



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN**



**" QUEMADORES BASADOS
EN EL EFECTO COANDA "**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO QUIMICO**

P R E S E N T A N :

**LETICIA ZUÑIGA GOMEZ
JOSE ALFREDO PEREZ BALDERRABANO**

ASESOR:

M. EN_C. RICARDO P. HERNANDEZ GARCIA

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEX.

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.

" QUEMADORES BASADOS
EN EL EFECTO COANDA "

OBJETIVO:

Proponer el uso de los Quemadores Coanda como una opción para minimizar los problemas de contaminación y operación que provoca la combustión incompleta de grandes volúmenes de gas.

INDICE.

- 1.00) Introducción.
- 2.00) Quemadores.
- 2.10) Combustión.
- 2.20) Factores Asociados a la Combustión.
 - 1) Humo.
 - 2) Ruido
 - 3) Luminosidad.
 - 4) Radiación Térmica.
- 2.30) Normas de Contaminación Ambiental.
- 2.40) Clasificación de los Quemadores de Seguridad.
 - Clasificación General.
 - Clasificación de Acuerdo a Aspectos de Combustión.
- 2.50) Descripción de Quemadores (Clasificación general.)
 - Quemador Sujetado por Cables.
 - Quemador Autosoportado.
 - Quemador con Estructura de Torre "Derrick".
 - Quemador de Fosa.
 - Quemador de Piso "Ground Flare".
 - Quemador "Multijet".
 - Quemador de Fosa con Humo.
- 2.60) Descripción de Quemadores (Basada en aspectos de combustión)
 - Quemadores de Flama Verticales o Elevados.
 - Quemadores de Flama Horizontales o de Huecos.
 - Quemadores de Mar.
- 2.70) Accesorios para un Quemador.
 - Pilotos y Sistemas de Ignición.
 - Separador de Condensados.
 - Boquillas.
 - Sellos de Gas para Quemador Elevado.
 - Sello líquido.

- 3.00) Quemadores Coanda
- 3.10) Antecedentes.
- 3.20) Principio Coanda.
- 3.30) Quemadores Coanda
- 3.31) Tipos de Quemadores Coanda.
 - a) Quemador Coanda tipo Indair.
 - b) Quemador Coanda tipo Mardair.
 - c) Quemador Coanda tipo Stedair.
- 3.40) Experiencias con los Quemadores Coanda.
- 3.50) Características Básicas de los Quemadores Indair.
- 3.51) Combustión sin Humo.
- 3.52) Ahorro y Quemado de Combustible.
- 3.53) Materiales de Construcción.
- 3.54) Quemado de Gases Tóxicos.
- 3.55) Diseños Básicos
 - a) Entrada fija de Combustible.
 - b) Entrada Ajustable de Combustible.
 - c) Entrada Variable de Combustible.
- 3.60) Quemadores Coanda tipo Mardair.
- 3.70) Quemadores Mardair Múltiples.
- 3.80) Optimización de los Quemadores Coanda.
- 4.00) Planteamiento de las Ecuaciones que Explican la Combustión en los Quemadores Coanda tipo Mardair.
 - a) Ecuación de Continuidad.
 - b) Ecuación de Movimiento.
 - c) Ecuación de Estado.
 - d) Ecuaciones de Transferencia de Masa.
 - e) Condiciones Frontera Respecto a las Ecuaciones de Velocidad y Balance de Materia.
- 5.00) Comparación Entre un Quemador Elevado Convencional y los Quemadores Coanda.
- 6.00) Conclusiones.
- 7.00) Bibliografía.

CAPITULO I

INTRODUCCION

La seguridad es desde el punto de vista Técnico, Económico y Social el factor más importante a cuidar dentro de toda industria, ya que de ella dependen tanto la subsistencia de la vida así como de la planta misma, es por ello que los sistemas de desfogue juegan un papel preponderante dentro de un proceso y deben ser cuidadosamente especificados para estar totalmente seguros de su adecuada funcionalidad.

El sistema de desfogue es un elemento de notable importancia para la seguridad de las plantas industriales que manejan grandes cantidades de sustancias flamables y tóxicas , pues en las fallas inadvertidas de operación normal que originan condiciones de presión excesiva en los equipos de proceso, de no contar con los sistemas adecuados de protección, se pueden provocar grandes explosiones o incendios.

Para el aprovechamiento óptimo del gas natural como fuente de energía, en México se requieren de grandes estaciones de compresión, de grandes plantas de endulzamiento y de extensas redes de distribución; de las cuales se debe garantizar la operación segura de estas instalaciones, contando con los sistemas adecuados de protección, sin embargo, ante al rápido desarrollo del país, no se ha dado la debida importancia a los sistemas de quemadores, y aunque los ya instalados han cumplido eficazmente en las fallas que se han presentado! es necesario considerarlos nuevamente, para que con un mejor diseño operen con mayor grado de seguridad y reduzcan al mínimo la contaminación ambiental.

En otros tiempos los vapores de hidrocarburos producidos durante la operación de un proceso eran venteados a la atmósfera

sin quemarse. Esto ocasionaba dos problemas, la seguridad y la polución del medio ambiente. Un peligro real para el personal de la planta se presentaba siempre, debido a la posibilidad de acumulación de los vapores con una concentración suficiente para producir la ignición de los mismos.

En algunos casos el fuego resultaba con consecuencias devastadoras para el personal de operación y para la planta misma.

Los problemas ambientales no se atendían anteriormente con tanta importancia como hoy en día. No obstante que estos representaban y representan un problema, el cual necesita ser resuelto.

Estas razones impulsaron a proponer, diseñar e instalar los sistemas de desfogue en las plantas de proceso.

Un sistema de desfogue libera energías de presión a través de dispositivos instalados especialmente para ello por medio de tuberías que descargan la materia causante de la sobre-presión en lugares remotos y seguros, lejos de los equipos y del personal que se encuentre laborando en los alrededores de la planta.

Un elemento dentro del sistema de desfogue lo constituye el quemador.

Un quemador es un equipo especialmente diseñado para quemar el gas sobrante o de desperdicio originado en refinerías, plantas químicas, terminales de almacenamiento, gaseoductos, y en diversos tipos de producción durante operación normal o de emergencia.

Un quemador es una unidad de disposición de gas de desperdicio utilizada en un proceso a altas temperaturas.

Un sistema de quemadores debe funcionar con gran flexibilidad, es decir, debe operar con un amplio rango de flujos de gas, de diversas composiciones, y a condiciones variables de presión y de temperatura, además, que deben operar aunque las condiciones del clima sean adversas.

Debido a los requerimientos de seguridad y control de la contaminación ambiental, los sistemas de alta tecnología se han vuelto una parte medular del sistema de proceso; debido a lo cual se han llevado a cabo programas de desarrollo e investigación para producir una nueva generación de quemadores y prácticas relacionadas con la seguridad de estos requerimientos.

El uso de estos nuevos sistemas han logrado el alcance de los objetivos planteados.

A esta nueva generación pertenece el "Quemador Coanda" generado a principios de 1967 como parte de un programa, para explorar nuevos conceptos en quemadores, así se concibió la idea de usar el *EFEECTO COANDA* como un medio de entrada de aire dentro del suministro de gas premezclado a quemadores.

CAPITULO II

QUEMADORES

2.00 QUEMADORES.

Definición: Un quemador de seguridad es un dispositivo diseñado para quemar el gas sobrante o de desperdicio que se origina en plantas de proceso, utilizando un proceso de oxidación a altas temperaturas.

2.10 COMBUSTION

La combustión constituye la forma más segura de disponer de las sustancias flamables y tóxicas, ya que estas sustancias se desfogan directamente a la atmósfera, causando problemas como intoxicaciones, explosiones, incendios, etc.

La combustión procede de acuerdo a una reacción química en la que se combina rápidamente el oxígeno del aire (comburente), con los elementos del combustible (hidrógeno, azufre y carbono).

La combustión puede presentarse por medio de dos mecanismos:

- 1) Premezclado de aire-combustible antes de llegar a la flama.
- 2) El mezclado ocurre cuando las corrientes de combustible y aire llegan a la flama.

En el primer caso la combustión se presenta vía un proceso de hidroxilación debido, a que al efectuar el mezclado de las corrientes de combustible y aire se propicia la aparición de compuestos hidroxilados; ocasionando que la combustión sea más limpia puesto que no hay carbón libre.

En el segundo caso la flama precalienta al gas en ausencia de aire, desencadenando un proceso de descomposición térmica del gas, generando moléculas de hidrógeno, hidrocarburos insaturados y carbón. Las moléculas de hidrógeno no causan mayor problema, se queman en un espectro de flama no visible, sin embargo, el problema se presenta con las partículas de carbón, debido a que se tornan incandescentes y producen una flama amarilla luminosa, además de la nube de hollín, que es la fuente principal de contaminación del quemador.

El oxígeno se suministra como componente del aire y debe proveerse en cantidades superiores a la estequiométrica para asegurar una buena combustión; además se deben considerar otros factores que van ligados al proceso de combustión tales como:

- a) Tiempo.
- b) Temperatura.
- c) Turbulencia.

Cada combustible tiene una velocidad de propagación, que depende fundamentalmente de la proporción de oxígeno presente y de la complejidad de su molécula. Los límites de flamabilidad son una propiedad característica de cada combustible, estos límites proporcionan el rango en que la mezcla aire-combustible es flamable, y es importante tenerlos en cuenta debido a que cuando la concentración de la mezcla disminuye hasta el límite pobre de flamabilidad ya no es posible efectuar el proceso de combustión.

En la tabla 9-19n del Perry J.H.; "Chemical Engineer's Hand Book" 4 Edition, pag 9-32 se presentan los límites de flamabilidad de algunos combustibles a temperatura y presión atmosférica. (15)

La ignición de la mezcla flamable se logra mediante chispas eléctricas, superficies calientes u otro tipo de flama.

Después de la ignición debe mantenerse una flama estable, esto se logra manteniendo un equilibrio entre la velocidad de suministro del gas combustible-oxígeno y la velocidad de propagación, para evitar el apagado ésta última debe ser menor. En caso contrario se debe contar con dispositivos retenedores de flama.

2.20 FACTORES ASOCIADOS A LA COMBUSTION

La combustión en los quemadores tiene asociada los factores siguientes:

- 1) Humo.
- 2) Ruido.
- 3) Luminosidad.
- 4) Radiación Térmica.

1) Humo

Los productos de una combustión completa de una corriente de hidrocarburos son CO_2 y vapor de agua, requiriendo aire en exceso, esta cantidad de aire se incrementa cuanto mayor sea el peso molecular del combustible, no es difícil deducir que si no se proporciona el aire suficiente la combustión se torna incompleta y en consecuencia se genera la formación de humo a causa de las partículas de carbono que no fueron quemadas.

En los apartados anteriores se señaló las dos formas en las cuales puede proceder la combustión, consideramos que la más efectiva es la que presenta un premezclado de las corrientes de gas-combustible y aire; de acuerdo con esto, hay que clasificar

a las dos corrientes de aire que se necesitan durante el proceso de combustión: aire primario, es el aire suministrado a la flama como aire para mezclado con la corriente de gas combustible, aire secundario es el aire en exceso que es inspirado por la misma corriente de premezclado dentro de la flama.

Cuando hay suficiente aire primario, la reacción de combustión conlleva a la formación de compuestos con radical hidróxilo (OH), y estos dan paso a la formación de aldehídos que posteriormente se oxidan para formar bióxido de carbono y vapor de agua, no dando lugar a la formación de carbón o de humo. en caso contrario los gases que llegan a la flama se precalientan causando reacciones de craqueo térmico o polimerización, generando hidrocarburos insaturados que debido a su estructura compleja no pueden quemarse en su totalidad, formando como resultado partículas incandescentes dentro de la flama, en consecuencia se tiene una flama muy luminosa. Cuando estas partículas incandescentes escapan de la flama, se enfrían generando humo y hollín.

En los procesos de combustión el aire primario debe ser suministrado por corrientes de gas de alta presión, ya que este aire será el que se mezcle con la corriente de gas combustible y la alta presión favorecerá la mezcla de estos.

Cuando la corriente de gas combustible contiene ácido sulfhídrico y otros compuestos volátiles de azufre, tales como mercaptanos, se propicia la formación de óxidos de azufre que con la humedad ambiental resultan ser extremadamente corrosivos; en tales casos se dimensiona el quemador considerando que los gases tóxicos deben tener una buena dispersión en la atmósfera de manera que su concentración a nivel de piso sea menor que la concentración dañina para la vida. (16)

2) Ruido.

El ruido que emiten los quemadores en funcionamiento, tiene dos fuentes de origen:

- a) El ruido propio de la combustión.
- b) El ruido de la corriente de gas fluyendo.

La estimación del ruido proveniente de un quemador se estima por:

$$L_p = L_A - 20.0 \log \frac{(R_p)}{(R_A)}$$

donde:

L_p : Nivel de ruido en el punto P, que es el punto al que se desea determinar el nivel de ruido en decibeles.

L_A : Nivel de ruido en el punto A, en decibeles.

R_p : Distancia de P al quemador, en metros.

R_A : Distancia de A al quemador, tomando como valor de referencia una distancia de 100m.

Los quemadores se dimensionan teniendo en cuenta un límite de 100 decibeles de ruido a nivel de piso.(9)

3) Luminosidad.

Los hidrocarburos que son sometidos a combustión completa con aire suficiente presentan una flama azul, poco luminosa. Cuando el aire es insuficiente, la flama se torna luminosa además de resultar humo desprendido.

La luminosidad de la flama se debe a la presencia de

partículas incandescentes de carbón, que dan una coloración anaranjada, luminosa y cuando escapan de la flama se enfrían formando humo y hollín.

4) Radiación térmica.

Si se efectúa una combustión de hidrocarburos en un medio abierto sólo un 40% del calor se concentra en la flama y participa en la combustión, el 60% restante se pierde por convección al aire de los alrededores.

La emisividad de la flama es difícil de estimar, sin embargo, se sabe que disminuye para flamas luminosas y cortas, y que el humo funciona como un efecto protector que impide el paso de la radiación.

Se cuenta con dos modelos para estimar la radiación proveniente de la flama de un quemador.

- 1) Considerando el centro de la flama como un punto fuente de radiación ("Point Source Model").(16)
- 2) Considerando que la radiación proviene de toda superficie exterior a la flama.(17)

Sin embargo, ninguno de los dos modelos ha demostrado ser el más apropiado y ambos están sujetos a discusiones.

En el API-RP-521 se establecen criterios de radiación permisible en diferentes puntos cercanos al quemador.

RADIACION	LOCALIZACION
BTU/hr ft ²	
750	En el límite exterior de la planta (límite de batería).
1500	Areas donde hay personal sin protección, que permanezca pocos minutos en tanto que el quemador este trabajando a su máxima capacidad.
2000	Areas donde hay personal sin protección, que deba permanecer máximo un minuto para acciones de emergencia.
3000	<p>Valor máximo para diseño a cualquier localidad donde el personal tenga acceso (nivel de piso, plataformas de servicio).</p> <p>En torres y estructuras elevadas, las escaleras deberan colocarse en el lado opuesto al quemador, como protección a la radiación. (9)</p>

2.30 NORMAS RESPECTO A CONTAMINACION AMBIENTAL.

La contaminación ambiental es un grave problema mundial por lo que los países han generado normas para solucionarlo. Se debe reducir el impacto ambiental por efluentes gaseosos, para no causar daños y molestias a la vida y no exista una degradación del medio ambiente.

En México rige la "Ley federal de protección al ambiente" publicada en enero de 1988.

La ley general del Equilibrio Ecológico y la Protección al ambiente provee que todas las emisiones a la atmósfera deberán ajustarse a las normas técnicas ecológicas en las que se determinan los niveles máximos permisibles de emisión por contaminante o por fuente de contaminación, a fin de asegurar una cantidad de aire satisfactoria para el bienestar de la población y para la conservación del equilibrio ecológico. (10,11)

La norma técnica ecológica NTECCAT-008-88 establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas, monóxido de carbono, dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno, provenientes de procesos de combustión en fuentes fijas que utilicen únicamente gas natural como combustible, cuando los gases de combustión no estén en contacto directo con los materiales de proceso.

Siendo los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas, los siguientes:

CONTAMINANTES	NIVELES MAXIMOS PERMISIBLES DE EMISION EN Kg/10 ⁶ m ³	
	Oxidos de nitrógeno.....	2250
Partículas.....	100	
Monóxido de Carbono.....	500 a 640	
Bióxido de azufre.....	10	
Oxidos de nitrógeno.....	2250 a 9000	

La norma técnica ecológica NTE-CCAT-007/88 establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas contaminantes, provenientes de procesos de combustión

en fuentes fijas, que utilicen únicamente combustóleo como combustible, cuando los gases de combustión no estén en contacto directo con los materiales de proceso.

Siendo los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas, los siguientes:

CONTAMINANTES	NIVELES MAXIMOS PERMISIBLES DE EMISION	
	Zonas críticas	Resto del país
	Kg/m ³	Kg/m ³
Partículas	4.240	6.740
Monóxido de carbono.	0.600	0.660
Bióxido de carbono.	57.000	95.000
Oxidos de nitrógeno	6.600 a 8.000	6.600 a 8.000

La norma técnica NTE-CCAT-005/88 establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas contaminantes, provenientes de procesos de combustión en fuentes fijas, que utilicen únicamente combustible, cuando los gases de combustión no estén en contacto directo con los materiales de proceso, son los siguientes:

CONTAMINANTES	NIVELES MÁXIMOS PERMISIBLES DE EMISION	
	Zonas críticas Kg/m ²	Resto del país Kg/m ³
Partículas	0.260	0.300
Monóxido de carbono	0.600	0.665
Dióxido de carbono	17.000	34.000
Oxido de nitrógeno	2.700	3.000

En esta ley se presentan restricciones por la emisión de humos y polvos, y de la protección del ambiente por efectos de la energía térmica y ruidos entre otros. (14)

Las emisión de humo y polvo son medidas mediante la escala conocida como " Carta de humo de Ringelmann ", la cual se aplica con diferente criterio según sea la fuente emisora, pero en promedio el número más común permitido es de dos. Estas medidas son casi nulas ya que no mencionan o califican contaminantes tóxicos específicos más dañinos que la generalidad de humos y polvos. (18)

2.40 CLASIFICACION DE LOS QUEMADORES DE SEGURIDAD.

En esta sección se presenta la clasificación y la descripción de los quemadores de seguridad más usados en la industria petroquímica.

Se llaman Quemadores de Seguridad con objeto de diferenciarlos de los quemadores para hornos que tienen una función distinta, no obstante se les conoce genéricamente como Quemadores de Campo.

CLASIFICACION GENERAL

	SUJETADO POR CABLES	CON HUMO O SIN HUMO.
QUEMADOR ELEVADO	AUTOSOPORTADO.	SIN HUMO.
QUEMADOR DE SEGURIDAD	SOPORTADO POR UNA ESTRUCTURA DE TORRE.	(SEGUN EL TIPO DE BOQUILLA)
	QUEMADOR DE PISO " GROUND FLARE " .	SIN HUMO.
	QUEMADOR TIPO "MULTIJET " .	
QUEMADOR DE FOSA	QUEMADOR DE FOSA CON HUMO. (PARA MEZCLAS DE GAS CON PEQUEÑAS CANTIDADES DE LIQUIDOS CONDENSADOS).	

CLASIFICACION DE ACUERDO A ASPECTOS DE COMBUSTION

- 1) Quemadores Elevados.
- 2) Quemadores de flama sin humo.
- 3) Quemadores de flama

Cada uno de estos quemadores son construídos dentro de las siguientes configuraciones:

2.50 DESCRIPCION DE QUEMADORES ELEVADOS (CLASIFICACION GENERAL) QUEMADOR SUJETADO POR CABLES.

Este sistema ha sido construído con alturas hasta de 600 ft., es necesario para quemadores de emergencia con diámetros muy grandes. Requiere de cables sujetadores en dos o tres niveles conectados a anclajes o pesos de concreto enterrados, y por la disposición de estos cables ocupa un mayor espacio, es un área cuyo diámetro es proporcional a la altura del quemador. Para alturas mayores de 200 ft. es el tipo de estructura más económica.

(Ver fig 1).

QUEMADOR AUTOSOPORTADO.

Es el sistema en el que la tubería ascendente es el soporte estructural del quemador. Es usado para alturas hasta de 250 ft. o menores, para los cuales es el tipo más económico. Un quemador autosoportado de 250 ft. de altura requiere sólomente de una base que ocupa un área cuyo diámetro es de 12 ft. La fuerza de los vientos puede hacer oscilar la estructura, para disminuir esto, se usan diferentes diámetros a lo largo de la tubería ascendente, y se le instalan deflectores de viento. Son de fácil crección y requieren del mínimo espacio.

(Ver fig 2).

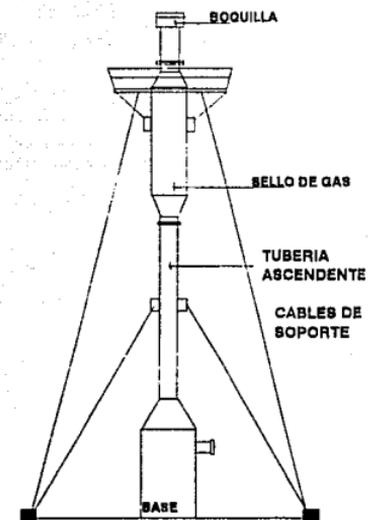


FIG. 1 QUEMADOR SUJETADO POR CABLES

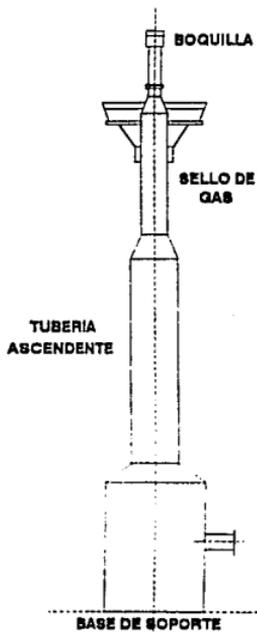


FIG. 2 QUEMADOR AUTOSOPORTADO

QUEMADOR CON ESTRUCTURA DE TORRE " DERRICK " .

Este tipo es ideal para instalaciones dentro de la planta, donde es necesario una gran elevación para minimizar la radiación y donde el espacio libre entre otros equipos es limitado. Se han construido con una altura hasta de 400 ft. y requiere de un área en la base con diámetro aproximado de 36 ft.

(Ver fig 3).

Existe un cuarto tipo de quemador elevado, el " Tripode ", que es una unidad portátil usualmente utilizada para pruebas y es de 20 a 30 ft. de altura.

QUEMADOR DE FOSA.

Ante numerosas demandas públicas que tuvieron las refinerías debido al humo, ruido y luminosidad de los quemadores elevados, se desarrollaron los quemadores de fosa, en que se adaptó una protección contra la luminosidad y el ruido y se puede controlar el humo eficientemente.

Existen tres tipos de estos quemadores:

- 1.- Quemador de piso "Ground Flare "
- 2.- Quemador tipo Multijet. (Sin humo).
- 3.- Quemador de fosa con humo.

Debido al alto costo y a las limitaciones de capacidad de un quemador de fosa, normalmente se usa en conjunto con un quemador elevado. Este arreglo permite que para la operación continua normal y ligeras emergencias se utilicen ambos quemadores.

1.- QUEMADOR DE PISO " GROUND FLARE ".

En este tipo de quemador, la combustión tiene lugar a nivel de piso dentro de una cámara de metal, recubierta por material refractario, con accesorios para el suministro de supresores de humo, que pueden ser por inyección de vapor, agua o aire.

Ocupan gran espacio para la capacidad que pueden manejar pero son muy eficientes.

(Ver fig 4).

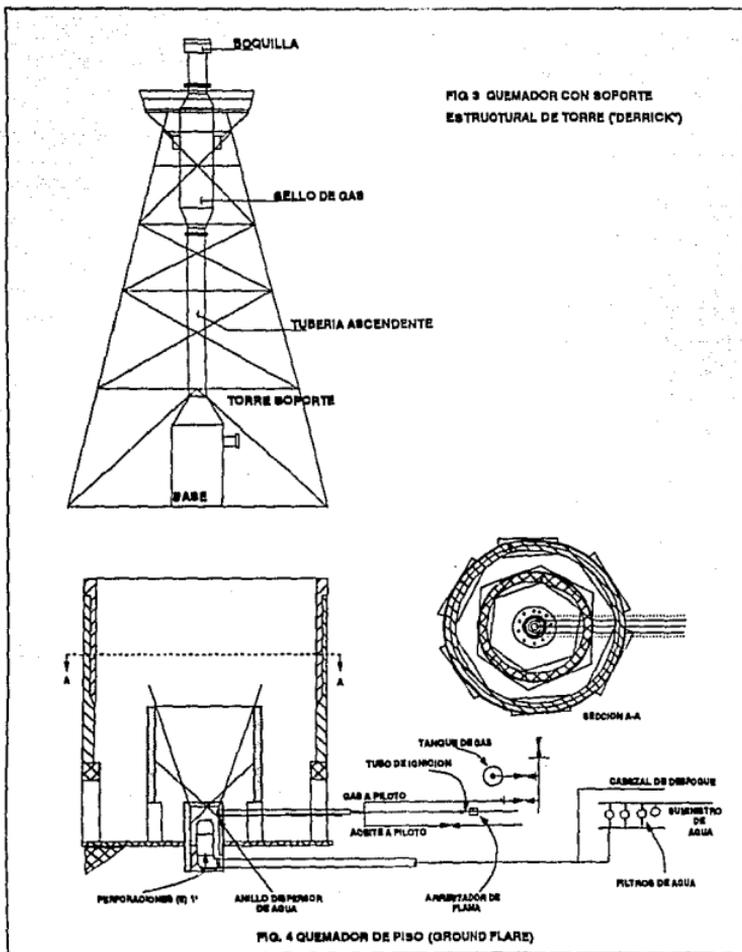
2.- QUEMADOR MULTIJET.

Es un quemador para gas de alta presión (mayor a 5 psig.) con una operación sin problemas de humo y luminosidad.

Consiste en una pared de material refractario ligeramente elevada del piso y contiene a nivel de piso varias hileras de boquillas de quemado.

Son una serie de líneas paralelas horizontales o " cabezales" (de material refractario) que cruzan el fondo de la estructura, cada uno contiene una serie de pequeños tubos verticales por donde se descarga el gas a través de la boquilla. Unos rodillos sólidos de material refractario están montados arriba de las boquillas en forma paralela a los cabezales.

Los cabezales inciden contra este rodillo que funciona como "Retenedor de Flama" donde empieza la flama. Operan mediante un control de presión, es decir, para poco flujo de gas opera solamente el primer cabezal; tiene una toma de señal de presión que va a un control que acciona una válvula controladora de



presión para abrir y que opere la segunda etapa, ésta tiene otro sensor que accionará la siguiente etapa.

Tiene un piloto para cada cabeza, que encendiendo la primera boquilla, ésta prende a la siguiente y así de manera progresiva. (Ver fig 5).

3.- OPERADOR DE FOSA CON HUMO.

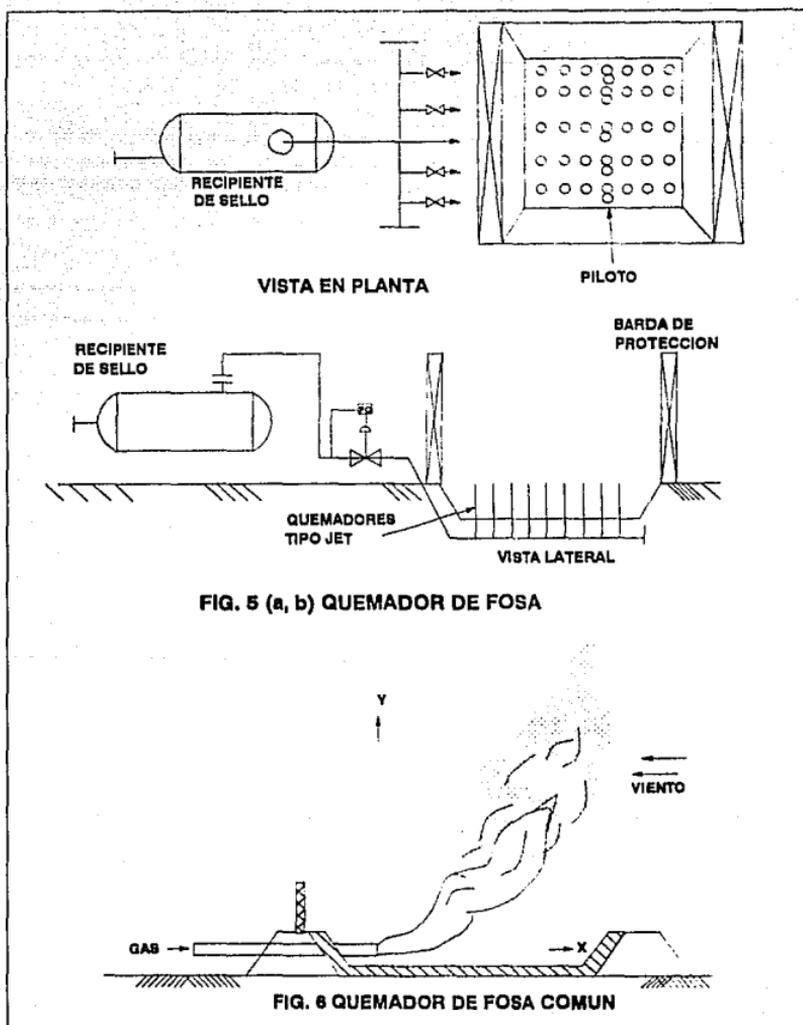
Una adaptación para quemador de fosa consiste en colocar una boquilla de " tubo " en posición horizontal dentro de una fosa de material refractario; en estas fosas se puede quemar mezclas de líquido y gas. (16)
(Ver fig 6).

2.60 DESCRIPCION DE QUEMADORES (BASADOS EN ASPECTOS DE COMBUSTION)

a) Quemadores de flama veticales o elevados.

Estos son usados para hidrocarburos o corrientes de vapor que no producen humo, tales como metano, hidrógeno, monóxido de carbono, gas sobre coque y amoniaco. El amoniaco es un caso muy especial, ya que se quema con una baja eficiencia y puede producir una pluma blanca si el contenido de humedad en la atmósfera es alto.

Este tipo de quemadores pueden quemar hidrocarburos pesados con la desventaja de que favorece una cantidad considerable de humo, sin embargo, tales casos se justifican sólomente en emergencias cortas.



Los quemadores que no producen humo son utilizados para:

- Plataformas de mar
- Pruebas de pared.
- Terminales de gas licuado natural/gas licuado de petróleo.
- Plantas de acero.
- Terminales de almacenamiento de amoníaco.
- Digestores de aguas sucias.
- Grandes unidades de refrigeración.

b) Quemadores de flama horizontales o de huecos.

Quemadores sin humo.

Los quemadores de flama sin humo son requeridos para una disposición limpia de las corrientes de hidrocarburos, tales como:

El grupo de parafinas por arriba del metano y para todos los demás grupos de oleofinas y aromáticos.

Estos quemadores utilizan vapor, gas combustible a alta presión, atomización de agua, un soplador de aire, o una acción de remolino a alta velocidad para producir una operación sin humo y una mejora en la combustión.

Los requerimientos de flujo del medio asistente son bajos debido a su alta velocidad.

Todos los quemadores de flama sin humo utilizan fuentes de momentum externo para producir el mezclado de gas/aire y la turbulencia.

El vapor, gas combustible y flamas de remolino obtienen los niveles de momentum de altas velocidades de las corrientes de chorro usadas para producir la operación sin humo.

Los valores típicos de vapor o de gas combustible son de 0.15 a 0.50 libras del medio asistente por libra de flujo de hidrocarburo. Aunque al agua de atomización y el aire de soplado producen niveles de momentum completamente diferentes. Para estos quemadores no se utilizan altas velocidades, estos utilizan velocidades con intervalos de flujo-masa más grandes. Para quemadores con agua rociada, las relaciones de agua típicas son de 1 a 5 libras de agua por libra de hidrocarburo.

Estas relaciones son altamente dependientes del método de inyección también tiene un efecto muy grande sobre los quemadores con agua rociada y éste puede reducir grandemente su efectividad.

Los quemadores con aire soplado usan aproximadamente de 3 a 7 libras de aire por libra de hidrocarburo para producir una operación sin humo. Un viento artificial fuerte del soplador mantendrá la flama erguida contra cualquier fuerza natural del viento.

APLICACIONES.

- En refinerías.
- Plantas químicas
- Almacenamiento bajo tierra
- Producción de acero.
- Gaseoductos.
- Plataformas mar abierto.
- Plantas de gas
- Tanques de almacenamiento.

c) Quemadores de mar.

Quemadores de flama o a fuego.

Estos quemadores son una forma de incinerador elevado para usarlos en corrientes de desecho de baja capacidad calorífica, tales como restos de gas; siempre y cuando el contenido de calor corriente de desperdicio esté por abajo de 150 BTU/ft³.

El diseño básico de un quemador a fuego depende de la cantidad requerida y de la presión disponible del gas de asistencia.

La radiación térmica de los quemadores a fuego es completamente diferente de la de los quemadores de hidrocarburos convencionales debido al muy bajo contenido calorífico y a la temperatura de la flama. La longitud de la flama es aproximadamente un 10% más corta que un quemador de hidrocarburos convencionales, mientras que la emisividad es de un 20% a un 40% más baja.

APLICACIONES.

- Gas residual.
- Gas sobre carbón.
- Corrientes de bajos BTU's y corrientes de gas ácido o de azufre. (15)

2.70 ACCESORIOS PARA UN QUEMADOR.

Los accesorios más importantes de un quemador son:

- Pilotos y sistema de ignición.
- Separador de condensados (opcional).
- Boquilla.
- Sello de gas para quemador elevado (opcional).
- Sello líquido.
- Tubería ascendente de quemador elevado.
- Plaraformas y escaleras de quemador elevado.
- Soporte estructural del quemador elevado.

PILOTOS Y SISTEMA DE IGNICION.

El sistema de ignición debe contar con los pilotos necesarios y debe ser seguro y confiable, para mantener la flama continuamente en la boquilla del quemador, y que en cualquier momento que se pierda la flama haya un encendido inmediato de los pilotos ya sea una acción automática o manual.

Los pilotos son normalmente alimentados con gas natural y están separados 120 grados en la circunferencia de la boquilla, de manera que el efecto del viento sea mínimo y hasta en las condiciones adversas por velocidad del viento alta o en la operación anormal se mantengan encendidos los pilotos y el quemador.

La disponibilidad del gas natural para pilotos puede contar con un control automático o bien las señales para que en caso de falla en la fuente primaria, se pueda utilizar una fuente alternativa, como por ejemplo de tanques de emergencia.

Los pilotos son encendidos remotamente desde un tablero en que se genera un frente de flama, que consta con el suministro de gas combustible y de aire comprimido que se mezclan y se enciende por la chispa de una bujía, la flama viaja a lo largo de la línea hasta encender el piloto.

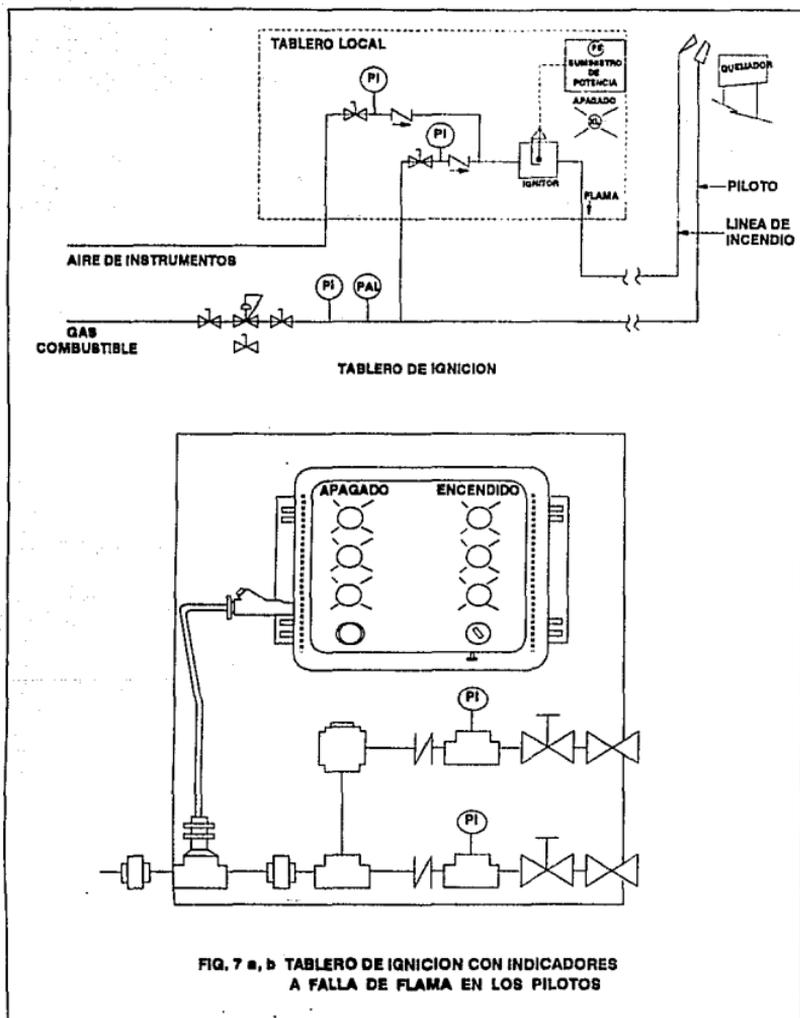
Los tableros de ignición se colocan alejados del quemador, donde la radiación no exceda de 1500 BTU/hr.ft². Pueden ser para operación manual o automática en cuanto a la reignición de los pilotos cuando se han apagado. Estos sistemas de ignición constan de válvulas solenoides para controlar el aire y el gas combustible, y además un sistema de control en base a termopares contactores instalados en los pilotos, y unas luces indicadoras de falla. (13)

(ver fig 7 a,b).

SEPARADOR DE CONDENSADOS.

Cuando una válvula de seguridad abre a una presión elevada, se producen enfriamientos debido a la expansión que sucede en la válvula, y es frecuente que la temperatura descienda por debajo del punto de rocío del gas elevado, produciéndose condensación. Los líquidos de la línea de desfogue causan problemas de operación en el quemador, pues hasta una pequeña cantidad de líquido ocasiona problemas de humo, luminiscencia y además las gotas encendidas caen al suelo provocando una "lluvia de fuego"; todo esto se evita mediante un separador de condensados que generalmente se asocia también con un sello de agua.

Están provistos con una malla para detener el rocío que puedan arrastrar las corrientes de gas; generalmente son verticales y construídos dentro de la base del quemador elevado, estos sellos cumplen con dos funciones:



-- Separar el líquido de la corriente de gas hacia el quemador.

-- Mantener una presión positiva en el cabezal de desfogue, evitando la entrada de aire. Cuando el flujo de gas es bajo, el aire puede entrar y difundirse en el sistema, formando mezclas explosivas.

(Ver fig 8).

BOQUILLA.

Existen dos tipos principales de boquillas para quemador:

1) De tubo.

Esta boquilla es usada para manejar grandes volúmenes de gas de baja presión en localidades con pocas restricciones ambientales. Algunas boquillas de este tipo tienen dispositivos especiales para tener una operación sin humo, tal es el caso de los deflectores de viento y de vónturis para inyección de vapor e inspiración de aire; y para mantener una flama estable se les instala un anillo de retención de flama, que logra mantener la flama alta en la boquilla aún cuando la velocidad del gas sea muy alta. Las boquillas de tubo se construyen generalmente con acero inoxidable, y van recubiertas en su parte interior de algún material refractario, o de cerámica, y en la parte exterior se les adapta ciertos deflectores o "para-vientos", que previenen que la flama se incline a los costados de la boquilla.
(Ver fig 9).

2) De tubos múltiples.

En este tipo de boquilla, la corriente de gas se divide y pasa por una serie de pequeños tubos "jets", con alta velocidad, inspira gran cantidad de aire primario y se obtienen flamas separadas en la boquilla, con poco humo, y además, las flamas de

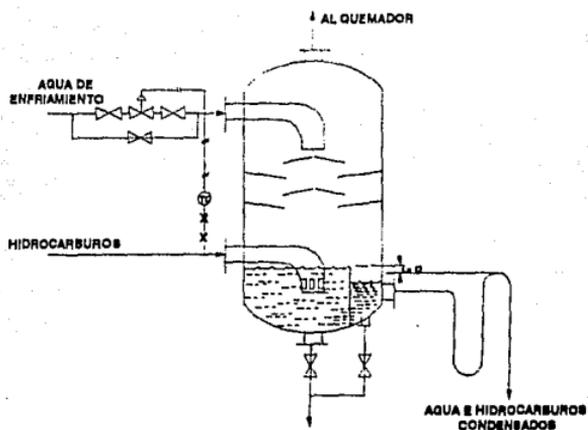


FIG. 8 SEPARADOR DE CONDENSADOS

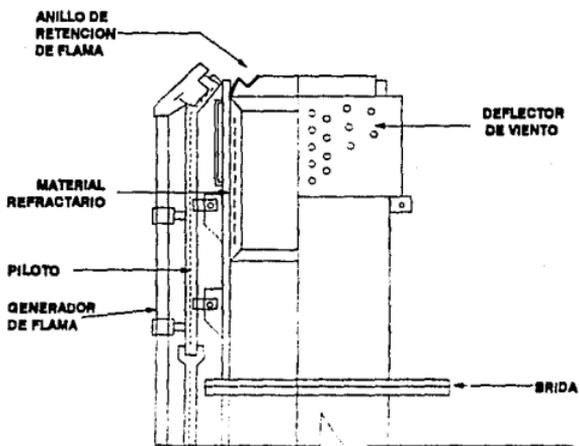


FIG. 9 BOQUILLA DE TIPO TUBO

Los "jets" exteriores dan un efecto protector, pues tapan la radiación proveniente de las flamas de los "jets" internos. se utilizan para gas con alta presión, hasta 75 psig; pero son costosas y producen mucho ruido.

(Ver fig 10).

SELLOS DE GAS PARA QUEMADOR ELEVADO.

Cuando el flujo de gas a través del sistema es muy bajo, puede entrar aire por la boquilla y difundirse hacia dentro del sistema. Esto sucede especialmente cuando la densidad del gas es menor que el valor de la densidad del aire. Esta situación es muy riesgosa, pues se corre el peligro de que se formen mezclas explosivas, o bien puede suceder una retrospcción de flama que daña todo el sistema de desfogue.

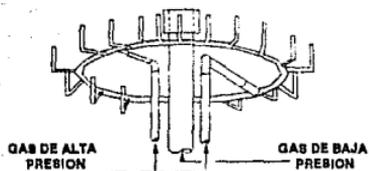
Para prevenir esto, una cantidad mínima de gas de purga o barrido se utiliza para mantener una presión positiva y un flujo continuo que evita la entrada de aire. Puede usarse gas natural, gas inerte, nitrógeno, o cualquier otro gas combustible dependiendo de la disponibilidad y el costo.

El gasto del gas de purga se incrementa cuando la velocidad del viento aumenta. Reed R.D. (Furnance Operations) recomienda una velocidad mínima de gas de purga de 3 ft/s para proteger un quemador de 200 ft. de altura, en que estima una velocidad del viento de 20 mph.

Existen sellos que se instalan en la base de la boquilla del quemador, que previenen estas situaciones, pues dificultan la entrada de aire. Hay de tres tipos:

a) Molecular.

BOQUILLAS PARA QUEMADOR ELEVADO



**FIG. 10 BOQUILLA DE TUBOS MULTIPLES,
CON BOQUILLA DE TUBO EN EL CENTRO**

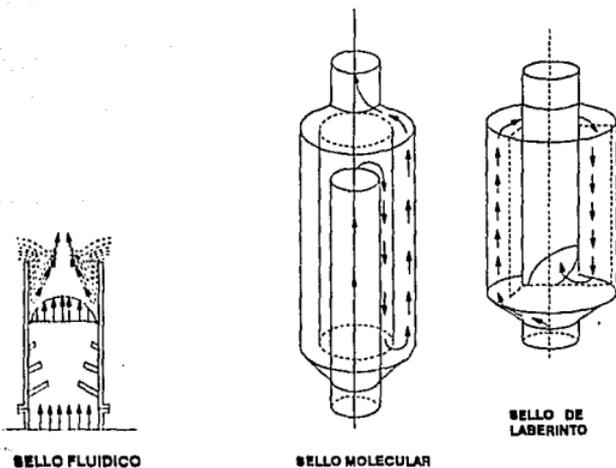


FIG. 11 a, b, c, SELLO DE GAS PARA QUEMADORE ELEVADO

b) De laberinto.

c) Fluido.

(Ver fig 11).

SELLO LIQUIDO.

El sello líquido generalmente consiste de una trampa construida dentro de la base del quemador o entre la línea de desfogue y la conexión de entrada del quemador.

Son diseñados para estar llenos de agua y así prevenir una retrospcción de la flama hacia los cabezales de desfogue; además de mantener una presión positiva en los cabezales de desfogue.

En condiciones de bajo flujo pueden ocasionar ciertas pulsaciones de gas hacia el quemador y también durante grandes relevos de gas puede perderse el sello de agua , que después deberá ser reestablecido.

Para el caso de gases amargos debe considerarse que habrá alta corrosión en el sello, y que es recomendable cambiar o reponer continuamente el líquido de sello.

El problema de pulsaciones en un recipiente de sello puede ser minimizado por el uso de una terminación de la tubería sumergida en forma de picos de manera que se da un incremento al área de flujo en tanto que el flujo de gases se incrementa.

(Ver fig 12).

Cuando el gas relevado o el gas de barrido del sistema, sean de un peso molecular menor al peso molecular del aire, se requiere intalar un sello líquido justamente antes del quemador, así el sistema de desfogue quedará separado y protegido. (16)

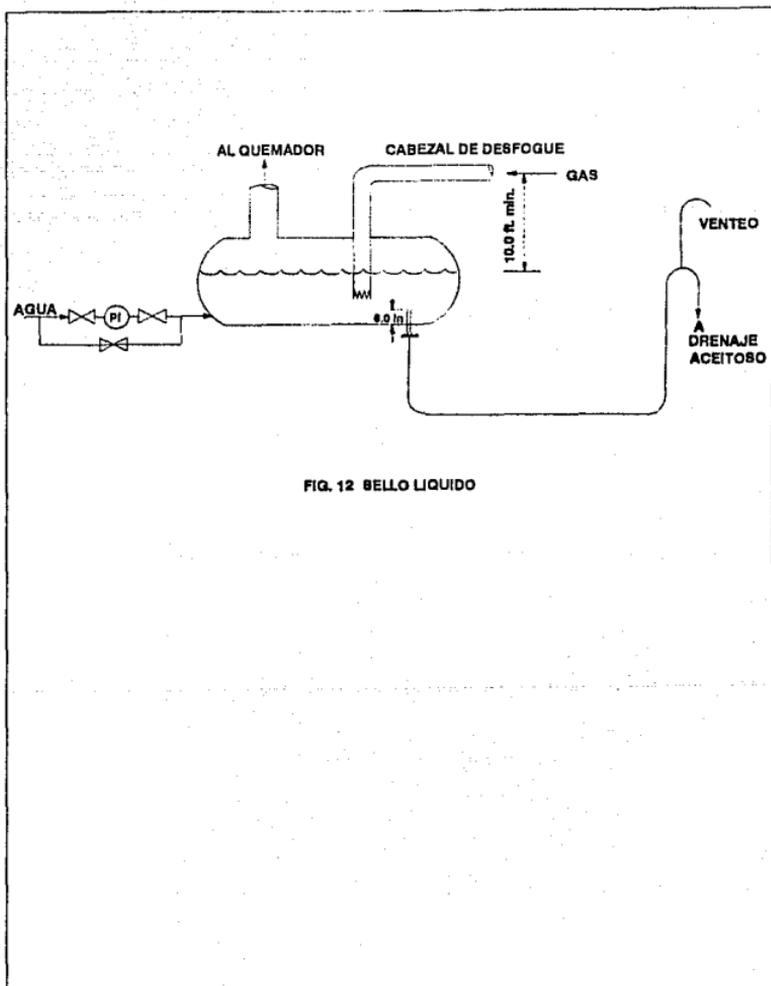


FIG. 12 BELLO LIQUIDO

CAPITULO III

QUEMADORES COANDA

3.10 ANTECEDENTES.

En 1910, Henry Coanda, egresado de la Escuela Superior de Aeronáutica de París buscando alternativas para las máquinas de aviones, desarrolla y prueba una nueva máquina, que era una especie de "Jet". Esta máquina estaba equipada con un compresor de aire, movido por una máquina reciprocante, de manera que inyectaba combustible dentro del aire comprimido resultando como consecuencia una especie de cohete posterior.

En la primera oportunidad, Coanda discutió sus experiencias con Theodor Van Karmann, un investigador en aeronáutica de la Universidad de Göttingen. Karmann se percató de que el fenómeno en el cual estaba basado el aeroplano de Coanda era un nuevo descubrimiento y lo denominó EFECTO COANDA.

Pasaron 25 años antes de que cualquier otro investigador diera cierta importancia al EFECTO COANDA, Posteriormente Coanda siendo Ingeniero en Jefe de una Compañía en Aeronáutica se involucró en diversas investigaciones técnicas e incluso efectuó varios experimentos para determinar los puntos básicos del EFECTO COANDA, sus posibilidades y usos, sin embargo, los resultados obtenidos no fueron de mayor trascendencia. (1,4)

3.20 PRINCIPIO COANDA.

A principios de 1967, después de años de trabajo de investigación y como parte de un programa para desarrollar nuevos conceptos de quemadores, el Centro de Investigación de la

"British Petroleum Company", concibió la idea de utilizar el EFECTO COANDA, como una alternativa para uno de los proyectos en el desarrollo de los quemadores de premezclado. (2,7,8)

Este fenómeno aplicado en los quemadores de premezclado, resulta bastante simple; ya que consiste en una corriente o chorro laminar de gas combustible, emergiendo de un orificio a velocidad sónica, ocasionando una zona de baja presión entre el chorro de gas combustible y la superficie del quemador, originando que el gas se adhiera a las paredes de tal forma que la región de baja presión en el otro extremo de la película genere un arrastre de aire el cual se aumenta debido a los cambios de dirección por parte de la corriente gaseosa, cuando sigue la forma de la superficie del quemador, de esta manera, una relación aproximada de 20 volúmenes de aire son arrastrados por cada volumen de gas combustible. (ver fig 1).

La aplicación de este fenómeno dio como resultado una flama compacta, poco luminosa y una combustión completa en el quemador. (4)

3.30 QUEMADORES COANDA.

3.31 TIPOS DE QUEMADORES COANDA.

La bonanza de los quemadores compactos dejó atrás el antiguo énfasis de desarrollar los tradicionales quemadores elevados. La capacidad de quemado para obtener altos rendimientos de gas, se convirtió en una parte importante de los sistemas de relevo de las plantas petroleras y petroquímicas; a esto había que añadir la preocupación por el impacto al medio ambiente y la deficiente combustión de los quemadores tradicionales.

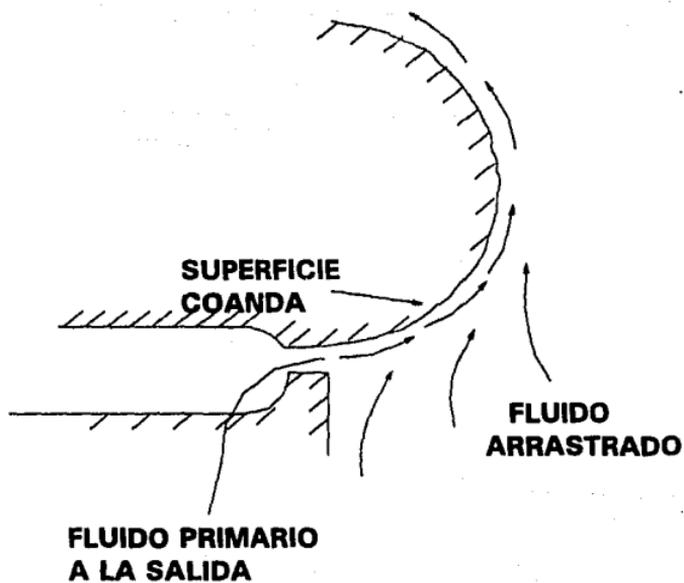


FIG. 1

Lo que obligó a que un equipo de investigadores con experiencia en la industria petrolera y petroquímica se enfrentara al reto de encontrar un quemador que:

a) Se basara en una combustión completa, (Mejorando las condiciones ambientales).

b) Cubriera los requisitos de ignición confiable, buena estabilidad frente al viento, costo no elevado de construcción y mantenimiento, requerimientos de espacio menores que los quemadores elevados.

De esta forma surge el Quemador Coanda, los prototipos desarrollados son tres :

QUEMADORES COANDA

QUEMADOR	TIPO	CONFIGURACION
Coanda	Indair	Externa
Coanda	Mardair	Interna
Coanda	Stedair	Externa -Interna

A) Quemador tipo Indair. (configuración externa) :

El primer prototipo de un quemador Coanda tipo Indair fue un quemador al que se le inyectaba aire a través de una garganta de 4 in de diámetro y en el cual el aire viajaba con una alta velocidad de flujo junto con el combustible sobre la superficie del quemador, este no fue aplicado a nivel industrial, pero fue la base experimental para los quemadores posteriores.

El primer prototipo Indair que se aplicó a escala industrial fue un quemador en forma de tulipán cuyo diámetro fue de 5 ft. Tal cuerpo de tulipán fue subdividido en tres áreas producto de la optimización en este diseño. (ver fig 2).

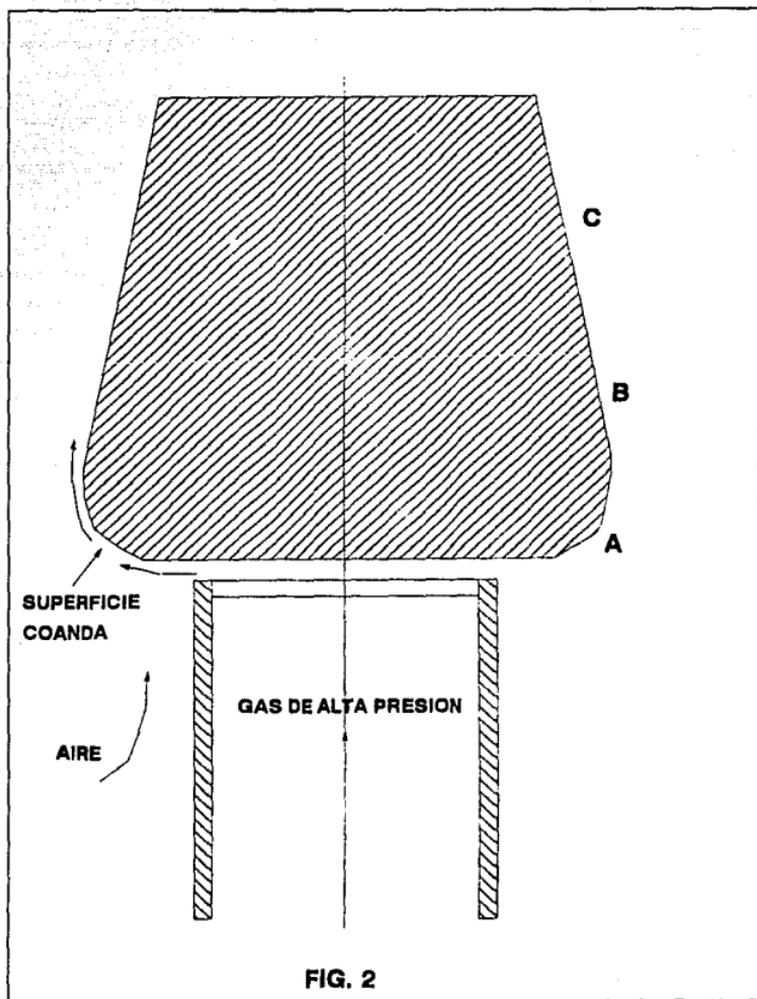
SECCION A.- La sección A del quemador fue una de las más importantes ya que soportaba uno de los principales objetivos de los quemadores compactos, lo que los hacía más competitivos que los quemadores tradicionales. Esta sección A fue usada en forma similar a un quemador pequeño encontrándose que satisfacía el objetivo primario de una combustión eficiente, lo que implicaba una menor polución sobre un amplio rango de flujos de gas y condiciones lo cual lo volvía muy versátil.

La sección media del cuerpo del quemador o sección B y la sección C, fueron desarrolladas para dar una buena estabilización de la flama del quemador, la sección B implicaba un cambio en la forma para el cuerpo del quemador esto hacía que se presentara una zona de estabilización para la flama en relación a la geometría del quemador provocando una ignición sencilla y puntual.

La sección C del quemador, permite que la flama no se apague cuando hay condiciones adversas de vientos; debido a que la mitad de la flama esta protegida en el sotavento del tulipán.

La Geometría del quemador permitía junto con el Efecto Coanda, contar con un quemador eficiente, obteniendo un impacto ambiental mínimo, viable económicamente y duradero. (2)

La forma de tulipán y la superficie COANDA, ofrece para los quemadores de este tipo una gran posibilidad de ser un equipo simple y compacto, se han construido unidades de 6.0 in de



diámetro de garganta quemando 1,800 lb/hr de propano con una presión flexible en un rango de 30 lb/in.² y no presenta generación de humo, además de presentar una flama estable al viento. (1,3)

B) Quemador Coanda tipo Mardair .(Configuración Interna):

Las pruebas con este tipo de quemador se llevaron a cabo utilizando como combustible al gas etileno dando como resultado una buena combustión libre de emisiones de contaminantes. (ver fig 3).

No obstante, se presentó un inconveniente el cual consistía en la estabilización de la flama, pero este se solucionó adicionando una mampara en forma de platillo al quemador, que permitió una flama estable en forma de anillo y de color azul, color característico de una buena combustión .

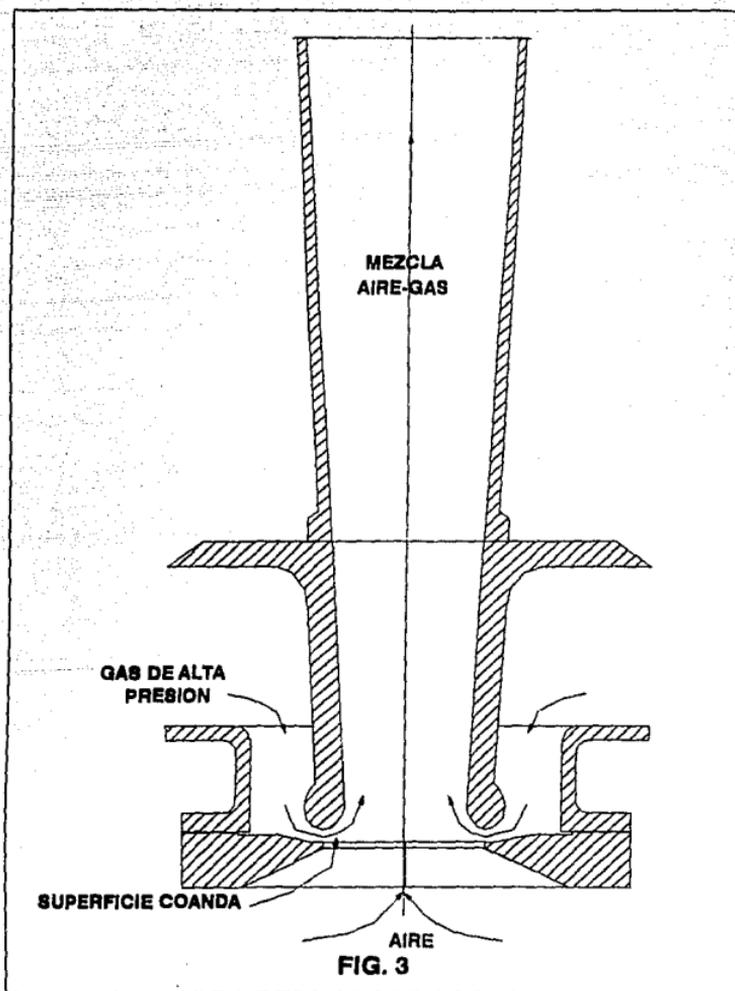
El quemador presenta una geometría de venturi, en la parte media se genera una gran turbulencia, lo cual provoca un completo mezclado entre la corriente de gas combustible y el aire primario inspirado, lo cual garantiza una combustión completa.

No hay problemas de estabilización de la flama puesto que la misma geometría del quemador la protege en la parte tubular de su cuerpo, garantizando también que la flama no se apague. (1,2)

C) Quemador Stedair. (Configuración externa - Interna):

Este tipo de quemador todavía no se aplica en la industria porque se encuentra aún en fase de desarrollo.

Este quemador está diseñado para operar en plantas muy



grandes, plantas que manejan grandes cantidades de desfogues por hora, se plantea para plantas petroquímicas y químicas. Se caracteriza por tener una estructura simple y compacta.

En este quemador el gas es enviado con una pequeña sobrepresión atmosférica y las altas presiones utilizadas en los quemadores Indair y Mardair son sustituidas por vapor de alta presión, la relación de gas a baja presión y vapor de alta presión proporciona una combustión con pocas cantidades de humo. (1,5,6)

3.40 EXPERIENCIA CON LOS QUEMADORES COANDA.

QUEMADORES COANDA TIPO INDAIR.

El lugar donde se probaron y desarrollaron estos quemadores por primera vez fue en la Isla Das al sur del golfo Pérsico, tales quemadores se desarrollaron con la idea de buscar una opción para resolver un problema que presentaba la isla Das debido a que era afectada en su extremo noreste por grandes cantidades de humo que ocasionaban los quemadores convencionales de tubo usados en la industria petrolera, además del problema ocasionado por el abasto de gases de alta presión y por el arrastre de gases de alta densidad cercanos a los quemadores sin contar con que los quemadores no realizaban una buena combustión debido a que el aire arrastrado durante la misma no era suficiente.

Se introdujo entonces el quemador Coanda Tipo Indair como una opción para la solución de dichos problemas; su diseño en forma de tulipán permitía independientemente del flujo de gas combustible que la combustión se llevara a cabo en una zona próxima al punto de máximo diámetro del cuerpo del quemador, por

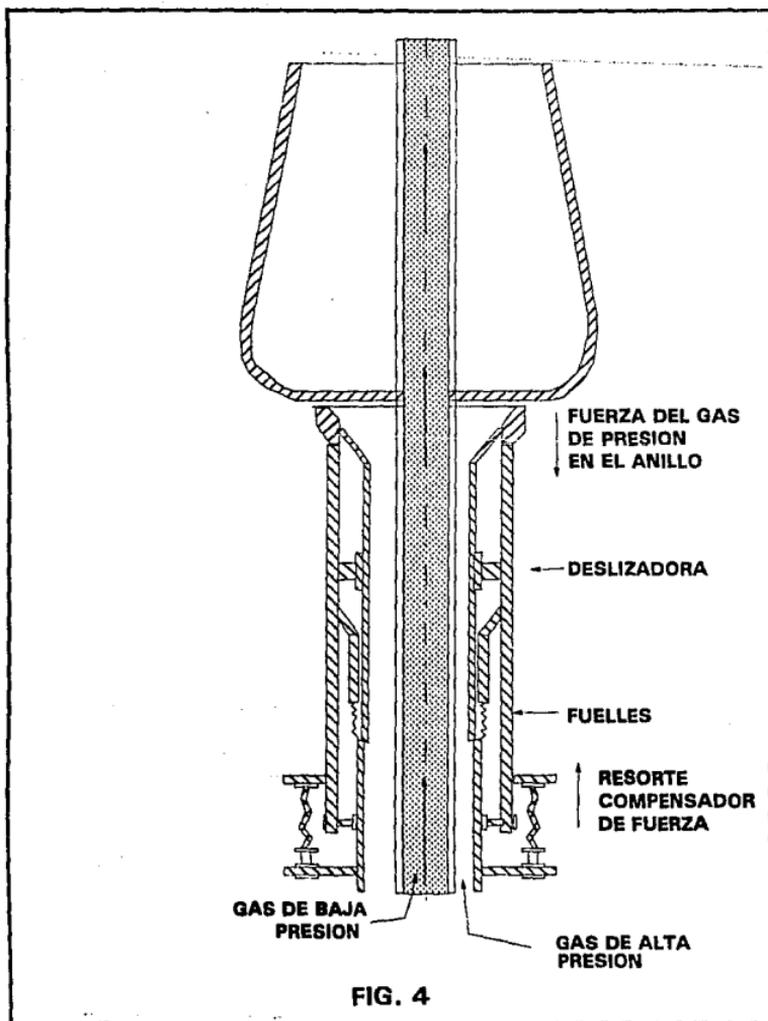
lo que al terminar la combustión, se tenía una zona de descanso o respiro para la flama generando que la misma se iniciara de manera uniforme alrededor del tulipán y al presentarse la flama de esta manera daba oportunidad a que al menos la mitad de la misma se encontrara protegida en el sotavento del quemador este efecto daba a la flama una gran estabilidad eliminando el riesgo de que se apagara o fuese tragada por el quemador. La combustión, por tanto era favorecida lo que se reflejaba en la ausencia de humo.

Se han efectuado optimizaciones al quemador Coanda Tipo Indair dando como resultado el Quemador Tipo Indair Alta Presión/Baja Presión, presentando una excelente eficiencia al quemar ambas corrientes de gas. (1,6)
(ver fig 4).

La corriente de gas de baja presión proviene de un tubo central del quemador mientras que la corriente de gas de alta presión corre por sus paredes.

Este quemador conjunta seguridad, eficiencia y en consecuencia un menor impacto ambiental.

El éxito que se presentó con estos quemadores permitió que se les usara en otras regiones donde se les perfeccionó de tal forma que las pequeñas longitudes de flama alcanzadas y la reducción de los niveles de radiación de las mismas permitieron reducir sus costos, además se redujeron las dimensiones del quemador y las alturas de la torre. Estos quemadores se desarrollaron con capacidades desde 9 a 300 MMpcpd. (4)



3.50 CARACTERISTICAS BASICAS DE LOS QUEMADORES INDAIR.

3.51 Combustión sin humo.

La mayoría de las corrientes de gas que contienen hidrocarburos dan como resultado en su combustión grandes cantidades de humo, el cual es resultado del rompimiento de enlaces en las reacciones de polimerización que tienen lugar en el quemador durante la combustión, la generación de humo es perjudicial porque contamina y provoca altos niveles de radiación entre otros inconvenientes.

El problema de la generación de humo y sus consecuencias se solucionan de manera completa teniendo un exceso de aire y régimen turbulento en el quemador Indair, ya que el gas saliente del ducto principal induce el aire requerido para quemarse y quemar cualquier gas de venteo atmosférico de la tubería central abierta. Esto vence los problemas de humo normalmente asociados con los gases de alta densidad que se utilizan como combustible. Estos gases tienen un alto requerimiento de aire para combustión no obstante que al ser separados del petróleo se separan a muy baja presión para inspirar su propio aire de combustión.

3.52 AHORRO Y QUEMADO DE COMBUSTIBLE.

El manejar un quemador implica extremar la seguridad en una planta, no sólo porque la combustión debe ser buena y eficiente para no provocar problemas ambientales, sino también para transportar el combustible al sistema de quemado, ya que el acarreo de combustible a la línea del quemador puede ocurrir en condiciones de emergencia, en situaciones como estas el quemador Indair es una excelente opción con respecto a quemadores convencionales ya que en estos últimos se presenta el peligro de

no quemar de manera completa el combustible debido a que el tiempo de residencia de éste en la flama no es el suficiente para que la combustión sea completa; si la emergencia es ocasionada por problemas de presión se puede presentar el fenómeno de lluvia quemante, la que además de poner en riesgo la seguridad del personal, implica una contaminación en el área de trabajo.

El quemador Indair en condiciones semejantes luego de muchas experiencias derivadas de la operación ha demostrado que cuando existen cantidades significativas de combustible éste es quemado en su totalidad de manera eficiente no presentando la lluvia quemante y daños al material con el cual esta hecho el quemador.

Este logro significativo se lleva a cabo debido a que la alta velocidad existente en la flama hace que ésta mantenga su momento hacia adelante logrando despedir la carga térmica de los gases quemados.

3.53 MATERIALES DE CONSTRUCCION.

Dadas las resultados obtenidos en el empleo del EFECTO COANDA los materiales de construcción para el quemador Indair son aleaciones de acero de tipo convencional hechos por el procedimiento de fundición normal lo que permite nos olvidemos de materiales como los cerámicos o de otro tipo cuyos gastos son muy elevados ya que se trata de materiales de construcción sofisticada.

La funcionalidad del acero se debe a que siempre hay una capa protectora de gas no quemado aislándolo de la flama durante la combustión, la flama se inicia en la salida de la boquilla y el Efecto Coanda permite que la flama se propague hacia adentro del

quemador en forma radial, como en ese momento ya existe una capa de gas que protege al quemador el material del mismo no se ve afectado además de que la flama muestra una gran estabilidad.

El utilizar acero convencional en el quemador Indair lo hace atractivo desde el punto de vista de costos, mantenimiento y tiempo de vida media.

3.54 QUEMADO DE GASES TOXICOS.

Cuando se realiza la combustión en un quemador debe ser lo más completa y eficiente posible, ya que esto permite eliminar contaminantes diversos que son lanzados a la atmósfera; que pueden afectar a un ecosistema dado.

Como ya hemos visto el quemador Indair durante la combustión suprime la presencia de humo pero además permite la combustión de los diversos gases tóxicos contenidos en el combustible, como es el caso de los combustibles que contienen sulfuros que si no son quemados pueden formar ácidos sulfúricos que a ciertas concentraciones puede dañar el cuerpo del quemador.

3.55 DISEÑOS BASICOS EN EL QUEMADOR INDAIR.

Existen básicamente tres tipos de diseños para este tipo de quemador, su diferencia radica en su capacidad de respuesta para manejar diversos flujos de combustible para la combustión del quemador.

El control de los diversos flujos se lleva a cabo afectando el diseño de la rendija o entrada del combustible al quemador.

El manejo de los flujos se da de la siguiente manera:

a) Entrada fija de combustible.

En este caso el acceso de combustible al quemador tiene un tamaño predeterminado y no puede ser cambiado, por lo tanto se maneja un flujo constante de combustible a la entrada del quemador por lo que este es poco versátil.

b) Entrada ajustable de combustible.

En este tipo de diseño la capacidad del quemador puede variarse, si la altura de la ranura de entrada de combustible se cambia, las alteraciones para la entrada de combustible se realizan de modo manual cuando el quemador está apagado, estas alteraciones son normalmente requeridas cuando se necesitan cambios grandes en relación a los requerimientos de flujo, en este diseño como en el anterior el flujo de gas combustible es directamente proporcional a la presión absoluta.

c) Entrada variable de combustible.

Este diseño es el más práctico y versátil de los tres debido a que posee una variación automática en el área de acceso de combustible al quemador como respuesta a las variaciones en el flujo de gas, en este diseño el labio inferior de la ranura actúa como un mecanismo de relevo de presión.

Durante su desarrollo se plantea su posición básica de tal forma que pueda manejar el flujo de diseño como mínimo, cuando se presenta la necesidad de una variación de flujo provocado por los cambios de presión; la presión generada causa una alteración en la posición del labio de la ranura y como consecuencia el flujo de gas se mantiene variable dependiendo de las demandas en un momento dado.

En el recuadro siguiente se muestran diferentes tamaños de ranuras para los quemadores Indair y Mardair, así como los flujos máximos y mínimos que se manejan.

(ver fig 5)

TIPO DE QUEMADOR	MEDIDA DE ENTRADA DE COMBUSTIBLE (in)	GASTO (mmecfd)	
		MIN.	MAX.
INDAIR	0.13	4.4	9.7
INDAIR	0.22	7.5	16.4
MARDAIR	0.005	4.0	11.4
INDAIR	0.20	6.8	14.9
INDAIR	0.39	13.3	29.0
MARDAIR	0.015	6.6	18.9

GRAVEDAD ESPECIFICA = 0.94

Para este tipo de quemador el flujo de gas es proporcional al producto del área de la ranura de suministro de gas y la presión absoluta. (1,3,5,6)

ENTRADA DE COMBUSTIBLE

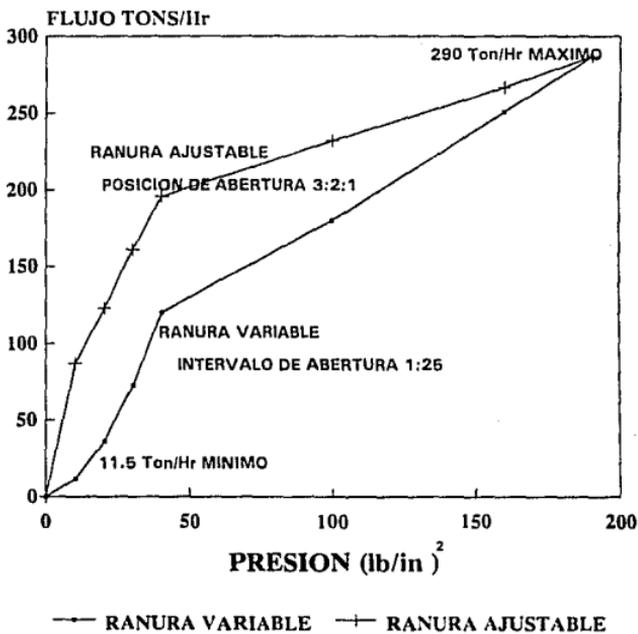


Fig. 5

3.60 QUEMADORES COANDA TIPO MARDAIR

El quemador Mardair se desarrolló de manera paralela al quemador Indair, sin embargo, se demostró que el quemador Mardair ofrecía ventajas adicionales. El desarrollo de este quemador se obtuvo luego de arduas investigaciones en las cuales se probaron diversos tamaños y configuraciones de prototipos, al final se optó por un quemador Tipo Coanda Interno (Venturi) en el cual se lograron altos grados de eficiencia y pequeñas longitudes de flama.

Para llegar a esto se utilizaron varias unidades compactas que a la postre daban la configuración final del quemador.

Se determinó que el quemador Mardair se podría utilizar en el rango de quemadores desarrollados específicamente para quemado continuo, donde el criterio principal es el de conservar longitudes de flama pequeños, bajos niveles de radiación y ruido; aspectos en los cuales el quemador Mardair superaba al quemador Indair.

El problema más importante que enfrentó el quemador Mardair fue el de la estabilización de la flama ya que era necesario considerar su forma y tamaño, debido a que el quemador carecía de mecanismos estabilizadores, lo cual lo hacía vulnerable ante vientos fuertes, este problema se solucionó agrupando varias unidades de quemadores lo que generó un paquete cerrado de flamas colindantes que daban una inmunidad completa de apagado frente a vientos adversos. (1,5,6)

Durante el desarrollo de los quemadores Mardair se tuvo especial atención en aspectos tales como:

- a) El suministro suficiente de aire primario para proporcionar una flama compacta, estable, y con poca luminosidad.
- b) El mantener la flama por encima de los conos del quemador para que su cuerpo permaneciera frío, provocando un mayor tiempo de vida media.
- c) Arreglos que permitieran que las flamas se estabilizaran mutuamente.

Para lograr estos objetivos, se llevaron a cabo diversas pruebas de combustión y mediciones de arrastre, siendo de vital importancia, ya que en función de éstos se determinaron valores óptimos para parámetros de suma importancia tales como:

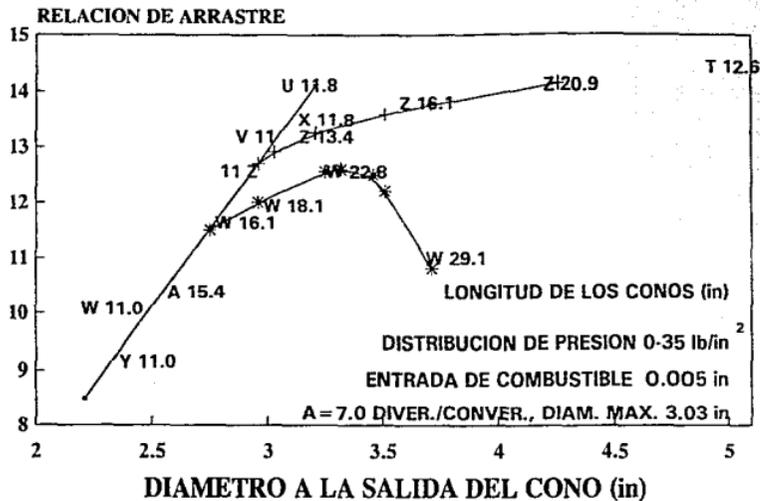
- Diámetro de garganta
- Diámetro de salida
- Largo del cono
- Angulo de divergencia, etc.

(ver fig 6).

Los primeros prototipos del quemador Mardair se desarrollaron usando un arreglo de 19 quemadores cada uno con un diámetro de garganta de 0.79 in., 6 meses después se desarrolló un prototipo experimental conteniendo 270 quemadores cuyo diámetro de garganta era 1.57 in este prototipo se puso a prueba con un gas terminal.

En estos dos prototipos se descubrió que era necesario elevar la velocidad a la salida del cono del quemador debido a que existía el riesgo de una propagación de la flama entre los conos lo que repercutía en una flama inestable arriesgando la seguridad del área de trabajo así como el óptimo funcionamiento del quemador y de su vida media.

ARRASTRE DE AIRE



T=13.2 S=10.0 U,X=7.7 V,Z=7.1 W,Y=4.4 S=3.6 ANGULO DEL CONO

Para incrementar la velocidad a la salida del quemador se redujo el diámetro del cono de salida de 2.83 a 2.17 in mientras que el diámetro de las ranuras se mantuvo constante en 0.015 in. trabajando de manera aceptable, el éxito de los diseños lo confirma la operación de este tipo de quemadores en las plataformas del Mar del Norte. (1,2,3,5)
(ver fig 7).

3.70 QUEMADORES MARDAIR MULTIPLES.

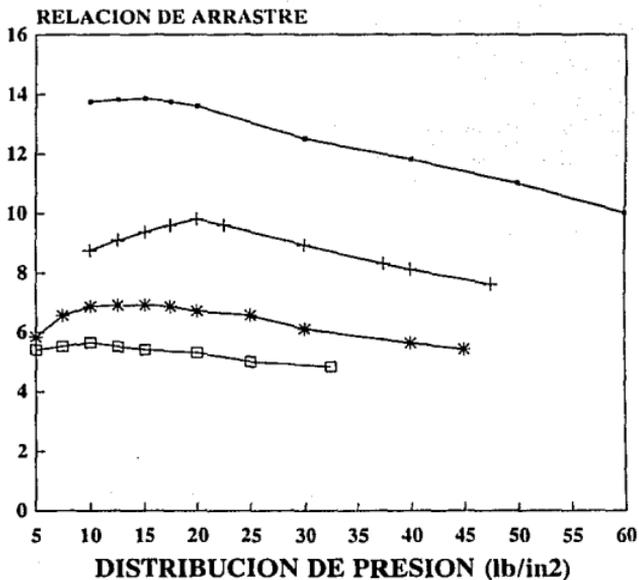
Dentro este tipo de quemadores se encuentran los quemadores Mardair M 40 y M 200, el quemador M 40 está constituido por un arreglo múltiple de quemadores al centro y consta de 270 conos conectados a un anillo externo, se clasifica como un quemador de alta presión, tiene excepcionales características de baja radiación, sin embargo, presenta algunas desventajas tales como una construcción cara, difícil mantenimiento y no es lo suficientemente robusto, además cuenta con una limitante operacional para bajas proporciones de quemado. (ver fig 8).

Para enfrentar estas desventajas se desarrolló el quemador Mardair M 200 que sustituyó al quemador M 40. Con el quemador M 200 se logró además de eliminar las deficiencias del M 40, incrementar la capacidad de relevo. El quemador M 200 consta de un arreglo que presenta sólo 7 conos largos lo que marca una gran diferencia con el quemador mardair M 40 que consta de 270 conos.

El quemador Mardair M 200 presenta las siguientes ventajas:

- Es de fácil construcción y su diseño permite una buena reposición de los quemadores, para su mantenimiento.
- Presenta una buena combustión.

PRESION-ARRASTRE



DIAMETRO A LA SALIDA DEL CONO

—○— UNI. PROTOTIPO 2.8in —+— UNI. DE PROD. 2.17in

—*— UNI. DE PROD. 2.17in —□— UNI. DE PROD. 2.17in

ANCHO DE 0.005 in 0.010 in

LA RANURA 0.005 in 0.015 in RESPECTIVAMENTE

Fig. 7

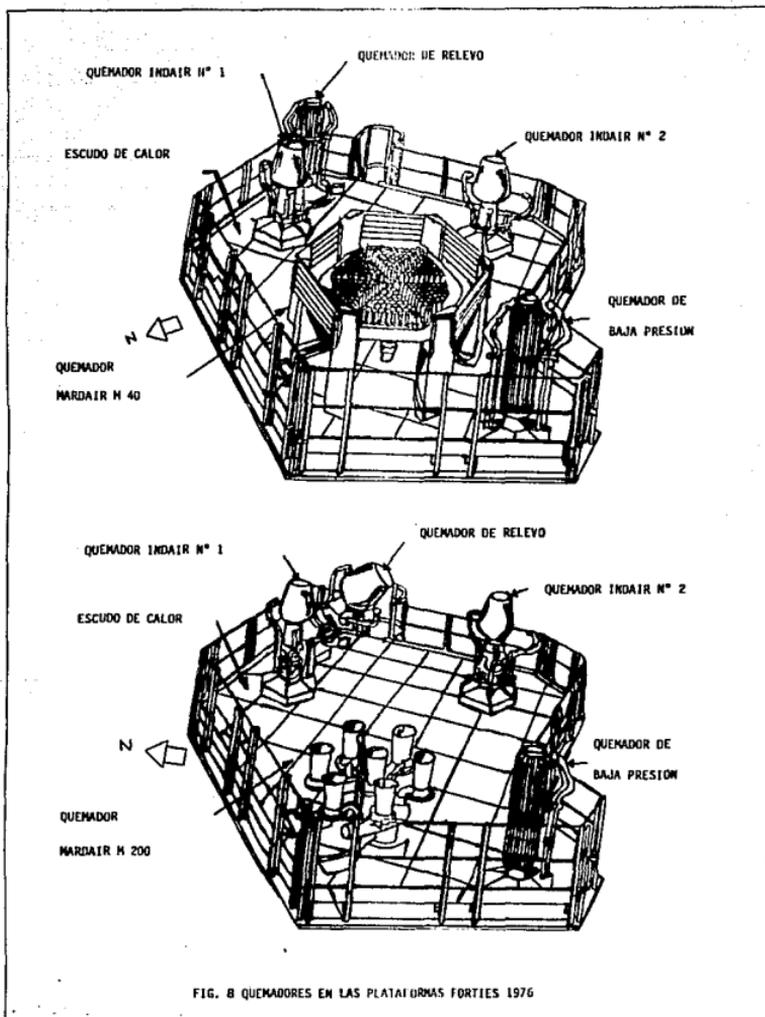


FIG. 8 QUEMADORES EN LAS PLATAFORMAS FORTIES 1976

- Es mucho más robusto que el quemador M 40.
- Tiene bajo peso.
- Cada unidad pesa 55 Kg de manera que un hombre puede remover manualmente la cubierta del quemador.
- Incrementa la capacidad de relevo.

Para aumentar la capacidad de relevo en un 50 % se amplió el diámetro en el tazón de 33 in a 45 in.

Este quemador superó las más duras pruebas de control en el Reino Unido, además de aguantar un prolongado proceso de pruebas en las plataformas Forties en el invierno de 1980 - 1981, lo que lo hace uno de los mejores quemadores en sistemas de quemado continuo. (2,4)

3.80 OPTIMIZACION DE LOS QUEMADORES COANDA.

El comienzo de la explotación de petróleo en el Mar del Norte fomentó la investigación y desarrollo de nuevos quemadores de entre los cuales surgirían los quemadores de Efecto Coanda que se convirtieron en diseños significativos cuyo desarrollo coincidió con más descubrimientos de grandes yacimientos petroleros en el Mar del Norte, que desde el momento de su perforación se reconoció traerían problemas, como quemado de gases resultantes de la perforación de yacimientos en aguas profundas y las plataformas.

Respecto a la problemática de los gases; se propuso que al menos parte de éstos se aprovecharan para generar la potencia requerida en las plataformas bajo corrida normal.

El principal problema para este sistema radicaba en su costo y poca funcionalidad con los quemadores existentes, sin embargo,

este problema se solucionaba al menos de manera parcial, si los quemadores utilizados eran los quemadores de EFECTO COANDA.

Para poder solucionar el problema del quemado de gases se desarrolló un programa que implicaba cubrir los siguientes tres casos:

- 1) Quemado de emergencia del volumen total de gas producido en la plataforma.
- 2) Un pequeño volumen de gas de los diversos sistemas que operan cerca de la presión atmosférica tales como, desoxigenación del agua de mar, plantas de tratamiento de agua, drenajes, etc.
- 3) Todos los requerimientos de gas para necesidades inmediatas sobre cada plataforma.

El caso uno era muy significativo dado que al tener la necesidad de quemar grandes volúmenes de gas el utilizar quemadores elevados implicaba tener una flama aún más elevada, además de presentar niveles de radiación inaceptables sobre la plataforma, también se requeriría de un mastil de gran altura lo que implicaba un gran costo por lo que este quemador fue desechado por caro e impráctico. Esto motivo buscar alternativas y se optó por utilizar un quemador Coanda Tipo Indair.

Su eficiencia quedo demostrada en una situación de emergencia ocurrida en la Isla Das , donde fueron capaces de quemar grandes cantidades de crudo que habían sido acarreadas con la corriente de gas durante una mala operación en la separación del crudo, se produjo una emulsión la cual paso al quemador , el quemador Indair logró la combustión de tal emulsión sin derramar petróleo y sin dañarse. Cuando esto había ocurrido a los quemadores

convencionales no habían quemado la emulsión y provocaron el derramamiento de petróleo en forma de lluvia quemante; poniendo en peligro la vida del personal y la integridad de la plataforma misma.

Durante la práctica los quemadores Indair demostraron un ahorro en la altura del quemador del mástil en un 40% en relación a la altura de los quemadores convencionales de tubo, además los quemadores Indair mostraron ser muy prácticos ya que al aumentar la producción de gases para combustión se adicionaron válvulas de alivio al sistema de quemadores dando como resultado que los flujos de gas manejados por los sistemas de relevo fueran mayores de lo que se habían contemplado en el diseño, esto sin afectar la calidad de la combustión.

Para el caso dos se utilizó un quemador de acero inoxidable diseñado con un deflector de viento para detener el choque de flama bajo condiciones de vientos fuertes, el quemador utilizado fue un quemador de baja presión ya que los volúmenes de gas a quemar eran pequeños y de bajas presiones, a este quemador se le instalaron tres pilotos con la finalidad de preservar la ignición.

Para el caso tres dado que los requerimientos de gas para las necesidades de la plataforma serían continuos se decidió instalar un quemador Coanda Tipo Mardair ya que dadas sus características minimizaba el ruido y el nivel de radiación a nivel de piso. (1,3,4,6)

Los quemadores Coanda Tipo Stedair tienen su campo de aplicación en refinerías, plantas petroquímicas, plantas químicas y plantas de acero, donde los gases de desecho para quemar son de baja presión; estos quemadores operan con vapor de

alta presión; dando como resultado bajos niveles de ruido, radiación y luminosidad.

El gas que sometido a la combustión es enviado al quemador con una escasa sobre presión atmosférica y las altas presiones usadas en los quemadores Indair y Mardair son reemplazadas por vapor.

Este quemador se probó teniendo una chimenea de 6 in de diámetro con la finalidad de llevar a cabo una economía máxima en el uso de vapor de alta presión, ya que el aire arrastrado dentro de la flama por el vapor es el factor primario para reducir la polución e inhibir la formación química de carbón lo que se refleja en una buena calidad de flama y buena combustión.

Cabe señalar que la fase de desarrollo de este quemador no se ha dado por concluida. (1)

CAPITULO IV

PLANTEAMIENTO DE LAS ECUACIONES QUE EXPLICAN LA COMBUSTION EN LOS QUEMADORES COANDA TIPO MARDAIR

Después de analizar cualitativamente a los quemadores Coanda deducimos que, la tecnología en la cual se basa este tipo de quemadores radica primordialmente en la optimización de la geometría para generar una eficiencia en la aplicación del Efecto Coanda, es decir, el objeto es generar una turbulencia "Benéfica" que ayude a un mezclado muy eficiente de los reactivos y por ende a una mejor combustión.

Pensamos que en los quemadores Elevados en los cuales no se genera una turbulencia adecuada de los reactivos, la combustión no es tan eficiente, puesto que la reacción de combustión es prácticamente instantánea del orden de una millonésima de segundo, de modo que la cinética de la reacción no es la etapa determinante para obtener una combustión completa, esto es, creemos entonces que al estar en contacto los reactivos reaccionan y los productos formados constituyen una barrera para la difusión.

De manera que hay que tener especial cuidado respecto a la generación de turbulencia ya que ésta genera remolinos que son inestables (se forman, son barridos y se vuelven a formar) absorbiendo así energía del fluido y disipándola en forma de calor al descomponerse en una extensa zona corriente abajo de la obstrucción que los generó.

Se considera la aceleración en los fluidos como un proceso eficiente y la desaceleración como un proceso ineficiente, puesto que la aceleración de un fluido se acompaña de un

gradiente de presión favorable para estabilizar la capa límite y minimizar la disipación de energía. y el movimiento desacelerado se acompaña de un gradiente de presión adverso que favorece la inestabilidad, la formación de remolinos y una gran disipación de energía.

Esto explica en parte porque los quemadores Coanda son más eficaces que los quemadores Elevados.

Es por esto, que aún no contando con un modelo matemático de los quemadores Coanda proponemos uno, con el objeto de proporcionar una explicación a groso modo de lo que pensamos sustenta el funcionamiento de los quemadores Coanda, el modelo que proporcionaremos lo basaremos en el quemador Coanda de Configuración Interna (MARDAIR) Tipo Venturi.

En el sistema considerado contamos con condiciones de flujo turbulento, para describirlo, en principio necesitamos de las siguientes ecuaciones:

ECUACION DE CONTINUIDAD.

ECUACION DE MOVIMIENTO.

MODELO DE LONGITUD DE MEZCLA DE PRANDTL.

ECUACION TERMODINAMICA. $P = P (V, T)$.

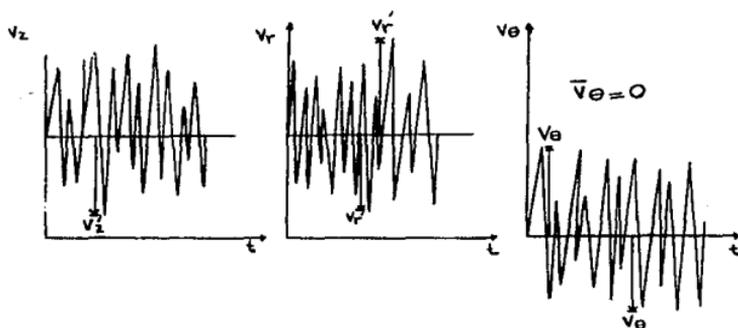
Estas ecuaciones se aplicarán al quemador Coanda Tipo Mardair que cuenta con una geometría de cilindro divergente, considerando además que el sistema es isotérmico y el flujo es de tipo newtoniano. En la siguiente figura analizaremos un punto y sus efectos en el quemador. (ver fig 1).



El punto de análisis se ve afectado por variaciones del vector velocidad, soportando estos efectos en las direcciones r , z , y θ , al tener flujo turbulento estas velocidades se convierten en velocidades promedio puesto que están sometidas a cambios continuos y aleatorios en el tiempo. (a diferencia de cuando se considera flujo laminar).

Para el caso de dirección tangencial las fluctuaciones en una y otra dirección se anulan al promediarse en el tiempo, ocasionando que el componente neto de V_θ sea igual a cero, por lo tanto V_θ promedio es igual a cero.

Este efecto no ocurre para las direcciones r y z , por tal motivo si graficamos las variaciones respectivas tenemos :



a) ECUACION DE CONTINUIDAD

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial}{\partial r} \right) (\bar{\rho}_r \bar{v}_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\bar{\rho} \bar{v}_\theta) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\rho} \bar{v}_z) = 0$$

Como $\bar{v}_\theta = 0$ este término se puede eliminar de la ecuación.

La ecuación de continuidad aplicada al sistema describe la variación de la densidad de flujo de materia por unidad de volumen, que no es otra cosa que la formulación de la conservación de la materia.

b) ECUACION DE MOVIMIENTO

Ahora plantearemos las ecuaciones de movimiento en términos de un fluido newtoniano con densidad y viscosidad constante, considerando coordenadas cilíndricas divergentes y flujo turbulento.

Si partimos de la siguiente ecuación tenemos:

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = - \underset{1}{\nabla p} - \underset{2}{v} \cdot \underset{3}{\tau} + \underset{4}{\rho g}$$

Donde:

- 1= Es la masa por unidad de volumen multiplicada por la aceleración.
- 2= Es la fuerza de presión sobre el elemento por unidad de volumen.
- 3= Son las fuerzas viscosas sobre el elemento por unidad de volumen.
- 4= Es la fuerza gravitacional sobre el elemento por unidad de volumen.

Esta ecuación es la formulación Lagrangeana de la segunda ley de Newton aplicada al movimiento de un fluido, donde la masa por la aceleración es igual a la suma de fuerzas.

Esta ecuación describe las variaciones que tienen lugar en un elemento que sigue el movimiento del fluido.

Aplicando la ecuación a nuestro sistema turbulento tenemos:

$$\bar{\rho} \frac{D\bar{v}}{Dt} = -\bar{\nabla} \bar{p} + (\bar{\nabla} \cdot \bar{\tau}^1) - (\bar{\nabla} \cdot \bar{\tau}^t) + \bar{\rho} \bar{g}$$

Donde, $\bar{\tau}^t$ se denomina esfuerzo de Reynolds y $\bar{\tau}^1$ define los componentes del tensor esfuerzo en las coordenadas existentes.

Como $\bar{\tau}^1$ es debido al transporte molecular al tener flujo turbulento carece de importancia por lo que lo podemos quitar de la ecuación, y esta queda:

$$\bar{\rho} \frac{D\bar{v}}{Dt} = -\bar{\nabla} \bar{p} + (\bar{\nabla} \cdot \bar{\tau}^t) + \bar{\rho} \bar{g}$$

Si para $\bar{\nabla} \bar{p}$ consideramos sus componentes $\frac{\partial p}{\partial r, z, \theta}$.

La ecuación que define nuestro sistema queda:

Componente radial (r).

$$\bar{\rho} \left(\frac{\partial \bar{v}_r}{\partial t} + \bar{v}_r \frac{\partial \bar{v}_r}{\partial r} + \bar{v}_z \frac{\partial \bar{v}_r}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial r} + (\bar{\nabla} \cdot \bar{\tau}^t)_r$$

En este caso los efectos debido a la fuerza gravitacional son cero ya que no afectan al movimiento del fluido en la dirección r.

Es el mismo caso para la componente tangencial ya que como hemos dicho anteriormente sus efectos se anulan.

La ecuación para la componente axial se presenta :

Componente axial. (z).

$$\bar{\rho} \left(\frac{\partial \bar{v}_z}{\partial t} + \bar{v}_r \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial r} + \bar{v}_z \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial z} \right) = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + (\nabla \cdot \bar{\tau})_z^t + \bar{\rho} \bar{g}_z$$

En este caso se deben considerar los efectos gravitacionales por que afectan esta componente del movimiento del fluido.

Para definir al sistema de manera completa necesitamos definir τ^t para sustituirlo en la ecuación de velocidad, para lo que nos serviremos de las expresiones semilempíricas para esfuerzos de Reynolds. (En este caso la expresión de Prandtl).

Donde:

$$(\tau_{rz})^t = - \bar{\rho} l^2 \left(\left| \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial r} \right| \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial r} + \left| \frac{\partial \bar{v}_r}{\partial z} \right| \frac{\partial \bar{v}_r}{\partial z} \right)$$

$$(\tau_{zz})^t = - \bar{\rho} l^2 \left(\left| \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial z} \right| \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial z} \right)$$

Donde l es la longitud de mezcla y es una función de la posición. Prandtl consideró que l es proporcional a la distancia r medida desde la superficie sólida y la definió como:

$$l = k_1 r \quad \text{donde } k_1 \text{ es la constante de Prandtl.}$$

Si incluimos los esfuerzos de Reynolds en las ecuaciones de velocidad para las componentes radial y axial estas quedan:

Componente radial (r).

$$\bar{\rho} \left(\frac{\partial \bar{v}_r}{\partial t} + \bar{v}_r \frac{\partial \bar{v}_r}{\partial r} + \bar{v}_z \frac{\partial \bar{v}_r}{\partial z} \right) =$$

$$-\frac{\partial \bar{p}}{\partial r} - \frac{\partial}{\partial r} \left(-\bar{\rho} r^2 \left| \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial r} \right| \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial r} + \left| \frac{\partial \bar{v}_r}{\partial z} \right| \frac{\partial \bar{v}_r}{\partial z} \right)$$

Componente axial (z).

$$\bar{\rho} \left(\frac{\partial \bar{v}_z}{\partial t} + \bar{v}_r \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial r} + \bar{v}_z \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial z} \right) =$$

$$-\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \left| -\bar{\rho} r^2 \right| \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial r} \right) \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial r} + \left| \frac{\partial \bar{v}_r}{\partial z} \right| \frac{\partial \bar{v}_r}{\partial z} \right) -$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(-\bar{\rho} r^2 \left| \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial z} \right| \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial z} \right) + \bar{\rho} \bar{g}_z$$

Con lo que las ecuaciones de velocidad quedan definidas.

En lo que llevamos del análisis hemos incluido:

La ecuación de continuidad.

Balance de materia.

Balance de momento.

Pero no hemos considerado el modelo de comportamiento gaseoso, al que aplicaremos una ecuación de estado, donde la presión esta en función del volumen y la temperatura.

c) ECUACION DE ESTADO

Una ecuación que nos describe de manera cercana la realidad del sistema, es la ecuación de Van der Waals en términos de propiedades reducidas; esto es:

$$P = \frac{RT}{\bar{v} - B} - \frac{a}{\bar{v}^2} = \bar{v}^3 - \left(b + \frac{RTc}{Pc} \right) + \frac{a}{Pc} \bar{v} - \frac{ab}{Pc} = 0$$

$$Z = \frac{\bar{P}\bar{V}}{RT} = P = \frac{8Pc\bar{V}cT}{3Tc(\bar{v} - \frac{\bar{V}c}{3})} - \frac{3Pc\bar{V}c^2}{\bar{v}^2}$$

$$\Pi = \frac{P}{Pc} \quad \phi = \frac{v}{Vc} \quad \tau = \frac{T}{Tc} \quad \Pi = \frac{8\tau}{3P-1} - \frac{3}{\phi^2}$$

Considerando la ecuación de Van der Waals, tenemos ya definido a nuestro sistema, teniendo seis ecuaciones con seis incógnitas y considerando un sistema isotérmico, de flujo newtoniano, con densidad y viscosidad constantes.

ECUACIONES

- 1 de continuidad
- 2 de movimiento
- 1 de estado
- 2 de esfuerzos de Reynolds

total 6

INCOGNITAS

- Presión, densidad,
- $\bar{v}_r, \bar{v}_z, \tau_{rz}, \tau_{zz},$

total 6

Cabe señalar que la resolución de estas ecuaciones es muy complicada, ya que se trata de ecuaciones diferenciales, parciales, simultáneas, acopladas y no lineales.

Sin embargo, se puede plantear su resolución mediante un esquema de diferencias finitas donde se obtiene un conjunto de ecuaciones algebraicas simultáneas no lineales, en los cuales aparecen problemas de convergencia y estabilidad en la solución numérica.

d) ECUACIONES DE TRANSFERENCIA DE MATERIA

Ahora debemos definir las ecuaciones para la transferencia de masa en el sistema. (Quemador Coanda Tipo Mardair); tenemos:

Dado que nuestro combustible básicamente es metano consideramos la reacción como sigue:



Condiciones; densidad, temperatura, viscosidad, difusividad A-B constantes. Además se tiene flujo turbulento.

Ecuación para el caso de reacción química:

$$\frac{\partial CA}{\partial t} = - \left(\frac{\partial}{\partial r} v_r CA + \frac{\partial}{\partial z} v_z CA \right) + D_{A-B} \left(\frac{\partial^2 CA}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 CA}{\partial z^2} \right) - K_n CA^n$$

Al igual que en la primera parte los términos que involucran a θ se pueden despreciar, ya que sus efectos se neutralizan.

Si consideramos las concentraciones de tiempo ajustado \bar{C}_A y la fluctuación de concentración turbulenta C_A' , C_A queda;

$$C_A = \bar{C}_A + C_A'$$

Con lo que la primera ecuación queda definida como:

$$\frac{\partial \bar{C}_A}{\partial t} = - \left(\frac{\partial}{\partial r} \bar{v}_r \bar{C}_A + \frac{\partial}{\partial z} \bar{v}_z \bar{C}_A \right) - \left(\frac{\partial}{\partial r} v_r' C_A' + \frac{\partial}{\partial z} v_z' C_A' \right) +$$

$$D_{A-B} \left(\frac{\partial^2 \bar{C}_A}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \bar{C}_A}{\partial z^2} \right) - K_n C_A^n$$

Donde los términos $v_i C_A'$ describen el transporte turbulento de materia, y el componente l de esta densidad de flujo se designa

por J^l y se explica por ecuaciones empíricas, para nuestro sistema utilizaremos la ecuación de longitud de mezcla de Prandtl y Taylor.

Si aplicamos la ecuación de continuidad para las coordenadas cilíndricas de nuestro sistema, ésta queda:

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} + \left(\underbrace{v_r \frac{\partial C_A}{\partial r}}_A + v_z \frac{\partial C_A}{\partial z} \right) = D_{A-B} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial C_A}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 C_A}{\partial z^2} \right) + R_A$$

Utilizando la ecuación de variación de tiempo ajustado para flujo turbulento aplicada al sistema que tenemos ésta queda,

$$\frac{D\bar{C}_A}{Dt} = - (\nabla \cdot \bar{J}^t_A) - \frac{\text{mol}}{lt} \left(\frac{1}{10^6 \text{ seg}} \right)$$

A B

Donde en las ecuaciones anteriores los términos A, B son iguales, y RA se sustituye por la concentración molar que multiplica a la velocidad de combustión que es de una millonésima de segundo.

Sin embargo, al tener en nuestro sistema flujo turbulento podemos desprestigiar la densidad de flujo laminar de materia, con lo que la ecuación anterior queda:

$$\frac{D\bar{C}_A}{Dt} = - \nabla \cdot \bar{J}^t_A - \frac{\text{mol}}{lt} \left(\frac{1}{10^6 \text{ seg}} \right)$$

No obstante, en esta ecuación falta definir la relación de densidad de flujo turbulento de materia \bar{J}^t con CA o su gradiente, para lo cual utilizaremos la expresión de longitud de mezcla de Prandtl y Taylor.

$$\bar{J}^t_{Ar} = - l^2 \left(l \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial r} \left| \frac{\partial \bar{C}_A}{\partial r} \right. \right)$$

$$\bar{J}^t_{Az} = - l^2 \left(l \frac{\partial \bar{v}_r}{\partial z} \left| \frac{\partial \bar{C}_A}{\partial z} \right. \right)$$

Donde $l = k_1 r$

En el sistema considerado tenemos estado estacionario, lo que implica que el perfil de concentraciones respecto al tiempo no cambie, esto permite considerar que,

$$\frac{\partial CA}{\partial t}$$

sea casi igual a cero, por lo que podemos despreciarlo. por lo tanto, la ecuación para considerar el balance de materia queda:

$$\left(v_r \frac{\partial CA}{\partial r} + v_z \frac{\partial CA}{\partial z} \right) = - \nabla \cdot \bar{J}_A^t - \frac{\text{mol}}{\text{lt}} \left(\frac{1}{10^6 \text{ seg}} \right)$$

Aplicando esta ecuación a cada una de las componentes que tiene nuestro sistema las ecuaciones quedan:

PARA REACTIVOS

PARA EL METANO (A).

Componente radial (r).

$$\left(v_r \frac{\partial CA}{\partial r} + v_z \frac{\partial CA}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial r} \left(- D^2 \left| \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial r} \right| \frac{\partial \bar{CA}}{\partial r} \right) - \frac{\text{mol}}{\text{lt}} \left(\frac{1}{10^6 \text{ seg}} \right)$$

Componente axial (z)

$$\left(v_r \frac{\partial CA}{\partial r} + v_z \frac{\partial CA}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left(- D^2 \left| \frac{\partial \bar{v}_r}{\partial z} \right| \frac{\partial \bar{CA}}{\partial z} \right) - \frac{\text{mol}}{\text{lt}} \left(\frac{1}{10^6 \text{ seg}} \right)$$

PARA EL OXIGENO (B).

Componente radial (r).

$$\left(v_r \frac{\partial CB}{\partial r} + v_z \frac{\partial CB}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial r} \left(-1^2 \left| \frac{\partial v_z}{\partial r} \right| \frac{\partial CB}{\partial r} \right) - 2 \frac{\text{mol}}{\text{lt}} \left(\frac{1}{10^6 \text{seg}} \right)$$

Componente axial (z)

$$\left(v_r \frac{\partial CB}{\partial r} + v_z \frac{\partial CB}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left(-1^2 \left| \frac{\partial v_r}{\partial z} \right| \frac{\partial CB}{\partial z} \right) - 2 \frac{\text{mol}}{\text{lt}} \left(\frac{1}{10^6 \text{seg}} \right)$$

PARA PRODUCTOS.

PARA DIOXIDO DE CARBONO (C).

Componente radial (r).

$$\left(v_r \frac{\partial CC}{\partial r} + v_z \frac{\partial CC}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial r} \left(-1^2 \left| \frac{\partial v_z}{\partial r} \right| \frac{\partial CC}{\partial r} \right) + \frac{\text{mol}}{\text{lt}} \left(\frac{1}{10^6 \text{seg}} \right)$$

Componente axial (z)

$$\left(v_r \frac{\partial CC}{\partial r} + v_z \frac{\partial CC}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left(-1^2 \left| \frac{\partial v_r}{\partial z} \right| \frac{\partial CC}{\partial z} \right) - \frac{\text{mol}}{\text{lt}} \left(\frac{1}{10^6 \text{seg}} \right)$$

PARA AGUA (D).

Componente radial (r).

$$\left(v_r \frac{\partial CD}{\partial r} + v_z \frac{\partial CD}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial r} \left(- D^2 \left| \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial r} \right| \frac{\partial \bar{CD}}{\partial r} \right) + 2 \frac{\text{mol}}{\text{lt}} \left(\frac{1}{10^6 \text{seg}} \right)$$

Componente axial (z)

$$\left(v_r \frac{\partial CD}{\partial r} + v_z \frac{\partial CD}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left(- D^2 \left| \frac{\partial \bar{v}_r}{\partial z} \right| \frac{\partial \bar{CD}}{\partial z} \right) + 2 \frac{\text{mol}}{\text{lt}} \left(\frac{1}{10^6 \text{seg}} \right)$$

Con lo cual quedan definidas las ecuaciones de balance de materia para el sistema.

Finalmente, para definir de manera completa al sistema necesitamos plantear las condiciones frontera del mismo, para ello nos valdremos de las ecuaciones planteadas para las velocidades y para los balances de materia.

e) CONDICIONES FRONTERA RESPECTO A LAS ECUACIONES DE VELOCIDAD Y DE BALANCE DE MATERIA.

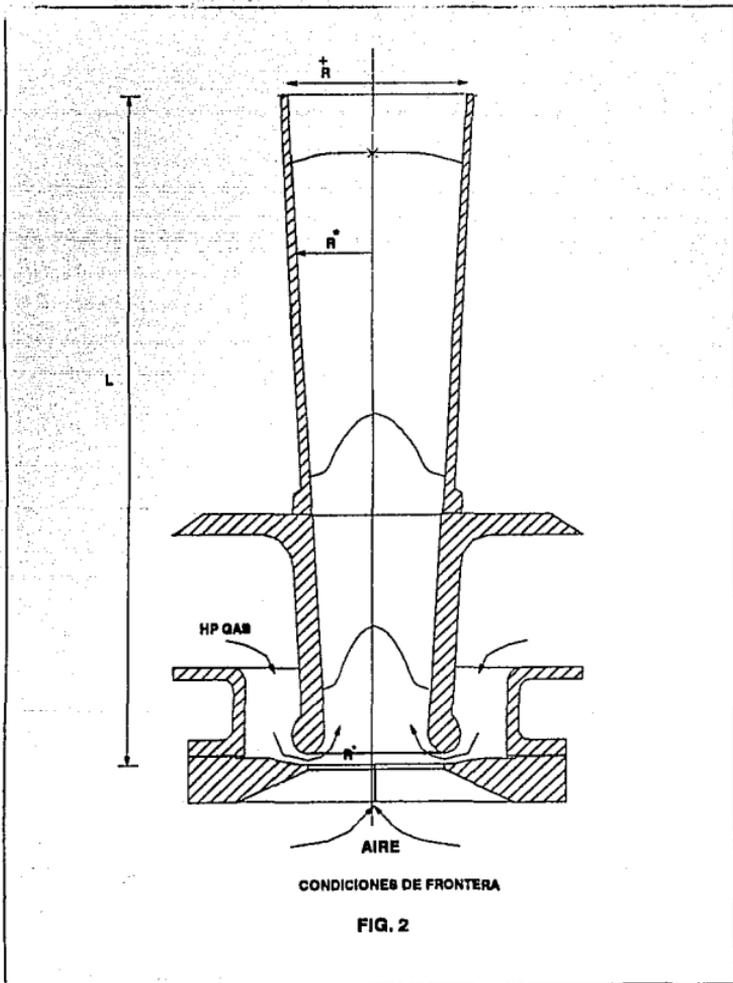
Tomando la ecuación de velocidad en la dirección radial r esta presenta diversos ordenes y para cada orden necesitamos definir una condición de frontera. por lo tanto tenemos,

ORDEN	# DE CONDICIONES DE FRONTERA
orden 1 de V_r en r	1 para V_r en r
orden 1 en z para $\frac{\partial V_z}{\partial r}$	1 para de z en $\frac{\partial V_z}{\partial r}$
orden 2 para V_r en z	2 para V_r en z
Para la dirección axial z	
orden 2 de V_z en r	2 para V_z en r
orden 1 para V_z en z	1 para V_z en z
<hr/>	
TOTAL. 7 condiciones de frontera	

Por lo tanto, debemos definir 7 condiciones de frontera respecto a las ecuaciones de velocidad.

Para definir estas condiciones de frontera nos valdremos de la siguiente figura en la cual consideraremos la siguiente ecuación general. (ver fig 2).

$$R^* = \frac{R^+ - R^-}{L} z + R^-$$



$$\left. \begin{array}{l} V_r = 0 \quad \text{cuando } r = R \text{ en toda } z \\ V_z = 0 \quad \text{cuando } r = R \text{ en toda } z \end{array} \right\} \text{ las cuales implican a las paredes del quemador.}$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\partial V_z}{\partial r} = 0 \quad \text{cuando } r = 0 \text{ en toda } z \\ V_z = V_z \text{ máx. para } r = 0 \text{ en toda } z \end{array} \right\} \text{ para el centro del quemador.}$$

$V_r = 0$ en $z = 0$ que es a la entrada del quemador.

$V_r = V_r \text{ máx.}$ cuando $z = L$ que es a la salida del quemador.

$V_z = \frac{Q}{\pi R^2}$ para $z = 0$ considera el flujo que entra al quemador. En la ecuación el denominador representa el área a la entrada del mismo.

Con esto quedan definidas las condiciones de frontera respecto a las velocidades. y en la figura de la página anterior podemos ver como se manifiesta el perfil de las mismas en el sistema, en la medida que aparece el efecto provocado por la turbulencia.

Para las condiciones frontera respecto a los balances de masa partiremos de las ecuaciones de los mismos. Los perfiles que se obtienen se pueden apreciar en las dos últimas figuras del presente capítulo.

Para el caso del metano la relación de concentración es de segundo orden respecto a r , lo que implica plantear dos condiciones frontera siendo el mismo caso para la dirección z ,

por lo que en total tendremos cuatro condiciones frontera.

CONDICIONES FRONTERA

Respecto a r .

Si $r = 0$ C_A tendrá siempre su valor máximo, esto es en el centro del quemador.

Cuando $r = R$ $C_A = 0$ lo cual implica las concentraciones en las paredes del quemador.

Respecto a z .

Si $z = 0$ $C_A = C_0$ que es la concentración inicial del metano.

Si $z = L$ $C_A \approx 0$ esto implica la salida del quemador.

Con esto quedan definidas las cuatro condiciones frontera para el metano que es uno de los reactivos. Para el oxígeno el comportamiento es el mismo, sin embargo, cabe señalar que la cantidad del oxígeno se encuentra en exceso, y por lo tanto cuando $z = L$ existe oxígeno presente.

Si $r = 0$ C_B tiene siempre su valor máximo.

Si $r = R$ $C_B = 0$ que es la concentración en la pared del quemador.

Respecto a z .

Si $z = 0$ $C_B = C$ que denota al oxígeno que va a reaccionar más el exceso del mismo.

Si $z = L$ $CB = C - C_0$ quedando el oxígeno que no reacciona y que es el exceso.

Con lo que quedan definidas las condiciones frontera para los reactivos.

Definición de las condiciones frontera para los productos.

Para el dióxido de carbono.

Si $r = 0$ CC tiene su concentración máxima.

Si $r = R^*$ entonces $CC = 0$

Respecto a z .

Si $z = 0$ entonces $CC = 0$ ya que la combustión aún no da inicio.

Si $z = L$ CC tiene su concentración máxima estequiométrica.

Para el agua tenemos:

Si $r = 0$ CD tiene su concentración máxima.

Si $r = R^*$ $CD = 0$ esto es en las paredes del quemador.

Si $z = 0$ $CD = 0$ ya que la combustión aun no da inicio.

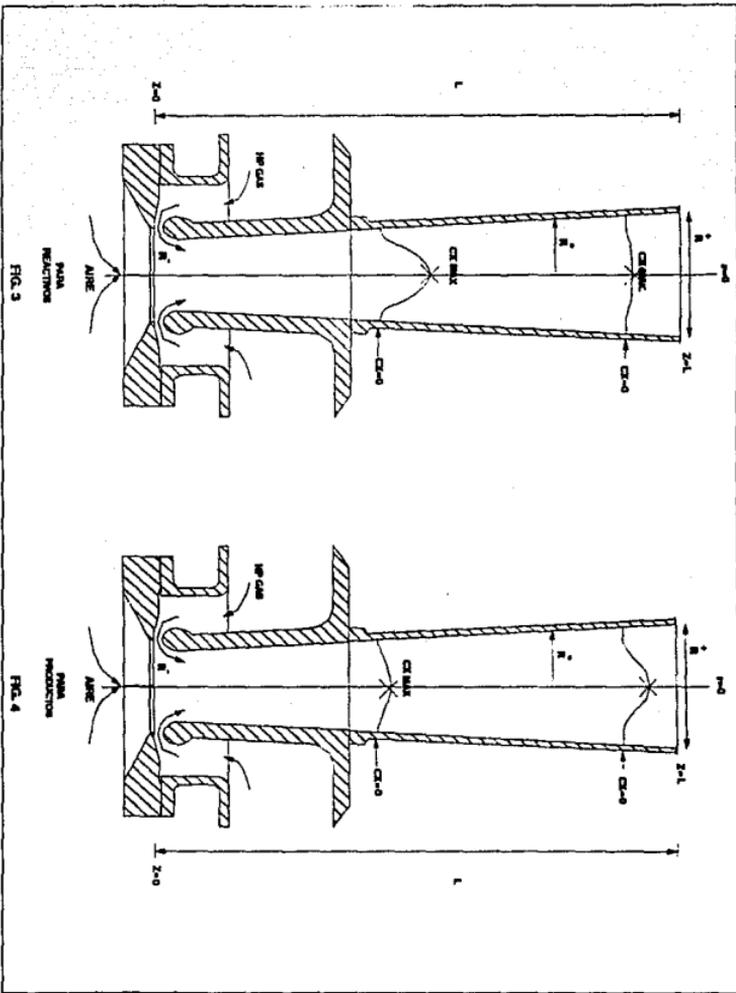
Si $z = L$ CD tiene su concentración máxima estequiométrica.

Las condiciones frontera definidas anteriormente, están planteadas en relación a las ecuaciones de balance de materia y

se entienden mejor con las figuras 3 y 4 . (12)
(ver fig 3 y 4).

En el presente capítulo, se plantearon las ecuaciones que definen los perfiles de velocidad y concentración que ocurren en el quemador Coanda Tipo Mardair durante la combustión.

Este planteamiento puede ser un tanto general ya que en el desarrollo del presente trabajo nos enfrentamos de manera constante a la limitada información reportada por parte de los investigadores que desarrollaron el Efecto Coanda, en lo que respecta al diseño de los quemadores. Sin embargo, se plantea como una propuesta para entender el alto grado de eficiencia en la combustión de los mismos.



CAPITULO V

COMPARACION ENTRE UN QUEMADOR ELEVADO CONVENCIONAL Y LOS QUEMADORES COANDA

Realizando una comparación entre el quemador Coanda y un quemador Convencional elevado, el primero presenta ventajas en cuanto a que realiza una mejor combustión; esto se debe entre otras cosas a las altas velocidades de flujo, a la geometría del quemador, y a la aplicación innovadora en quemadores del Efecto Coanda.

La combinación de estos factores da como resultado la obtención de un equipo compacto, versátil, eficiente, de bajo costo que presenta un quemado de combustible de casi el 100%. Con emisiones de humo mínimas, comparadas con las emisiones de los quemadores Convencionales o de Tubo.

En los quemadores Convencionales cuando se considera un buen diseño el quemado del combustible es del orden del 94 al 97% requiriendo un exceso de aire del 15 al 20%. (Esto está demostrado por la operación de los quemadores en campo), mientras que en los quemadores Coanda el aire implicado en la combustión es del orden del 2000%. (20 volúmenes de aire por volumen de gas combustible), esta demanda de aire es generada por las altas velocidades del fluido y la geometría especial del quemador, a diferencia de los quemadores elevados Convencionales cuya geometría es sencilla en relación a los quemadores Coanda, además de no manejar las altas velocidades de flujo, estos dos factores repercuten en un bajo nivel de arrastre de aire ocasionando una mínima eficiencia; teniendo además la desventaja operacional de tener estructuras más robustas y altas (altura de la torre del quemador directamente proporcional al flujo del combustible), esto conlleva a la necesidad de una estructura

para soportar el cuerpo del quemador lo cual genera problemas de espacio y altos costos de manufactura , además de mantenimiento.

Cabe señalar que en principio, la inversión de los quemadores Coanda puede parecer costosa por ser una tecnología innovadora, sin embargo, tal costo se justifica a largo plazo por que reduce al mínimo los requerimientos de espacio y mantenimiento, lo que justifica a los quemadores Coanda como una mejor opción en la optimización de la combustión.

Las compañías que desarrollaron los quemadores Coanda, (British Petroleum Co. y Kaldair Limited Co.), guardan celosamente el fundamento de su tecnología ya que esto garantiza su inversión y vanguardia en el desarrollo de este tipo de quemadores; por lo que limitan la información. en particular del dimensionamiento de los mismos.

En base a la información disponible se presentan los siguientes cuadros comparativos que implican factores tales como: radiación, longitud de flama, y ruido. (1,3)

En los cuadros mostramos algunas comparaciones entre los quemadores de tubo Convencionales y los quemadores Coanda tipo Indair y Mardair. podemos ver que en parametros tan importantes como la longitud de la flama y la radiación, los quemadores Coanda superan con mucho a los quemadores de Tubo.

En condiciones similares de operación, la longitud de la flama de los quemadores de Tubo es de casi el 50.0%, mayor en relación al quemador Coanda Tipo Indair y de aproximadamente el 64.0%. en relación al quemador Coanda Tipo Mardair.

(Debe observarse que entre los quemadores Coanda, el quemador Tipo Indair tiene una longitud de flama superior al Tipo Mardair en un 30.0% aproximadamente.)

Cabe recalcar esta cualidad de los quemadores Coanda, ya que pone en franca desventaja a los quemadores elevados Convencionales que manejan grandes flujos y en consecuencia presentan características de flama que degeneran en altos índices de radiación.

La distancia al quemador para un mismo nivel de radiación la abaten en mayor grado los quemadores Coanda; esto se muestra en el recuadro uno donde a una velocidad nula de viento encontramos un nivel de $440.0 \text{ BTU/ft}^2/\text{hr}$ de radiación para un gasto de 30.0 millones de pies cúbicos por día, para el quemador de tubo 197.0 ft, para el quemador Indair de 143.0 ft y para el quemador Mardair de 120.0 ft.

Por lo que se deduce que los niveles de radiación son mayores en los quemadores de Tubo que el los quemadores Coanda.

Este efecto se presenta a diversas condiciones de viento, de tal forma, que a 50.0 millas por hora las distancias al quemador para un valor de radiación de $440.0 \text{ BTU/ft}^2/\text{hr}$ se modifican a : 279.0, 171.0 y 144.0 ft respectivamente.

Esto repercute tanto en mayor seguridad para el personal como para los equipos adyacentes al quemador, lo cual se refleja en un abatimiento de costos, ya que tenemos un mejor aprovechamiento del espacio de trabajo. En la figura 1 podemos ver que la longitud de la flama y el escape bruto de calor son menores en los quemadores Indair que en los quemadores de Tubo. (ver fig 1).

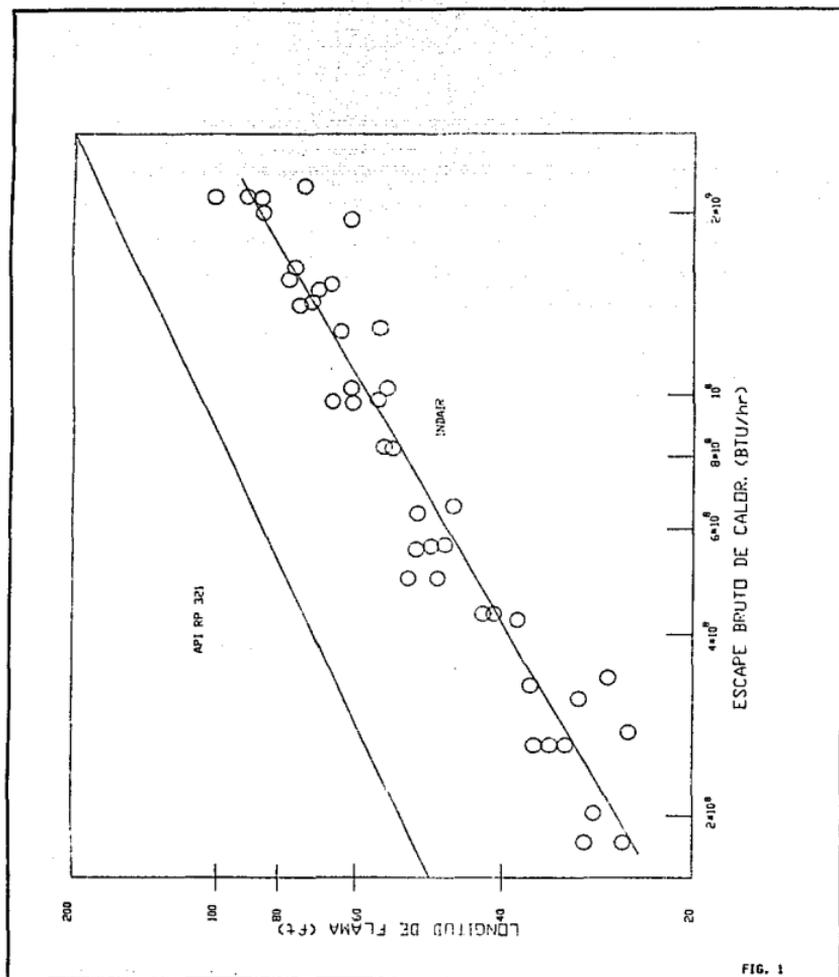


FIG. 1

Cabe señalar que las condiciones de ruido son extremas en los quemadores Coanda ya que trabajan con velocidades cercanas a las del sonido lo cual los pone en una aparente desventaja frente a los quemadores de Tubo cuya única fuente de ruido se debe a la combustión.

Los niveles de ruido en los quemadores Coanda son debido a dos factores:

--- A la combustión.

--- A el flujo que emerge de las ranuras.

El ruido debido a la combustión se denomina de baja frecuencia. (63.0,125.0,250.0 y 500.0 Hz). Mientras que el ruido debido al flujo se denomina de altas frecuencias. (1.0,2.0,4.0, y 8.0 Khz). Esta alta frecuencia se puede atenuar de alguna manera aunque no de manera significativa. En el recuadro dos se muestra una comparación de los niveles de ruido entre los quemadores Indair y los Mardair, tomando como punto de referencia una distancia de 100.0 ft. (2,4) (ver fig 2).

Los quemadores Coanda tienen la limitante de no poder emplearse en la industria química debido a su requerimiento de altas velocidades de flujo y gastos; lo cual los limita a la industrias petroleras, en tanto que los quemadores de tubo no tienen estas limitantes.

PERFIL DE RUIDO PARA QUEMADORES

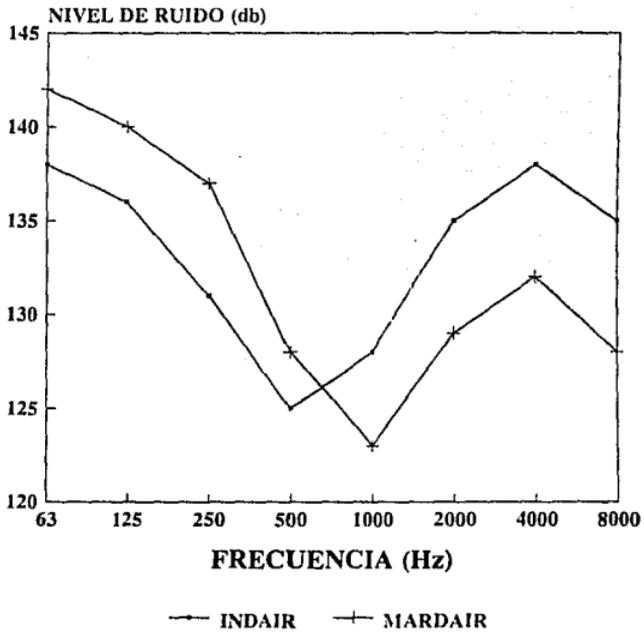


Fig. 2

TIPO DE QUEMADOR	TUBO	INDAIR	HARDAIR
TAMANO DE FLAMA (FT)	138.0	70.0	50.0
VELOCIDAD DE VIENTO	DISTANCIA AL QUEMADOR (FT)		
0.0 MPH	197.0	143.0	120.0
50.0 MPH	279.0	171.0	144.0

RECUADRO # 1

FLUJO TOTAL (MMSCFD)	NIVEL DE RUIDO	
	INDAIR dbA	HARDAIR dbA
19.0	106.0	93.0
23.0	107.0	93.0
26.0	109.0	94.0
28.0	108.0	95.0
30.0	109.0	95.0
34.0	110.0	96.0

RECUADRO # 2

CONCLUSIONES

Por lo antes expuesto los quemadores Coanda son una buena opción para la industria petrolera nacional, ya que la tecnología en la cual están fundamentados es vanguardista y asegura una mejor combustión que los sistemas tradicionales empleados actualmente, con lo cual también garantizamos un mejor cuidado de las emisiones atmosféricas despedidas por el quemador a los ecosistemas.

Además de que se abaten costos de manufactura y mantenimiento sobre todo en los quemadores Coanda Tipo Indair.

El ahorro de espacio es sustancial ya que estos quemadores no requieren de soportería puesto que se ha minimizado la altura del mástil de los quemadores, con esto se tiene además un mejor control de flama y de los niveles de radiación.

Aparentemente la inversión inicial en la adquisición de un quemador Coanda es demasiado costosa, sin embargo, a largo plazo se justifica, pues los beneficios que se obtienen en el empleo de estos quemadores son múltiples y diversos.

Cabe señalar que este tipo de quemadores hasta ahora diseñados han probado su efectividad en las plantas petroleras en donde las velocidades de flujo y gastos son grandes en comparación con los empleados en la industria química.

Sin embargo, las investigaciones persisten y se sigue trabajando en los prototipos Stedair para eliminar los inconvenientes de las altas velocidades de flujo que sería difícil generar en la industria química ; sustituyendolas por vapor de alta presión.

BIBLIOGRAFIA.

- 1.-Titulo: NO SMOKE WITH FIRE.

Autor: Desty, D. H.

Corporate source: British Petroleum, Sunbury-on-Thames, Surrey, England.

Fuente: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Parte A: "Power and Process Engineering" Vol.197 Jul 1983 p 159-170.

- 2.-Titulo: DEVELOPMENT OF COANDA FLARES.

Autor: Turner, P. J.; Chesters, D. A.

Publicada por: Kaldair Ltd.

Titulo de la Conferencia: " Developments' 82. (Institution Chemical Engineers Jubilee Symposium).

Publicación: EFCE Publication Series (European Federation Chemical Engineers (Symposium Series D-73), Rugby, Warwickshire, Inglaterra P A127- A139.

Año de publicación: 1982.

- 3.-Titulo: ENVIRONMENTAL PROBLEMS PROMPT FLARE SYSTEMS DEVELOPMENT.

Autor: British Petroleum Co Ltd.

Publicación: Ocean Industry Vol 12 N.4 p 208 - 211 (abril 1977)

- 4.-Titulo: THE DESIGN, DEVELOPMENT, AND PERFORMANCE OF INDAIR MARDAIR FLARES (FOR DISPONSAL OF HIGH VOLUMENES OF NATURAL GAS).

Autor: Wilkins J.; Desty D.H.; Mason J. T. M.; Nerby n.; Witheridge R.E.

Publicada por: Bp Trading Ltd ; Br. Petroleum Co. Ltd; Bp Petroleum Developments Ltd; Bp Alaska Inc.

Publicación: 9th Offshore Technological Annual Conference. (Houston 5/2-5/77) Proc. v 2 N.OCT-2822 123 30 (1977).

5.-Titulo: THE ORIGATION, DEVELOPMENT, AND APPLICATION OF
NOVEL, PREMIXED FLARE BURNERS EMPLOYING THE COANDA EFFECT.

Autor: Desty D. H.; Boden J. C.; Witheridge R. E.; British
Petroleum Co. Ltd

Publicada por: British Petroleum Co. Ltd./ Kaldair Ltd.

Publicación: 85th Aiche Natl. Meet. (Philadelphia 6/4-8/78).

Prepr. N. 57A 30p.

6.-Titulo: BP'S (BRITISH PETROLEUM Co. Ltd.) NEW INDAIR FLARE
BURNS WASTE GAS WITHOUT SMOKE.

Autor: British Petroleum Co. Ltd.; Cranfield J.

Publicación: Petroleum Petrochemical Internation Vol.3 N.11

86-87 89-90 (Nov 1973)

7.-Titulo: NEW FLARE BURNS SMOKELESSLY.

Autor: British Petroleum Co. Ltd.

Publicación: Oil gas Journal N. 47 71-72 (11/19/73).

8.-TITULO: APPLICATIONS OF COANDA EFFECT

AUTOR: SCIENTIFIC AMERICAN

Vol. 214 No. 6 pp. 84-92

June 1966

9.-TITULO: A.P.I RP 521.

GUIDE FOR PRESSURE RELIEF AND DEPRESSURING SYSTEMS.

1st.ed, seept 1969.

AUTOR: AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE

10.-TITULO: ECOLOGICAL ASPECTS OF COMBUSTION DEVICES.

AUTOR: SWITHENBANK, J.

AICHE JOURNAL. 18 (3), 553-560 (1972).

11.-DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACION DEL 18 OCTUBRE 1988.
BUFETE QUIMICO S. A. DE C. V.

12.-TITULO: FENOMENOS DE TRANSPORTE
AUTOR: R. BYRON BIRD, WARREN E. STEWART
Ed Reverté. S. A. 1978.

13.-JONH ZINK
COMBUSTION CONTROLS.

14.-SECRETARIA DE DESARROLLO SOCIAL
NORMA OFICIAL MEXICANA.
NOM SEDESOL-CCAT-019/92

15.-PERRY J. H, CHEMICAL ENGINEER'S HANDBOOK.
4TH, Mc Graw - Hill.

16.-TITULO: A. P. I RP 931
MANUAL ON DISPOSAL OF REFINERY WASTES
Atmospheric Emissions, June 1977.
AUTOR: AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE

17.-BECKER R. MATHEMATICAL MODEL OF LUMINOUS FLAME RADIATION
FOR THE DETERMINATION OF SAFETY ZONES.
Ger Chem Eng, Vol. 3, 1980

18.-LEY FEDERAL DE PROTECCION AL AMBIENTE.
Ed 1982.
