPOR)-8 = 10 LOG(GVAPOR/R ²) + 88
8K	SPL(VAPOR)-12 = 10 LOG(GVAPOR/R ²) + 84

TABLA 7.10
ESPECTROS RESULTANTES DE RUIDO EN QUEMADORES ELEVADOS
POR COMBUSTION E INYECCION DE VAPOR
RELACION VAPOR/GAS AL 50 % EN PESO

FRECUENCIA HZ	ESPECTRO DE RUIDO POR COMBUSTION Y EFECTO JET POR INYECCION DE VAPOR
31.5	10 LOG(GVAPOR/R ²) + 98
63	10 LOG(GVAPOR/R ²) + 99
125	10 LOG(GVAPOR/R ²) + 96
250	10 LOG(GVAPOR/R ²) + 92

INCREMENTO DE INTENSIDAD POR EFECTO DE INYECCION

FRECUENCIA HZ	ESPECTRO DE RUIDO POR COMBUSTION Y EFECTO JET POR INYECCION DE VAPOR	INCREMENTO POR INYECCION $\Delta\beta$
31.5	10 LOG(GVAPOR/R) + 98	SPL - 6
63	10 LOG(GVAPOR/R ²) + 99	SPL - 5
125	10 LOG(GVAPOR/R ²) + 96	SPL - 8
250	10 LOG(GVAPOR/R ²) + 92	SPL - 12
500	10 LOG(GVAPOR/R ²) + 86	SPL - 18
1K	10 LOG(GVAPOR/R ²) + 89	SPL - 15
2K	10 LOG(GVAPOR/R ²) + 91	SPL - 13
4K	10 LOG(GVAPOR/R ²) + 88	SPL - 16
8K	10 LOG(GVAPOR/R ²) + 84	SPL - 20

susceptible de atenuarse, esto se logra al utilizar diferentes formas de inyección de vapor.

En la figura 7.7 se muestran formas típicas de inyectar vapor.

El modo más sencillo es el tipo 1, el vapor es suministrado por un soporte simple en el centro de la punta del quemador. El tipo 2 es utilizado en quemadores pequeños, el vapor es suministrado en el seno de la zona de combustión por un número de jets (orificios) conectados en un anillo distribuidor.

El tipo 3 es una combinación del tipo 1 y 2 y es muy usado. El tipo 4 es un tipo de boquilla especial que utiliza el efecto coanda para aspirar aire a través de numerosas boquillas.

Se ha observado que el utilizar un mayor número de boquilla de suministro de vapor en la misma area (punta del quemador) la mezcla del gas con el aire externo es más homogéneo y distribuido logrando evitar el rompimiento térmico y la formación de humo. Y sobre todo la disminución del ruido por el paso de vapor a través de la boquilla.

Se muestra dos tipos de boquillas de inyección de vapor y la diferencia en la intensidad y espectro de frecuencia entre cada una.

fig. 7.4, 7.5, 7.6

Una boquilla especial es el inyector Coanda, este tipo de boquilla se fundamenta en incrementar el número de boquillas dentro del cuerpo principal de punta del quemador. Véanse figura 7.8

Estas boquillas utilizan el efecto de arrastre de un fluido por otro debido a su alta velocidad a través de un dispositivo tipo venturi.

Y reducen el nivel de ruido efectivamente además de proveer una excelente mezcla aire-gas-vapor reduciendo el humo indeseable en la operación del quemador, sin embargo, su mayor limitante es el manejo de grandes flujos que limitan su utilización.

Véanse gráficas 7.4 y 7.6

VII.2.4) Condensación súbita de humedad

El ruido producto de una condensación súbita de humedad es potencialmente un componente de los sistemas de inyección de vapor. Este fenómeno puede compararse a la cavitación en bombas y válvulas y se presenta ocasionalmente.

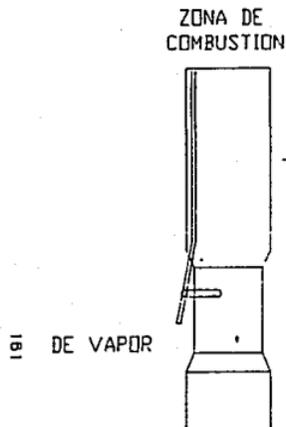


Fig. 7.4 Boquilla de quemador con inyección de vapor.

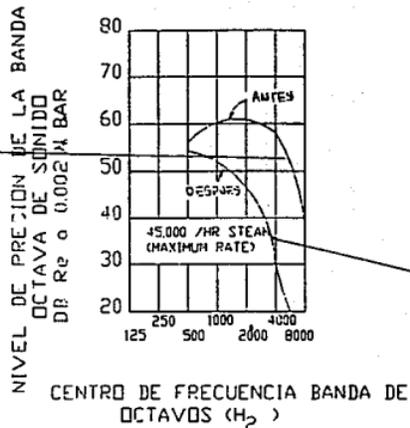


Fig. 7.6 Espectro de ruido a $\frac{1}{4}$ de milla.

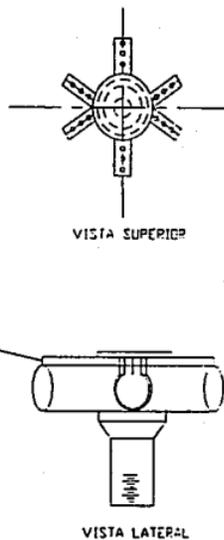


Fig. 7.5 Detalles del nuevo diseño de boquillas multipuertos.

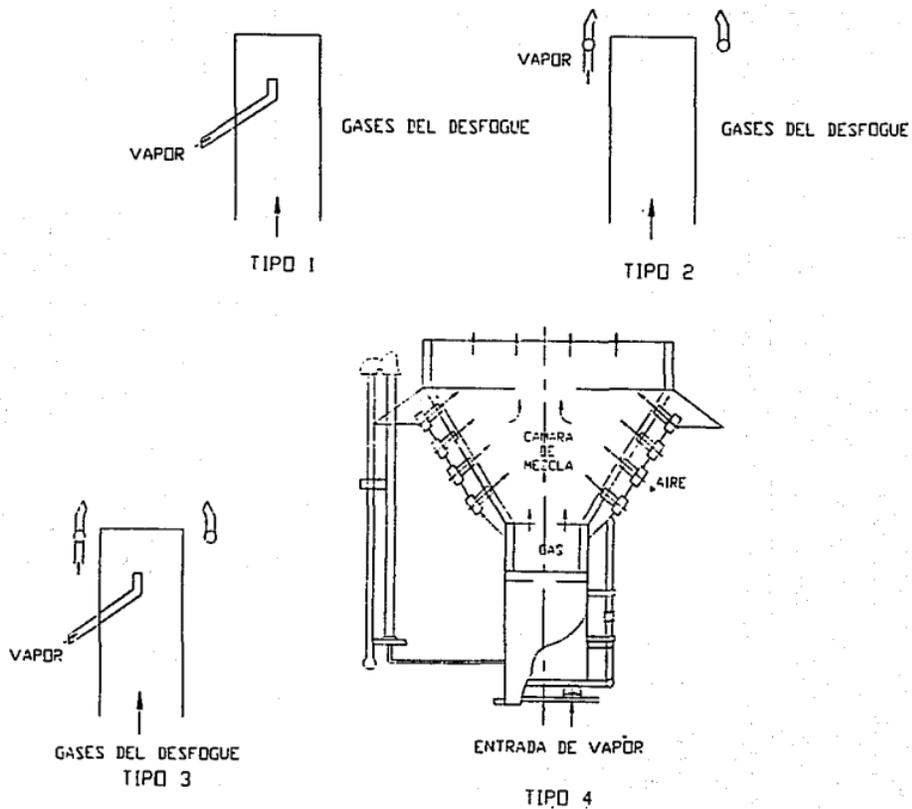
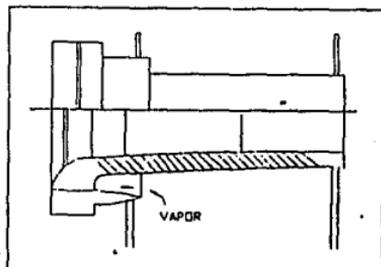
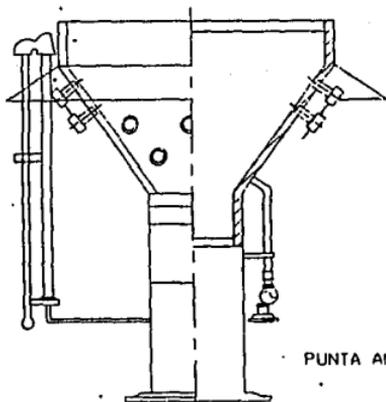
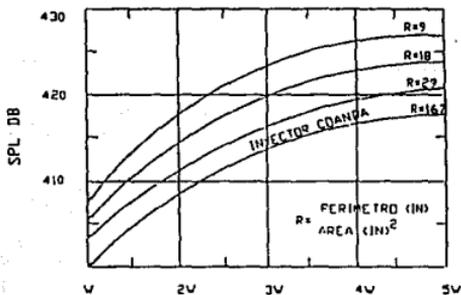


Fig. 7.7 Tipos de Boquillas de Inyección de Vapor.



INECTOR DE EFECTO COANDA

FIG. 7.8
PUNTA ANTICONTAMINANTE PARA QUEMADOR.



GRAFICA. 7.6
(SPL) EN RELACION AL FLUJO MASIVO
RELACION DE NIVELES DE SONIDO

La condensación súbita de humedad está asociada con el flujo de vapor a través de la boquilla. Algunas veces con la presión suministrada, la temperatura y las relaciones de presión del proceso en algún punto de la boquilla son alcanzadas las condiciones de saturación. Y una mezcla de vapor saturado y líquido saturado se presenta antes de la zona de expansión.

Sin embargo, algunos experimentos muestran que la precipitación de humedad es retardada y no se alcanza en las condiciones de saturación. Este fenómeno es llamado supersaturación, y la presión de vapor es mayor que la presión de saturación correspondiente a esa temperatura; existe un estado metaestable de equilibrio.

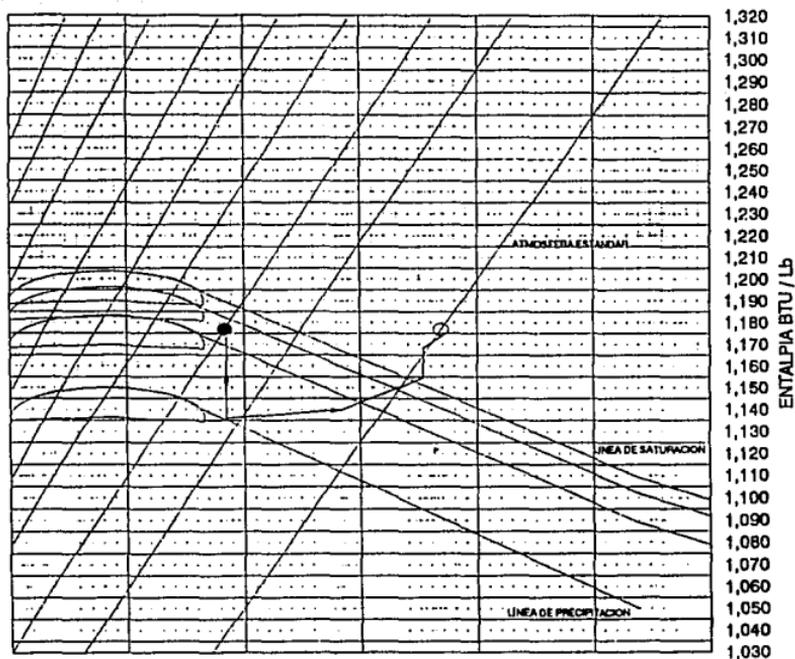
La precipitación probable es asociada con la aparición de núcleos quizás de partículas extrañas comprimidas o la formación accidental de grupos de moléculas de vapor.

Este fenómeno puede describirse en un diagrama de Mollier, las líneas de estado de precipitación llamada la línea de Wilson debe encontrarse experimentalmente y está cerca de 60 BTU/Lb abajo de la línea de saturación.

La condensación de humedad es totalmente imprevista, existiendo una oscilación del estado del fluido hacia el estado de equilibrio. Las gotas formadas durante la condensación aparentemente son excesivamente pequeñas y no hay datos disponibles acerca del tamaño de las gotas y nada acerca de la velocidad de crecimiento y desarrollo. Los mecanismos detallados no son claros, acentuando que el estado del fluido es imposible creando un proceso oscilatorio entre este estado y el de equilibrio provocando por consiguiente una alta eficiencia acústica (medio de propagación del sonido más apto). En la gráfica 7.7 se muestra un proceso típico de una boquilla de inyección de vapor. El proceso se efectúa isoentrópicamente a una presión igual o cercana al 55 % de la presión de suministro y en este punto la velocidad del fluido es sónica. Después el proceso avanza discontinuamente buscando el equilibrio.

El fluido se encuentra a una presión crítica en la salida de la boquilla y cuando este entra repentinamente a la región de muy baja presión se expande explosivamente. Las partículas de vapor son aceleradas fuera del eje del chorro de vapor (eje del jet) y a causa de esta inercia sobrepasa la posición de equilibrio produciendo una rarefacción en el centro del jet, la cual después succiona al interior produciendo así el patrón familiar del ruido del jet.

CONDENSACION SUBITA



GRAF. 7. 7 PROCESO TÍPICO EN BOQUILLAS DE INYECCION DE VAPOR

Este fenómeno se presenta cuando el vapor suministrado a la boquilla contiene de 1 a 2 % de humedad; para evitar este problema es necesario utilizar vapor seco o sobrecalentado en el suministro de vapor al sistema del quemador (ver gráfica 7.7) .

VII.2.5) Burbujeo o chapaletico en el tanque de sello

Una de las fuentes de una combustión inestable es ocasionada por el burbujeo o chapaletico del tanque de sello. El burbujeo del nivel de agua en el tanque de sello conduce a oleadas periódicas (flujo discontinuo) en el suministro de gas al quemador. Este oleaje o interrupciones periódicas de suministro de gas es del orden de un segundo, estas pulsaciones en la combustión son comúnmente observadas en los quemadores elevados.

El desplazamiento del nivel del agua en equilibrio a través de su superficie satisface para un sello líquido cilíndrico vertical las ecuaciones de onda en coordenadas cilíndricas .

Se ha encontrado que los modos de movimiento en el tanque de sello son :

* Asimétrico

El periodo que presenta puede estimarse por :

$$t = 0.301 D/H^{1/2} \quad \text{Ec. 7.20}$$

donde :

D : Diámetro del tanque, Ft

H : Profundidad del líquido en el tanque (nivel), Ft

t : Periodo, segundos

* Simétrico

Puede estimarse por :

$$t = 0.145 D/H^{1/2} \quad \text{Ec. 7.21}$$

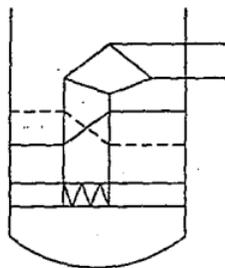
Estrictamente hablando el tanque de sello es un tubo anular, sin embargo, los periodos son del mismo orden que los típicos presentados. Un arreglo especial es el mostrado en la figura 7.9, este arreglo es susceptible para regular la pulsación en la combustión.

Esta discontinuidad en la alimentación del gas provoca una oscilación en la intensidad del ruido provocado por la combustión, ocasionando molestias mayores en el ruido total.

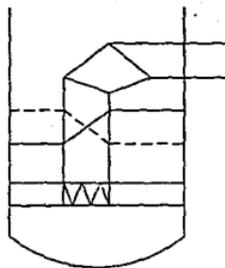
Para eliminar estas pulsaciones existen algunas alternativas :

- * Tanque de sello gaseoso
- * Utilización de baffles y platos perforados en el tanque de sello para minimizar los periodos.

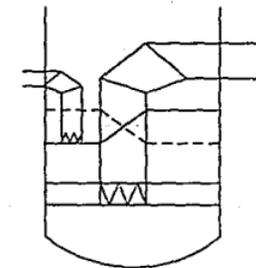
Es importante considerar todas las fuentes posibles de ruido y evitar aquellas que pueden controlarse para obtener una operación y funcionamiento óptimo y dentro de las regulaciones ambientales el sistema del quemador.



(A) ASIMETRICO



(B) SIMETRICO



(C) TUBO AUXILIAR DE RELEVO

Fig. 7.9 Tipos de Tanques de Sello.

C A P I T U L O V I I I

E S P E C I F I C A C I O N E S

VIII. ESPECIFICACIONES

VIII.1) Consideraciones Generales

Básicamente un sistema de quemador consiste de los siguientes elementos :

1. Cabezales de las unidades del proceso al quemador (sistemas de tuberías para la recolección de gases).
2. Tanque de remoción y almacenamiento de condensables y líquidos arrastrados por el gas a quemar.
3. Sistema para prevención de retroceso de flama (sellos, arrestadores, etc.).
4. Sistema de soporte del quemador.
5. Sistema de encendido y pilotos.
6. Sistema de reducción de humo (Inyección de vapor).

La eficiencia en la operación del quemador y la seguridad de este dependen del adecuado diseño, selección y manejo de estos elementos.

En el transcurso de los capítulos anteriores se han descrito algunos de estos elementos, sin embargo, otros más serán explicados en el capítulo presente.

VIII.2) Tanque de remoción de condensables del gas a quemar (Knock-out Drum)

Durante una expansión súbita de gases o líquidos como se presenta en un sistema de desfogue, se genera un fenómeno de enfriamiento rápido que produce una mezcla líquido-gas.

Cuando la cantidad de líquido en el gas es pequeña, ésta causará humo en el proceso de quemado y una mayor emisión de radiación; sin embargo, si la cantidad de líquido aumenta y el tamaño de las gotas es mayor de 400 micrones se produce una lluvia de gotas encendidas alrededor del quemador.

Esta situación debe evitarse. y se logra a través de un tanque de separación comúnmente instalado entre el quemador y el cabezal de desfogue (ver figura 8.1).

Las dimensiones del tanque son una función del flujo de gas y líquido a separar, pero el tiempo de retención o el espacio velocidad del gas en el

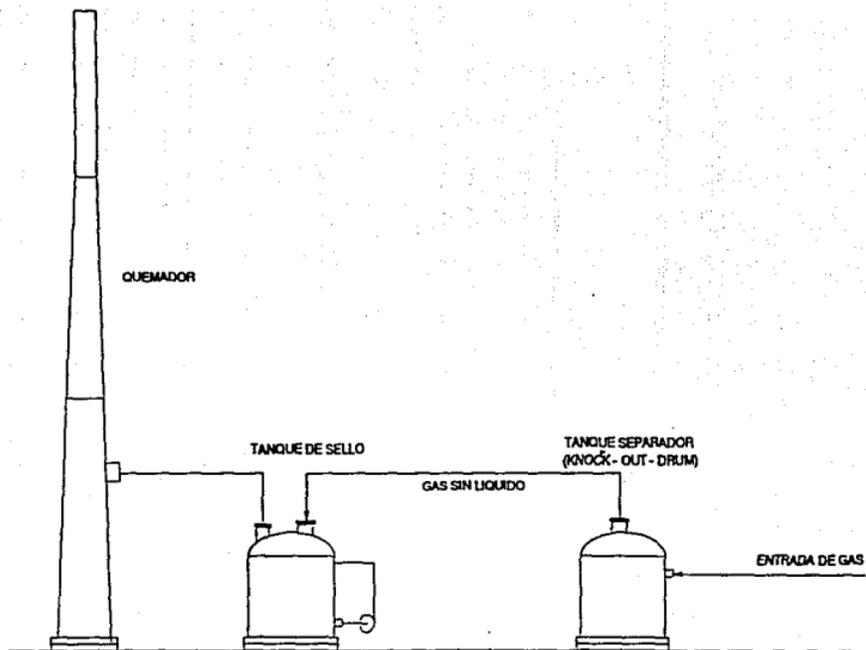


FIG. 8.1 UBICACION DEL TANQUE-DE SEPARACION

recipiente debe ser suficiente para permitir que las gotas entrampadas en el gas sean retenidas y solo se permita que las gotas que persistan en la corriente posean un tamaño muy fino y no causen ningún problema de operación.

Existen diferentes métodos de dimensionamiento de estos tanques, el API-RP-521 presenta un método de dimensionamiento para remover gotas de 150 micrones y mayores.

TAN muestra un método alternativo para gotas de 400 micrones y mayores.

VIII.3) *Prevención de retroceso de flama*

Cuando se tienen gastos bajos de relevo al quemador, el aire puede ocasionar un retroceso del gas a través de la punta del quemador, formándose una mezcla explosiva en la línea que puede ser encendida por el sistema de pilotos o la flama central.

Si existe la suficiente introducción de gas a lo largo del quemador, la mezcla explosiva dañará severamente al quemador.

Para evitar esta situación se instalan varios sistemas de protección como son :

- * Sello molecular
- * Sello fluídico
- * Arrestador de flama

a) Sello Molecular

Previene el paso del aire por una complejidad de pasajes internos, mediante el empleo de un dispositivo con una doble curvatura en forma de "U" invertida (ver figura 8.2).

Este sello requiere una estructura fuerte capaz de soportar su peso, y mantenerlo erguido, las dimensiones y su peso excesivo hace que este sello tenga un costo alto. Además su eficiencia se reduce notablemente si sus baffles internos son obstruidos parcialmente con agua o pedazos de refractario de la punta del quemador. Un sistema de drene puede ser utilizado para remover el agua, pero remover el refractario requiere de costosos mantenimientos.

Algunas veces se necesitan grandes cantidades de gas de purga para operar eficientemente el sello molecular. Esto es especialmente cierto en condiciones de oscilación, contracción térmica y vientos fuertes.

La oscilación es causada por un cierre rápido de las válvulas de



A. SELLO MOLECULAR



B. SELLO FLUIDICO

Fig. 8.2 Tipos de Sellos.

seguridad. La columna de gas en el cabezal del quemador continúa viajando bajo su propio impulso o momentum, creando una zona de baja presión de atrás de él. Al suspender el desfoque se presenta una columna de gas por este efecto y entonces el aire es arrastrado al interior del quemador. Esta entrada de aire no es controlada por el sello molecular debido a que la caída de presión a través del sello es igual en ambas direcciones. Otro fenómeno similar se presenta cuando se apaga rápidamente el quemador y el gas a quemar se enfría rápidamente, la contracción del gas crea una zona de baja presión vulnerable a la introducción de aire. Los fenómenos anteriores también provocan que el sello molecular requiera un consumo mayor de gas de purga para contrarrestar los efectos mencionados y ello crea una desventaja de este tipo de sello contra otros.

b) Sello Fluidico

El sello fluidico consiste de una serie de baffles cónicos orientados de forma tal que la corriente de aire que puede entrar por la boquilla regrese por las paredes de la misma, el efecto del baffle es el de crear un flujo positivo hacia la salida y así lograr que el gas salga por el centro de boquilla (basado en el principio del diodo de Tesla). No presenta los problemas que el sello molecular, su precio es de 4 a 5 veces menor para las mismas condiciones que el sello molecular; es de construcción ligera y sencilla y lo hace ser el tipo más utilizado.

c) Arrestador de Flama

Es un dispositivo que consiste de una serie de rejillas sobrepuestas, con el propósito de extinguir cualquier fuego que quiera pasar a través de ellas. Este tipo de sello es poco usado por la gran caída de presión que ejerce, además de que requiere un excesivo mantenimiento por la continua obstrucción de las rejillas. Su costo se eleva conforme el tamaño del arrestador.

d) Gas de Purga

Por la misma configuración del quemador elevado, se genera un alto riesgo de explosión o detonación del gas a quemar que puede quedar atrapado a lo largo de la chimenea.

Se puede en determinado momento introducir aire y mezclarse como ya se dijo, dentro de la chimenea, produciendo una explosión si el aire

introducido es suficiente para generar una mezcla flamable y tener consecuencias desastrosas para el equipo o el personal.

Para evitar esta situación, se inyecta un gas llamado gas de purga, con la finalidad de reducir la concentración de oxígeno libre en la chimenea y mantener una condición segura.

Dentro de los gases utilizados como gas de purga se tienen :

- * Nitrógeno
- * Metano
- * Gas de refinería
- * Helio
- * Hidrógeno
- * Bióxido de Carbono
- * Vapor

Su selección dependerá de las características del gas a quemar, flujo del gas de purga y costo.

Se recomienda para hidrocarburos que la concentración de oxígeno libre a 25 Ft (7.5 m) de distancia hacia abajo de la punta del quemador sea menor de 6 % (ver figura 8.3)

Generalmente el gas de purga a utilizar debe tener valores iguales o mayores en densidad que la del aire, esto con la finalidad de evitar mezclas entre los gases en la columna de la chimenea y reducir la velocidad del gas de purga.

Con gases más ligeros que el aire se requieren velocidades o flujos mayores de gas de purga para obtener las condiciones de oxígeno libre.

En conclusión, a lo largo de la chimenea del quemador se crean ciertos perfiles de concentración de oxígeno libre que son una función de la densidad y velocidad del gas de purga, así como las dimensiones del quemador (altura, diámetro).

La velocidad del gas de purga puede expresarse por una ecuación empírica como función del oxígeno libre a cierta distancia de la punta del quemador y las dimensiones del mismo.

$$v = \left(\frac{0.022}{H-h} \right) \left(\frac{6}{X} \right)^{0.64} \left(\frac{28}{M} \right) \left(e^{0.16 D} - 0.96 e^{0.16(D-H)} \right)$$

Ec. 8.1

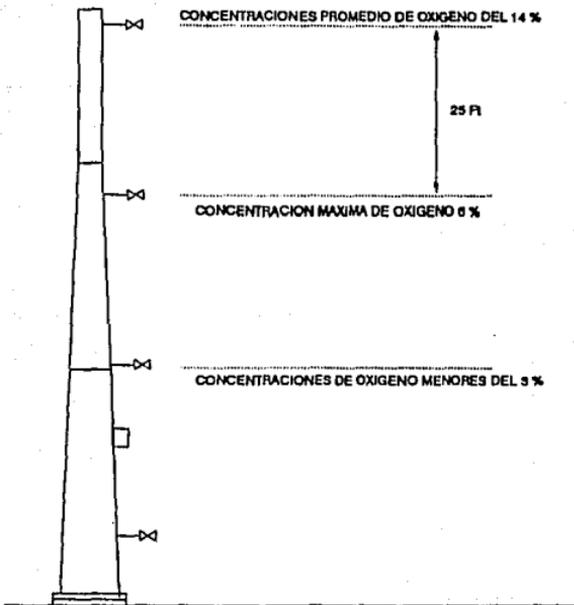


FIG.9.3 PERFIL DE CONCENTRACIONES DE OXIGENO EN QUEMADOR ELEVADO

donde :

V : Velocidad del gas de purga para tener una concentración X de oxígeno libre a una elevación h en Ft en el quemador

D : Diámetro del quemador en pulgadas

H : Altura del quemador en Ft

Utilizando un gas de purga de peso molecular menor al del aire, donde $3\% \leq X \leq 6\%$

$n = f(D)$

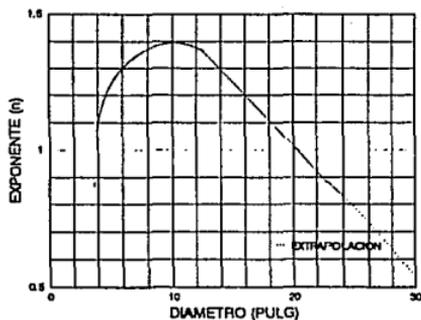
Esta ecuación empírica puede reducirse y presentarse gráficamente con las siguientes condiciones :

Una concentración máxima de 6 % de oxígeno libre a 25 Ft de distancia tomadas desde la punta del quemador; a distancias mayores esta concentración debe ser menor de 6 % . Sin embargo, el nivel de oxígeno puede variar de acuerdo al peso molecular del gas utilizado si el fluido a quemar tiene niveles de flammabilidad menores del 6 % .

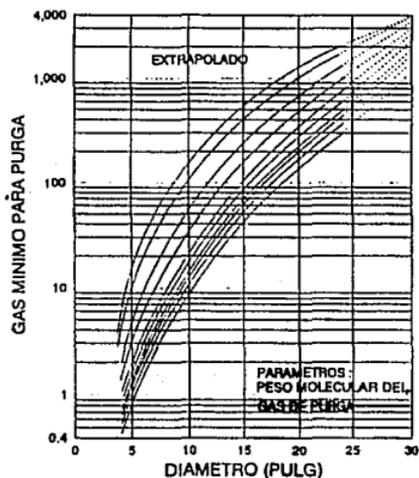
TABLA 8.1
NIVEL DE OXIGENO

GAS DE PURGA (PESO MOLECULAR)	NIVEL SEGURO DE OXIGENO (X) %
2	3
4	3
6	4
8	5
> 8	6

Con estos parámetros y $(H-h) = 25$ Ft se obtuvo la gráfica 8.1. El método gráfico simplifica la elección del gas de purga. Sin embargo, es importante aclarar que esta ecuación no es directamente aplicable a quemadores con relaciones de H/D menores de 50 o quemadores pequeños de 50 Ft.



GRAF 8.1 VALORES DE EXPONENTE n
Gráf. 8.1 Valores de exponente "n".



GRAF 8.2 FLUJO MÍNIMO DE GAS DE PURGA RECOMENDADOS PARA QUEMADORES
Gráf. 8.2 Flujo mínimo de gas de purga recomendados para quemadores

Con quemadores cortos el nivel seguro de concentración será probablemente más cercano a la punta que los 25 Ft que se propone para quemadores mayores.

Los valores de gas de purga pueden ser estimados al multiplicar el valor obtenido en la curva por $25/a$ donde a es la distancia designada desde la punta para lograr un nivel seguro de concentración de oxígeno.

e) TANQUE DE SELLO

Con la finalidad de prevenir en caso de fallas de los elementos de protección del quemador (gas de purga, sellos moleculares, etc.) de una posible explosión, se coloca un dispositivo que protege el sistema de desfogue de una posible deflagración por un retroceso de flama más allá del quemador, este dispositivo es un tanque de sello ubicado en la base del quemador y que separa a éste de los cabezales.

Su funcionamiento es el de crear un sello hermético, es decir, en este tanque se conduce el gas a quemar y se burbujea sobre un nivel de agua (sello) el cual permite pasar el gas al conducto final (el ducto del quemador) para evitar en caso de retroceso de flama que ésta solo llegue hasta el tanque y ahí se sofoque. En esta operación puede resultar dañado el quemador y el tanque de sello pero no se perjudicarían más equipos o instalaciones.

A continuación se muestran diferentes tipos de sellos de agua, estos pueden ser ubicados como parte integral de la base del quemador o ser concebidas como un equipo independientemente.

VIII.4) Pilotos

Los gases del quemador son encendidos por un sistema de pilotos instalados en la punta de este.

Normalmente son 3 pilotos espaciados 120° para minimizar los efectos de alejamiento de la flama a la punta del quemador por la dirección del viento, aunque el número de pilotos también está en función del diámetro del quemador.

Los pilotos son completamente diseñados para reducir el consumo de combustible y las fallas por condiciones adversas de operación.

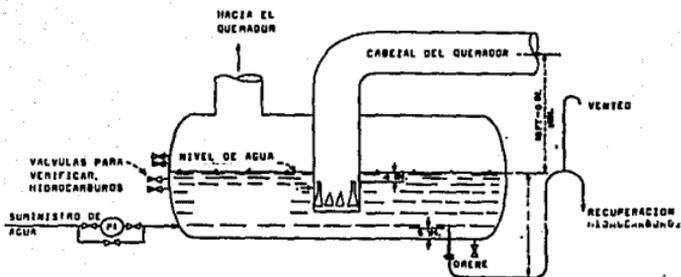


Fig. 8.4 Sello de agua horizontal.

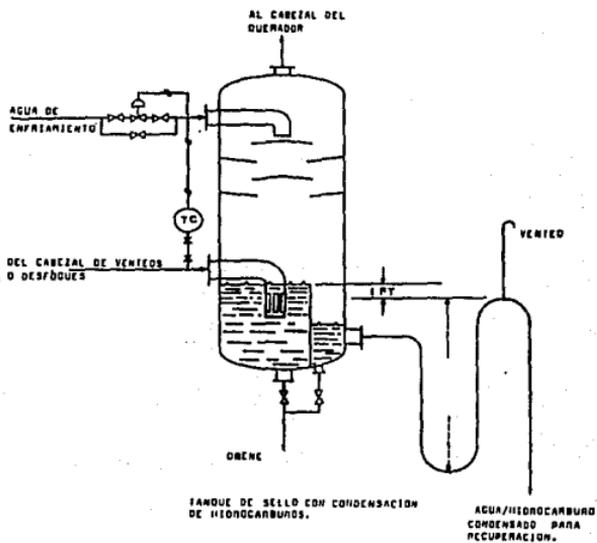
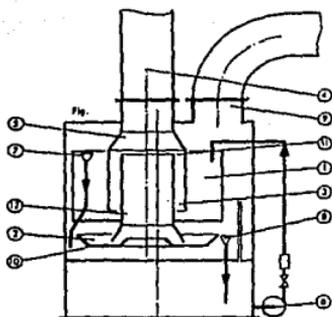
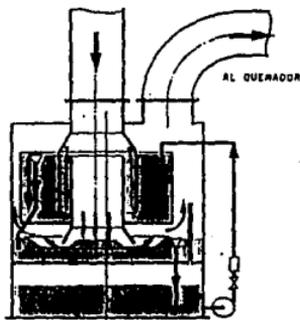


Fig. 8.5 Sello de agua vertical.



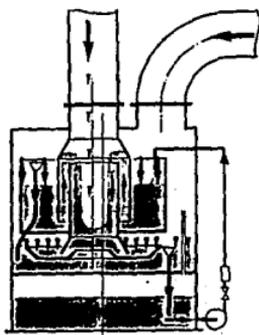
- 1.- ENVASE INTERIOR
- 2.- FUNDO DEL SELLO
- 3.- INICIO DEL SELLO
- 4.- CAMPANA DEL SELLO
- 5.- ENTRADA A LA BOQUILLA
- 6.- BOMBA DE RECIRCULACION
- 7.- RECOLECCIONES POR SOBREFLUJO
- 8.- RECOLECCIONES POR SOBREFLUJO
- 9.- SALIDA DE LA BOQUILLA

DEL CABEZAL DE DESFOGUE



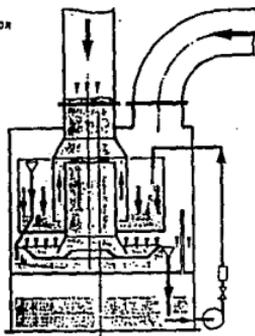
OPERACION DEL SELLO DE AGUA
EN CONDICIONES NORMALES

DEL CABEZAL DE DESFOGUE



INICIO POR CONTRAPRESION O RETROCESO
DE FLAMA

DEL CABEZAL DE DESFOGUE



CONDICION DE EQUILIBRIO

Los sistemas de pilotos poseen sistemas de suministro de servicios auxiliares que entran en operación en caso de fallas de los sistemas principales, además operan automáticamente (con una fuente eléctrica propia) para fallas de energía.

La instrumentación y control de los sistemas de los pilotos son localizados a distancias pertinentes que le permiten trabajar en condiciones de radiación máximas de 1000 BTU/hr Ft². A continuación se muestran diferentes tipos de pilotos.

VIII.5) *Materiales de Construcción*

La parte más delicada del quemador por sus condiciones de operación es la boquilla, generalmente es deseable elegir un material que inicialmente su costo es alto, sin embargo es engañoso el costo inicial de la boquilla pues el elegir un material menos resistente puede conducirnos a problemas de deterioro acelerado y altos gastos de mantenimiento.

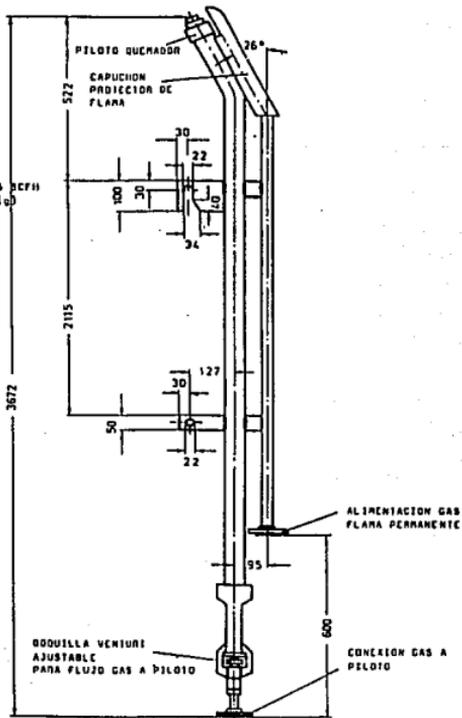
La boquilla es sometida a grandes temperaturas, sobretodo cuando los flujos a quemar son pequeños y provocan que la zona de combustión sea muy cercana o dentro de la boquilla. Esta situación es agravada por los efectos del viento y el vapor que provocan que se acerque más la flama a la boquilla.

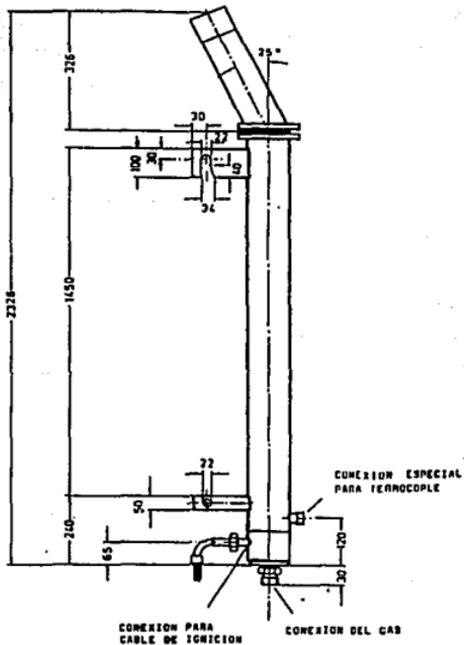
Estos efectos tienen como consecuencia una erosión y fatiga del material así como un esfuerzo térmico que degrada la capacidad y resistencia del material.

Los materiales de construcción del quemador son seleccionados como una función del tipo de flujo a quemar, si es corrosivo o produce altas temperaturas de trabajo.

PILOTO QUEMADOR
 TIPO K
 IGNICION CON FLAMA
 PERMANENTE

CONSUMO DE GAS APROX. 135 CFH
 (gas suministrado a 10 psig)





PILOTO GUERRADO
TIPO E

CON ALIMENTACION GAS COMESTIBLE
E IGNICION ARCO ELECTRICO

CONSUMO DE GAS APROX.: 186 BCFH
(plus rubicon estándar por hora)

T A B L A 8.2
MATERIALES DE CONSTRUCCION DE QUEMADORES ELEVADOS

COMPONENTES	M A T E R I A L
Chimenea del quemador	Acero Inoxidable 316 L
Boquilla del quemador	Cuerpo : A.I. 316 L Anillo Retenedor de flama : INCOLOY 800 Material refractario
Sistema de ignición y pilotos	Boquilla del ignitor : INCONEL Boquilla del piloto : INCONEL
Unidad de encendido remoto	Acero inoxidable Boquilla de INCONEL
Tanque Separador de líquido	Acero al carbón
Base del quemador	Acero y cimientos resistentes a la radiación y corrosión
Tuberías	Acero al carbón convencional T > -20 °F
Tanque separador de Líquido-gas	Acero al carbón especial para bajas temperaturas de trabajo T ^ - 50 °F Acero inoxidable 18-8 T < -150 °F Aleaciones resistentes a altas temperaturas T > 750 °F

VIII.6) Normas

El quemador por su naturaleza de operación es una fuente de emisión de sustancias tóxicas o flamables a la atmósfera. Dado que realiza un proceso de Combustión, emite además CO_2 y H_2O si el proceso de combustión es adecuado, apareciendo CO si el proceso es deficiente. Dependiendo del gas quemado existen otros contaminantes como son óxidos de nitrógeno, bióxido de azufre, partículas sólidas, etcétera.

Por esta particularidad de operación el quemador es una fuente fija de contaminación, la cual debe cumplir con las normas y regulaciones de contaminación aplicables en la región en que se ubica el quemador cuando opera ya sea por un proceso de combustión o un desfogue de gases a la atmósfera.

Existen Normas, reglas o leyes en materia de contaminación específicas para emisiones de gases que se descargan por un conducto. En los Estados Unidos de Norteamérica, la reglamentación, normatividad y vigilancia es guiada a través de la EPA (Environmental Protection Agency). Sin embargo en el caso de quemadores elevados un resumen rápido y práctico de estas medidas se encuentra en el API Publication 931 (*Manual on disposal of refinery wastes volume on atmospheric emissions*).

Los primeros cuatro capítulos de la publicación API 931 se enfocan a la descripción de fuentes de contaminantes (en plantas de Refinación y Petroquímica) y sus propiedades, así como el efecto de exposiciones a estos efluentes en los seres vivos.

La regulación y límites permisibles de generación de contaminantes es una tarea que concierne a todos los seres humanos. Los gobiernos deben y han establecido estándares de emisión para diferentes contaminantes en aire y agua. Contemplando una política de ir cerrando más esas normas conforme se avanza en tecnología y se agrava el problema de contaminación en el mundo.

En México la regulación, normatividad y guía es a través de la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL). Esta secretaría es de creación reciente (1992) y busca de forma general el cuidado y preservación ecológica del ambiente.

Con la finalidad de aclarar la normatividad y reglamentación en materia de contaminación se presentan una serie de prontuarios e instructivos de las diferentes Instituciones y Secretarías que legislan en México, (ver Apéndice A).

Lo más reciente en materia de Normalización son las NTE (Normas Técnicas Ecológicas) emitidas por el organismo anterior a la SEDESOL, (SEDUE) para complementar los reglamentos de la Ley general del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente. En este caso particular, la SEDESOL la define como "Conjunto de Reglas científicas o Tecnológicas que establece los requisitos, especificaciones, condiciones, procedimientos, parámetros y límites permisibles que deberán observarse en el desarrollo de actividades o usos y destino de bienes que causen o puedan causar desequilibrio ecológico o daños al ambiente, y además, que uniformen principios, criterios, políticas y estrategias en materia ".

En el apéndice se presentan las normas que en materia de protección al ambiente y a la ecología existen en México y que tienen relación con la operación de un Quemador tipo Elevado.

C A P I T U L O I X

EJEMPLO DE APLICACION

IX. EJEMPLO DE APLICACION

Para verificar las ecuaciones y modelos presentados en los capítulos anteriores sobre el Diseño de Quemadores elevados, se realizará un ejemplo de aplicación sobre un quemador utilizado en un Prototipo de Batería de Separación Aceite - Gas ubicada en la zona de Villahermosa, en Tabasco México.

En la actualidad el Ingeniero diseñador cuenta con la versátil y práctica herramienta de la computación para realizar los cálculos de casi cualquier equipo, incluyendo los quemadores elevados, sin embargo en este trabajo los cálculos se realizarán manualmente para cumplir con el objetivo de la tesis de conocer los conceptos, modelos y ecuaciones básicas para el cálculo del quemador, aunque éstos se llevarán a cabo paso a paso para facilitar la adaptación de los cálculos a procedimientos por computadora si fuese necesario.

A continuación se dan las bases de operación y diseño de la Batería de Separación que se utilizará como ejemplo del presente estudio.

IX.1) PLANTEAMIENTO

Batería de Separación Aceite - Gas diseñada para efectuar las siguientes funciones :

- * Separar Aceite - Gas de la producción de los pozos cercanos de los campos petroleros de explotación en Villahermosa, Tabasco.
- * Enviar los productos de separación a los oleoductos y gasoductos de distribución a otras baterías para su almacenamiento y transporte.

IX.2) Condiciones de operación

IX.2.1) Bases de operación

La planta está constituida por las siguientes áreas de operación :

- * Separación
- * Rectificación Primaria y Secundaria
- * Enfriamiento de gas
- * Medición de pozos
- * Red de agua contraincendio
- * Drenajes
- * Sistema de desfogue

IX.2.2) Bases de proceso

- i) La separación Aceite-Gas se realiza a una presión de 85 Kg/cm² man. y temperatura promedio de 90°C .
- ii) El gas obtenido se rectifica y se enfría posteriormente por medio de Solosaires.
- iii) Existe una segunda etapa de rectificación en separadores ciclónicos a alta presión, después de lo cual es enviado al gasoducto respectivo.
- iv) El líquido se incorpora a su vez al oleoducto.
- v) Se tiene además un sistema de medición y recuperación de líquido.

IX.2.3) Capacidad de la planta y Especificación de los Productos de la separación

Se espera que la planta opere todo el año a una capacidad normal de 50 MBPD de aceite y 250 MMPCSD de gas proveniente de los pozos de explotación. Se considera que la capacidad Máxima de la planta será igual a la normal.

Por otro lado, no se tiene contemplado a futuro un aumento de la capacidad de operación.

T A B L A 9.1
ESPECIFICACION DEL GAS SEPARADO
GAS AMARGO

COMPONENTE	% MOL
Acido sulfhídrico	0.709
Bióxido de Carbono	2.682
Metano	78.762
Etano	9.486
Propano	2.424
I-Butano	1.950
N-Butano	1.620
I-Pentano	1.083
N-Pentano	0.811
N-Hexano	0.340
N-Heptano	0.101
N-Octano	0.020
N-Nonano	0.008
N-Decano	0.004
	<hr/>
	100.000

TABLA 9.2

ESPECIFICACION DEL ACEITE SEPARADO

COMPONENTE	% MOL
Acido sulfhídrico	0.944
Dióxido de Carbono	2.144
Metano	29.610
Etano	9.034
Propano	4.733
I-Butano	6.562
N-Butano	6.864
I-Pentano	8.474
N-Pentano	7.742
N-Hexano	7.733
N-Heptano	5.980
N-Octano	3.772
N-Nonano	3.272
N-Decano	3.302
N-Undecano	0.253
	100.000

Los productos de la separación deberán ser entregados en Límites de batería a 85 Kg/cm² y 90°C como condiciones máxima y normal.

IX.2.4) Bases de diseño del sistema de Desfogue y Quemadores

- * Capacidad máxima posible : 250 MMPCSD
- * Causa crítica del desfogue : Descarga bloqueada a la salida del gasoducto.
- * Tipo de Quemador : Elevado

IX.2.5) Condiciones climatológicas y ambientales

- * Temperatura
 - Máxima extrema : 40°C
 - Mínima extrema : 18°C
 - Promedio : 29°C
- * Humedad relativa : 75 %
- * Dirección de los vientos :
 - Dominantes : Norte
 - Reinantes : Noreste
- * Velocidad del viento en condiciones de Tormenta
 - Mínima : 110 Km/hr
 - Máxima por 5 minutos : 170 Km/hr
- * Presión atmosférica : 760 mm Hg
- * Atmósfera : Corrosiva Ligeramente

IX.3) CAUSAS DEL DESFOGUE

I X.3.1) Análisis de Fallas

El análisis de fallas se hará estudiando las causas del desfogue de cada sección de la planta .

a) Area de Separación

Esta área maneja la mezcla aceite-gas que llega directamente de los pozos de explotación a alta presión y cuya separación se lleva a cabo en 5 separadores verticales (ver esquema).

Las posibles fallas en esta área pueden ser por :

- a) Descarga bloqueada
- b) Fuego en planta

El flujo generado por descarga bloqueada será el máximo flujo que está entrando a cada separador, es decir aproximadamente 50 MMPCSD para cada uno, sin embargo, la probabilidad de que fallen las descargas de los 5 separadores simultáneamente es muy baja, por lo que se considerará como máximo la falla de 2 separadores con lo cual el flujo por esta causa sería de aproximadamente 100 MMPCSD.

Por otro lado si se considera fuego en esta área el flujo que se enviaría a quemador sería el gas generado por la vaporización del líquido contenido por el separador, el cual para el caso más crítico se considera el nivel máximo. Sin embargo este flujo es menor que el causado por descarga bloqueada, como se analizó en capítulos anteriores, por lo que en esta área se tomará en cuenta solo el flujo máximo de 100 MMPCSD para esta última falla.

El área de separación también involucra a 2 separadores más que son los respectivos de medición de alta y baja presión (ver esquema) .

En el caso del separador vertical de medición de alta presión (SVNAP-6) el flujo desalojado por descarga bloqueada es de 50 MMPCSD.

b) Area de Rectificación

En el área de rectificación se tienen 6 recipientes, de los cuales 3 corresponden a la rectificación de vapores de alta presión o

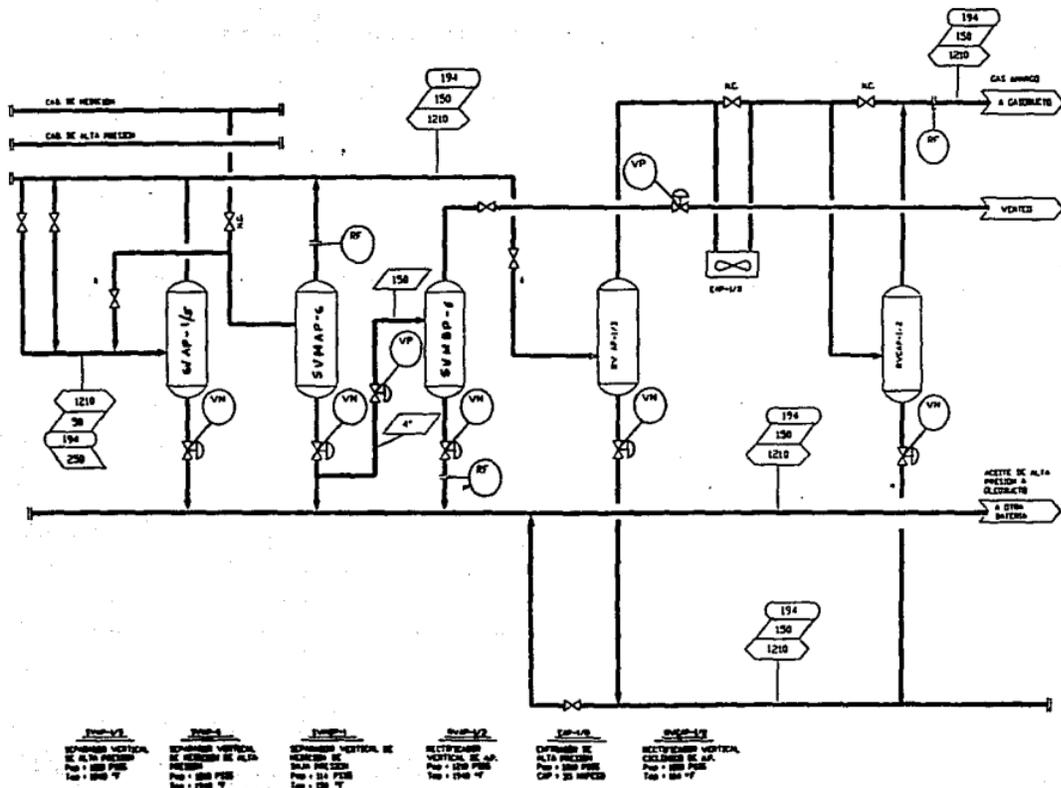


Fig. 9.1 Esquema de flujo de proceso (Batería de Separación)

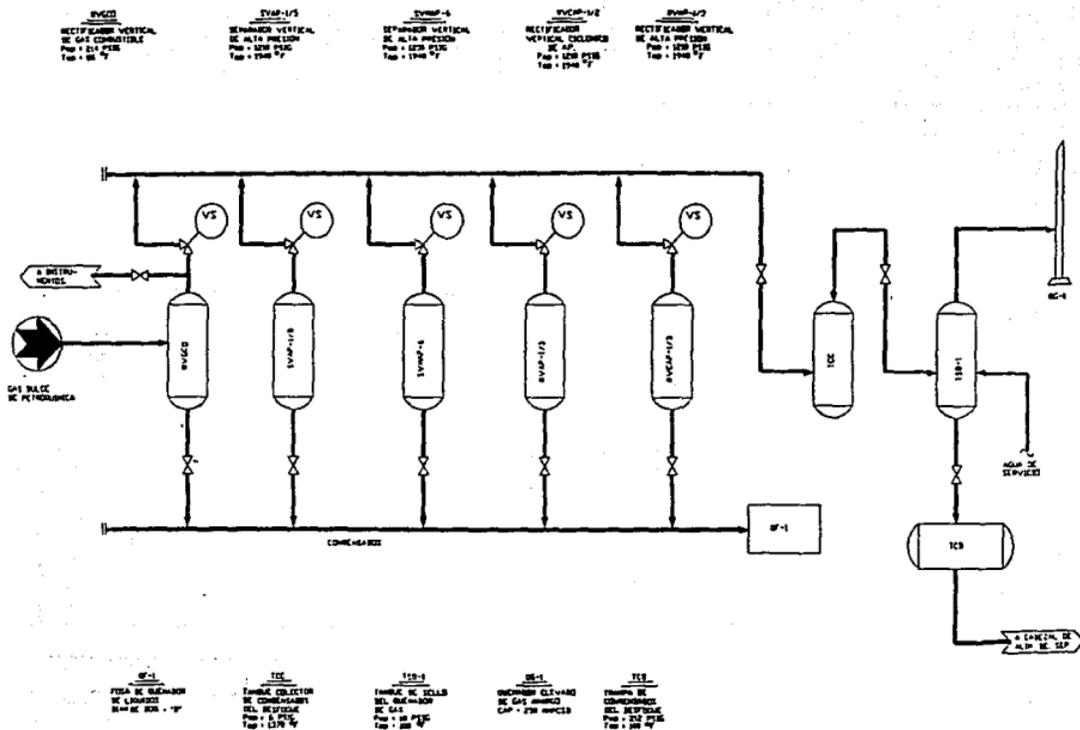


Fig. 9.2 Esquema del Sistema de Desfogue de la Batería de Separación

rectificación primaria y 3 más de una rectificación ciclónica o Secundaria, en esta área se considera que el flujo máximo manejado es de 250 MMPCSD ya que es el flujo proveniente del área de separación (ver esquema).

En esta situación la falla que produce el mayor flujo es nuevamente por descarga bloqueada; en este caso considerando que solo descarga 1 de los rectificadores, a la vez, es decir el flujo a quemador será de 84 MMPCSD aproximadamente para una falla en esta área.

c) Servicios Auxiliares

En la planta existe un tanque rectificador de gas combustible que abastece a los instrumentos y a una trampa de condensados del defogue para un bombeo neumático.

Esta válvula de seguridad fué diseñada para una falla por descarga bloqueada, manejando un flujo aproximado de 1.07 MMPCSD.

d) Válvula de Control de Presión

El flujo manejado por esta válvula es de 25 MMPCSD como máximo cuando es utilizada como *by-pass* al sistema de desfogue.

Como ya se mencionó en el capítulo de análisis de fallas, la simultaneidad de éstas es poco probable, por lo tanto, para las fallas aquí analizadas, se considerará la descarga bloqueada en el área de separación, donde se manejaría el mayor flujo a quemador, 100 MMPCSD, agregando a este flujo el proveniente de la válvula de control de presión; con lo cual se tendría un flujo total de 125 MMPCSD, el cual puede utilizarse como flujo de diseño del quemador.

Sin embargo en bases de diseño se menciona que el desfogue deberá dimensionarse para una situación de descarga bloqueada en el ducto de envío, es decir, prácticamente en límites de batería, esto indicaría que al estar bloqueada la salida de toda la producción de la Batería ésta tendría que enviarse a desfogue totalmente para evitar sobrepresiones en las áreas de proceso. Esta situación produce un flujo a quemador de 250 MMPCSD. Este flujo puede considerarse como un flujo crítico, dado que su probabilidad de ocurrencia es de solo una vez en el promedio de vida útil de la batería.

Condiciones Críticas

* Masa a relevar

- Flujo máximo de diseño : 125 MMPCSD
- Flujo crítico : 250 MMPCSD

Resumiendo de acuerdo al análisis del punto anterior, se debe diseñar un quemador que maneje un flujo máximo de 125 MMPCSD, pero se analizarán las situaciones que pueden presentarse si este quemador llegara a manejar un flujo de 250 MMPCSD, de tal manera que puede obtenerse un quemador que ante cualquiera de las dos situaciones no represente grandes riesgos ni para el personal, ni para la planta o los alrededores de la misma.

IX.5) Cálculo del Quemador

A continuación se dan los parámetros a utilizar para determinar el diámetro y la altura del quemador elevado :

* EVENTO CRITICO

Flujo :	250 MMPCSD
Temperatura :	512 °C
Velocidad del viento :	110 Km/hr
No. de Mach máximo :	0.5
Intensidad máxima a la base del quemador :	5000 BTU/hr Ft ²
Distancia a punto cercano a proteger :	160 m
Intensidad máxima a punto cercano a proteger :	1000 BTU/hr Ft ²

* EVENTO DE DISEÑO

Flujo :	125 MMPCSD
Temperatura :	512 °C
Velocidad del viento :	110 Km/hr
No. de Mach máximo :	0.2 - 0.3
Intensidad máxima a la base del quemador :	3000 BTU/hr Ft ²
Distancia a punto cercano a proteger :	160 m
Intensidad máxima a punto cercano a proteger :	1000 BTU/hr Ft ²

Características requeridas del quemador :

Tipo :	Elevado
Flujo máximo :	125 MMPCSD
Flujo crítico :	250 MMPCSD
Observaciones :	A 160 m de distancia del quemador se encuentra una camino poco transitable que deberá protegerse en caso de que se encuentre eventualmente personal en esa área.

TABLA 8.3

LIMITES MAXIMOS TOLERABLES EN EL AMBIENTE PARA 8 HR DE TRABAJO
40 HR A LA SEMANA

CONTAMINANTE	LIMITE PPM (VOLUMEN)		COMPOSICION EN EL GAS DE DESFOGUE
	(1)	(2)	
H ₂ S	10	20	0.709
CO ₂	5000	5000	2.682
SO ₂	2	5	Producto de la combustión

- (1) Norma Mexicana
(2) Norma Americana

IX.5.1) Cálculo del quemador por el método KENT

a) Definición de variables requeridas

- W : flujo de gas a quemar (Lb/Hr)
 P : Presión en la boquilla del quemador (PSIAS)
 T : Temperatura del gas en la boquilla (°R)
 K : Cp/Cv relación de calores específicos
 M : Peso molecular
 Mach : No. de mach de diseño

$$W1 = 6.026 \times 10^5 \text{ Lb/hr} \quad (125 \text{ MMPCSD})$$

$$W2 = 12.05 \times 10^5 \text{ Lb/hr} \quad (250 \text{ MMPCSD})$$

$$P = 18.0 \text{ Paig}$$

$$\text{Mach1} = 0.25$$

$$\text{Mach2} = 0.50$$

b) Cálculo del diámetro

Ecuación 6.3

$$d^2 = 1.702 \times 10^{-5} \left(\frac{W}{P \text{ Mach}} \right) \left(\frac{T}{K H} \right)^{1/2}$$

$$d = 1.702 \times 10^{-5} \left(\frac{12.05 \times 10^5}{18 \times 0.5} \right) \left(\frac{512}{1.4 \times 43.9} \right)^{1/2}$$

$$d = 2.56 \text{ ft}$$

c) Calculo de la longitud de la flama

$$\text{Mach } 0.25$$

$$L = 120 d$$

$$L = 120 (2.56) = 307.2 \text{ ft}$$

d) Calcular el calor total liberado Q

$$Q = W \sum n_i h_i - \frac{379}{H}$$

$$Q = (12.05 \times 10^5) (1200) (379) / 43.9$$

$$Q = 1.248 \times 10^{10} \text{ BTU/Lb}$$

e) Determinar la distancia radial (Ec. 5.41) para $q_r = 440 \text{ BTU/hr Ft}^2$

$$X = \left(\frac{F Q}{4\pi (440)} \right)^{1/2}$$

$$X = \left(\frac{0.4 (1.248 \times 10^{10})}{4\pi (440)} \right)^{1/2} = 950 \text{ ft}$$

f) Fijar el tiempo de escape $t_c = 30$ y de la gráfica 5.13 obtener q_m

$$q_m = 1200 \text{ BTU/hr Ft}^2$$

g) Calcular la Altura (Ec. 6.7)

$$H = \frac{\left(L^2 + \frac{rQ}{\pi q_m} \right)^{1/2} - L}{2}$$

$$H = \frac{\left(307.2^2 + \frac{0.4 * 1.248 * 10^{10}}{\pi (1200)} \right)^{1/2} - 307.2}{2} = 172.5 \text{ Ft}$$

h) Calcular distancia mínima radial (Ec. 4.6)

$$X_m = (H (H + L))^{1/2}$$

$$X_m = (172.5 (172.5 + 307.2))^{1/2} = 288 \text{ Ft}$$

i) Calcular la distancia para $Q_m = 440 \text{ BTU/hr}$ (Ec. 4.8)

$$Y = (X^2 - H (H + L))^{1/2}$$

$$Y = (950^2 - 172.5 (172.5 + 307.2))^{1/2} = 941.0 \text{ Ft}$$

j) Calcular el tiempo de escape

$$t_e = \frac{(X^2 - X_m^2)^{1/2}}{20}$$

$$t_e = \frac{(950^2 - 288^2)^{1/2}}{20} = 30.17$$

k) Comparar tiempos de escape

$$t_e = \left| \frac{t_e^* - t_e}{t_e} \right| \leq 0.05$$

$$t_e = \left| \frac{30 - 30.17}{30.17} \right| = 0.0056 < 0.05 \quad \text{O.K.}$$

l) Cálculo por distorsión de flama

$$U_w = 45 \text{ Ft/s}$$

$$A = \pi (2.56)^2 / 4 = 5.14 \text{ Ft}^2$$

$$c = 2326.0 \text{ Ft}^3/\text{s}$$

$$U_g = \frac{2326 \text{ Ft}^3/\text{s}}{5.14 \text{ Ft}^2} = 452.5 \text{ Ft}$$

Ángulo de incidencia :

$$\tan \theta = U_w / U_g$$

$$\theta = \tan^{-1}(45/452.5) = 5.68$$

m) Cálculo de la distancia radial (Ec. 4.14)

$$Y = \left\{ X^2 - (H + (X_m - H) \cos \theta)^2 \right\}^{1/2} + (X_m - H) \sin \theta$$

$$\sin (5.68) = 0.098$$

$$\cos (5.68) = 0.995$$

$$Y = \left\{ 950^2 - (172.5 + (288-172.5) \cdot 0.995)^2 \right\}^{1/2} + (288-172.5) \cdot 0.0989$$

$$Y = 917.0$$

Radiación debajo del centro de flama

$$q = \frac{0.4 (1.248 \cdot 10^{10})}{4 \pi (172.5 + [288-172.5][0.995])^2}$$

$$q = 48818.6 \text{ Bt/Hr Ft}^2$$

valor menor a 5000 BTU/Hr Ft² (criterio de diseño).

Por lo tanto las dimensiones calculadas para el quemador son :

Diámetro : 2.56 Ft(30")

Altura : 172.5 Ft(52.5 m)

IX.5.2) Cálculo del quemador por el método API

a) Condiciones del Sistema

$$W = 12.05 \times 10^5 \text{ Lb/hr} \quad (250 \text{ MMPCSD})$$

$$P = 18.0 \text{ Psig}$$

$$K = 1.4$$

$$P.M. = 43.9$$

$$\text{Mach} = 0.50$$

$$d = 2.56 \text{ Ft}$$

$$\mu_w = 45 \text{ Ft/s}$$

b) Cálculo de la longitud de la flama

$$Q = 1.248 \cdot 10^{10} \text{ BTU/Hr}$$

De la fig. 6.7 se obtiene $L = 400 \text{ Ft}$

c) Cálculo del centro de flama (cálculo riguroso)

velocidad del gas : $\mu_g = 452.5 \text{ Ft/s}$

Utilizando la ecuación 6.23A

$$\left[\frac{\Delta Y}{\Delta X} \right] = 1.6 \pi d_o \frac{\mu_o}{\mu_a} \left[\frac{1}{L} - \frac{1}{L} \right]$$

$$\left[\frac{\Delta Y}{\Delta X} \right] = 1.6 \pi 2.56 \frac{452.5}{45} \left[\frac{1}{L} - \frac{1}{L} \right]$$

$$\left[\frac{\Delta Y}{\Delta X} \right] = 129.4 \left[\frac{1}{L} - \frac{1}{L} \right]$$

Utilizando el método iterativo :

$$\Delta X = \frac{\Delta l}{\left[1 + \left(\frac{\Delta Y}{\Delta X} \right)^2 \right]^{1/2}} \quad \text{Ec. 6.24}$$

$$\Delta Y = \frac{\Delta l}{\left[1 + \left(\frac{\Delta X}{\Delta Y} \right)^2 \right]^{1/2}} \quad \text{Ec. 6.27}$$

T A B L A 9.4
TABLA DE ITERACIONES
METODO A.P.I.

SUPDNER (l)	$\left(\frac{1}{l} - \frac{1}{L} \right)$	$\frac{\Delta Y}{\Delta X}$	ΔX (Ec. 6.26)	ΔY (Ec. 6.27)
20	0.0475	6.14	3.21	19.74
40	0.0225	2.91	6.49	18.91
60	0.0141	1.23	9.57	17.55
80	0.0100	1.29	12.28	15.82
100	0.0075	0.97	14.35	13.93
120	0.0058	0.75	15.96	12.05
140	0.0046	0.60	17.14	10.30
160	0.0037	0.48	17.99	8.73
180	0.0030	0.39	18.59	7.35
200	0.0025	0.32	19.03	6.15
220	0.0020	0.26	19.33	5.11
240	0.0017	0.21	19.55	4.21
260	0.0013	0.17	19.70	3.43
280	0.0010	0.14	19.81	2.75
300	0.0008	0.11	19.88	2.14
320	0.0006	0.08	19.93	1.61
340	0.0004	0.06	19.97	1.14
360	0.0003	0.04	19.98	0.72
380	0.0001	0.02	19.99	0.34
400	0.0000	0.00	20.00	∞

Cálculo de las coordenadas del centro de flama :

$$\sum \Delta X = 322.7$$

$$\sum \Delta Y = 151.9$$

$$X = 322.7 \cdot 0.5 = 166.3 \text{ Ft}$$

$$Y = 151.9 \cdot 0.5 = 76.0 \text{ Ft}$$

d) Cálculo de la altura por Radiación (De la Figura 6.9)

Radiación máxima del quemador : 5000 BTU/Hr Ft² de la ecuación 5.41

$$D = \left(\frac{F Q}{4\pi (q)} \right)^{1/2}$$

$$D = \left(\frac{0.40 (1.248 \cdot 10^{10})}{4\pi (5000)} \right)^{1/2} = 282 \text{ Ft}$$

Radiación debajo del centro de flama

$$D = H'$$

$$H = H' - Y$$

$$H = 282 - 76 = 206 \text{ Ft} \quad (62.8 \text{ m})$$

Radiación a la base

$$D = (H'^2 - R'^2)^{1/2}$$

$$R' = X$$

$$D = (282^2 + 166.3^2)^{1/2} = 327.4 \text{ Ft}$$

$$q = \left(\frac{0.40 (1.248 \cdot 10^{10})}{4\pi (327.4)^2} \right) = 3706.0 \text{ BTU/Hr Ft}^2$$

Radiación a 160 m (525 Ft)

$$D^2 = R'^2 + H'^2$$

$$R = R' + X = 525$$

$$R' = 525 - 166.3 = 358.7$$

$$D = 456.2 \text{ Ft}$$

$$q = \left(\frac{0.40 (1.248 \cdot 10^{10})}{4\pi (456.2)^2} \right) = 1908.8 \text{ BTU/Hr Ft}^2$$

e) Altura por Dispersión de contaminantes

$$C_{\text{max}} = \frac{3697 V H D_z}{\mu_w H^2 D_y^2}$$

$$X_{\text{max}} = \left(\frac{H}{D_z} \right)^{2/(2-n)}$$

T A B L A 9.5
CONCENTRACION DE CONTAMINANTES
FLUJO MAXIMO : 250 MMPCSD

EVEN TO	CONTAMINANTE	DESCARGA (TON/DIA)
VENTEO (Desfogue operando y quemador apagado)	H ₂ S	36.0
	CO ₂	176.5
QUEMADOR OPERANDO (Combustión Completa)	SO ₂	67.8
	CO ₂	9300.0

IX.5.3) Cálculo del quemador por el método de TAN

$$W = 12.05 \times 10^5 \text{ Lb/hr} \quad (250 \text{ MMPCSD})$$

$$P = 18.0 \text{ Peig}$$

$$K = 1.4$$

$$P.M. = 43.9$$

$$\text{Mach} = 0.50$$

$$d = 2.56 \text{ Ft}$$

a) Calcular la emisividad (e)

$$c = 0.048 (H)^{1/2}$$

$$c = 0.048 (43.9)^{1/2}$$

b) Calcular el calor liberado

$$Q = 20 \text{ 000 } W$$

$$Q = 2.41 \cdot 10^{10} \text{ BTU/Lb}$$

$$L = 120 \text{ D}$$

$$L = 307.2 \text{ Ft}$$

c) Calcular la altura del quemador (Ec. 6.37).

$$H = \frac{(14,400 D^2 + 0.204 W H^{1/2})^{1/2} - 120 \cdot D}{2}$$

$$H = \frac{(14,400 (2.56)^2 + 0.204 (12.05 \cdot 10^5 (43.9)^{1/2})^{1/2} - 307.2}{2}$$

$$H = 502.7 \text{ Ft} \quad (153.2 \text{ m})$$

Altura requerida para obtener 1500 Btu/Hr Ft² a la base del quemador.

d) Utilizando la Ec. 6.36

$$q = \frac{960 W \sqrt{H}}{4 \pi (X^2 + H (H + 120 \cdot D))}$$

para $q = 5000 \text{ BTU/Ht Ft}^2$ (radiación a la base $X = 0$)

$$5000 = \frac{960 (12.05 \cdot 10^5) \sqrt{43.9}}{4 \pi (H (H + 120 \cdot D))}$$

Resolviendo :

$$H^2 + 120 H + D = 1.22 \cdot 10^5$$

$$H = 228 \text{ Ft} \quad (69.5 \text{ m})$$

e) Cálculo de la Radiación a 160 m (525 Ft)

$$q = \frac{960 (12.05 \cdot 10^5) \sqrt{43.9}}{4 \pi ((525)^2 + 228^2 (228 + 120 \cdot 2.56))}$$

$$q = 1533.8 \text{ BTU/Hr Ft}^2$$

IX.5.4) Cálculo del quemador por el método BRZUSTOWSKI

$$W = 12.05 \times 10^5 \text{ Lb/hr} \quad (250 \text{ MMPCSD})$$

$$P = 18.0 \text{ Psig}$$

$$K = 1.4$$

$$P.M. = 43.9$$

$$\text{Mach} = 0.50$$

$$d = 2.56 \text{ Ft}$$

$$H_w = 45 \text{ Ft/s}$$

$$H_j = 452.5 \text{ Ft/s}$$

$$Cl = 0.04$$

a) Calcular el límite de flamabilidad del gas

$$\bar{Cl} = Cl \frac{U_j (P.M)_j}{U_\alpha (P.M)_\alpha}$$

$$\bar{Cl} = \frac{0.04 (452.5) (43.9)}{(45) (29)} = 0.592$$

Longitud relativa de la flama

$$Cl > 0.5 \quad \text{Entonces :} \quad \bar{Sl} = \frac{2.51}{(0.592)^{0.625}} = 3.483$$

b) Calcular la longitud de la flama

$$\bar{X}_l = \bar{Sl} - 1.65$$

$$\bar{Z}_l = 2.05 (\bar{X}_l)^{0.28}$$

$$\bar{X}_l = 3.483 - 1.65 = 1.833$$

$$\bar{Z}_l = 2.05 (1.833)^{0.28} = 2.43$$

c) Calcular la longitud relativa de la flama (St) $X_L = \bar{X}_L d Ro$

$$Z_L = \bar{Z}_L d Ro$$

$$Ro = \frac{U_j}{U_\alpha} \left(\frac{\rho_j}{\rho_\alpha} \right)^{1/2}$$

$$Ro = \frac{452.5}{45} \left(\frac{0.1429}{0.0776} \right)^{1/2} = 13.69$$

$$X_L = 1.833 (2.56) (13.69) = 64.24$$

$$Z_L = 2.43 (2.56) (13.69) = 85.16$$

Coordenadas del centro de flama :

$$X_c = 1/2 (64.24) = 32.12$$

$$Z_c = 0.82 (85.16) = 69.80$$

d) Calcular la longitud de la flama (\bar{X}_L, \bar{Z}_L)

Considerando una radiación máxima debajo del centro de flama de 5000 BTU/Hr Ft²

$$K = \frac{F Q}{4 \pi D^2}$$

$$K = \frac{0.4 (1.248 \cdot 10^{10})}{4 \pi (2.56)^2} = 281.8 \text{ Ft}$$

$$D = h' \text{ (debajo del centro de flama)}$$

$$H = h' - Z_c$$

$$H = 281.8 - 69.8 = 212 \text{ Ft} \quad (64.6 \text{ m})$$

e) Cálculo de la Radiación a 160 m (525 Ft)

$$X_t = X' - X_c$$

$$X_t = 525 - 32.1 = 492.9 \text{ Ft}$$

$$D^2 = X^2 + h^2$$

$$D = (492.9^2 + 281.8^2)^{1/2} = 567.7 \text{ Ft}$$

$$K = \frac{0.4 (1.248 \cdot 10^{10})}{4 \pi (567.7)^2} = 1232.6 \text{ BTU/Hr Ft}^2$$

T A B L A 9.6
RESUMEN DE RESULTADOS

A. FLUJO CRITICO : 250 MMPCSD

M E T O D O	DIAMETRO CALCULADO (PULG)	ALTURA ESTIMADA (m)	R A D I A C I O N (BTU/Hr Ft ²)	
			MAXIMA	A 160 m
KENT	30.7	52.5	4818.6	1108.5
A.P.I.	30.7	62.8	5000.0	1908.8
TAN	30.7	69.5	5000.0	1533.8
BRZUSTOWSKI	30.7	64.6	5000.0	1232.6

B. FLUJO MAXIMO : 125 MMPCSD

M E T O D O	DIAMETRO CALCULADO (PULG)	ALTURA ESTIMADA (m)	R A D I A C I O N (BTU/Hr Ft ²)	
			MAXIMA	A 160 m
KENT	30.7	52.5	2432.0	553.9
A.P.I.	30.7	62.8	3127.0	911.5
TAN	30.7	69.5	2500.0	767.0
BRZUSTOWSKI	30.7	64.6	2871.6	911.5

I X.5.5) Simulaciones

a) Flujo Critico : 250 MMPCSD

$$\omega = 12.05 \cdot 10^5 \text{ lb/hr}$$

$$P = 18 \text{ psias}$$

$$T = 512 \text{ }^\circ\text{R}$$

$$K = 1.4$$

$$M = 43.9$$

$$\text{mach} = 0.5$$

$$\text{Diámetro} = 2.56 \text{ Ft}$$

$$Q = 1.248 \cdot 10^{10} \text{ BTU/Hr}$$

$$\phi = 5.68$$

a.1.) Método de Kent

L = 307.2 Ft

T A B L A 9.7

A L T U R A (m)	R A D I A C I O N (BTU/Hr Ft)		
	AL CENTRO DE FLAMA	A LA BASE	A 160 m
50	5156.0	5136.0	1125.0
55	4543.0	4525.0	1092.0
60	4010.0	3995.0	1058.0
65	3594.0	3582.0	1027.0
70	3223.0	3212.0	994.0
75	2926.0	2916.0	964.0
80	2670.0	2661.0	934.0
85	2434.0	2427.0	904.0
90	2241.0	2234.0	876.0
95	2060.0	2054.0	847.0
100	1910.0	1905.0	820.0

a.2.) Método A.P.I.

Coordenadas de la flama :

x = 166.3

y = 76.0

T A B L A 9.8

A L T U R A (m)	R A D I A C I O N (BTU/Hr Ft)		
	AL CENTRO DE FLAMA	A LA BASE	A 160 m
50	6890.0	4655.0	2131.0
55	6056.0	4259.0	2044.0
60	5325.0	3884.0	1953.0
65	4752.0	3570.0	1870.0
70	4238.0	3272.0	1785.0
75	3828.0	3022.0	1708.0
80	3474.0	2797.0	1634.0
85	3149.0	2582.0	1558.0
90	2883.0	2401.0	1490.0
95	2636.0	2227.0	1421.0
100	2432.0	2079.0	1360.0

a.3) Método de TAN

L = 307.2 Ft

T A B L A 9.9

A L T U R A (m)	R A D I A C I O N (BTU/Hr Ft)	
	A L A B A S E	A 160 m
50	7890.0	1728.0
55	6953.0	1678.0
60	6139.0	1626.0
65	5503.0	1578.0
70	4935.0	1527.0
75	4480.0	1481.0
80	4089.0	1435.0
85	3728.0	1388.0
90	3432.0	1345.0
95	3156.0	1301.0
100	2927.0	1260.0

a.4) Método Brzustowski

Coordenadas del centro de flama :

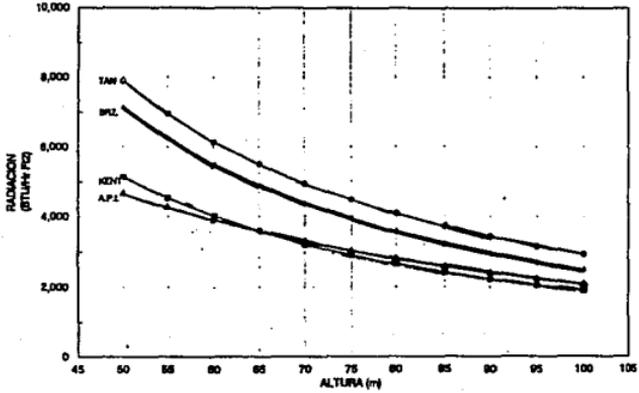
Xc = 32.1

Yc = 69.8

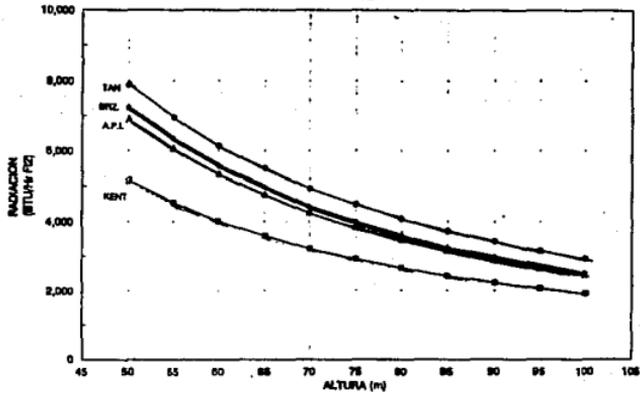
T A B L A 9.10

A L T U R A (m)	R A D I A C I O N (BTU/Hr Ft)		
	A L C E N T R O D E F L A M A	A L A B A S E	A 160 m
50	7260.0	7126.0	1333.0
55	6360.0	6257.0	1300.0
60	5575.0	5496.0	1263.0
65	4962.0	4899.0	1229.0
70	4415.0	4365.0	1192.0
75	3979.0	3939.0	1158.0
80	3605.0	3571.0	1124.0
85	3262.0	3235.0	1088.0
90	2982.0	2959.0	1055.0
95	2723.0	2703.0	1021.0
100	2508.0	2492.0	989.0

METODOS DE CALCULO
RADIACION A LA BASE
FLUJO 250 MMPCSD

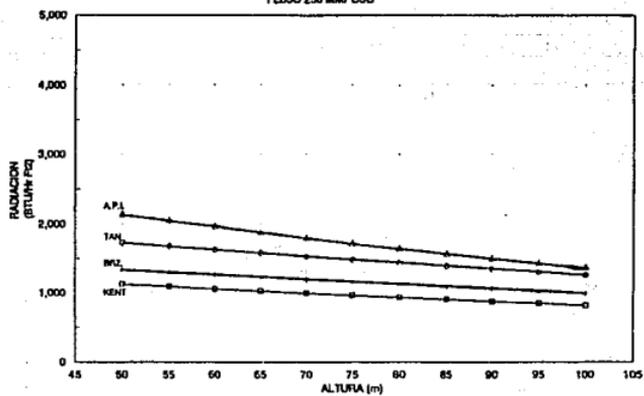


METODOS DE CALCULO
RADIACION AL CENTRO DE FLAMA
FLUJO 250 MMPCSD



METODOS DE CALCULO

RADIACION A 160 m
FLUJO 250 MMPCSD



b) Flujo de Diseño : 125 MMPCSD

$$\omega = 6.025 \cdot 10^5 \text{ lb/hr}$$

$$P = 18 \text{ psias}$$

$$T = 512 \text{ }^\circ\text{R}$$

$$K = 1.4$$

$$M = 43.9$$

$$\text{mach} = 0.25$$

$$\text{Diámetro} = 2.56 \text{ Ft}$$

$$Q = 6.24 \cdot 10^{10} \text{ BTU/Hr}$$

$$\epsilon = 11.25$$

b.1.) Método de Kent

T A B L A 9.11

A L T U R A (m)	R A D I A C I O N (BTU/Hr Ft)		
	AL CENTRO DE FLAMA	A LA BASE	A 160 m
50	2518.0	2479.0	543.0
55	2218.0	2184.0	527.0
60	1957.0	1929.0	511.0
65	1753.0	1729.0	496.0
70	1571.0	1550.0	480.0
75	1426.0	1408.0	465.0
80	1301.0	1285.0	451.0
85	1185.0	1171.0	436.0
90	1091.0	1078.0	423.0
95	1003.0	992.0	409.0
100	929.0	919.0	396.0

b.2.) Método A.P.I.

Coordenadas :

$$x = 132 \text{ ft}$$

$$y = 46.1 \text{ ft}$$

T A B L A 9.12

A L T U R A (m)	R A D I A C I O N (BTU/Hr Ft)		
	AL CENTRO DE FLAMA	A LA BASE	A 160 m
50	4495.0	3223.0	999.0
55	3882.0	2895.0	965.0
60	3358.0	2593.0	929.0
65	2956.0	2347.0	896.0
70	2603.0	2119.0	860.0
75	2326.0	1931.0	828.0
80	2090.0	1766.0	796.0
85	1877.0	1612.0	763.0
90	1705.0	1483.0	733.0
95	1547.0	1362.0	702.0
100	1418.0	1261.0	674.0

b.3.) Método de TAN

T A B L A 9.13

A L T U R A (m)	R A D I A C I O N (BTU/Hr Ft)	
	A LA BASE	A 160 m
50	3944.0	864.0
55	3476.0	839.0
60	3069.0	813.0
65	2751.0	789.0
70	2467.0	764.0
75	2240.0	740.0
80	2044.0	718.0
85	1864.0	694.0
90	1716.0	672.0
95	1578.0	650.0
100	1463.0	630.0

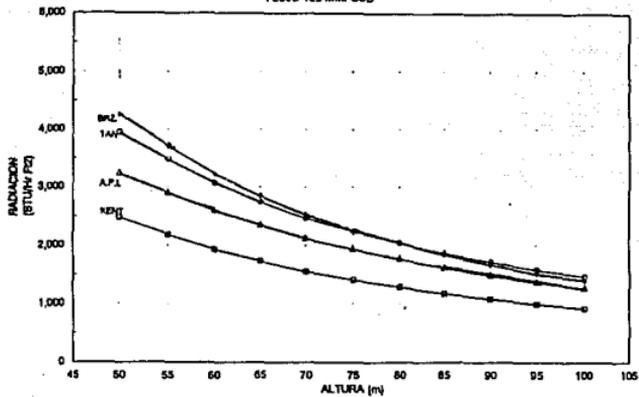
b.4.) Método Brzustowski

Coordenadas del centro de flama :

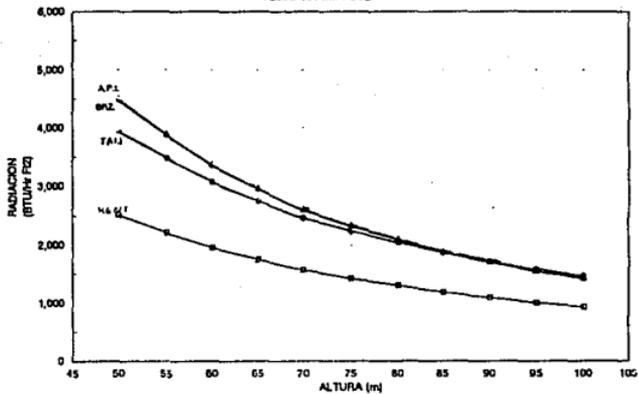
$$X_c = 46.4 \text{ Ft}$$

$$Y_c = 46.9 \text{ Ft}$$

METODOS DE CALCULO
RADIACION A LA BASE
FLUJO 125 MMPCSD



METODOS DE CALCULO
RADIACION AL CENTRO DE FLAMA
FLUJO 125 MMPCSD



METODOS DE CALCULO
RADIACION A 180 m
FLUJO 125 MMPCSD

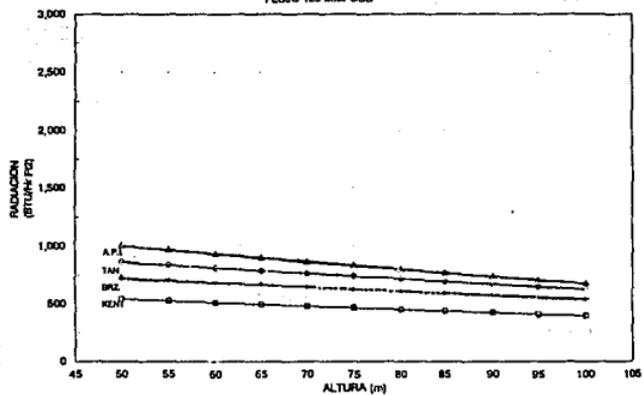


TABLA 9.14

AL T U R A (m)	R A D I A C I O N (BTU/Hr Ft)		
	AL CENTRO DE FLAMA	A LA BASE	A 160 m
50	4461.0	4255.0	725.0
55	3854.0	3700.0	707.0
60	3336.0	3219.0	688.0
65	2938.0	2847.0	669.0
70	2588.0	2517.0	649.0
75	2313.0	2256.0	630.0
80	2080.0	2034.0	612.0
85	1868.0	1831.0	592.0
90	1698.0	1667.0	574.0
95	1541.0	1515.0	554.0
100	1412.0	1391.0	537.0

IX.5) Cálculo de la altura del quemador por dispersión de Contaminantes

$$W = 12.05 \times 10^5 \text{ Lb/hr} \quad (250 \text{ MMPCSD})$$

$$P = 18.0 \text{ Psig}$$

$$K = 1.4$$

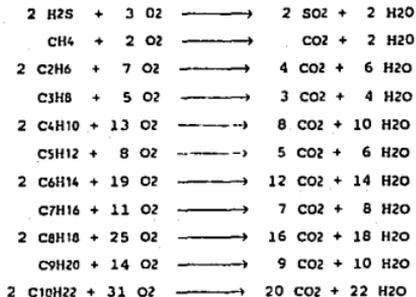
$$P.M. = 43.9$$

$$d = 2.56 \text{ Ft}$$

$$\mu_w = 45 \text{ Ft/s}$$

$$\mu_j = 452.5 \text{ Ft/s}$$

IX.6.1) Reacciones de Combustión



• Flujo Crítico

$$p = 0.1439 \text{ Lb/Ft}^3$$

$$(12.05 \cdot 10^5 \text{ lb/hr})(1b \text{ mol}/43.9 \text{ lb}) = 27,448.8 \text{ lbmol/hr}$$

T A B L A 9.15
PRODUCTOS DE LA COMBUSTION

R E A C T I V O S		P R O D U C T O S (Lb/Hr)		
COMPUESTO	FRACCION	CO2	H2O	SO2
H2S	0.709	---	3,503	12,455
CH4	78.762	951,253	389,149	
C2H6	9.486	229,135	93,737	
C3H8	2.424	87,828	35,930	
C4H10	3.570	172,468	70,555	
C5H12	1.894	114,374	46,790	
C6H14	0.340	24,638	10,079	
C7H16	0.101	8,539	3,493	
C8H18	0.020	1,932	791	
C9H20	0.008	870	356	
C10H22	0.004	4,831	198	
CO2	2.682	32,392	---	
SUBTOTALES		1'628,260	654,581	12,455

TOTAL : 2'295,296 Lb/Hr

FRACCION PESO DE LOS PRODUCTOS :

$$X \text{ CO}_2 = 0.710$$

$$X \text{ SO}_2 = 0.005$$

$$X \text{ H}_2\text{O} = 0.285$$

IX.6.2) Planteamiento de los Eventos Posibles para la emisión de los contaminantes

EVENTO A : Emisión de Contaminantes causada por VENTEO durante el evento crítico (250 MHPCSD), este evento se tendría cuando el desfogue se efectúe y el piloto del quemador se encuentre apagado accidentalmente.

CO2 32,392 Lb/Hr (4085 g/s)

H2S 6,617 Lb/Hr (835 g/s)

EVENTO B : Emisión de Contaminantes causada por una combustión completa del desfogue durante el evento crítico (Queimador operando en forma adecuada).

CO₂ 1'628,260 Lb/Hr (205,342 g/s)
 SO₂ 12,455 Lb/Hr (1,571 g/s)

IX.6.3) Cálculo de la altura de quemador para el evento A.

D = 2.56 Ft (0.78 m)
 P = 18 psias (1.26 atm)
 T = 512 °R (284 °K)
 $\rho = 0.1439 \text{ Lb/Ft}^3$ (2307 g/m³)
 $\omega = 452.5 \text{ Ft/s}$ (138 m/s) velocidad del gas
 T_{amb} = 538.6 °R (294 °K)
 $\mu_o = 7.38 \text{ Ft/s}$ (2.25 m/s) velocidad de viento débil
 Distancia a cubrir : 525 Ft (160 m)

Ecuaciones :

$$H = H_s + \Delta H$$

$$\Delta H = \frac{\omega d}{\mu_o} \left[1.5 + 2.68 P \left(\frac{T_g - T_a}{T_g} \right) d \right]$$

$$X = \frac{Q_c}{\mu \sigma_y \sigma_z} \exp \left[- \frac{1}{2} \left(\frac{z}{\sigma_z} \right)^2 \right]$$

$$X_{\max} = \left(\frac{2 Q_c}{e \pi \mu H^2} \right) \left(\frac{\sigma_z}{\sigma_y} \right)$$

$$\Delta H = \frac{138 \cdot 0.78}{2.25} \left[1.5 + 2.68 (1.26) (0.78) \left(\frac{284 - 299}{284} \right) \right]$$

$$\Delta H = 65 \text{ M}$$

Suponiendo una altura de quemador (H_s)

$$H_s = 50 \text{ m}$$

$$H = 50 + 65 = 115 \text{ m}$$

IX.6.4) Método Riguroso para el Evento A

Utilizando la ecuación 5.26 y calculando los coeficientes de dispersión (σ_y y σ_z) de acuerdo al apéndice se calcularán las concentraciones por el método riguroso.

T A B L A 9.16

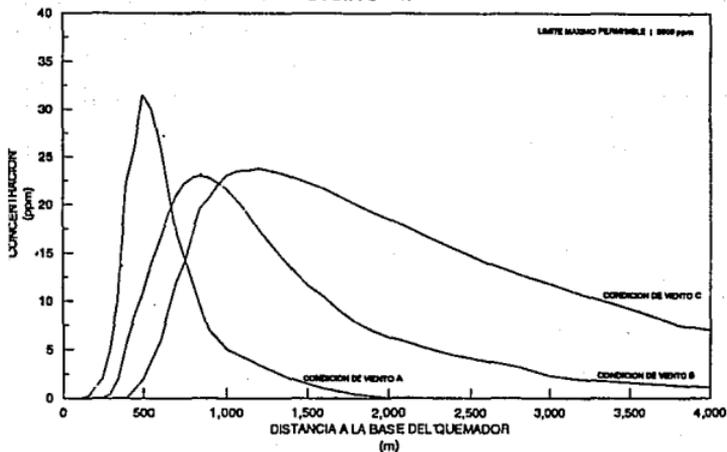
CONDICION DE VIENTO	l (m)	σ_y	σ_z	CONCENTRACION (ppm)	
				CO2	H2S
A	160	36.4	26.3	0.01	0.0
	300	67.4	45.3	5.6	1.5
	400	89.4	66.7	22.2	5.9
	500	111.3	98.3	31.2	8.2
	600	133.1	144.8	27.3	7.2
	800	176.5	314.0	12.7	3.3
	1000	219.7	681.0	5.0	1.3
	1500	316.0	1784.0	1.3	0.3
	2000	401.0	3815.6	0.5	0.1
B	160	27.8	18.0	---	---
	300	51.7	32.7	0.3	0.08
	600	102.4	63.0	16.6	4.4
	900	152.7	99.3	22.9	6.0
	1200	202.0	159.3	17.4	4.6
	1500	243.6	230.0	11.7	3.1
	2000	310.0	369.0	6.3	1.7
	3000	435.0	717.0	2.4	0.6
	4000	553.0	1151.3	1.2	0.3
C	160	21.0	12.1	----	---
	400	50.0	29.0	0.2	0.05
	500	62.0	36.0	2.1	0.5
	600	74.0	43.0	6.7	1.8
	700	85.6	49.5	12.1	3.2
	800	97.0	56.3	17.3	4.6
	1000	120.0	69.6	23.3	6.2
	1400	163.0	92.2	23.3	6.2
	1800	201.7	108.4	19.9	5.3
	2000	220.4	116.5	18.2	4.8
	3000	310.0	157.0	12.0	3.2
4000	395.0	198.0	7.3	1.9	

IX.6.5) Método gráfico para el Evento A

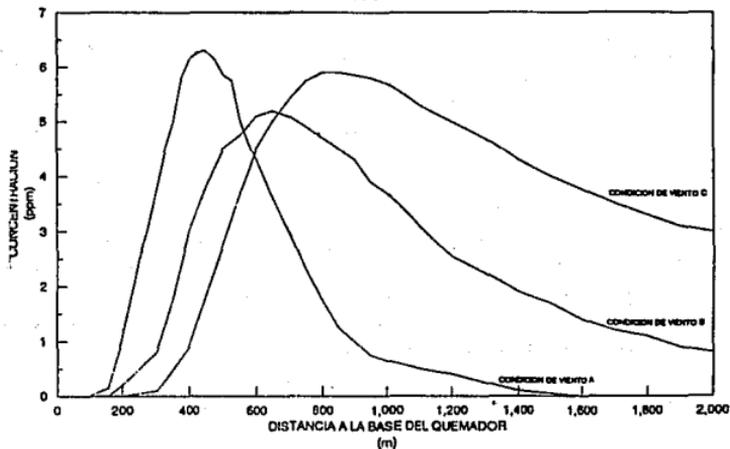
Estimación de la concentración máxima y la distancia a la cual se presenta, por medio de la gráfica del apéndice.

H = 115 m (altura efectiva)

DISPERSION DE BIXIDO DE CARBONO (CO₂)
 FLUJO : 250 MMPCSD ALTURA : 50 m
 EVENTO A



DISPERSION DE ACIDO SULFHDrico (H₂S)
 FLUJO : 250 MMPCSD ALTURA : 50 m
 EVENTO A



Temperatura supuesta de los gases de combustión cuando empiezan a dispersarse : 580 °K

$$T_f = (580+299)/2 = 439.5 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$P = (1.26+1.0)/2 = 1.13 \text{ atm}$$

por lo tanto :

$$\Delta H = \frac{138(0.78)}{2.25} \left[1.5 + 2.72(1.13)(0.78) \left(\frac{439.5-299}{439.5} \right) \right]$$

$$\Delta H = 108.4 \text{ m}$$

$$\frac{\mu_w}{\mu_o} = 0.005$$

de la gráfica 5.6

$$\left(\frac{\sum \Delta Y}{L} \right) = 0.95$$

$$\Delta FL = FL \frac{\sum \Delta Y}{L}$$

$$\Delta FL = 0.95 (93.6) = 88.9$$

Altura total

$$H_a = 50 \text{ m (Igual al evento A)}$$

$$H = 50 + 108.4 + 88.9$$

$$H = 247.3 \text{ m}$$

Altura efectiva donde inicia la
Dispersión

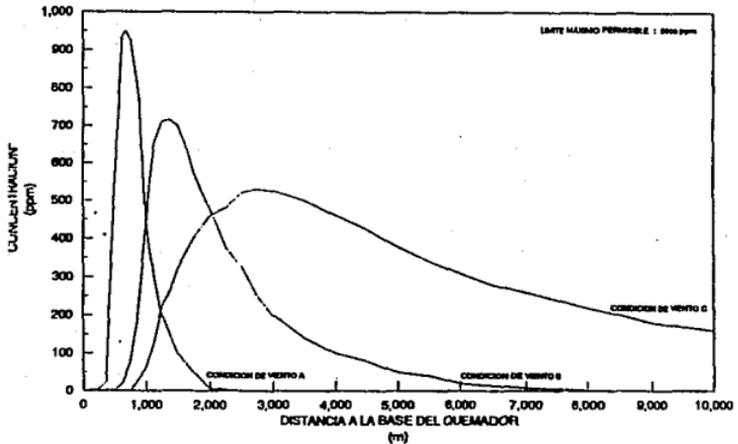
IX.6.7) Método Riguroso para el evento B

Utilizando los coeficientes σ_y y σ_z calculados para cada distancia (I) en el evento A, se obtienen los resultados mostrados en la tabla 9.17

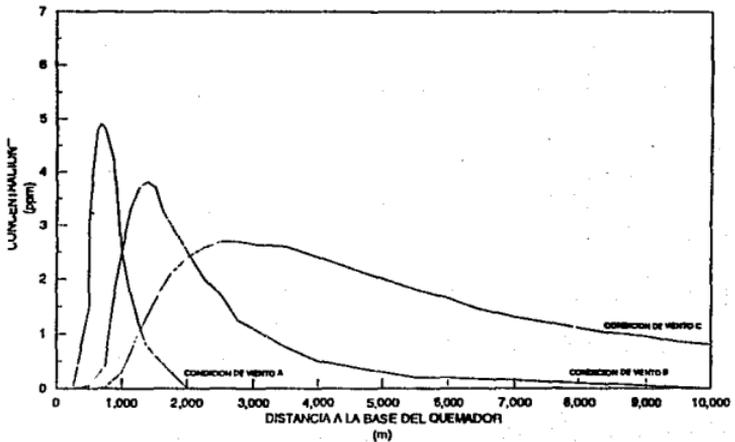
T A B L A 9.17
METODO RIGUROSO PARA EL EVENTO B

CONDICION DE VIENTO	I (m)	CONCENTRACION (ppm)		
		CO2	SO2	
A	160	-----	---	H = 263.56
	300	-----	---	
	400	4.5	0.02	
	500	166.0	0.9	
	600	655.0	3.5	
	800	840.0	4.4	
	1000	410.0	2.1	
	1500	116.0	0.6	
	2000	43.0	0.2	
	B	160	-----	
300		-----	---	
400		-----	---	
500		0.06	$3 \cdot 10^{-4}$	
600		1.6	0.008	
750		21.5	0.11	
900		129.0	0.68	
1200		523.0	2.75	
1500		613.0	3.22	
2000		448.0	2.35	
3000		198.0	1.04	
5000		59.0	0.31	
8000	18.0	0.09		
C	160	-----	---	H = 247.3
	700	0.06	$3 \cdot 10^{-4}$	
	1000	14.0	0.07	
	1200	73.0	0.4	
	1400	102.0	0.5	
	1800	224.0	1.2	
	2000	271.0	1.4	
	3000	394.0	2.1	
	3500	400.0	2.1	
	4000	388.0	2.0	
	5000	340.0	1.8	
	10000	150.0	0.8	
	15000	31.0	0.2	
	20000	20.0	0.1	

DISPERSION DE BÓXIDO DE CARBONO (CO₂)
FLUJO : 250 MMPCSD ALTURA : 50 m
EVENO B



DISPERSION DE BÓXIDO DE SULFURO (SO₂)
FLUJO : 250 MMPCSD ALTURA : 80 m
EVENO B



IX.6.8) Método gráfico para el evento B

Estación de la concentración máxima y la distancia a la cual se presenta para el evento B. Altura efectiva de Emisión : H = 247.3 m

T A B L A 9.18
METODO GRAFICO PARA EL EVENTO B

CONDICION DE VIENTO	$\left(\frac{C_1}{Q_{max}}\right)$ g/m ³	CO ₂		H ₂ S		DISTANCIA (m)
		lg/m ³	ppm	lg/m ³	ppm	
A	$5.0 \cdot 10^{-6}$	456315	331	3491	1.74	700
B	$3.0 \cdot 10^{-6}$	273789	198	2095	1.04	1600
C	$2.2 \cdot 10^{-6}$	200779	145	1536	0.77	3500
D	$9.0 \cdot 10^{-7}$	82137	59	628	0.31	14000
E	$3.0 \cdot 10^{-7}$	27379	20	209	0.10	30400
F	$1.7 \cdot 10^{-7}$	15515	11	119	0.06	85000

Límites máximos permisibles de acuerdo a Norma Nacionales

CO₂ 5000 ppm
SO₂ 2 ppm

Calculando la altura de la chimenea requerida por el método riguroso para obtener avlores menores de 2 ppm de SO₂, se obtine el valor de 80 m. Esta altura deberá compararse con la obtenida por radiación.

IX.6.9) Resumen de Resultados del Análisis de Dispersión de Contaminantes
Con altura supuesta de chimenea de 50 m.

T A B L A 9.19

RESUMEN DE RESULTADOS DE DISPERSION DE CONTAMINANTES

CONDICION DE VIENTO	CONTAMINANTE	C O N C E N T R A C I O N M A X I M A	
		MÉTODO RIGUROSO	MÉTODO GRAFICO
A	EVENTO A CO ₂ H ₂ S	31.2 @ 500 m 8.2	13.7 @ 480 m 3.6
	EVENTO B CO ₂ SO ₂	840.0 @ 800 m 4.4	331.0 @ 700 m 1.74
B	EVENTO A CO ₂ H ₂ S	22.9 @ 900 m 6.0	10.7 @ 800 m 2.8
	EVENTO B CO ₂ SO ₂	613.0 @ 1500 m 3.2	198.0 @ 1600 m 1.04
C	EVENTO A CO ₂ H ₂ S	23.3 @ 1400 m 6.2	9.1 @ 1300 m 2.4
	EVENTO B CO ₂ SO ₂	400.0 @ 3500 m 2.1	145.0 @ 3500 m 0.77

IX.7) Conclusiones al Ejemplo

Todo diseño de cualquier equipo en Ingeniería Básica debe enmarcarse en una serie de parámetros que permitan conocer su operación en condiciones normales, máximas y críticas, con la finalidad de diseñar adecuadamente dicho equipo y los Sistemas auxiliares de protección y servicio que requiera.

No debe considerarse al equipo como un sistema aislado del proceso, sino como un sistema integral de producción.

Por ello, para iniciar el diseño de un Quemador Elevado deben conocerse las condiciones de Operación de la planta, como son :

- * Bases de Operación
- * Bases del Proceso
- * Capacidad de la planta
- * Especificación de los productos
- * Condiciones climatológicas
- * Ubicación de la planta
- * Configuración de los Sistemas de protección

Posteriormente se analizan los orígenes de los diferentes flujos que serán enviados al quemador, analizando las Fallas Operacionales o por fuego en Planta que puedan presentarse.

Mediante este análisis se obtienen las cantidades de fluido que deberá manejar el Quemador bajo las condiciones normales o de emergencia de la planta. Así mismo, se obtendrán las propiedades Físicoquímicas de estos fluidos.

En este momento el Diseñador del Quemador Elevado deberá plantear los límites de Niveles de Radiación, de concentración de contaminantes y las áreas mínimas a proteger durante la operación normal y máxima del equipo, para un funcionamiento adecuado.

Con los parámetros básicos definidos (necesidades del proceso, flujos, condiciones, límites permisibles, etc.) se inicia el diseño del quemador propiamente dicho.

Con los análisis anteriores se llegó a los siguientes parámetros básicos para dimensionar el Quemador Elevado :

* Flujo Crítico :	250 MMPCSD	(Poco probable)
* Flujo Máximo :	125 MMPCSD	
* Radiación Máxima para Flujo Crítico :	5000 BTU/Hr Ft ²	
* Radiación Máxima para Flujo Máximo :	3000 BTU/Hr Ft ²	
* Distancia a Proteger :	160 m.	
* Radiación a distancia a proteger :	1000 BTU/Hr Ft ²	
* Límite máximo permisible de concentración de contaminantes :	CO2	5000 ppm
	SO2	2 ppm
	H2S	10 ppm

Con estas bases de Diseño se realizó el cálculo del diámetro y altura del Quemador Elevado, mediante los métodos de Kent, A.P.I., Tan y Brzustowski, obteniendo básicamente el mismo diámetro para cada método, pero una altura de chimenea requerida diferente por efectos de radiación.

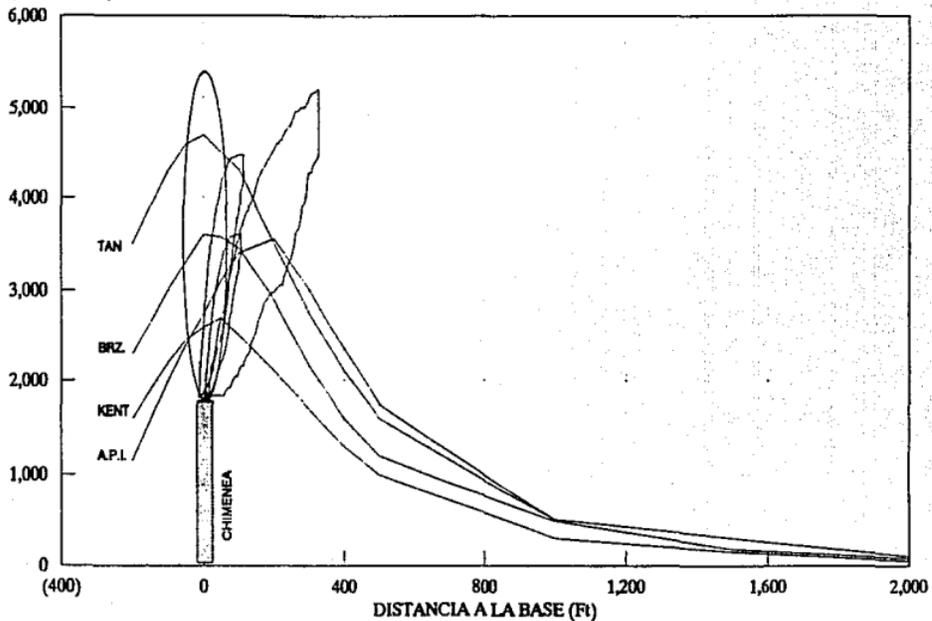
Debido a que las diferencias de altura entre métodos son grandes se procedió a analizar el comportamiento de los mismos en un rango de altura, considerado entre los mínimos y máximos obtenidos.

Con estas simulaciones se logró determinar las diferentes geometrías de la flama considerados por cada método y que son las que definen las diferencias fundamentales de cada método. Estas geometrías de flama se refieren fundamentalmente a la longitud o inclinación de la misma y a la localización aproximada del centro de flama, el cual es aplicado para el cálculo de los niveles de Radiación considerando el modelo de la esfera de Radiación.

En la gráfica de la siguiente página pueden observarse las características de las flamas supuestas por cada método para las mismas condiciones de Operación, así como el comportamiento de los niveles de radiación en función de la distancia a la base del Quemador.

NIVELES DE RADIACION EN FUNCION DE LA DISTANCIA
A LA BASE DEL QUEMADOR
FLUJO: 250 MMPCSD ALTURA: 80 m

RADIACION
(BTU/Hr Ft²)



CAPITULO X
CONCLUSIONES

X. CONCLUSIONES GENERALES

A través del desarrollo del presente trabajo se plantearon los diferentes factores que intervienen en el diseño adecuado de un quemador elevado que bien puede utilizarse en la industria Petroquímica, como en cualquier otro tipo de industria Química en general o las relacionadas con ella.

En primera instancia puede concluirse que la mejor opción en la elección de un sistema de desfogue es evitar en lo máximo posible la utilización de este.

Los grandes problemas de contaminación con que se enfrenta la humanidad aunados a los altos costos de las materias primas obligan a los diseñadores a innovar sistemas que prevengan o eviten condiciones inseguras de operación así como del manejo de desfogues mas eficientes en la recuperación y reutilización de estas descargas .

En la medida de reducir estos riesgos estamos disminuyendo también el manejo del problema.

Ahora, dentro de las alternativas existentes para controlar y manejar esta situación debe operarse bajo ciertos conceptos que permitan un diseño mejor, por ejemplo.

A) Una inversión inicial mayor en la construcción de equipos de proceso al sobrediseñar aquellos que implican el caso(s) mas probable de alejarse de las condiciones de operación normales.

B) Dotar de instrumentación a todos los equipos de la planta con el fin de detectar fallas en los mismos instantáneamente y con esto efectuar paros o secuencias ordenadas de operación para evitar riesgos ocasionados por éstas.

C) Instalar sistemas secundarios de emergencia que relaven a los sistemas principales que fallen ,estos sistemas deberán dotarse de suministros de energía propios e independientes.

D) Como consecuencia de los incisos anteriores el manejo de materiales en los desfogues sera menor, lo que permitirá reciclar estos más facilmente. Y los no reciclables se dispondrán (si se pueden quemar) a quemadores que los manejen adecuadamente.

E) En el caso de sistemas con elementos finales de disposición como quemadores, originarán equipos más pequeños con requerimientos menores.

Trabajando bajo esta filosofía, las plantas de proceso ven reducidas favorablemente las descargas y como consecuencia las pérdidas de materiales, sin embargo, al no tener otra alternativa que la de quemar estos desfogues, es necesario que el diseño del quemador a utilizar cumpla con todas las restricciones impuestas por las Dependencias de Control ambiental que rijan en cada zona; para ello es necesario aplicar los conceptos espuestos en el presente trabajo además de otros factores muy variados que complementarán y formarán el mejor resultado.

Dentro de las variables que se consideran en el diseño del elemento final de un sistema de desfogue abierto la gran diversidad de conceptos parece complicar la utilización de un método de diseño fácil y que refleje los datos generados con la realidad. Sin embargo el factor o variable que no debe descuidarse y que se jerarquiza en el orden que se menciona es:

- Seguridad del personal
- Seguridad del Equipo
- Seguridad de la materia prima

Ante cualquier circunstancia el método que más se verá favorecido es aquel que sustente este concepto de prioridades y proporcione la mayor alternativa seguridad-costo.

En todos los métodos espuestos en el diseño de quemadores se basaban en modelos puntuales de radiación, es decir que el centro de radiación se concentra en una zona de la flama y ésta es distribuida radialmente, esta consideración implica que las diferencias básicas entre los métodos es la forma de calcular y determinar la longitud de la flama y la ubicación del centro de radiación de la misma.

De los métodos de cálculo analizados en el presente trabajo, se puede resumir lo siguiente :

A) Método de Kent

El dimensionamiento propuesto en este método, está basado en dos aspectos muy importantes de diseño el primero es considerar una velocidad adecuada del fluido en la boquilla del quemador, dependiendo de las condiciones de operación de la planta (Operación normal o de emergencia), con lo cual obtiene un diámetro recomendado para esas condiciones; mientras que el segundo es determinar la altura del quemador en función de la cantidad de calor absorbida por un individuo, dependiendo del tiempo de escape de éste, llegando a un método iterativo.

B) Método de A.P.I.

Esta institución realizó diferentes estudios para determinar su método de cálculo que obtiene la altura recomendable de chimenea; este método consiste en localizar el centro de flama, como una función dinámica de los cambios de flujo de gas quemado en la dirección del viento (DY) y de los cambios de velocidad de viento (DY) llegando a un método iterativo de cálculo riguroso.

C) Método de Tan

Este autor realiza una serie de cálculos que le permiten construir Nomogramas que facilitan el cálculo del quemador. El uso de Nomogramas permite realizar cálculos rápidos de quemadores que pueden utilizarse preliminarmente para cotizaciones, estimaciones o con fines ilustrativos de las dimensiones, pero no recomendables como diseños finales dado que su misma sencillez de cálculo lo hacen ser poco preciso.

D) Método de Brzustowski

Brzustowski y sus colaboradores realizaron los estudios originales sobre el comportamiento de gases venteados a la atmósfera a través de chimeneas y posteriormente extrapolaron los comportamientos de gases venteados con reacción química (flamas), llegando a determinar éste método de cálculo, el cual se basa en el análisis vectorial de momentum que intermienen durante la operación del quemador.

Estos datos experimentales llegaron a corroborarse en campo, obteniendo resultados muy cercanos a los reales.

C A P I T U L O X I
B I B L I O G R A F I A

XI. BIBLIOGRAFIA

API RP 521

Guide for pressure relief and depressuring system.

First edition, september 1969.

API Publication 931

Manual on disposal of refinery wastes volume on

atmospheric emissions.

K. Banerjee, N. P. Cheremisinoff

Flare gas systems pocket handbook.

Gulf Publishing Company

Houston, Texas, 1985

Straitz John

National Airoil Burner Co., Inc.

Houston, Texas.

Ira N. Levine,

Fisicoquimica

Mc. Graw Hill

Crane Co.,

Flow of fluids. through valves, fittings and pipe.

Mc. Graw Hill

1990.

Ernest E. Ludwig,

**Applied process design for chemical and petrochemical
plants. Gulf Publishing Company**

1983.

Byron Bird, Warren E. Stewart,
Fenómenos de Transporte
Editorial Reverté, S.A.
España, 1978

Donald Q. Korn,
Procesos de Transferencia de Calor.
C.E.C.S.A.
México, 1986

J.P. Holman,
Termodinámica

Mc. Graw Hill
México, 1974

L. G. Vanderlinde,
Smokeless Flares
Hydrocarbon Processing, 1974

H. J. Klooster, G. A. Vogt and G. F. Braun,
Optimizing the design of relief and flare systems.
Chemical Engineering Progress, 1975

Lloyd E. Owen and Jinn-Huic Huang,
Engineering Profiles into Energy Operations, 1975

George R. Kent,
Make profit from flares,
Hydrocarbon Processing, 1972

J. L. Kilby,
Flare system explosions.
Chemical Engineering Progress, 1968

Leslie Coulthard,
High-velocity flares offer several advantages.
Technology, 1984

F. T. Bodurtha, Jr.,
Flare Stacks -- How Tall ?
Chemical Engineering, 1958

Chung-you Wu,
Are your flare systems adequate ?
Chemical Engineering, 1983

James G. Seebold,
Practical flare design.
Chemical Engineering, 1984

R. McMurray,
Flare radiation estimated.
Hydrocarbon Processing, 1982

Irving Heltner,
A critical look at API RP 521.
Hydrocarbon Processing, 1970

R. Oenbring,
Flare design... are current methods too conservative ?
Hydrocarbon Processing, 1980

John D. Constance,
Calculate effective stack height quickly.
Chemical Engineering, 1972

Robert D. Reud,
Design and operation of flare systems.
Chemical Engineering Progress, 1968

B. Paruit and W. Kimmel,
Control Blowdown to the flare.
Hydrocarbon Processing, 1979

Soen H. Tan,
Flare system design simplified.
Hydrocarbon Processing, 1967

H. W. Husa,
How to compute safe purge rates.
Hydrocarbon Processing and Petroleum, 1964

William Lauderback,
Unique flare system retards smoke.
Hydrocarbon Processing, 1972

F. Straitz,
Make the flare protect the environment.
Hydrocarbon Processing, 1977

D. Shore,
Toward quieter flaring, Noise control.
Chemical Engineering Progress, 1973

O. C. Leite,
Predict flare noise and spectrum.
Hydrocarbon Processing, 1988

James G. Seebold,
Control flare steam noise.
Hydrocarbon processing, 1971

W. R. Woolrich, Jr.
Burner tip flares gases smokelessly.
The Oil and Gas Journal, 1973

James G. Seebold,
Flare noise : causes and cures.
Hydrocarbon Processing, 1972

H. J. KTom Chunghu Tsai,
Flare system design by microcomputer.
Chemical engineering, 1985

G. S. Mason and R. Kumar,
Algorithm sizes flare piping.
Chemical Engineering, 1988

Jorge A. Bonilla,
Estimate safe flare-headers quickly.
Chemical Engineering, 1978

Rolf Becker,

Mathematical model of luminous flame radiation for
the determination of safety zones.

Ger. Chemical Engineering, 1980

S. R. Golluballi, T. A. Brzustowski,

Characteristics of a turbulent propane diffusion flame in a
cross - wind.

1975

James B. Lawler,

Cut costs on flare stack design.

Fumarola, D. M. DeFaverl, E. Palazzi,

Determine plume rise for elevated flares.

Hydrocarbon Processing, 1982

Thomas R. Schmidt,

Ground - level detector tames flare-stack flames.

Chemical Engineering, 1977

Robert R. Pierce,

Estimating acid dewpoints in stack gases.

Chemical Engineering, 1977

Robert D. Reed,

What is flare's proper purge rate ?

Leslie C. Hardison,

Dynamics of flare gas recovery system design.

James G. Seebold,
How to conserve fuel in furnaces and flares.
Hydrocarbon Processing, 1981

Carlos J. Hilado, Stanley W. Clark,
Autoignition temperatures of organic chemicals.
Chemical Engineering, 1972

Higiene y Seguridad,
Organo oficial de la Asociación Mexicana de Higiene y Seguridad.
Enero, 1990

C A P I T U L O X I I

A P P E N D I C E S

**XII.1 NIVELES MAXIMOS PERMISIBLES
DE CONCENTRACION DE
CONTAMINANTES.**

XII.1 Niveles máximos permisibles de concentración de los contaminantes (sólidos, líquidos y gaseosos) para exposición laboral.

LPT : Concentración ponderada en el tiempo, (10 hr. de exposición)
ULT : Concentración para exposición de corto tiempo,
P : Concentración Pico.

NÚM.	CONTAMINANTE	LPT		ULT	
		ppm (a)	mg/m ³ (a)	ppm (a)	mg/m ³ (a)
1	Azule	-	10	-	20
2	Azule Mineral (óxido)	-	4	-	10
3	Azules Vegetales Niveles	-	0.1	-	-
4	Azules azules (verdes)	-	-	-	-
5	Azules de cloruro(sulfato)	100	100	150	270
6	Acetileno (concentración de metil acetileno, ppi)	25	100	50	170
7	Acetato de alio	600	1000	-	-
8	Acetato de isopropilo	100	325	125	350
9	Acetato de isobutilo	150	700	180	875
10	Acetato de propilo	250	950	310	1100
11	Acetato de n - butilo	300	810	250	700
12	Acetato de n - amilo	100	530	150	800
13	Acetato de n - hexilo	700	840	250	1030
14	Acetato de n - heptilo	180	710	200	750
15	Acetato de octilo	120	630	150	740
16	Acetato de nonilo	200	130	200	1170
17	Acetato de decilo	300	900	300	1100
18	Acetato de undecilo	10	30	20	60
19	Acetato de dodecilo	1000	3000	1000	3000
20	Acetato de trietileno glicol	60	70	60	100
21	Acetato de metilo	10	25	15	37
22	Acido fólico	5	5	-	-
23	Acido formico	-	5	-	3
24	Acido nítrico	2	5	4	10
25	Acido sulfúrico	-	1	-	2
26	Acido sulfónico	-	5	-	9
27	Acido sulfídrico	1	5	-	9
28	Acido trifluoroacetico	-	-	-	-
29	Acido trifluoroaceticético	-	10	-	10
30	Acido fólico (pico)	-	0.2	-	0.8
31	Acido de bario	10	10	-	-
32	Acido de calcio (pico)	5	20	25	100
33	Acido de p - nitropropilo (pico)	0.5	5	-	-
34	Acido de sodio (pico)	15	60	-	-

NÚM.	CONTAMINANTE	LPT		ULT	
		ppm (a)	mg/m ³ (a)	ppm (a)	mg/m ³ (a)
35	Acido nítrico (pico)	0.5	0.5	0.2	0.8
36	Acido nítrico	0.1	0.25	-	-
37	Acido nítrico (pico)	100	900	-	-
38	Acido nítrico (pico)	2	15	-	-
39	Acido nítrico (pico)	2	5	4	10
40	Acido nítrico (pico)	2	5	-	-
41	Acido nítrico (pico)	10	200	75	300
42	Acido nítrico (pico)	1000	1000	-	-
43	Acido nítrico (pico)	10	10	10	10
44	Acido nítrico (pico)	100	200	150	300
45	Acido nítrico (pico)	300	900	300	900
46	Acido nítrico (pico)	100	100	150	150
47	Acido nítrico (pico)	100	100	150	150
48	Acido nítrico (pico)	100	100	150	150
49	Acido nítrico (pico)	100	100	150	150
50	Acido nítrico (pico)	100	100	150	150
51	Acido nítrico (pico)	100	100	150	150
52	Acido nítrico (pico)	100	100	150	150
53	Acido nítrico (pico)	100	100	150	150
54	Acido nítrico (pico)	100	100	150	150
55	Acido nítrico (pico)	100	100	150	150
56	Acido nítrico (pico)	100	100	150	150
57	Acido nítrico (pico)	100	100	150	150
58	Acido nítrico (pico)	100	100	150	150
59	Acido nítrico (pico)	100	100	150	150
60	Acido nítrico (pico)	100	100	150	150
61	Acido nítrico (pico)	100	100	150	150
62	Acido nítrico (pico)	100	100	150	150
63	Acido nítrico (pico)	100	100	150	150
64	Acido nítrico (pico)	100	100	150	150
65	Acido nítrico (pico)	100	100	150	150
66	Acido nítrico (pico)	100	100	150	150
67	Acido nítrico (pico)	100	100	150	150
68	Acido nítrico (pico)	100	100	150	150
69	Acido nítrico (pico)	100	100	150	150
70	Acido nítrico (pico)	100	100	150	150

XII.2 Propiedades de compuestos clorados

COMPUESTO	FORMULA	PESO MOLECULAR	LIMITE DE DETECCION DE CLOR (PPM)			INDEX CLOR	DIFUSIVIDAD EN AIRE CM ² /SEG
			24H	50 %	100 %		
Acetona	CH ₃ COCH ₃	58.5	20	32.5	140.0	1742	0.083
ACIDOS							
Acético	CH ₃ COOH	60.5	0.15	0.26	0.36	35731	0.106
Clorhídrico	HCL	36.47	-	-	10	665	0.128
Fluorhídrico	HF	20.01	-	-	-	685	0.141
ALCOHOLÉS							
Metanol	CH ₃ OH	32.05	4.26	53.3	55.5	2393	0.133
Etanol	CH ₃ CH ₂ OH	46.04	-	-	10	5844	0.074
Propanol	CH ₃ CH ₂ CHOH	60.05	0.07	0.05	0.15	246825	0.035
Isopropanol	(CH ₃) ₂ CHOH	60.08	3.20	7.57	16.2	1529	0.062
n-Butanol	CH ₃ (CH ₂) ₃ OH	74.08	0.2	1.0	2	2639	0.070
Isobutanol	(CH ₃) ₂ CHCH ₂ OH	74.08	0.63	1.8	2.05	5131	0.075
Acetilco	CH ₃ (CH ₂) ₄ OH	56.10	0.12	1.0	1.0	12150	0.063
Acetaldehido	CH ₃ CHO	44.05	1	-	0.21	4.75 x 10 ⁶	0.100
Acniaco	HN ₃	17.03	-	-	46.8	685	0.216
Cloro	Cl ₂	70.91	-	-	0.31	685	0.093
Eter etílico	C ₂ H ₅ OC ₂ H ₅	74.08	-	0.23	-	2.55 x 10 ⁶	0.078
HIDROCARBUROS							
Metano	CH ₄	16.04	-	NO DETECTABLE	-	-	0.158
Etano	C ₂ H ₆	30.07	-	NO DETECTABLE	-	-	0.106
Propano	CH ₃ CH ₂ CH ₃	44.09	-	NO DETECTABLE	-	-	0.068
n-Butano	CH ₃ (CH ₂) ₃ CH ₃	58.12	-	NO DETECTABLE	-	-	-
Gasolina	CH ₃ (CH ₂) ₄ CH ₃	114.22	-	-	-	-	0.051
AROMATICOS							
Benceno	C ₆ H ₆	78.05	1.5	-	4.66	2149	0.077
Tolueno	C ₆ H ₅ CH ₃	92.08	0.17	1.74	1.74	1639	0.071
o-xileno	C ₆ H ₄ (CH ₃) ₂	106.08	0.06	0.27	0.27	2922	0.062
Naftalenos	C ₁₀ H ₈	128.16	-	-	-	-	0.051
TERCIARIOS							
Metil	CH ₃ SH	48.10	-	-	0.0021	685	0.075
Etil	CH ₃ CH ₂ SH	62.11	0.0025	-	0.0010	53 x 10 ⁶	0.074
n-Propil	CH ₃ CH ₂ CH ₂ SH	76.15	0.0016	-	0.024	-	0.071
n-Butil	(CH ₂) ₃ CH ₂ SH	90.14	0.034	-	0.047	-	0.064
t-Butil	C ₄ H ₉ S	90.14	-	-	-	-	0.054
TERCIOS							
Fenol	C ₆ H ₅ OH	94.05	0.012	-	0.047	-	0.066
Cresol	CH ₃ C ₆ H ₄ OH	106.6	2.05	12.5	22.8	-	0.012
Tiofenol	C ₆ H ₄ SH	110.17	-	-	-	-	-
Tiocresol	CH ₃ C ₆ H ₃ SH	124.15	-	-	0.0027	41	0.055
Piridina	C ₅ H ₅ N	102.08	0.007	0.01	7.7	2092	-
Sulfuros							
Hidrogeno	H ₂ S	34.08	-	-	0.0047	685	0.122
Tiofeno	C ₄ H ₄ S	84.14	-	-	0.0047	16.8 x 10 ⁶	-
Propil	(C ₃ H ₇) ₂ S	118.3	0.011	-	0.017	-	0.054

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

**XII.2 PROPIEDADES DE COMPUESTOS
OLOROSOS.**

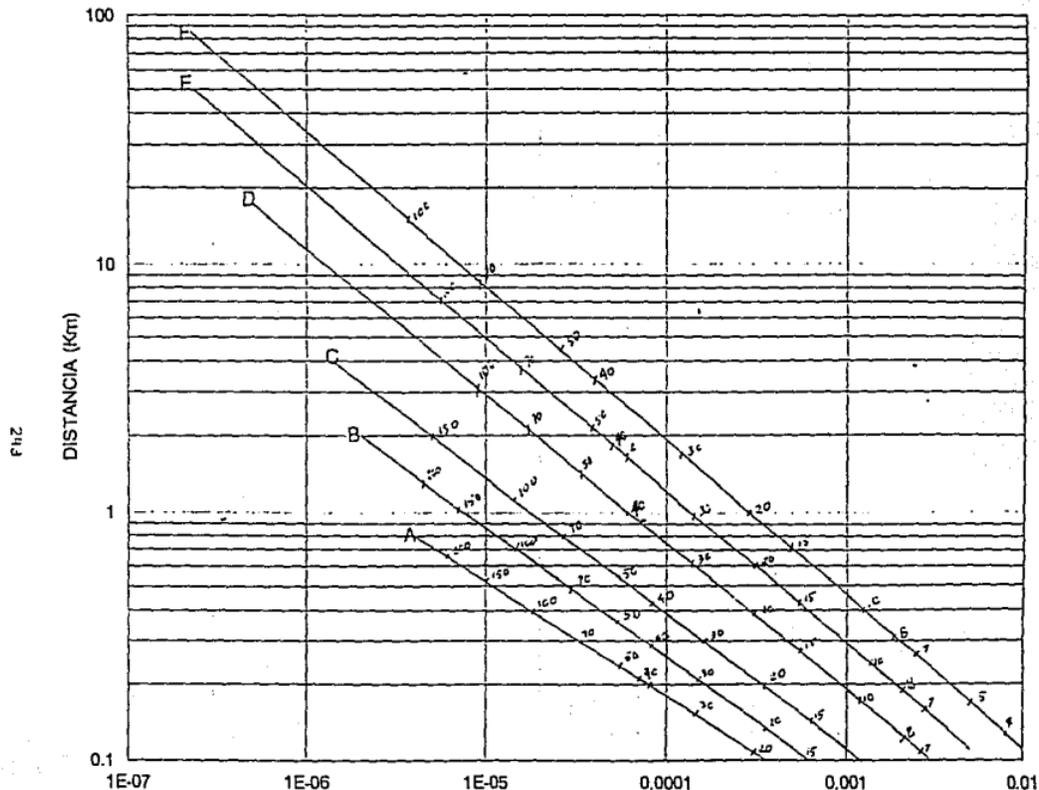
**XII.3 EFECTOS EN LA SALUD DE
COMPUESTOS OLOROSOS.**

XII.3 Efectos en la salud de compuestos odorosos

COMPUESTO	FORMULA	EFECTOS DE INHALACION				EFECTOS INICIALES A LA SALUD
		MOMENTANEOS LOCAL	SINTOM	CRONICOS LOCAL	SINTOM	
Acelona	CH ₃ CCH ₃	2	2	-	1	IRRITANTE ANESTESICO
ACIDOS						
Acetico	CH ₃ COOH	2	U	-	U	IRRITANTE
Clorhidrico	HCL	3	U	-	U	IRRITANTE
Fluorhidrico	HF	3	3	-	2	IRRITANTE
ALCOHOLES						
Metanol	CH ₃ OH	1	2	1	2	MARCOTICO
Etilol	CH ₃ CH ₂ OH	-	2	-	1	LIGERO IRRITANTE
Propanol	CH ₃ CH ₂ CHOH	1	1	U	1	ANESTESICO
Isopropanol	(CH ₃) ₂ CHOH	1	2	U	1	IRRITANTE LOCAL
n-Butanol	CH ₃ (CH ₂) ₃ OH	-	2	U	1	LIGERO IRRITANTE
Isobutanol	(CH ₃) ₂ CHCH ₂ OH	3	2	U	U	LIGERO IRRITANTE
Alilico	CH ₂ (CH ₂) ₁ OH	-	3	U	2	IRRITANTE
Acetaldehido	CH ₃ CHO	3	2	-	2	IRRITANTE, MARCOTICO
Amoniaco	NH ₃	3	U	-	U	IRRITANTE
Cloro	Cl ₂	3	0	U	U	IRRITANTE
Eter etilico	C ₂ H ₅ OC ₂ H ₅	1	2	U	U	ANESTESICO
HIDROCARBUROS						
Metano	CH ₄	0	1	0	1	ASFIXIANTE
Etano	CH ₃ CH ₃	0	2	0	1	ASFIXIANTE
Propano	CH ₃ CH ₂ CH ₃	0	1	0	U	ASFIXIANTE
n-Butano	CH ₃ (CH ₂) ₃ CH ₃	0	2	U	1	ASFIXIANTE, ANESTESICO.
Gasolina	CH ₃ (CH ₂) ₇ CH ₃	1	2	-	1	ASFIXIANTE
AROMATICOS						
Benceno	C ₆ H ₆	1	2	0	3	IRRITANTE
Tolueno	C ₆ H ₅ CH ₃	-	2	-	2	ANESTESICO NAUSEAS
o-xileno	C ₆ H ₄ (CH ₃) ₂	-	1	-	1	ANESTESICO
Naftalenos	C ₁₀ H ₈	1	2	-	1	--
MERCAPTANOS						
Metil	CH ₃ SH	2	2	U	U	VOMITO
Etil	CH ₃ CH ₂ SH	2	2	U	U	VOMITO
n-Propil	CH ₃ CH ₂ CH ₂ SH	2	U	U	2	VOMITO
n-Butil	(CH ₃) ₃ CHSH	2	U	U	2	VOMITO
t-Butil	C ₄ H ₉ S	2	U	U	2	VOMITO
FENOLAS						
Fenol	C ₆ H ₅ OH	3	3	-	2	VOMITO, NEOSIRRITANTE
Cresol	CH ₃ C ₆ H ₄ OH	2	2	-	2	VOMITO, IRRITANTE
Tiofenol	C ₆ H ₄ SH	U	U	U	U	DOLOR DE CABEZA, IRRITANTE
Tiocresol	CH ₃ C ₆ H ₄ SH	-	-	-	-	---
Piridina	C ₅ H ₅ N	1	1	U	2	IRRITANTE
Sulfuros						
Hidrosulfuro	H ₂ S	3	3	-	3	IRRITANTE ASFIXIANTE
Tiofeno	C ₄ H ₄ S	MAS QUE EL BENCENO				DESCONOCIDO
Fosfeno	(C ₂ H ₅) ₂ S	DESCONOCIDO				DESCONOCIDO

0= SIN EFECTO 1=LIGERO 2=MODERADO 3=ALTO U=DESCONOCIDO

**XII.4 PERFILES DE EMISION EN
FUNCION DE LA ESTABILIDAD
DEL VIENTO Y LA ALTURA
EFECTIVA DE EMISION.**



GRAF. A.1 CONCENTRACIONES MAXIMAS Y DISTANCIAS MAXIMAS EN FUNCION DE LA ESTABILIDAD DEL VIENTO Y DE LA ALTURA EFECTIVA DE EMISION

**XII.5 CORRELACIONES PARA EL
CALCULO DE COEFICIENTES DE
DISPERSION.**

XII.3 Correlaciones para el cálculo de coeficientes de dispersión de Contaminantes

CONDICION DE VIENTO A

$$H = H_a + \Delta H + 1.15$$

Si $I > 1000$ DONDE I = Distancia horizontal del quemador
a un punto determinado (m)

Entonces

$$\begin{aligned}\sigma_y &= 0.7362 \cdot I^{0.620} \\ \sigma_z &= 7.2484 \cdot 10^{-6} \cdot I^{2.042}\end{aligned}$$

Si $I < 1000$

$$\begin{aligned}\sigma_y &= 0.251 \cdot I^{0.620} \\ \sigma_z &= 14.1825 \cdot e^{(3.8718 \times 10^{-3} \cdot I)}\end{aligned}$$

CONDICION DE VIENTO B

$$H = H_a + \Delta H + 1.15$$

Si $I < 800$

$$\begin{aligned}\sigma_y &= 0.1854 \cdot I^{0.6607} \\ \sigma_z &= 0.1473 \cdot I^{0.617}\end{aligned}$$

Si $800 < I < 1000$

$$\begin{aligned}\sigma_y &= 0.1854 \cdot I^{0.667} \\ \sigma_z &= 0.00139 \cdot I^{1.643}\end{aligned}$$

Si $I > 1000$

$$\begin{aligned}\sigma_y &= 0.5389 \cdot I^{0.630} \\ \sigma_z &= 0.00139 \cdot I^{1.643}\end{aligned}$$

CONDICION DE VIENTO C

$$II = II_n + \Delta II$$

$$SI \ 1000 < I < 10 \ 000$$

$$\sigma_y = 0.3662 \cdot I^{0.042}$$

$$\sigma_z = 35.428 + 0.04057 \cdot I$$

$$SI \ I > 10 \ 000$$

$$\sigma_y = 0.3662 \cdot I^{0.05111}$$

$$\sigma_z = 1.1868 \cdot I^{0.641}$$

$$SI \ I < 1000$$

$$\sigma_y = 0.1708 \cdot I^{0.049}$$

$$\sigma_z = 0.0971 \cdot I^{0.05110}$$

CONDICION DE VIENTO D

$$II = II_n + \Delta II +$$

$$SI \ I > 1000$$

$$\sigma_y = 0.2269 \cdot I^{0.049}$$

$$\sigma_z = 0.7356 \cdot I^{0.6613}$$

$$SI \ I < 1000$$

$$\sigma_y = 0.09398 \cdot I^{0.049}$$

$$\sigma_z = 0.11851 \cdot I^{0.6128}$$

CONDICION DE VIENTO E

$$II = II_n + \Delta II + 0.85$$

$$SI \ I < 1000$$

$$\sigma_y = 0.07696 \cdot I^{0.02585}$$

$$\sigma_z = 0.1159 \cdot I^{0.7094}$$

$$SI \ I > 3000$$

$$\sigma_y = 0.1697 \cdot I^{0.0450}$$

$$\sigma_z = 41.063 \cdot I_n(1) - 288.012$$

SI $1000 < I < 3000$

$$\sigma_y = 0.1697 \cdot I^{0.0450}$$

$$\sigma_z = 0.1159 \cdot I^{0.7594}$$

CONDICION DE VIENTO F

$$II = III + \Delta II + 0.85$$

SI $I < 1000$

$$\sigma_y = 0.040 \cdot I$$

$$\sigma_z = 0.6922 \cdot I^{0.7211}$$

SI $I > 3000$

$$\sigma_y = 0.1154 \cdot I^{0.0400}$$

$$\sigma_z = -118.48 + 18 \cdot \ln(I)$$

SI $1000 < I < 3000$

$$\sigma_y = 0.1154 \cdot I^{0.0400}$$

$$\sigma_z = 0.0922 \cdot I^{0.7211}$$

**XII.6 CONVERSION DE PARTES POR
MILLON (ppm) EN VOLUMEN A
MICROGRAMOS POR METRO
CUBICO.**

XII.B Conversión de partes por millón (ppm) en volumen a microgramos por metro cúbico

Por muchos años se utilizó y expresó la concentración de contaminantes en partes por millón (PPM), normalmente a una temperatura de 77 °F y 760 mmHg de presión. Con la adopción del sistema métrico, es necesario y usual expresar estas concentraciones como microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$):

Puede utilizarse el siguiente método para convertir de una unidad a otra.

$$\begin{aligned}1 \text{ m}^3 &= 100 \times 100 \times 100 \text{ ml} \\ &= 10^6 \text{ ml}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Entonces } 1 \text{ ml}/\text{m}^3 &= 1 \times 10^{-6} \\ &= 1 \text{ ppm}\end{aligned}$$

El peso de 1 mililitro de cualquier gas es igual al peso molecular del gas en gramos dividido por volumen específico por gramo a la temperatura y presión estándar.

$$\begin{aligned}1 \text{ ml CO}_2 &= \frac{44}{22400} \times \frac{273}{298} \times \frac{760}{760} \\ &= 1.728 \times 10^{-3} \\ &= 1728 \mu\text{g}\end{aligned}$$

$$\text{Entonces } 1 \text{ ppm CO}_2 = 1728 \mu\text{g}$$

$$\text{ppm CO}_2 = \frac{\mu\text{g CO}_2}{\text{m}^3} \times 5.788 \times 10^{-4}$$

Ejemplos de aplicación

$$\text{ppm SO}_2 = \frac{\mu\text{g SO}_2}{\text{m}^3} \times 3.82 \times 10^{-4}$$

$$\text{ppm CO} = \frac{\text{mg CO}}{\text{m}^3} \times 0.873$$

$$\text{ppm O}_3 = \frac{\mu\text{g O}_3}{\text{m}^3} \times 5.10 \times 10^{-4}$$

XII.7 PRONTUARIO DE NORMAS
OFICIALES MEXICANAS EN
MATERIA DE CONTAMINACION
(REFERENTE A QUEMADORES).

XII.7 PRONTUARIO DE NORHAS OFICIALES MEXICANAS NOM AA

CONTAMINACION

(SOLO LAS RELACIONADAS CON LA EMISION DE CONTAMINANTES EN QUEMADORES)

NORMA OFICIAL MEXICANA
NOM: AA-1-72 NUMERO INDICATIVO DE LA NORMA Y DE GRUPO
AÑO DE VEGENCIA DE LA NORMA

- NOM : AA-1-72** *Método de Prueba para determinar la Densidad aparente visual del humo, empleando la carta de Ringelman (fuentes estacionarias).*
Especifica el método para determinar la densidad aparente visual del humo mediante la carta de Ringelmann. Se aplica exclusivamente a los humos producidos por combustión en fuentes estacionarias, y que varían del transparente a diversos tonos de gris hasta el negro.
- NOM : AA-10-74** *Determinación de la Emisión de Partículas Sólidas contenidas en los Gases que se descargan por un conducto.*
Establece el método para determinar la emisión de partículas sólidas contenidas en los gases que se descargan de fuentes estacionarias por captación en medio filtrante.
- NOM : AA-23-86** *Protección al Ambiente - Contaminación Atmosférica - Terminología, Cancela NOM - AA-23-75*
Establece la nomenclatura para uniformar la terminología y conceptos utilizados en contaminación atmosférica.
- NOM : AA-35-76** *Determinación de Dióxido de Carbono, Monóxido de Carbono y Oxígeno en los gases de combustión*
Establece el método para determinar por absorción las proporciones de Dióxido de Carbono, Monóxido de Carbono y Oxígeno en los gases de combustión.

NOM : AA-40-76

Clasificación de Ruidos

Establece una clasificación de los sonidos que por su indeseabilidad son considerados como Ruidos, de acuerdo a su presentación temporal y conforme a su estructura de componente. Esta clasificación es empleada para establecer una diferenciación de las diversas formas de energía acústica, consideradas como ruido, que al ser emitidas por una fuente fija o móvil causan contaminación del ambiente.

NOM : AA-55-79

Contaminación Atmosférica - Fuentes Fijas - Determinación de Dióxido de Azufre, Trióxido de Azufre y Neblinas de Acido Sulfúrico en los gases que fluyen por un conducto.

Establece el procedimiento para la determinación de la concentración y de la emisión de dióxido de azufre en gases que fluyen a través de un conducto.

NOM : AA-56-80

Contaminación Atmosférica - Fuentes Fijas - Determinación de Dióxido de Azufre, Trióxido de Azufre y Neblinas de Acido Sulfúrico en los gases que fluyen por un conducto.

Establece el procedimiento para la determinación de la concentración y de la emisión de dióxido de azufre, Trióxido de Azufre y Neblinas de Acido Sulfúrico en gases que fluyen a través de un conducto.

Es aplicable para los casos en que se presenten estos tres componentes.

NOM : AA-69-80

Contaminación atmosférica - Fuentes Fijas - Determinación de Acido Sulfhídrico en gases que fluyen por un conducto.

Establece el procedimiento para la determinación de la emisión de ácido sulfhídrico en los gases que fluyen por un conducto.

NOM : AA-107-88

Calidad del Aire - Estimación de la altura Efectiva de Chimenea y de la dispersión de Contaminantes - Método de prueba.

Establece los parámetros necesarios para una ecuación semiempírica, se sustituyen en ella y por último se agrega a la altura física de la chimenea el ascenso de la pluma calculado. Posteriormente se estima la dispersión de los contaminantes a nivel del suelo, para determinadas condiciones de estabilidad.

**XII.8 PRONTUARIO DE NORMAS Y
DISPOSICIONES LEGALES
DERIVADAS DE LA REGLAMENTA-
CION DE LA LEY GENERAL DEL
EQUILIBRIO ECOLOGICO Y LA
PROTECCION AL AMBIENTE.**

