

147



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

Zejeu

FACULTAD DE INGENIERIA

**OPTIMIZACION DE LA COMBUSTION EN LOS
GENERADORES DE VAPOR INDUSTRIALES
TIPO PAQUETE**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO
P R E S E N T A N ,
MANUEL BERNARDO PARRA DUARTE
LUIS ANTONIO HUERTA ZURITA :**



DIRECTOR DE TESIS:

ING. VICENTE LOPEZ FERNANDEZ

MEXICO, D. F.

1995

FALLA DE ORIGEN

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

**OPTIMIZACION DE LA COMBUSTION
EN LOS GENERADORES DE VAPOR
INDUSTRIALES TIPO PAQUETE**

AGRADECIMIENTOS

A mi padre que ha sabido enseñarme la mejor lección, a mi madre que a sabido enseñarme el orden con que se lleva la lección y a mis hermanos con quienes he pasado grandes momentos de esta lección: la vida.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y en especial a la Facultad de Ingeniería, por esa educación tan completa, académica y socialmente , que me hace comprender el compromiso para con el país.

Al Ingeniero Vicente López Fernández por su gran apoyo en la realización de este trabajo.

A ti mi más grande tesoro por que representas mi máximo orgullo, y a quien debo parte de este logro.

INDICE TEMATICO

CAPITULO I INTRODUCCION RESUMEN

CAPITULO II GENERADORES DE VAPOR

- II.1 HISTORIA**
- II.2 GENERALIDADES**
 - II.2.1 DESCRIPCION**
- II.3 CLASIFICACION DE LOS GENERADORES DE VAPOR TIPO PAQUETE**
 - II.3.1 GENERADORES DE TUBOS DE HUMO**
 - II.3.2 GENERADORES DE TUBOS DOBLADOS**
- II.4 LA PRODUCCION DE VAPOR**
- II.5 CONDICIONES QUE DEBE DE CUMPLIR UN GENERADOR DE VAPOR
PARA UNA BUENA COMBUSTION**

CAPITULO III ASPECTOS GENERALES DE LA COMBUSTION

- III.1 ASPECTOS MECANICOS DE LA COMBUSTION**
- III.2 ASPECTOS QUIMICOS DE LA COMBUSTION**
 - III.2.1 DENSIDAD DE LOS GASES**
 - III.2.2 DENSIDAD DE LOS GASES MIXTOS**
 - III.2.3 TEMPERATURA DE COMBUSTION**
- III.3 ASPECTOS FISICOS DE LA COMBUSTION**
 - III.3.1 COMBUSTIBLES LIQUIDOS Y GASEOSOS**
 - III.3.2 ENCENDIDO**
 - III.3.3 GASES Y PARTICULAS SIN QUEMAR**
 - III.3.4 AIRE PRECALENTADO**
 - III.3.5 DISTRIBUCION DEL AIRE ATRAVES DEL CAUSE DEL
COMBUSTIBLE**
 - III.3.6 EFECTOS DE LA CALIDAD DEL CARBON**

CAPITULO IV CONTROL DE LA COMBUSTION

- IV.1 COMPOSICION QUIMICA DEL COMBUSTIBLE**
- IV.2 PROCESOS REALES DE COMBUSTION**
- IV.3 CALCULOS DE COMBUSTION**
 - IV.3.1 COMBUSTIBLES GASEOSOS**
 - IV.3.2 COMBUSTIBLES SOLIDOS Y LIQUIDOS**

- IV.3.3 GRAFICOS PARA CALCULOS RAPIDOS DE AIRE Y GASES DE LA COMBUSTION
- IV.3.4 DIAGRAMAS DE COMBUSTION
- IV.4 ANALISIS DE LOS GASES DE COMBUSTION
 - IV.4.1 MEDICION DEL CO₂
 - IV.4.2 MEDICION DEL O₂
 - IV.4.3 MEDICION DEL CO
 - IV.4.4 MEDICION DE INQUEMADOS SOLIDOS (INDICE DE BACHARACH)
- IV.5 CONTROL DE LOS GASES DE COMBUSTION
- IV.6 EFICIENCIA DE LA COMBUSTION
- IV.7 OPTIMIZACION DE LA COMBUSTION EN LOS GENERADORES DE VAPOR

CAPITULO V CLASIFICACION DE LOS SISTEMAS DE COMBUSTION

- V.1 SISTEMAS DE COMBUSTION DE GASES
 - V.1.1 SISTEMA I ALIMENTACION SEPARADA DEL GAS Y DEL AIRE A LA CAMARA DE COMBUSTION
 - V.1.2 SISTEMA II MEZCLADO DE BOQUILLA
 - V.1.3 SISTEMA III PREMEZCLADO PARCIAL CON REQUERIMIENTO DE AIRE SECUNDARIO
 - V.1.4 SISTEMA IV PREMEZCLADO TOTAL UTILIZANDO ENERGIA CINETICA
 - V.1.5 SISTEMA V PREMEZCLADO TOTAL UTILIZANDO MEZCLADORES MECANICOS
- V.2 SISTEMAS DE COMBUSTION DE LIQUIDOS
- V.3 SISTEMAS DE COMBUSTION DE SOLIDOS
 - V.3.1 LECHO FIJO
 - V.3.2 LECHO FLUIDIZADO

CAPITULO VI ESTUDIO DE LOS QUEMADORES DE BAJO NO_x

- VI.1 NATURALEZA DEL SMOG FOTOQUIMICO
 - VI.1.1 CLASIFICACION
 - VI.1.2 EFECTOS DEL NO_x
- VI.2 CINETICA PARA LA FORMACION DE NO_x
- VI.3 PRODUCCION DE NO_x POR QUEMADORES DE COMBUSTIBLE OPERANDO CON PEQUEÑOS EXCESOS DE AIRE
- VI.4 QUEMADORES DE BAJO NO_x
- VI.5 EFICIENCIA DEL QUEMADOR
- VI.6 DESENVOLVIMIENTO DE LOS NO_x DENTRO DE LA FLAMA
 - VI.6.1 EFECTOS DE LA ESTRUCTURA DE LA FLAMA
- VI.7 RECIRCULACION DE LOS GASES DE ESCAPE

- VI.8 FORMACION Y REDUCCION DEL NO_x
- VI.8.1 REDUCCION DE NO_x
- VI.9 REPERCUSIONES DEL NO_x
- VI.10 CONTROL DE NO_x
- VI.10.1 INYECCION DE AMONIACO (NO CATALITICA)
- VI.10.2 TECNICAS DE CONTROL DEL NO_x EN LA POSTCOMBUSTION
- VI.10.3 REDUCCION CATALITICA SELECTIVA
- VI.11 EJEMPLOS DE CONTROL DE LA COMBUSTION DEL NO_x
- VI.12 COSTOS DE CONTROL DEL NO_x
- VI.13 COSTOS DE EQUIPO DE CONTROL

CAPITULO VII NORMATIVIDAD

- VII.1 OBJETIVO
- VII.2 CAMPO DE APLICACION
- VII.3 REFERENCIAS
- VII.4 ESPECIFICACIONES
- VII.5 REQUISITOS Y CONDICIONES PARA LA OPERACION DE LOS EQUIPOS DE COMBUSTION
- VII.6 VIGILANCIA
- VII.7 SANCIONES

CAPITULO VIII MEDIDAS PRACTICAS PARA OPTIMIZAR LA COMBUSTION

- VIII.1 RAZONES DEL USO DEL COMBUSTIBLE GASEOSO Y NO SOLIDO NI LIQUIDO EN LA COMBUSTION
- VIII.2 MODIFICACION DE LA COMBUSTION
- VIII.3 CONDICIONES BASICAS QUE UN QUEMADOR DEBE SATISFACER PARA UNA BUENA COMBUSTION
- VIII.4 CONTROL DE LA OPERACION DE LOS QUEMADORES DE BAJO NO_x
- VIII.5 CRITERIOS DE SELECCION DE SISTEMAS DE REGULACION Y CONTROL
- VIII.6 METODOS PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DEL GENERADOR DE VAPOR
- VIII.7 PROBLEMAS TÍPICOS Y RECOMENDACIONES PRACTICAS

CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFIA

OBJETIVO: PRESENTAR UN CONJUNTO DE MEDIDAS PARA OPTIMIZAR LOS SISTEMAS DE COMBUSTION EN LOS GENERADORES DE VAPOR INDUSTRIALES TIPO PAQUETE QUE REDUNDEN EN EL APROVECHAMIENTO EFICIENTE DE LA ENERGIA Y LA CONSECUENTE DISMINUCION DE EMISIONES CONTAMINANTES.

CAPITULO I INTRODUCCION

Como sabemos la contaminación en México es de un alto índice en comparación de otras ciudades y se debe, en gran parte, a las emisiones de los automóviles y en menor proporción, pero también de tomarse en cuenta, a las grandes masas de gases contaminantes que desprenden las industrias por medio de sus grandes hornos y generadores de vapor.

Así pues, en estos últimos tiempos es necesario eliminar los excesos de gases contaminantes como CO₂, CO y los NO_x, ya que estos contienen un alto porcentaje de materia tóxica que, por lo general, es dañina para los seres vivos.

Ahora bien, lo que se pretende con este trabajo es proponer una serie de alternativas para optimizar los sistemas de combustión y reducir las emisiones contaminantes en los generadores de vapor industriales tipo paquete y que a su vez representen un incremento en la eficiencia de estos equipos mediante el uso racional de la energía.

La elaboración de este trabajo fue pensando que en el país existen un sin número de equipos generadores de vapor, tanto en el aspecto industrial como de servicios, lo que generará grandes volúmenes de gases contaminantes que disminuye la calidad del aire que respiramos. Por lo anterior, hoy en día se cuenta con diversos equipos con sistemas que minimizan las emisiones dentro de los parámetros que establecen las normas ecológicas; esto se logra, por una parte mejorando la calidad del combustible y por la otra, mejorando la eficiencia del quemador.

Por otro lado, cabe mencionar que en el generador de vapor existe un equipo que va relacionado estrechamente con el quemador, del cuál sólo se hará mención para tener una visión general del proceso; dicho equipo es el economizador, el cuál se instaló para aumentar la temperatura del agua de alimentación al generador de vapor para de esta manera disminuir el consumo de combustible en el precalentamiento del fluido de trabajo.

El uso del economizador en los generadores de vapor industriales de grandes magnitudes es prácticamente obligatorio dada su rentabilidad, mientras en los generadores de vapor pequeños no son de uso común, sin embargo, al aumentar el uso del combustible aunado al mejoramiento ambiental se da el uso de los generadores de vapor industriales tipo paquete ya que la disminución de las emisiones de gases contaminantes y el ahorro en el consumo de energía son proporcionales a sus beneficios y costo

De acuerdo a los elementos que integren el generador de vapor dependerá la eficiencia del mismo; por esta razón, se debe evaluar los requerimientos necesarios para alcanzar el objetivo deseado. La rentabilidad del generador de vapor estará en función del costo inicial del equipo y de la capacidad de aprovechar la energía generada.

Por lo anterior, las normas ecológicas que regulan las emisiones permisibles, de gases contaminantes, día con día, han sido más estrictas; lo cual trae como consecuencia la búsqueda de combustibles de mayor calidad, el diseño de construcción más óptimo, mejores materiales para la fabricación, etc. que en suma dan un equipo menos contaminante y más eficiente. Estas normas son establecidas por la Secretaría de Desarrollo Social.

Pero, en México existen muchos equipos generadores de vapor muy trabajados y antiguos, por lo cual se requiere de un mantenimiento constante que garantice el buen funcionamiento de todos los sistemas que conforman los generadores de vapor. En muchas ocasiones, el costo de mantenimiento es alto; por lo cual la mayoría de las empresas que cuentan con estos equipos no les dan el mantenimiento necesario y los operan con muy baja eficiencia provocando altos porcentajes de gases dañinos para la salud.

Los técnicos especialistas en la materia, debido a la experiencia que obtienen con los años, adquieren cierta habilidad para ajustar los controles que regulan el gasto de combustible y aire, para obtener una mezcla aire-combustible cercana a la estequiométrica que produzca una buena combustión.

Desde la existencia hasta los sistemas más modernos de generadores de vapor se han ido, adquiriendo algunas medidas y recomendaciones prácticas que favorecen mucho el incremento de la eficiencia. Estas medidas y recomendaciones se han ido desarrollando conforme han surgido problemas típicos que se presentan en el funcionamiento de estos equipos.

Debido a la gran importancia que representan estos equipos para la industria en general, seguirán desarrollándose, cada día más hasta lograr sistemas generadores de vapor con un alto porcentaje de eficiencia y no contaminantes.

RESUMEN

En el tema que a continuación se presenta se darán a conocer los siguientes aspectos:

Se describirán técnica y científicamente los equipos que existen dentro del generador de vapor que son destinados a la producción de vapor, tanto para uso industrial como de servicio.

También, se mencionarán los aspectos fundamentales de la combustión como son: temperatura y presiones de operación, clasificación de los combustibles y análisis de los gases de escape así como una clasificación de los diferentes sistemas de combustión del generador de vapor; además de los diferentes tipos de quemadores de bajo NOx que existen para disminuir el alto índice de contaminación.

Posteriormente, se darán a conocer las normas que regulan los niveles máximos permisibles de contaminación en fuentes fijas como es el caso, los generadores de vapor industriales tipo paquete; en un estudio cuantitativo, tanto económica como energéticamente. Dicho estudio, se tendrá que ir realizando año con año para actualizar sus diseños y así tener una mayor eficiencia y confiabilidad de estos equipos.

Finalmente, se mencionarán algunas medidas prácticas para optimizar la combustión en los generadores de vapor industriales tipo paquete.

CAPITULO II GENERADORES DE VAPOR

II.1 HISTORIA

Los generadores de vapor o (boilers) son la estación de poder en escuelas y viviendas que cuentan con los suficientes recursos, dichos generadores son equipos empleados todos los días del año y su historia data desde hace poco en comparación a otros sistemas de calefacción que se usan en la actualidad.

El funcionamiento de los mejores generadores proviene del poder mecánico y su industrialización comienza en la Gran Bretaña muy cercana al siglo XVIII con la necesidad de cubrir el pequeño interés humano por el poder mecánico, con lo cual el Marqués de Warcester y otro personaje como Watt vinieron a liberar el poder de la corriente y por lo tanto, el de los generadores de vapor.

Desde los tiempos pasados, estos generadores sólo se usaban como simples complementos para hacer funcionar maquinaria, como era el caso más general el de los barcos de vapor. Pero como han transcurrido los años el hombre ha hecho de estos equipos elementos importantes tanto para un uso particular como general.

Actualmente, estos equipos han ganado el grado de indispensables por el gran campo de aplicación, como por ejemplo industrias, comercios y hogares, por lo cual seguirán evolucionando constantemente hasta lograr en un futuro sistemas generadores de vapor no contaminantes.

II.2 GENERALIDADES

El término de generadores de vapor conocidos también con el nombre de calderas es aplicado a un grupo de dispositivos térmicos, los cuales actúan mediante el empleo de energía calorífica que transmiten a algún fluido permitiendo elevar su temperatura llegando hasta el punto de cambio de fase.

Estos tipos de dispositivos son utilizados básicamente en procesos industriales; como en sistemas de calefacción y calentamiento de agua para usos generales.

Para definir estrictamente lo que se entiende por un generador de vapor comenzaremos señalando que ésta diseñado para la obtención exclusiva de una sustancia en estado gaseoso, generalmente, vapor de agua; mientras que el suministro al dispositivo será en estado líquido, lo que se cumple para los generadores de vapor convencionales tipo paquete, en el cual el suministro de calor será de una fuente externa para que se produzca la combustión de algún derivado del petróleo.

1.2.1 DESCRIPCION.

Un generador de vapor moderno, es un conjunto integrado por varios componentes esenciales. Su función es convertir el agua en vapor a presión y temperatura predeterminadas, lo que constituye un cambio de estado físico producido por la transmisión de calor de la combustión de una sustancia al agua. Comúnmente es un proceso a presión constante.

El generador de vapor es un depósito a presión en el cual se bombea agua en estado líquido a la presión de operación y sus principales funciones son:

La transmisión de calor y la producción de presión en un fluido.

La unidad completa consiste de: (1) Partes sometidas a presión, (2) Local o instalación; (3) Equipo de combustión; (4) Órganos auxiliares.

Las partes que trabajan a presión generalmente en las calderas son las siguientes:

- (a) La superficie de calefacción de la caldera y los tanques de almacenamiento para el agua y el vapor.
- (b) La superficie de recalentamiento constituye simplemente una superficie adicional por la que debe

pasar vapor antes de salir de la caldera.

La superficie de calefacción esta constituida por tubos de acero sin soldadura, estando comprendidos los tamaños normales que más se ven entre 5.1 y 10 cm de diámetro exterior, variando sólo por incrementos de 1.27 cm.

El cuerpo de la caldera consiste en un cilindro con extremos esféricos, construido en placas de acero soldadas dando la forma deseada y las cuales se pueden excluir de estos trabajos si se hacen a muy altas presiones.

Son también componentes esenciales de una caldera, el hogar para quemar el combustible y los quemadores o alimentadores de combustible de los cuales se dará una explicación mas detallada en los capitulos siguientes.

II.3 CLASIFICACION DE LOS GENERADORES DE VAPOR TIPO PAQUETE.

La primera clasificación que se impone a las calderas de alta presión se hace según la superficie de calefacción tubular que este cubierta con agua o con los gases calientes de la combustión. Según está clasificación resultan dos grupos: Los generadores de vapor de tubos por donde circulan gases y los generadores de vapor de tubos por donde circula agua.

Los generadores de tubos por donde circulan gases, son aquellos en los que los productos de la combustión pasan por los tubos y por el otro lado están rodeadas de agua. Para esto se requiere que los tubos se encuentren dentro de una cubierta para confinar el agua y pueda soportar la presión. La mayor parte de los generadores vapor de tubos por donde circulan gases están formados por un haz de tubos soldados a una cubierta, los tubos son rectos y paralelos entre si al eje de la cubierta, las variaciones que pueden presentar son las siguientes :

a) Eje vertical u horizontal

b) Hogares interiores o exteriores; cubiertas total o parcialmente cilíndricas.

Dichos generadores tienen una relación relativamente grande entre el contenido de agua y la capacidad para producir vapor, en estos se pueden usar sistemas automáticos de control sencillos o si el control es manual no necesita ser una supervisión tan rigurosa ni continua como la de los generadores de tubos por donde circula agua, como se indica en las figuras II.1, II.2, II.3, II.4, II.5, donde se muestran los modelos básicos de recirculación en generadores de vapor industriales de tubos por donde circulan los gases.

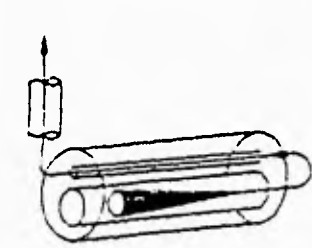
Las principales ventajas de los generadores de tubos por donde circulan gases es que son:

- Compactos
- Independientes
- Portables
- Económicos

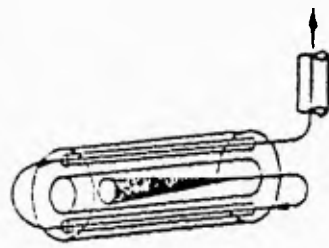
Las principales desventajas son:

- Restringir el vapor libre en espacios disponibles.
- Acoplamiento del calor en la concha vertical.
- Tamaño que es limitado a 4.5 m de ancho.
- Limitantes de rendimiento para diseños comunes que son de 20 MW para combustibles gaseosos y de 12 MW para combustibles líquidos.
- Sujetarse a una presión externa aumentando los espesores y aumentando los esfuerzos térmicos producidos por que el gradiente de temperatura a través del material es sumamente estandarizado.

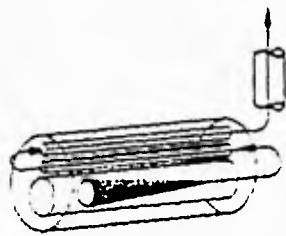
Los generadores de vapor de tubos por donde circula agua, consisten en tubos y tambores que se pueden clasificar en :



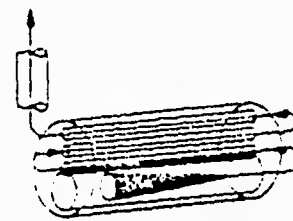
De dos retornos parte posterior seca



De tres retornos parte posterior entrada por agua



De tres retornos parte posterior seca



De cuatro retornos parte posterior seca

FIG II 1 MODELOS BÁSICOS DE RECIRCULACION EN GENERADORES DE VAPOR DE TUBOS DE HUMO

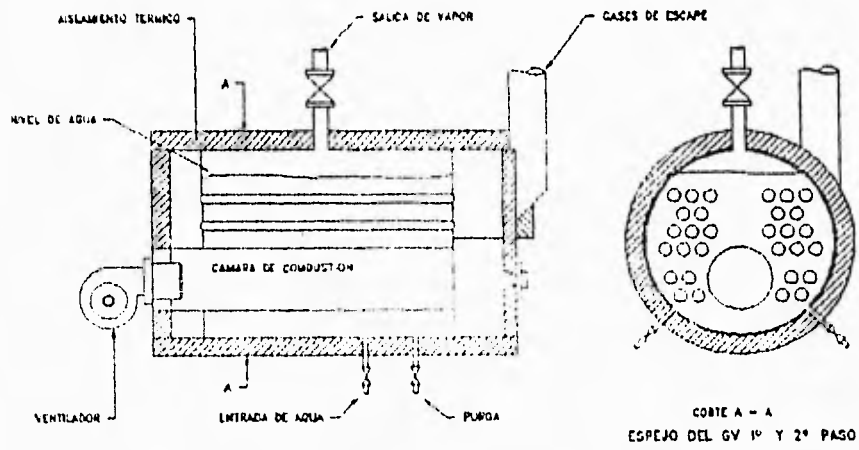


FIG II.2 ESQUEMA DE UN GENERADOR DE VAPOR DE TUBOS DE HUMO

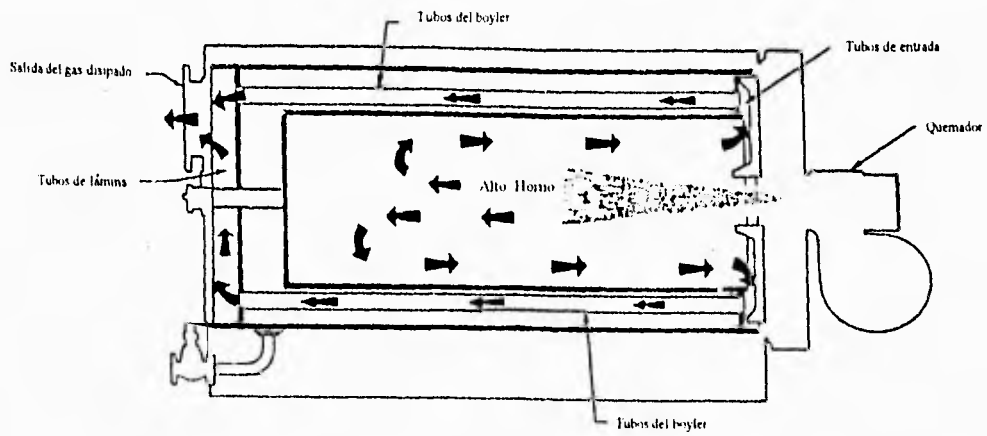


FIG II.3 BOYLER DE FLAMA INVERTIDA

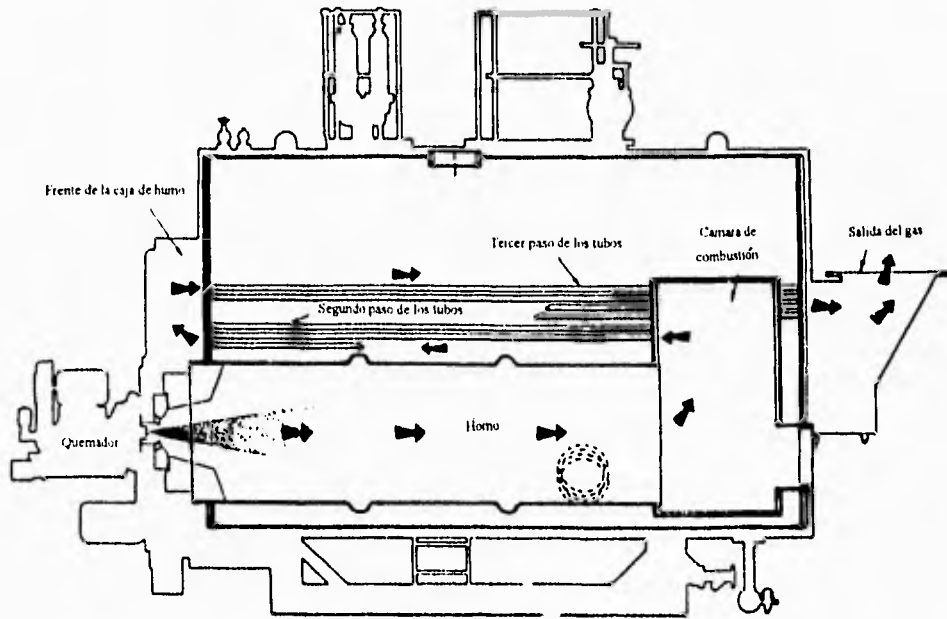


FIG. II. 4 VISTA POSTERIOR DE UN BOYLER ECONÓMICO DE TRES PASOS Y RESPALDOS HÚMEDOS

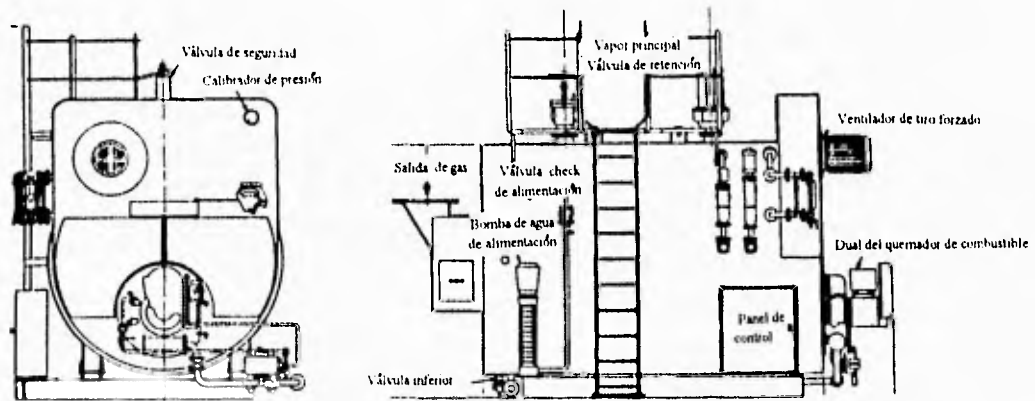


FIG. II. 5 BOYLER DE TUBOS DE HUMO TIPO PAQUETE

- a) Generadores de tubos rectos
- b) Generadores de tubos doblados

II.3.1 GENERADORES DE TUBOS RECTOS

Estos llevan un grupo de tubos paralelos rectos de igual longitud, arreglados según un sistema uniforme y unidos en sus extremos a cabezales. Estos cabezales a su vez están unidos a uno o más tambores horizontales. Según su construcción los cabezales pueden clasificarse en dos tipos: los de caja y los seccionales.

Cabezales de caja Son aquellos que llevan tirantes para contrarrestar la presión de los fluidos; la superficie del cabezal debe ser perpendicular al eje del tubo puesto que deben estar inclinados con respecto a la horizontal para poder controlar la circulación.

Cabezales seccionales Son aquellos que son adecuados para resistir las altas presiones; ya que su superficie no es una hoja plana pueden ser forjados o vaciados de manera que si el cabezal es vertical presente en su unión con los tubos una superficie que sea normal al eje de los mismos.

II.3.2 GENERADORES DE TUBOS DOBLADOS

Estos no llevan cabezales por lo cual los tambores desempeñan la función de estos, por lo que uno o más generadores de vapor se construyen con un tambor y dos o más cabezales cilíndricos. El o los tambores deben ser suficientemente grandes para ponerles un registro en sus extremos, en este tipo de generadores todas las hileras de tubos menos una deben de ser de tubos doblados. Las distribuciones más comunes de las superficies de calefacción son

Tambor y Medio Un tambor superior se coloca un tambor inferior más corto el espacio que queda

debajo del tambor superior y delante del inferior se utiliza para colocar el hogar. el cual sus paredes laterales están cubiertas de tubos llenos de agua conectadas al tambor superior y a los cabezales inferiores. Este es un diseño barato y compacto para generadores pequeños en las que se permite el enfriamiento con agua del hogar.

Dos Tambores Tienen dos tambores horizontales de igual longitud pero no necesariamente del mismo diámetro colocados uno arriba del otro y unidos por varias filas de tubos doblados.

Tres Tambores Llevan dos tambores superiores y uno inferior arreglados de manera que uno de los superiores lleve el indicador de nivel de agua y otro que actúe realmente como cabezal. Puede haber muchas variaciones que se den a los tres tambores; pero anteriormente, se construían calderas con cuatro o más tambores cosa que actualmente ya no se usa.

Teniendo en cuenta los tambores del generador de vapor y los agujeros que estos tienen donde se introducen los tubos, se pueden calcular los esfuerzos circulares mediante la siguiente expresión:

$$F = P \times D / [2T \times (p-d)/p]$$

Donde

P Es la presión de diseño del generador

D Diámetro del tambor.

p Es el tubo de tiro - centro - deslincado del centro a lo largo del barril.

d Diámetro del agujero del tambor.

p-d/p Representa la proporción del material disponible del tambor a través de los agujeros del mismo.

Esto puede ser visto desde que la presión P aumenta provocando que el espesor del barril también aumente si el esfuerzo F no es muy excedido.

Algunos ejemplos de estos generadores de vapor, se muestran en las figuras II.6, II.7, II.8, II.9 y II.10.

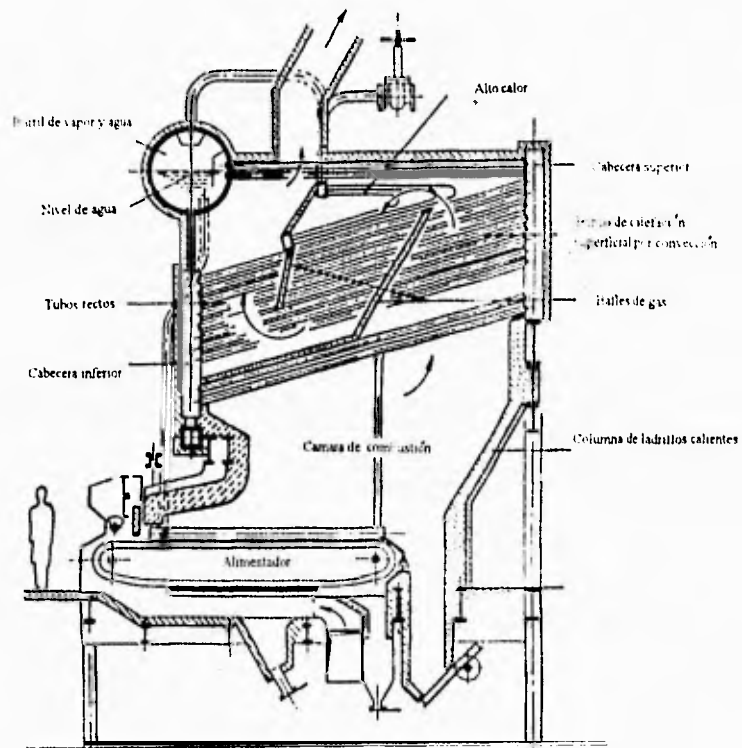


FIG. II. 6 BOYLER DE TUBOS RECTOS DE AGUA

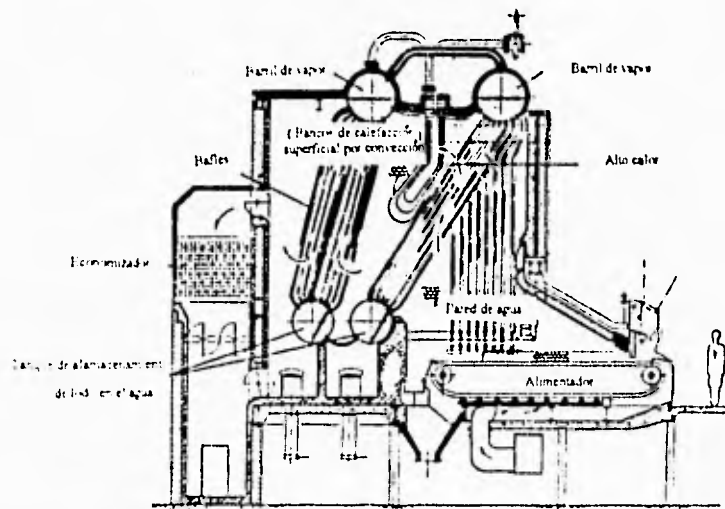


FIG II 7 BOYLER DE CUATRO TANQUES DE TUBOS INCLINADOS Y CON MURO PARCIALMENTE FRESCO

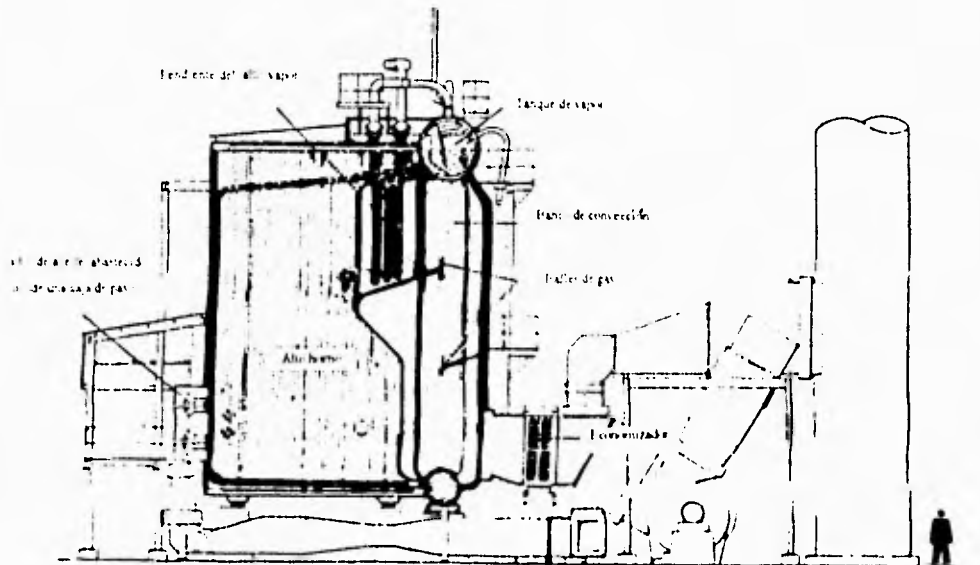


FIG II 8 BOYLER CON DOS BARRILES DE ACEITE, GAS CALIENTE Y PAREDES HÚMEDAS

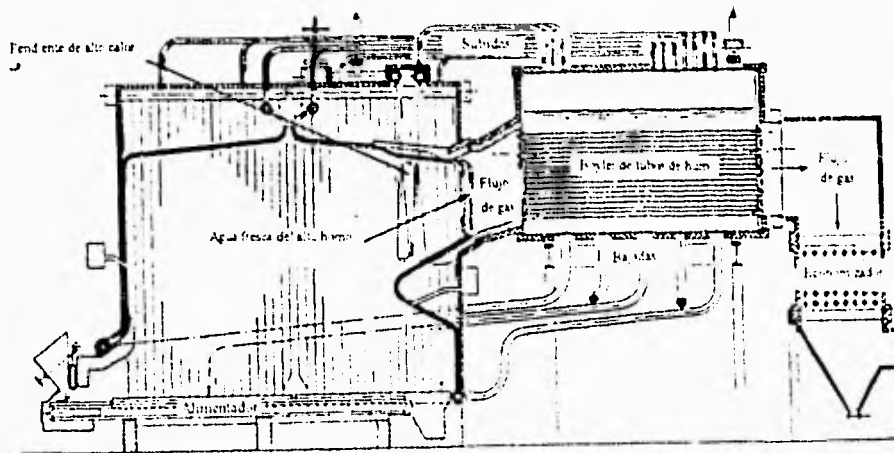


FIG II 9 COMPONENTES DEL BOYLER

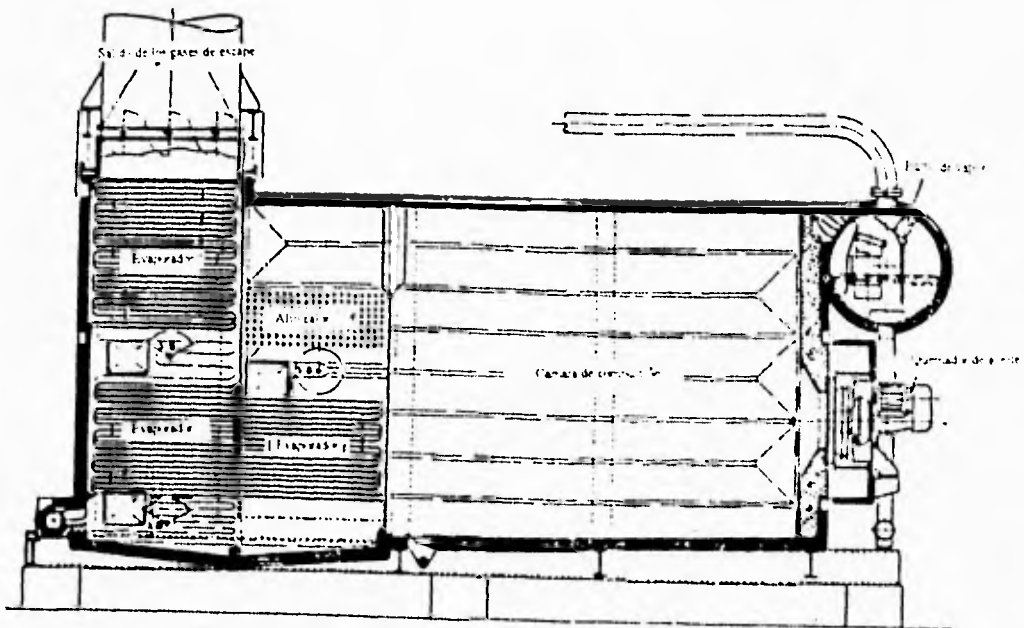


FIG II 10 ENSAMBLADO DE UN BOYLER DE TUBOS DE AGUA Y CIRCULACION FORZADA

11.4 LA PRODUCCION DE VAPOR

La capacidad de producción de vapor dependerá de los siguientes factores.

1. Grado de combustión obtenido en la cámara de ignición.
2. Área de superficie de calefacción.
3. Proporción en la que se distribuye la superficie en áreas de calefacción primaria (calor por radiación) y secundaria (calefacción por convección).
4. La circulación del vapor y la de los gases de la combustión

Para que se lleve a cabo una buena combustión es necesario remover los gases que se generaron durante dicho proceso, esto se logra mediante un suministro de cierta cantidad de aire adicional al que se requiere para la combustión mediante un flujo natural, debido al tiro de la chimenea o en los casos que lo requiera adaptar un tiro forzado inducido por un ventilador.

La mayoría de estos generadores de vapor son diseñados para operar con combustibles líquidos, porque con el uso del carbón se presentan complicaciones adicionales como son la dificultad en el manejo de combustible y de las cenizas producidas en la combustión. Este problema de remoción de cenizas acumuladas es una de las dificultades más grandes para poder crear un sistema totalmente automático.

La superficie de calefacción puede ser manejada de distintas maneras pero dependerá esencialmente del diseño del generador de vapor por lo que la distribución de las áreas de calefacción puede ser dato obtenido de diseños anteriores, censando el comportamiento de la eficiencia de estos y retroalimentando esta información para nuevos diseños.

DISEÑO DE LA CALDERA

El diseño de la caldera y la limpieza de las superficies de calefacción tanto de agua como de los gases, son los factores que permiten la transferencia de calor hacia el agua. Un buen diseño con superficies limpias representan maximas transferencias de calor y menos pérdidas por las chimeneas.

Diseños anticuados u hollín e incrustación en los tubos de la caldera reducen la transferencia de calor, incrementan la temperatura de los gases de escape en la chimenea y consecuentemente producen una eficiencia reducida.

DISEÑO DEL QUEMADOR

Todos los quemadores requieren de un exceso de aire adicional a la cantidad de aire requerido para la combustión. Si se suministra una cantidad de aire insuficiente para la combustión la flama humeará y cubrirá los tubos de hollín y de carbón.

En caso contrario si emplea grandes cantidades de exceso de aire, el aire innecesario es calentado y es expulsado por la chimenea llevando consigo considerables cantidades de calor que es desperdiciado. Consecuentemente es importante en la eficiencia de operación la relación aire/combustible y deberá ser comprobada con un analizador de gases de combustión.

La forma de circulación de los fluidos através del generador de vapor repercutirá en gran medida sobre la relación producción-consumo del sistema del generador de vapor, esté es entre otras cosas que cuando sea mayor la turbulencia de los fluidos se darán altos numeros de Reynolds y por consecuencia mayor será su capacidad de transmitirse calor entre ellos, dado que los factores de transferencia de calor por convección son directamente proporcionales al grado de turbulencia.

DISEÑO DE LA CALDERA

El diseño de la caldera y la limpieza de las superficies de calefacción tanto de agua como de los gases, son los factores que permiten la transferencia de calor hacia el agua. Un buen diseño con superficies limpias representan máximas transferencias de calor y menos pérdidas por las chimeneas.

Diseños anticuados u hollín e incrustación en los tubos de la caldera reducen la transferencia de calor, incrementan la temperatura de los gases de escape en la chimenea y consecuentemente producen una eficiencia reducida.

DISEÑO DEL QUEMADOR

Todos los quemadores requieren de un exceso de aire adicional a la cantidad de aire requerido para la combustión. Si se suministra una cantidad de aire insuficiente para la combustión la flama humeará y cubrirá los tubos de hollín y de carbón.

En caso contrario si emplea grandes cantidades de exceso de aire, el aire innecesario es calentado y es expulsado por la chimenea llevando consigo considerables cantidades de calor que es desperdiciado. Consecuentemente es importante en la eficiencia de operación la relación aire/combustible y deberá ser comprobada con un analizador de gases de combustión.

La forma de circulación de los fluidos através del generador de vapor repercutirá en gran medida sobre la relación producción-consumo del sistema del generador de vapor, esté es entre otras cosas que cuando sea mayor la turbulencia de los fluidos se darán altos números de Reynolds y por consecuencia mayor será su capacidad de transmitirse calor entre ellos, dado que los factores de transferencia de calor por convección son directamente proporcionales al grado de turbulencia.

II.5 CONDICIONES QUE DEBE CUMPLIR UN GENERADOR DE VAPOR PARA UNA BUENA SELECCION

La eventual reconversión del generador en un uso determinado se puede ajustar a distintos combustibles, partiendo de aquel para el cual fue diseñado o bien para la adición de nuevos equipos como precalentadores, economizadores, etc.

Con el objeto de hacer más efectiva la clasificación establecida anteriormente se resume a continuación los principales puntos que han de ser determinantes para la selección y diseño.

- 1) Construcción robusta y compensadora de dilataciones.
- 2) Tambor recolector de impurezas de agua (lodos), con el fin de que estas impurezas no queden sometidas al fuego.
- 3) Suficiente capacidad de agua y vapor de forma que pueda absorber la demanda de vapor.
- 4) Relación superficie de vaporización/capacidad de vaporización adecuada para no formar espumas.
- 5) Las juntas de dilatación no deben estar expuestas al fuego.
- 6) La cámara de combustión debe de estar diseñada de tal manera que la combustión sea completada antes de que los gases pasen por los recuperadores.
- 7) Disposición de la superficie de calefacción con respecto al flujo de gases, de tal manera que se obtenga el mayor coeficiente de convección posible mediante la ruptura de las líneas de corriente de los gases.
- 8) Facilidad de limpieza para aumentar la seguridad, la eficiencia y por tanto la economía.
- 9) Versatilidad en el funcionamiento.
- 10) Debe de estar provisto de equipos auxiliares necesarios para garantizar control y seguridad.

CAPITULO III ASPECTOS GENERALES DE LA COMBUSTION

III.1 ASPECTOS MECANICOS DE LA COMBUSTION

La combustión puede definirse como una rápida reacción exotérmica entre un combustible y un oxidante, en la cual se libera energía química.

Actualmente, se definen dos tipos de combustión: combustión completa y combustión incompleta.

Se dice que la combustión es completa cuando el combustible es totalmente oxidado y se dice que la combustión es incompleta cuando no se oxida todo el combustible. Para entender más esto daremos una clasificación de los diferentes tipos de combustibles que más se usan en los generadores de vapor.

CLASIFICACION DE LOS COMBUSTIBLES

Los combustibles se pueden clasificar en tres grupos que son: sólidos, líquidos y gaseosos.

Dentro de los combustibles sólidos se encuentran:

Los carbones como son: antracita, semiantracita, carbón semibituminoso, lignito, turba, coque, madera, carbón vegetal, bagazo y desperdicios de procesos industriales.

Dentro de los combustibles líquidos se encuentran:

Alcoholes, hidrocarburos destilados del petróleo (gasolina y diesel), aceites animales y alquitranes.

Dentro de los combustibles gaseosos se encuentran

Gases naturales (propano, butano, metano) y los gases manufacturados, tales como gas de alto horno tanto de coque como de aguas residuales y gas de agua natural.

Pero, para el fin que persigue este trabajo, nos enfocaremos sólo a analizarlos desde el punto de vista teórico-práctico.

III.2 ASPECTOS QUIMICOS DE LA COMBUSTION

Con el propósito de diseñar los generadores de vapor, es necesario obtener información considerable del combustible y de productos de combustión. Es nuestra intención, en ese criterio, describir los cálculos de combustión desde la cantidad de aire requerido para la combustión hasta la cantidad consumida del gas producido junto con el análisis de la densidad derivada de ellos (aire-combustible), además de que los valores caloríficos del combustible también son discutidos.

Lo más necesario durante los cálculos de combustión es determinar la densidad que es el primer término a tratar.

III.2.1 DENSIDAD DE LOS GASES

La masa molar de la sustancia es la suma de los términos: masa atómica por el número de átomos por cada elemento en la fórmula química. Hasta ahora, para monóxido de carbono (CO) se tiene un átomo de carbono y un átomo de oxígeno, las masas atómicas son 12 y 16 respectivamente mientras que la masa molar es de: 28.

$$1 \times 12 + 1 \times 16 = 28.0$$

Para dióxido de carbono (CO₂), se tiene un átomo de carbono y dos de oxígeno por lo que la masa es de: $1 \times 12 + 2 \times 16 = 44$, este proceso es similar para otras sustancias en el cual la masa molar queda

expresada en alguna unidad de masa.

El volumen molar para un gas es el volumen ocupado por la masa molar a las condiciones de estado de temperatura y presión. En el sistema internacional de unidades para 1 kg de gas se ocupa 22.4 m³ a 0° C y 1.013 bar de presión absoluta.

Tomando el dióxido de carbono como ejemplo: a 0° C y a 1.013 bar, la densidad en masa por unidad de volumen estará dada por : 1.9643 kg/m³.

La temperatura y la presión para las condiciones antes citadas están referidas a menudo a la temperatura y a la presión estándar, el término normal de la presión y de la temperatura incluyen también algunas condiciones atmosféricas normales, cabe señalar que en algunas de estas definiciones no son aceptadas universalmente por la STP y la NTP.

Cuando la presión y la temperatura para un gas varía de cero grados centígrados y 1.013 bar, la densidad en esas condiciones se debe calcular aplicando la ecuación de gas ideal:

$$PV=WR/T$$

Donde:

P : Es la presión absoluta.

V : Es el volumen.

W : Es el volumen ocupado por la masa de gas.

R : Es la constante universal de los gases.

T : Es la temperatura absoluta.

Quedando la densidad como :

$$\text{Densidad} = W/V = P/RT$$

III 2 2 DENSIDAD DE LOS GASES MIXTOS

La densidad de los gases mixtos disponibles se calculan primero determinando la masa molar mixta y además aplicando el principio dado en la sección anterior de densidad de los gases, como ejemplo presentaremos el análisis del gas natural que se da en la tabla III 1.

TABLA III.1 DETERMINACIÓN DEL ANÁLISIS DE MASA POR MEDIO DEL ANÁLISIS DEL VOLUMEN PARA UN GAS NATURAL.

Componente	Fórmula	Porcentaje para volumen A	Proporción para volumen B=A/100	Masa molecular C
Metano	CH ₄	94.5	0.945	16
Etano	C ₂ H ₆	2.9	0.029	30
Propano	C ₃ H ₈	0.4	0.004	44
Butano	C ₄ H ₁₀	0.2	0.002	58
Pentano	C ₅ H ₁₂	0.1	0.001	72
Hidrógeno	H ₂ S	0.2	0.002	34
Sulfuro				
Carbono	CO ₂	0.3	0.003	44
Dióxido				
Nitrogeno	N ₂	1.4	0.014	28

CONTINUACION DE LA TABLA III.1

Componente	Proporción para masa $D = B \times C$	Proporción para masa $E = D \times 100 / \text{Total en D}$	Proporción para masa $F = D / \text{Total en D}$
Metano	15.120	89.224	0.8922
Etano	0.870	5.134	0.0513
Propano	0.176	1.039	0.0104
Butano	0.116	0.685	0.007
Pentano	0.072	0.425	0.0042
Hidrógeno	0.068	0.401	0.004
Sulfuro			
Carbono	0.132	0.779	0.0078
Dioxido			
Nitrogeno	0.392	2.313	0.0231
TOTAL	16.946		

Total de masa molecular mixta = 16.946

A continuación se describe el procedimiento anterior para obtener la masa molecular de los gases mixtos

La masa molecular de los gases mixtos se obtiene multiplicando la proporción por el volumen para cada gas constituyente por la masa molar de cada elemento y sumando los resultados.

Por otro lado, diremos que la densidad del gas natural a $0^{\circ}C$ y 1.013 bar se obtiene como

$$16.946/22.4 = 0.7565 \text{ Kg/m}^3$$

Otra alternativa de los valores para la densidad en cada gas constituyente son variables y una de ellas es la proporción por volumen (columna B) en la que en cada constituyente se ha multiplicado por su densidad y los resultados sumados a cada densidad de la mezcla, asegurando tener todos los valores de densidad usando las condiciones de presión y de temperatura, determinando así la densidad de la mezcla.

III.2.3 TEMPERATURA DE COMBUSTION

Si no se realiza trabajo ni hay un cambio apreciable en la energía cinética de la corriente, la energía liberada por una reacción química en un reactor a régimen permanente se presenta en dos formas:

Perdidas de calor hacia los alrededores y un aumento en la temperatura de los gases producto de la combustión.

Cuanto menor sea la pérdida de calor mayor resulta el aumento de temperatura. En el límite de una operación adiabática del generador ocurrirá el máximo aumento de la temperatura. En las aplicaciones de sistemas reactivos a la ingeniería, como la propulsión de todos los cohetes y los ciclos de turbinas de gas, es conveniente predecir la máxima temperatura que pueden alcanzar los gases producto de la combustión. Esta temperatura máxima se conoce con el nombre de llama adiabática o de combustión adiabática de la mezcla. Su ecuación en el sistema es:

$$\sum N_i (\Delta h_{f298} + h_i - h_{i298})_i = \sum N_i (\Delta h_{f298} + h_i - h_{i298})$$

Como casi siempre se conocen la temperatura inicial y la composición de los reactivos se puede calcular en forma directa el segundo miembro de la ecuación anterior. Para obtener el máximo aumento de temperatura de los productos, la reacción debe realizarse totalmente. Por consiguiente, los valores de N_i de los productos se conocen también con la química de la reacción; además los valores de Δh_f y de h_{298} en cada uno de los productos puede obtenerse en tablas de datos termoquímicos.

Por lo tanto, las incógnitas de la ecuación anterior son los valores de h_f en cada uno de los gases producto a la temperatura de combustión adiabática desconocida. Proponiendo una temperatura se encuentran los valores de las entalpías de los gases producto a esa temperatura. Si la temperatura calculada es la correcta, los valores numéricos de los dos miembros de la ecuación anterior son iguales, en caso contrario será necesario ensayar otro cálculo de la temperatura final.

La máxima temperatura de combustión calculada es generalmente conservadora, es decir, el valor calculado es a menudo varios cientos de grados más alto que el valor medido. La temperatura de combustión calculada no se alcanza en la práctica debido a varios de los efectos. En primer lugar, raras veces la combustión es completa, donde las pérdidas de calor pueden reducirse pero no eliminarse.

Por último, algunos de los productos de la combustión se disociarán en otras especies químicas a causa de las altas temperaturas. Normalmente, las reacciones de disociación son endotérmicas y consumen parte de la energía liberada por la reacción que nos ocupa.

III.3 ASPECTOS FISICOS DE LA COMBUSTIÓN.

III.3.1 COMBUSTIBLES LÍQUIDOS Y GASEOSOS.

En realidad muchos quemadores son diseñados para ambos tipos de combustibles, en orden, algunos toman ventajas para las tarifas intermedias que son ofrecidas para gas industrial, por lo que los terminos son muy favorables en el regreso del cese de la noticia que es demandada para gas, obligando a tomar otro combustible como alternativa que usualmente es gasolina. La mayor parte de los generadores industriales que son encendidos por gas son equipados con un dual de quemadores de combustible, por lo que es necesario una serie de requerimientos para satisfacer la combustión.

Los requerimientos para una buena combustión de gases, líquidos, y sólidos pulverizados son los siguientes:

- 1) El combustible/aire de la mezcla debe ser fácilmente encendido.
- 2) La flama resultante debe de estar perfectamente estable dentro de las condiciones de operación del generador de vapor.
- 3) La flama debe de estar totalmente contenida dentro del volumen del horno.
- 4) Especificación de las limitaciones en la emisión de gases sin quemar.
- 5) La combustión debe ser completa de acuerdo con los requerimientos del inciso anterior con un mínimo de exceso de aire.

III.3.2 ENCENDIDO

En el orden de encendido de combustible/aire se necesita energía; ésta energía es mínima en el caso de gas pero no en el caso de los combustibles líquidos donde la proporción de combustible utilizado es evaporado por lo cual requiere de mayor energía.

Todo el fuego de gas industrial y el fuego por gasolina en los generadores de vapor son ahora por completo operados en forma automática existiendo energía proveniente de una chispa eléctrica casi de 11 kW.

El encendido de la flama de gas en el piloto en cualquier momento que se haga, hace una flama mayor ampliando la energía que proviene para ese propósito. El importe de energía necesaria varía entre diferentes combustibles con la relación combustible/aire y con la velocidad de la mezcla local.

La relación combustible/aire necesariamente esta entre los límites de flamabilidad de la mezcla por que la poca energía que existe se obtiene tomando medidas del mismo generador de vapor.

Considerando que la energía requerida aumenta con la velocidad de la mezcla, el piloto que produce la flama debe ser diseñado para bajas velocidades para evitar el consumo de energía grande.

APARIENCIA DE LA FLAMA

La apariencia de la flama apagada en los generadores de vapor , es una buena indicación preliminar para las condiciones de combustión que dan origen a una situación ideal, las cuales son operadas a bajos excesos de aire, por lo que se debe de familiarizar con las condiciones de operación a crear y con las condiciones de los altos excesos de aire. La demanda de operación de los bajos excesos de aire en todos los técnicos de un generador de vapor citan especial atención en las diferentes características de los procesos de combustión, tales características son :

- 1 - La reducción de los niveles de oxígeno dirigidos al aumento de la flama toman más tiempo en completar el abastecimiento del combustible en el quemador.
- 2 - Si las exhibiciones de las ondulaciones lentas de la flama aparecen en lugares intensos, las altas flamas turbulentas pueden aparecer y su vez las bajas flamas de oxígeno pasaran lentamente a través del horno.
- 3 - Las flamas de gas natural, por ejemplo, que llegan a ser más visibles o luminosas con un ligera porción de un confuso color amarillo. Las flamas de carbón y aceite pueden llegar a ser oscuras, amarillas y naranjas y pueden aparecer muy difícilmente en algunas partes
- 4 - Aunque la operación con bajos excesos de aire es importante, no es posible trabajar por ese camino por que la combustión bajo ese régimen generará muchos problemas.
- 5 - Al observar la flamas de aceite se provee de bastante información concerniente a los procesos de combustión, cuyos problemas que ocurren típicamente se deben a los siguientes aspectos :
 - a).- Niveles de exceso de aire
 - b).- Presión o temperatura de aceite
 - c).- Tipo de cañon de aceite
 - d).- Registro de aceite
 - e).- Posición del cañon de aceite

Para prevenir estos problemas se puede llegar a diferentes ajustes de flama los cuales se muestran a continuación :

En la figura III.1 se muestra un modelo de flama muy cercano a la geometría ideal de la flama.

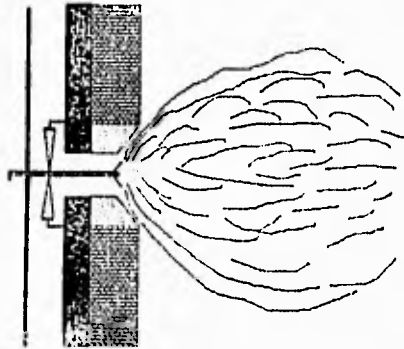


Figura III.1

La flama ideal es :

- Flama clara en la garganta del quemador.
- Flama clara y uniforme con humo claro al final de la combustión.
- Ningún problema de encendido de flama.

Ahora bien los problemas que pueden ocurrir en la geometría de la flama ideal son :

- 1.- Contenidos de flama con chispa crispada.
 - a).- Gran contenido de exceso de oxígeno.
 - b).- Demasiado aceite caliente.
 - c).- Presencia de cenizas en el combustible.
- 2.- Visión de mucho humo en la flama.
 - a).- Bajo exceso de oxígeno.

3.- Flama negra y visibilidad aceitosa cerca de la garganta sin quemador

a).- Registro cerrado de aire

4.- Apariencias de la flama que pueden ser bajas, brillantes y demasiado densas pero algo transparentes

a).- Alta diferencia de presión de aceite y mucho regreso de flujo

b).- Tipo de retorno con mucho flujo de aceite

La figura III.2 muestra la flama estrecha y sin llenado completo de la tobera. Con un vapor posiblemente delgado para el aceite presente en medio de la flama.

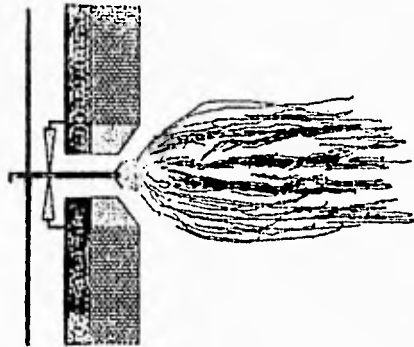


Figura III.2

Los problemas que pueden ocurrir en este tipo de quemador son los siguientes :

1.- Baja diferencia de presión de aceite o el regreso de aceite de la línea de detención

2.- abertura tardía del registro de aceite

En la figura III.3 se muestra un tipo de flama patrón con intermitentes gotas de aceite que están saliendo por un extremo.

Los principales problemas que pueden ocurrir en este tipo de quemador son :

Problemas de atomización, tapado parcialmente por un extremo, gasto en un extremo u otro tipo de quemador, etc.

En la figura III.4 se muestra el golpe que se produce a la salida de la flama que pueden ser continuos o pulsados.

Los problemas que se presentan aquí son :

- 1 - Registros abiertos de aire demasiado lejos.
- 2.- Cañon de aceite posesionado demasiado lejos del horno.

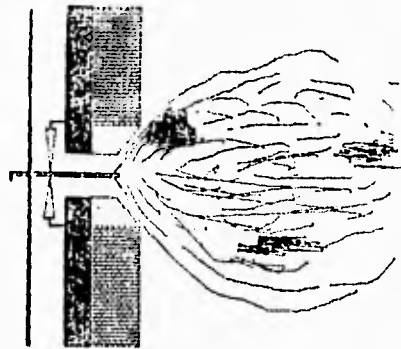


Figura III.3

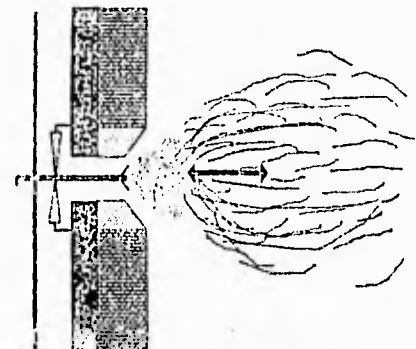


Figura III.4

La figura III.5 muestra la flama limpia en la garganta con giro inverso impregnándose así en las paredes del horno.

Los problemas que se presentan son los siguientes :

1 -Registros de aire cerrados demasiado lejos.

La figura III 6 muestra la invasión de la flama en la garganta del quemador.

Los problemas que se presentan son los siguientes :

1 - El cañon de aceite sin llenar extendido dentro de la posicion de encendido.

2 - Extremos falsos o gasto en el extremo del orificio.

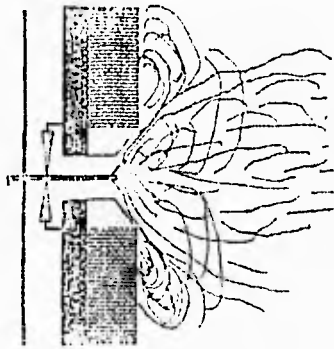


Figura III.5

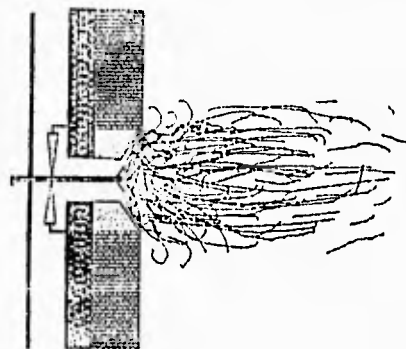


Figura III.6

III.3.3 GASES Y PARTÍCULAS SIN QUEMAR

En la figura III.7 se muestra la relación entre las partículas de emisión y el calor volumétrico libre en los tubos calientes del generador de vapor quemándose medio combustible, estos experimentos provienen y son indicados iniciada la emisión aumentando la potencia consumida mas allá de 2.0 MW/m³.

La tabla indica ser más malo como combustible grueso a la gasolina que contiene un excesivo contenido de asfalto. Por tal motivo, las figuras antes citadas deben ser tomadas al máximo, consultando los manuales de diseño del generador de vapor específicamente en el diseño del quemador y en el combustible abastecido que deber ser satisfactorios según la figura anterior.

Esto quiere decir, que se puede ver en los quemadores originales apropiados al mismo generador que las emisiones son muy grandes y siempre excediendo el límite legal presente en el VK (0.4 para el combustible calentado).

De este diseño proviene virtualmente la recirculación de todos los gases desde abajo de la flama reduciendo el tiempo efectivo de residencia dentro del horno.

La recirculación es más libre con los quemadores modificados. Según Drake y Hubbard que examinaron los efectos circulares de las partículas de emisión experimentando con gas, afirmaron que no podrían ser partículas emitidas y que el problema es lo que pasa con los tubos calientes de los generadores de vapor en ausencia de los quemadores de gases a la entrada de los tubos que son convencionales. A nivel de grandes concentraciones de monóxido de carbono desde 500 ppm en adelante se queman las entradas de los tubos aumentando la transferencia de calor local y causando un recalentamiento y agrietamiento al final de los tubos.

Por esa razón, el monóxido de carbono que contienen los gases a la entrada de los tubos no debe ser mayor que 150 ppm por lo que las precauciones en contraste con los problemas que son muy ligeros si

son muy limitadas y el porcentaje de calor volumetrico libre es de casi 1.9 MW/m^3 para asegurar asi una combustion completa dentro del horno. Por otro lado, los quemadores deben ser capaces de producir flamas compactas y recircular gases en el quemador por una buena secuencia de tiempo de residencia.

III.3.4 AIRE PRECALENTADO

Si la temperatura para la mezcla de combustible/aire es elevada la velocidad del quemador se incrementa, por lo que se ayuda a obtener una estabilidad de la flama reduciendo el volumen de la misma. Asi pues, el aire precalentado se usa frecuentemente con tubos largos de agua en los generadores de vapor cuyo principal propósito es recobrar el calor latente desde el gasto saliente de los gases hasta la recirculación de atrás del quemador dentro del mismo generador de vapor. El aire precalentado no es usado con mas frecuencia en los tubos calientes del generador de vapor convencional por lo que el recipiente que lo contiene deberá ser mayor conforme crezca la demanda del aire precalentado dentro del sistema del generador de vapor.

Entonces se puede decir que el aire precalentado es usado bajo las siguientes condiciones:

- 1) La cantidad de aire precalentado no debe ser grande ya que repercute en los efectos de velocidad y estabilidad del fluido cuando es usado.
- 2) Desde el azufre que se presenta en el combustible utilizado, el aire precalentado esta sujeto a corrosión por ácido sulfúrico.

III.3.5 DISTRIBUCIÓN DE AIRE A TRAVÉS DEL CAUSE DEL COMBUSTIBLE.

A medida que se va mezclando el combustible gaseoso con el aire, es importante la distribución del aire en proporciones necesarias para el combustible. Este proceso se hace más complicado con la

combustión de los combustibles sólidos con rayaduras, por lo que los porcentajes de exceso de aire son del 40% o más. Una de las causas de esto es que con los rayados fijos de este combustible, éste no es distribuido uniformemente, ahora con las partes más delgadas del mismo combustible rayado se evita que el aire que pasa por el combustible sea más espeso que en otras partes, por lo que con los porcentajes de 40% de exceso de aire se crea una relación entre el exceso de aire, CO₂ y O₂ contenido en los gases de escape de varios combustibles.

Igualmente pasa con combustibles (de grietas) en movimiento, mientras que el nivel del combustible distribuido a través de grietas es mayor, es más difícil de corregir el problema, si una vez iniciado el recorrido del cauce del combustible disminuido en espesor no se da alguna reacción con el aire.

Para un mejor control del viaje en las grietas se llevan a cabo una serie de arreglos suplantando el aire separado en las diferentes áreas del generador de vapor por el combustible que entra por el fondo de este, haciéndolo únicamente con los generadores de tubos por donde circula agua según se muestra en las figuras III.8, III.9 (a) y III.9 (b).

III.3.6 EFECTOS POR LA CALIDAD DEL CARBÓN

El carbón es una sustancia variable dependiendo de la fuente de origen, sus propiedades en masa no son muy grandes así como en contenido de volátiles, su poder de contenido más bajo es del 7% lo que es un porcentaje muy extraño usado por los generadores de vapor industriales mientras que arriba del 40% no se usa masa de carbón.

En el UK los carbonos preferidos para los generadores de vapor industriales son los siguientes:

- 1) Carbono solo de 25 mm - 12.5 mm es el único usado por encima del cebador alimentado de coque.
- 2) Carbón de lavado pequeño de 12.5mm - 0 es el único usado para alimentar de coque y viajar por grietas.

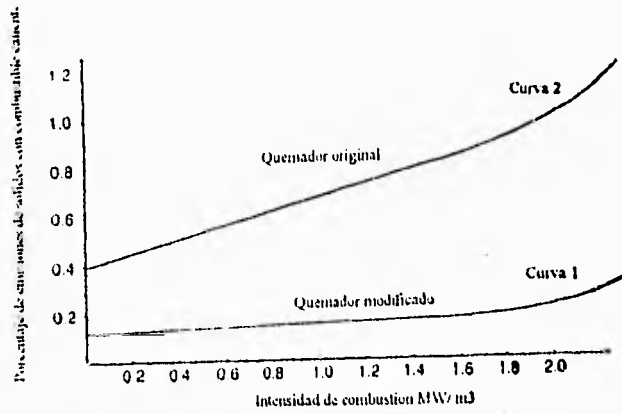


FIG. III-7 EMISIONS DE SOLIDOS CON ACEITE COMO COMBUSTIBLE

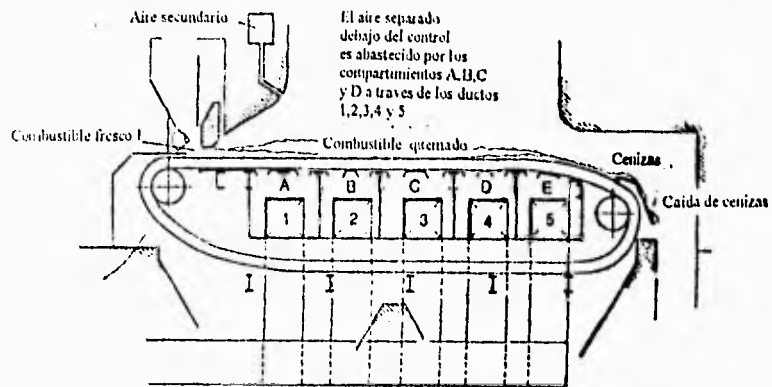


FIG. III-8 VIAJE DE LAS CENIZAS ENTRE LAS REJILLAS DEL GENERADOR DE VAPOR DE TUBOS DE HUMO

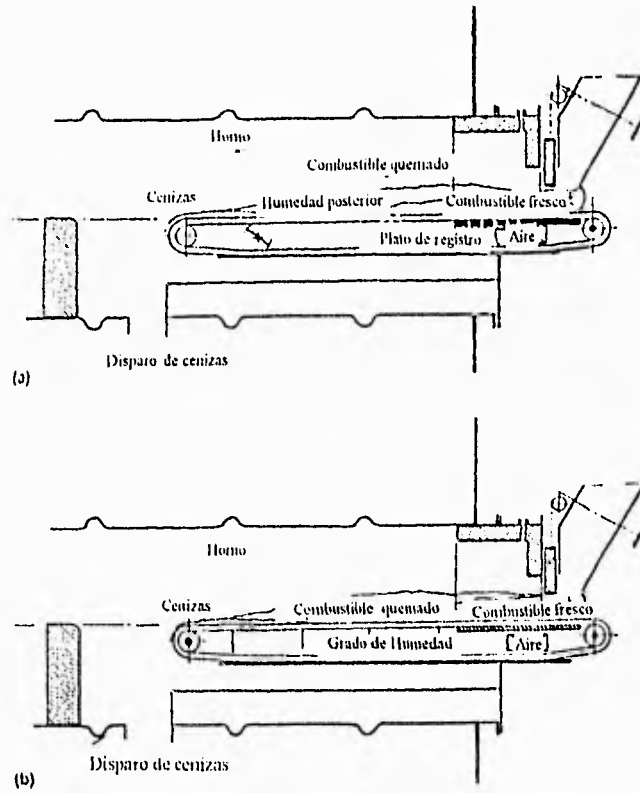


FIG. III.9 CADENA DE REJILLAS PARA BOYLERS DE TUBOS DE HUMO

- a) Mostrando el entrecillado húmedo
- b) Mostrando el entrecillado de los balles inclinados

3) Carbón sin tratado pequeño de 12.5 mm - 0 es usado únicamente a lo largo del combustible, viajando por grietas el combustible pulverizado.

Otras características de importancia son las siguientes :

- 1) La temperatura de fusión de las cenizas debe ser alta para evitar posible formación de sonido.
- 2) El contenido de cenizas no necesariamente afecta la eficiencia del generador de vapor, pero el alto contenido de ésta complica el transporte y la disposición de costos.
- 3) El contenido de humedad. Los quemadores de carbón por encima del cebador y de los utensilios deben de estar por debajo en la humedad para evitar problemas manuales y así facilitar la distribución en reja. Donde la humedad superficial ideal para esta categoría de carbón es de casi 1.5% por el 10% de carbon menor de 3 mm.
- 4) En los metales alcalinos el contenido de cenizas es muy alto por lo que son depositados desde la superficie de calentado del mismo generador de vapor.

En 1950 estas características fueron incorporadas a la BCURA con una extensa investigación de los efectos que causan las características del carbón hasta su ejecución dentro de los generadores de vapor.

Por tal motivo ese trabajo sería publicado si es recomendable que sea estudiado cuando los tubos calientes del generador de vapor sean primero alimentados con coque en rejas y en cadena y segundo, que sea muy recomendable hacer por las normas de la BRITISH COL.

3) Carbón sin tratado pequeño de 12.5 mm - 0 es usado únicamente a lo largo del combustible, viajando por grietas el combustible pulverizado.

Otras características de importancia son las siguientes :

- 1) La temperatura de fusión de las cenizas debe ser alta para evitar posible formación de sonido.
- 2) El contenido de cenizas no necesariamente afecta la eficiencia del generador de vapor, pero el alto contenido de ésta complica el transporte y la disposición de costos.
- 3) El contenido de humedad. Los quemadores de carbón por encima del cebador y de los utensilios deben de estar por debajo en la humedad para evitar problemas manuales y así facilitar la distribución en reja. Donde la humedad superficial ideal para esta categoría de carbón es de casi 1.5% por el 10% de carbon menor de 3 mm.
- 4) En los metales alcalinos el contenido de cenizas es muy alto por lo que son depositados desde la superficie de calentado del mismo generador de vapor.

En 1950 estas características fueron incorporadas a la BCURA con una extensa investigación de los efectos que causan las características del carbón hasta su ejecución dentro de los generadores de vapor.

Por tal motivo ese trabajo sería publicado si es recomendable que sea estudiado cuando los tubos calientes del generador de vapor sean primero alimentados con coque en rejas y en cadena y segundo, que sea muy recomendable hacer por las normas de la BRITISH COL.

CAPITULO IV CONTROL DE LA COMBUSTION

IV.1 COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL COMBUSTIBLE

El combustible tiene elementos muy conocidos como el carbono, gasolina y gas natural, así como hidrógeno y en algunos casos azufre.

Tanto el hidrógeno y el azufre no presentan una forma elemental por que están combinados entre ellos mismos y en algunos casos con otras sustancias como: materias inertes semejantes a óxidos de silicios y a óxidos metálicos.

Los análisis de sólidos y líquidos combustibles son presentados en base a masa y todos los gases combustibles son presentados comúnmente en base al volumen.

Los análisis para combustibles sólidos pueden ser al inicio o al final, los análisis en estos determinan la humedad de cenizas y el firme contenido en porcentaje de carbono, además del valor calorífico.

El próximo análisis indica la limitación por las propiedades del combustible, el análisis final para sólidos y líquidos combustibles dados los elementos compuestos que el combustible contiene como cenizas y humedad se expresan en la siguientes tablas IV.1 y IV.2.

TABLA IV.1

Constituyente	Hechura de Flama	Secado	Cenizas Libres Secas
Carbon fijo	50.19	57.03	62.5
Volátiles	30.11	34.22	37.5
Cenizas	7.7	8.75	

Humedad	12.0		
TOTAL	100.0	100.0	100.0
Valor calorífico bruto en KJ/kg	27000	30682	33624

TABLA IV.2 ULTIMO ANALISIS PARA UN TIPICO LAVADO GRANDE DE CARBON Y DE COMBUSTIBLE PESADO

Carbón	Combustible Pesado	
Carbón	66.0%	85.4%
Hidrógeno	4.1%	11.4%
Azufre	1.7%	2.8%
Oxígeno	7.2%	0.1%
Nitrógeno	1.3%	0.1%
Humedad	12.0%	0.1%
Cenizas	7.7%	0.1%

Las cenizas sobrantes en el fondo de la cámara después de la combustión son elementos individuales que requieren un análisis por separado, los análisis para los gases están dados en base al volumen por que son los que se dan en todo lo alto de la cámara.

Por otro lado, los últimos análisis de combustible que se necesita para facilitar los requerimientos del aire producto de la combustión ya fueron determinados anteriormente. Por lo cual, los análisis de combustibles sólidos son llevados afuera de las normas británicas 1016 y consecuentemente para combustibles líquidos son también hechos fuera de las normas del Instituto del Petróleo (IP) para petróleo y sus derivados. El análisis de combustible gaseoso son determinados generalmente mediante el origen y procedencia del combustible abastecido.

Los análisis para combustibles sólidos particularmente el carbón son especificados sobre una base de números mientras se recibe, se pone al fuego y se seca, lo que origina cenizas secas libres como material mineral seco que tienen una existencia típica o universal. Los análisis recibidos al inicio y final del proceso difieren únicamente en el contenido de humedad el cual puede cambiar durante el almacenaje y el movimiento así como dependiendo de las condiciones del clima.

Las cenizas secas y libres no se comparan con las cenizas que tienen humedad según se indica en la tabla IV.1, los componentes secos son obtenidos multiplicando el material recibido entre los constituyentes quemados esto se calcula como:

$$100/(100 - \% \text{ de humedad})$$

Los constituyentes de cenizas secas libres son obtenidos dividiendo el material recibido entre los constituyentes quemados, esto es :

$$100/(\% \text{ de cenizas} + \text{humedad})$$

Las cenizas y el material mineral no son lo bastante igual desde que alguno de ellos se descompone durante el proceso de calefacción usado. Determinando la ceniza del material, la cantidad de ceniza es, por consiguiente menor que algún material mineral libre, por lo que los análisis de dicho material son hechos sobre bases verticales.

IV.2 PROCESOS REALES DE COMBUSTIÓN

En las secciones anteriores el análisis estaba basado en la premisa de que se contaba con suficiente información acerca de los reactivos que entran en el proceso de combustión. Además, fue necesario suponer que con un exceso de aire todo el carbono que contiene el combustible se convertiría en dióxido de carbono.

Sin embargo, el conocimiento común basado en las mediciones de los gases producto, indica que se presenta monóxido de carbono en cantidades importantes aunque se haya usado aire en exceso.

Como algún aspecto adicional hay varias aplicaciones en las que es difícil indagar la medida real de la relación aire-combustible. Normalmente se conoce bastante bien el flujo del combustible sea sólido, líquido o gas que entra en la cámara de reacción; sin embargo, puede resultar difícil de medir con precisión el flujo de aire que se encuentra en circulación.

Hay numerosos métodos experimentales que pueden utilizarse para determinar la concentración de diversos componentes en los productos gaseosos reales de la combustión. La necesidad de algunos procedimientos más precisos aumentó con la aprobación de los gobiernos estatales y federales de Estados Unidos los cuales dictaron normas estrictas para el control de emisiones con la capacidad de disminuir los contaminantes en el aire a partir del final de la década de los años sesentas.

En la actualidad, existen un gran número de fabricantes de instrumentos apropiados para este fin. Generalmente, el análisis de los gases de la combustión se da en base seca o bien en base húmeda como se mencionó anteriormente. En base seca no se indica el porcentaje del vapor de agua en la corriente de gases.

La metodología que se emplea para realizar esta clase de análisis se fundamenta en el uso de los balances de masa de las especies atómicas presentes en la mezcla reactiva.

IV.3 CALCULOS DE COMBUSTION

Los cálculos para la combustión son basados en ecuaciones químicas elementales para las reacciones con oxígeno y para cada uno de los constituyentes del combustible. Dichos cálculos serán desarrollados por dos métodos diferentes primero por un método particular y segundo por el método tradicional aplicado a un proceso industrial, pero antes de realizar dicho análisis se procederá a analizar algunas

características de los combustibles y de la combustión.

IV.3.1 COMBUSTIBLES GASEOSOS

Los combustibles gaseosos pueden variar en un espacio líquido rico en petróleo comprimiendo gases mixtos para propano y butano, el combustible gaseoso se inclina hacia gases semejantes a ráfagas caloríficas de gas en el cual el contenido de combustible para el cual es solo 22% monóxido de carbono con 2-4% de hidrógeno diluido por contener gran cantidad de materia inerte como dióxido de carbono y el nitrógeno que a continuación se muestra en la tabla IV.3.

TABLA IV.3 ANALISIS TIPICO DE COMBUSTIBLES GASEOSOS - PORCENTAJE POR VOLUMEN

Constituyente	Ráfaga de Caliente de Gas	Regenerador Catalítico
Dióxido de carbono	12.64	10.56
Monóxido de carbono	22.33	7.54
Hidrógeno	2.36	0.0
Metano	0.0	0.0
Acetileno	0.0	0.0
Etileno	0.0	0.0
Argón	0.0	0.0
Nitrógeno	59.22	70.14
Oxígeno	0.0	0.18
Vapor de agua	3.45	11.58
TOTAL	100.00	100.00
Valor calorífico bruto en KJ/m ³	3130	957.6
Temp. del gas en el boiler en °C	Temp. ambiente	600

CONTINUACION DE LA TABLA IV.3

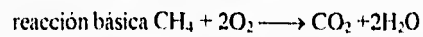
Constituyente	Planta Apagada de Carbón Gas Negro	Horno de Gas Coque
Dióxido de carbono	2.39	2.5
Monóxido de carbono	6.9	7.0
Hidrógeno	4.23	55.0
Metano	0.16	27.0
Acetileno	0.21	0.0
Etileno	0.0	2.70
Argón	0.37	0.0
Nitrógeno	31.74	5.5
Oxígeno	0.0	0.3
Vapor de agua	54.00	0.0
TOTAL	100.00	100.00
Valor calorífico bruto en KJ/m ³	1602	19000
Temp. del gas en el boiler en °C	Temp. ambiente	Temp. ambiente

Según los resultados de la tabla anterior se está muy lejos de que se use gas mixto en los generadores de vapor en los cuales se usa sólo gas natural.

El gas arriba de la cámara de combustión que se da en la tabla IV.3 es generalmente sulfuro libre. Ahora bien si se tiene una cantidad grande de sulfuro de hidrógeno está deberá ser incluida dentro de los cálculos de combustión puesto que, estos pasarán a ser constituyentes significativos en otros combustibles gaseosos.

Por otro lado, las reacciones químicas de los gases del combustible con el oxígeno son dadas en base al volumen las cuales se muestran en el siguiente ejemplo :

- Metano 94.5 % por volumen (3.4)



multiplicando todo por 0.945, la proporción por volumen es:

0.945 volúmenes para CH_4 + 1.98 volúmenes para O_2 produce

0.945 volúmenes para CO_2 + 1.89 volúmenes para H_2O

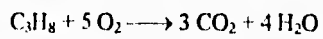
- Etano 2.9 % (3.5)



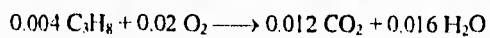
multiplicando todo por 0.029 tenemos :



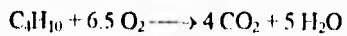
- Propano 0.4 % (3.6)



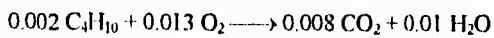
multiplicando todo por 0.004 tenemos :



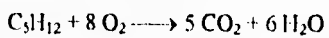
- Butano 0.2% (3.7)



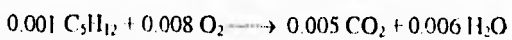
multiplicando todo por 0.002 tenemos :



- Pentano 0.1 % (3.8)



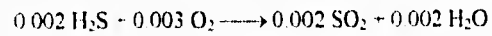
multiplicando todo por 0.001 tenemos :



- Sulfuro de hidrógeno 0.2 % (3.9)



multiplicando todo por 0.002 tenemos :



El próximo paso es sumar las ecuaciones para el etano y para el sulfuro de hidrógeno en forma tabular obteniendo la medida total, y así cuantificar el oxígeno requerido según se muestran en las tablas IV.4, IV.4 (a) y IV.4 (b).

TABLA IV.4 SUMARIO DE LAS ECUACIONES DE LA 3.4 A LA 3.9 Y EL ANÁLISIS DE LOS PRODUCTOS DE LA COMBUSTIÓN

Número de Ecuación	Gas Componente	Porcentaje de Volumen por Componente
3.4	CH ₄	94.5
3.5	C ₂ H ₆	2.9
3.6	C ₃ H ₈	0.4
3.7	C ₄ H ₁₀	0.2
3.8	C ₅ H ₁₂	0.1
3.9	H ₂ S	0.2
En combustible	CO ₂	0.3
En combustible	N ₂	1.4
TOTAL		100.00

TABLA IV.4 (a)

Número de Ecuación	Proporción de Volumen por Componente	Oxígeno Requerido para la Medida Métrica de Combustión, Volúmenes desde 3.4 a 3.9
3.4	0.945	1.890

3.5	0.029	0.102
3.6	0.004	0.020
3.7	0.002	0.013
3.8	0.001	0.008
3.9	0.002	0.003
TOTAL	1.000	2.036

TABLA IV.4 (b)

Productos por Combustión con Oxígeno				
Volumenes				
	CO ₂	H ₂ O	SO ₂	N ₂
	0.945	1.890		
	0.058	0.087		
	0.012	0.016		
	0.008	0.010		
	0.005	0.006		
		0.002	0.002	
	0.003			
				0.014
TOTAL	1.031	2.011	0.002	0.004

La consistencia del aire en este ejemplo es del 21% por volumen para el oxígeno y el 79% por volumen para el nitrógeno. Unas de las medidas métricas de los requerimientos de aire para abastecer 2.0355 volúmenes de oxígeno son dados por:

$$2.0355 \text{ O}_2 + 7.657 \text{ N}_2 = 9.693 \text{ volúmenes de aire.}$$

El aire requerido incluyendo el 10% de exceso de aire es:

$$2.239 \text{ O}_2 + 8.423 \text{ N}_2 = 10.662 \text{ volúmenes de aire}$$

El total de los productos de la combustión (húmedos) con 10% de exceso de aire incluyendo nitrógeno en el combustible viene dado por:

$$(2.239-2.0355)\text{O}_2 + (8.423+0.014)\text{N}_2 + 1.013 \text{ CO}_2 + 0.002 \text{ SO}_2 = 11.685 \text{ volumen/volumen de combustible.}$$

El total de los productos de combustión (secos) con 10% de exceso de aire incluyendo nitrógeno en el combustible viene dado por:

$$(2.239-2.0355)\text{O}_2 + (8.423+0.014)\text{N}_2 + 1.031 \text{ CO}_2 + 0.002 \text{ SO}_2 = 9.679 \text{ volumen /volumen de comb.}$$

Estos datos se puede ver que son sumados en forma tabular en la tabla IV.5 que más adelante se presenta.

Por otro lado, podemos observar que se asigna al nitrógeno para suplantar al aire para que así con el exceso de aire que queda se tenga una combustión satisfactoria (10% en ese caso particular), en la practica el aire de combustión tiene un gran contenido de humedad que es conocida por que es calculada y sumada a los productos de la combustión junto con el exceso de aire los cuales se enunciarón en la tabla IV.4.

PRODUCTOS DE LA COMBUSTIÓN

Si el volumen total de gases secos es menor que el volumen total de gases húmedos, los porcentajes de los constituyentes serán diferentes según se muestra en la tabla IV.5

TABLA IV.5 PRODUCTOS DE COMBUSTIÓN EN BASES HÚMEDAS Y SECAS PARA GAS NATURAL

Productos de Combustión	Volumenes Húmedos	% de Volumen Húmedo	Volumenes Secos	% de Volumen Seco
CO ₂	1.031	8.823	1.031	10.657
H ₂ O	2.011	17.21		
SO ₂	0.002	0.017	0.002	0.021
N ₂	8.437	72.20	8.437	87.213
O ₂	0.204	1.75	0.204	2.109
TOTAL	11.685	100.00	9.674	100.00

Por consiguiente, el flujo másico de los gases de escape para el diseño de generadores de vapor queda determinado con los cálculos para obtener la densidad de gases mixtos antes de la combustión, esto se ilustra en la tabla IV.6.

TABLA IV.6 CALCULOS DE LA DENSIDAD DE LOS GASES DE ESCAPE

Gas	Masa Molar A	% de Volumen B	AXB/100	% de Volumen seco C	AXC/100
CO ₂	44	8.823	3.88	10.657	4.689
H ₂ O	18	17.210	3.10		
SO ₂	64	0.017	0.01	0.021	0.013
N ₂	28	72.200	20.22	87.213	24.420
O ₂	32	1.750	0.56	2.109	0.675
TOTAL		100.00	27.77	100.00	29.797

Por lo tanto :

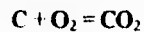
Densidad de los gases húmedos de escape = $27/22.4 = 1.24 \text{ Kg/m}^3$

Densidad de los gases secos de escape = $29.797/22.4 = 1.33 \text{ Kg/m}^3$

IV 3 2 COMBUSTIBLES SÓLIDOS Y LÍQUIDOS

Los análisis para combustibles sólidos y líquidos se basan en las masas de las sustancias presentes en el combustible, los cuales son considerados en proporciones volumétricas para los gases constituyentes semejantes al metano CH_4 . Los combustibles sólidos que también contienen materia mineral así como humedad, primero son convertidos en cenizas durante el proceso de combustión; más tarde son mandados a evaporar y finalmente diluido en los productos de la combustión. El residual del combustible líquido semejante a gasolina espesa también contiene materia mineral y humedad, por lo que es mucho más pequeño el grado de humedad que la mayoría de los combustibles sólidos, totalizando tal vez el 0.2% comparado con el casi 20% limpio de grado más pequeño. De los cálculos del aire requerido para la combustión y los análisis para los productos de la misma, se desprende un procedimiento similar para los cálculos de los combustibles gaseosos (para los gases de carbón y de la gasolina). Tomando como ejemplo al carbón donde las sustancias presentes en el combustible son carbón, hidrógeno y azufre, si se presenta el oxígeno en estos significa extenderse más en los análisis por lo que, para las ecuaciones de la combustión es considerado el 40% de exceso de aire siendo apropiado para carbones calientes en generadores de medio tamaño (en generadores de vapor de tubos largos de agua).

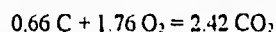
Ahora bien, puesto que el análisis de combustible es dado en base a masas y los cálculos de la combustión son dados fuera de esta, la ecuación básica de la combustión del carbón es:



Donde la masa molar para el carbón es 12 y para el oxígeno es 32, por lo que el balance de masa queda de la siguiente manera:

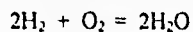
12 unidades de masa para carbón + 32 unidades de masa para el oxígeno dan como resultado 44 unidades de masa para el dióxido de carbono .

Este resultado representa el 66% del análisis de combustible hecho en la tabla III.3, por lo que para el combustible en cuestión las masas molares son multiplicadas por 1/12 dado que se requieren 0.66 kg de carbón y 1.79 kg de oxígeno, dando como resultado 2.42 kg de dióxido de carbono, esto se puede ver en la siguiente ecuación:



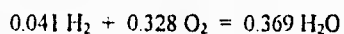
Ahora bien para los demás combustibles se hace un análisis idéntico dando como resultado el siguiente desarrollo:

-Hidrógeno 4.1%, esto es 0.041 kg/kg de combustible

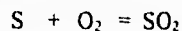


$$4 + 32 = 36$$

multiplicando todo por 0.041/4 tenemos:

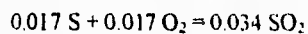


-Azufre 1.7%, esto es 0.017 kg/kg de combustible



$$32 + 32 = 64$$

multiplicando todo por 0.017/32 tenemos:



Estos resultados se pueden tabular haciendo la asignación cuando se calcula el oxígeno por una medida

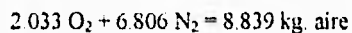
métrica durante la combustión de este mismo ya en el combustible, si el 40% de exceso de aire es sumado al tubo de los gases de escape de análisis produciría un balance de masa.

En ese instante con los cálculos hechos fuera de las bases de masa es imposible que chequen los resultados, por ejemplo:

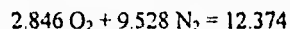
Masa total de aire abastecido + masa de cenizas libres de combustible = Masa de los productos de la combustión.

12.374 kg aire/kg combustible + 0.923 kg de cenizas libres de combustible = 13.297 kg de gases calientes en los tubos de escape

Por otro lado, la consistencia del aire para el 23% en peso del oxígeno y 77% en peso del nitrógeno queda dado en los requerimientos del aire abastecido, para 2.033 kg de oxígeno la ecuación es la siguiente:



Los requerimientos incluyendo el 40% de exceso de aire es:



EL total de los productos de la combustión (húmedos) con 40% de exceso de aire incluyendo nitrógeno en el combustible son los siguientes:

$(2.846 - 2.033)\text{O}_2 + (9.528 + 0.013)\text{N}_2 + 2.42 \text{ CO}_2 + 0.489 \text{ H}_2\text{O} + 0.034 \text{ SO}_2 = 13.297 \text{ kg. gas/kg. combustible.}$

Ahora bien, para el total de productos de combustión (secos) con 40% de exceso de aire, incluyendo nitrógeno en el combustible se hace lo siguiente:

$$(2.846 - 2.033)O_2 + (9.528 + 0.013)N_2 + 2.42 CO_2 + 0.034 SO_2 = 12.808 \text{ kg gas/kg combustible.}$$

Estos cálculos nos hacen ver que el exceso de aire es para evitar la corrosión y la contaminación pero a largo plazo si se mantienen estas características el aire acabaría con todo el interior del generador de vapor donde el exceso de aire oscila entre 18-22% y actualmente en México se usa de 6-8%.

Por otro lado, si la combustión se mantiene cerca de la cantidad estequiométrica se solucionan los siguientes problemas:

- 1) Corrosión en el sobrecalentador.
- 2) Transporte de partículas mas fluido.
- 3) Emisión de hollines con ácido.
- 4) Formación de pentóxido de vanadio.
- 5) Formación del NOx.

Actualmente existe otro método para realizar los cálculos de combustión los cuales son hechos en base al comportamiento de los generadores de vapor para los combustibles solidos, liquidos y gaseosos, dicho método se realiza en forma general y se divide en método directo y método indirecto los cuales son aplicados a un proceso industrial, para esto se describen los pasos a seguir por cada método.

METODO DIRECTO

- a) Poder calorifico para combustibles liquidos y sólidos

$$PC = 33960 C + 144212 (H-O/8) + 9420 S$$

Donde :

33960 es el valor calorifico del carbono

144212 es el valor calorifico del hidrógeno

9420 es el valor calorífico del azufre

b) Poder calorífico para combustibles gaseosos

$$\% \text{ en peso} = \frac{A \times B}{\sum C' \times D}$$

Donde

A es el % en volumen del compuesto

B es el peso molecular del compuesto en cuestión

C' es el % en volumen del compuesto

D es el peso molecular de los compuestos

(PC)comp = % vol x valor calorífico (kJ/m³)

(PC)comp = Σ (PC)comp (kJ/m³)

(PC)comp = % en peso x valor calorífico (kJ/kg)

c) Eficiencia del generador

$$\eta_{cal} = \frac{E_s}{E_e} \times 100$$

$$E_e = PC \times G$$

Donde

G es el gasto de combustible

E_e es la energía de entrada

E_s es la energía de salida

METODO INDIRECTO O DE PERDIDAS

Aquí se considera que las pérdidas son debidas a:

a) Los gases producto de la combustión

$$P = GS \times 1.0048 (t_2 - t_1)$$

Donde

t_1 Temperatura de agua de entrada

t_2 Temperatura de los gases a la salida del calentador

1.0048 es el calor específico

$$\Sigma P = E_s - E_e$$

$$\% \text{ perdidas} = \frac{\Sigma P}{E_e} \times 100$$

$$\eta_{\dots} = 100 - \% P$$

$$GS = \frac{44CO_2 + 32O_2 + 28(CO + N_2)}{12(CO_2 + CO)}$$

Donde

$$CO = 100 - CO_2 - O_2 - N_2$$

Para el caso de líquidos y sólidos tenemos lo siguiente:

$$GS = GS' \times C_1$$

Donde

$C_1 = (\text{kg carbono/kg combustible quemado})$

$$GS' = \frac{4CO_2 + O_2 + 700}{3(CO_2 + CO)}$$

Donde los valores de CO_2 y CO se expresan en decimales.

Para los combustibles líquidos tenemos:

$$C_1 = \frac{W_1 C_1 - W_2 C_1}{W_1} \times 100$$

Donde:

W_f es el combustible quemado en kg.

C_f es el carbono en el combustible kg carb/kg.

W_r son las cenizas que salen en kg.

C_r es carbono en las cenizas en kg carb/kg comb.

Para combustibles gaseosos tenemos

% CH_4 (16.041), peso molecular del CH_4 total (metano)

% C_2H_6 (30.067), peso molecular del C_2H_6 total (etano)

% C_3H_8 (44.092), peso molecular del C_3H_8 total (propano)

% C_4H_{10} (58.118), peso molecular del C_4H_{10} total (butano)

% C_5H_{12} (72.146), peso molecular del C_5H_{12} total (pentano)

Peso molecular de la mezcla

Para encontrar el % en peso de cada uno de los compuestos se procederá como lo muestra el siguiente ejemplo:

$$\% \text{ en peso del carbono} = \frac{C \times D}{\text{peso molecular del compuesto}}$$

Donde:

C es el % en peso del compuesto

D es el peso molecular del carbono

Calculo del peso del aire seco x kg de comb.

$$As = GS + 7.936 H_2 - C_1$$

Donde

7.936 es la cantidad de oxígeno anizado para formar agua

C_1 es la cantidad de carbono en el combustible

H_2 es la cantidad de hidrógeno en el combustible

Otra forma de calcular la As , es considerando la siguiente formula:

$$As = \frac{28N_c}{12(CO + CO_2) \times 0.769}$$

b) Pérdidas de energía debida a los gases de la combustión

$$P_2 = As \times W_v \times 1.926 (T_g - T_2)$$

Pero

$$W_v = Wv/W_d \times 100$$

$$T_g = T_4 - \frac{As[1.0048 \times (t_3 - t_2)] + W_v \times 1.926(t_3 - t_2)}{GS(1.0048) + (8.936H_2)(1.926)}$$

Donde :

GS peso de los gases secos x kg de comb.

W_v humedad especifica del aire

t_2 temperatura del aire a la entrada del precalentador

t_3 temperatura del aire a la salida del precalentador

t_4 temperatura a la salida de la caldera

T_g temperatura de los gases a la salida del calentador

Wv humedad real especifica

W_d humedad de saturación especifica

1.0048 calor especifico del aire

1.926 calor especifico del vapor

8.936 es el agua formada por el hidrógeno

c) Pérdidas de energía debida a la humedad que contiene el combustible

Para los tres tipos de combustible (sólido, líquido y gaseoso) se considera la ecuación siguiente:

$$P_3 = M_f (1.926 (t_g - 100) + 2257 + 4.1868(100 - T_{\text{combustible}}))$$

Donde :

M_f es la humedad total del combustible

Pero para combustibles gaseosos en la ecuación anterior la M_f puede variar como líquido o como vapor

d) Pérdidas de energía debido al hidrogeno que contiene el comb.

a.1) Para combustibles solidos tenemos:

$$P_4 = 8.936 H_{2-2} [1.926 (t_g - 100) + 2257 + 4.1864 (100 - t_c)]$$

a.2) Para combustibles gaseosos tenemos :

$$P_4 = 8.936 H_{2-1} [1.926 (t_g - 100) + 2257 + 4.1864 (100 - t_c)]$$

Donde

H_{2-2} es el % total en peso del hidrógeno en el combustible

H_{2-1} es el % en peso del hidrógeno

e) Pérdidas de energía por radiación

$$P_5 = Fr PC$$

Donde

Fr es el factor obtenido de las gráficas del fabricante

PC es el poder calorifico

f) Pérdidas de energía debida a una combustión incompleta

$$P_7 = \frac{CO}{CO + CO_2} \times C \times PC$$

g) Pérdidas de energía debida al combustible no quemado

$$P_7 = \frac{33820 \times W_r \times C_r}{W_r}$$

Donde

33820 es el carbono liberado para formar CO₂

h) Pérdidas incalculables

$$P_8 = 0.015 \times PC$$

Exceso de aire

$$\% \text{ Exa} = \frac{O_2 - CO_2 / 2}{0.265N_2 - (O_2 - CO_2 / 2)} \times 100$$

Donde el término (O₂-CO₂) representa el total de oxígeno que deberá salir suelto en los gases ya que al CO₂ le falta un O₂/2 para ser CO₂. Por otro lado el oxígeno que sale suelto en los gases representa el exceso puesto que el resto del oxígeno se combina para formar CO₂, además de que el término 0.265 representa el total de oxígeno introducido en el aire.

COMBUSTIBLES LÍQUIDOS Y SÓLIDOS PRODUCTOS DE LA COMBUSTIÓN

Los combustibles sólidos y líquidos productos de la combustión se convierten desde las bases de masa hasta las bases de volumen dado el proceso reversible en los temas anteriores, el cual es portador donde la proporción por masa para cada constituyente sea dividida por la masa molecular dando el radio volumétrico desde el cual, el porcentaje por volumen estará determinado entre lo húmedo y lo seco. Estos resultados se pueden ver en la tabla IV 7

TABLA IV.7 ANALISIS DE PRODUCTOS DE LA COMBUSTION DEL CARBON

Productos de la combustion	Masa molecular A	Masas secas B	Proporción por volumen B/A= C	% por volumen seco
CO ₂	44	2.420	0.055	13.046
H ₂ O	18			
SO ₂	64	0.034	0.0005	0.119
N ₂	28	9.541	0.3407	80.81
O ₂	32	0.813	0.0254	6.025
TOTAL		12.808	0.4216	100.00

CONTINUACION DE LA TABLA IV.7

	Masa húmeda kg/kg comb. B	Proporción por volumen B/A-D	Porcentaje por volumen húmedo
	2.42	0.055	12.26
	0.489	0.027	6.02
	0.034	0.0005	0.11
	9.541	0.3407	75.95
	0.813	0.0254	5.66
TOTAL	13.297	0.4486	100.00

Cuando esta operando el boiler, es útil conocer la relación entre el oxígeno y el dióxido de carbono contenidos en los productos de la combustión así como el exceso de aire del combustible quemado que existe; alternativamente, puede ser conveniente que se use la fórmula para esa propuesta, esta fórmula es:

$$VCO_2 = (1 - VO_2/21) vCO_2$$

TABLA IV.7 ANALISIS DE PRODUCTOS DE LA COMBUSTION DEL CARBON

Productos de la combustion	Masa molecular A	Masas secas B	Proporción por volumen B/A= C	% por volumen seco
CO ₂	44	2.420	0.055	13.046
H ₂ O	18			
SO ₂	64	0.034	0.0005	0.119
N ₂	28	9.541	0.3407	80.81
O ₂	32	0.813	0.0254	6.025
TOTAL		12.808	0.4216	100.00

CONTINUACION DE LA TABLA IV.7

	Masa húmeda kg/kg comb. B	Proporción por volumen B/A-D	Porcentaje por volumen húmedo
	2.42	0.055	12.26
	0.489	0.027	6.02
	0.034	0.0005	0.11
	9.541	0.3407	75.95
	0.813	0.0254	5.66
TOTAL	13.297	0.4486	100.00

Cuando esta operando el boiler, es útil conocer la relación entre el oxígeno y el dióxido de carbono contenidos en los productos de la combustión así como el exceso de aire del combustible quemado que existe; alternativamente, puede ser conveniente que se use la fórmula para esa propuesta, esta fórmula es:

$$VCO_2 = (1 - VO_2/21) \times CO_2$$

Donde :

V_{CO_2} : Es el porcentaje por volumen para el dióxido de carbono en los gases de escape

V_{O_2} : Es el porcentaje por volumen para el oxígeno en los gases de escape.

v_{CO_2} : Es la medida métrica del porcentaje por volumen de el dióxido de carbono para el combustible.

Si el valor de la densidad para los productos de combustión de gas natural es 1.24 Kg/m^3 , si puede ser comparado este valor con aquel para los productos de combustión como el carbón el cual es: 1.323 Kg/m^3 . Para efecto de cálculo la densidad del aire es: 1.29 Kg/m^3 , el uso de todas estas densidades contribuye a una mejor aproximación de los cálculos, por consiguiente la densidad para los productos de combustión desde el combustible comercial podría caer incluso hasta tener el valor de la densidad del aire exterior y si se hiciera uso de estos datos sería un grave error cometido.

IV.3.3 GRÁFICOS PARA CALCULAR LOS VOLUMENES DE AIRE Y GASES DE COMBUSTIÓN PARA CARBONES

Resulta necesario conocer :

Poder calorífico del combustible en Kcal/kg.

% en peso de cenizas

Índice de exceso de aire

Ejemplo : Sea un carbón que tenga un PCI = 5700 Kcal/kg, un porcentaje en cenizas del 33 % y que se quema con un exceso de aire de $n = 1.5$ (ver figura IV.1).

Por el punto de PCI = 5700 se levanta una vertical hasta el corte con la recta de aire mínimo $A_m = 6.3 \text{ Nm}^3/\text{kg}$.

El aire real de combustión sea $A = n \times A_m = 1.5 \times 6.3 = 9.45 \text{ Nm}^3/\text{kg}$

Para obtener los gases de la combustión se prolonga la vertical hasta la línea de $n = 1.5$, y desde el punto de corte horizontal hacia la derecha, se lee $H = 10.1 \text{ Nm}^3/\text{kg}$

Estos valores deben ser corregidos en función del porcentaje de cenizas mediante el recuadro de la parte superior izquierda. El haz de recta inferior sirve para corregir el aire, y el superior para los gases.

Los valores corregidos son :

$$A_c = A - F_m, H_c = H - F_n$$

Trazando una vertical por el 33 % hasta $n = 1.5$, se obtiene para el haz inferior $F_m = 0.29$ y para el haz superior $F_n = 0.70$.

Por lo que los valores corregidos serán :

Aire de combustión : $A_c = 9.45 - 0.29 = 9.16 \text{ Nm}^3/\text{kg}$

Gases de combustión : $H = 10.1 - 0.7 = 9.40 \text{ Nm}^3/\text{kg}$

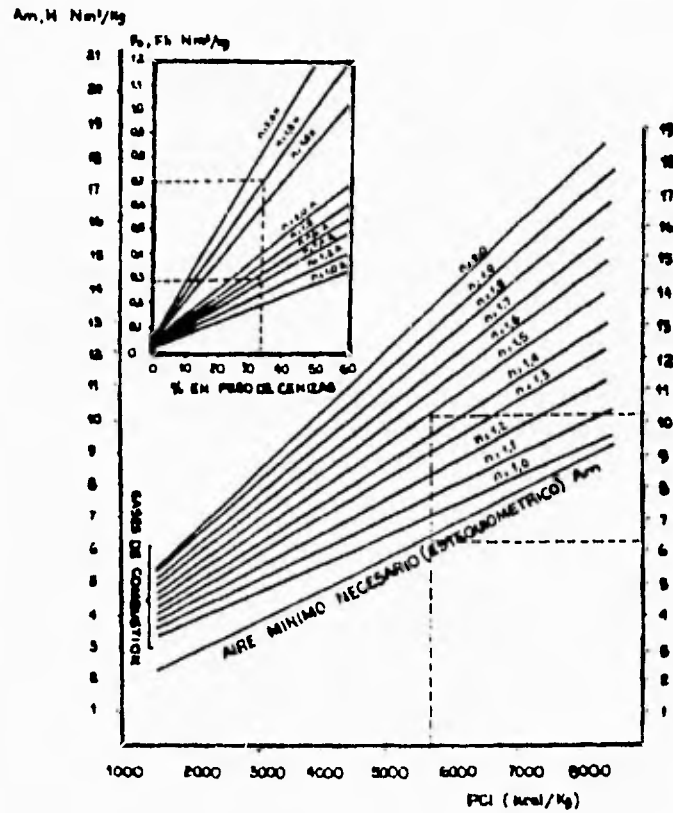


Figura IV.1 Volúmenes de aire y gases de combustión para carbonos

Combustibles Líquidos.

Mediante el gráfico de la figura IV.2 se obtienen los volúmenes de aire y gases de combustión por Kg de combustión, por Kg de combustible líquido, en función de :

PCI en Kcal/Kg

Exceso de aire n

Ejemplo : Sea un Fuel Oil de PCI = 9.600 Kcal/Kg, que se quema con un 20 % de exceso de aire, es decir, $n = 1,2$.

Por el punto de PCI = 9.600 se traza una vertical hasta la recta de aire mínimo y desde aquí una horizontal, leyéndose en la escala de la izquierda $A_m = 10.5 \text{ Nm}^3/\text{Kg}$.

El aire real será $A = n A_m = 1,2 \times 10.5 = 12.6 \text{ Nm}^3/\text{Kg}$.

para obtener los gases de combustión, se sigue la vertical hasta la recta de $n = 1.2$, leyéndose en la escala vertical. $H = 13.3 \text{ Nm}^3/\text{Kg}$.

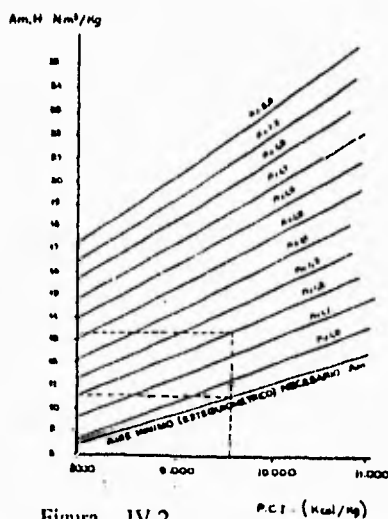


Figura IV.2

Combustibles Gaseosos

Con el gráfico de la figura IV.3 se obtienen los volúmenes de aire y gases por Nm³ de combustible gaseoso en función de :

PCI en Kcal/Kg

Exceso de aire n.

Ejemplo : Sea un gas natural que tenga un poder calorífico inferior de 10.100 Kcal/Kg. que se queme con un exceso de aire del 10 % es decir $n = 1,1$; siguiendo el procedimiento anterior se tendría :

Aire : $A_m = 11,3 \text{ Nm}^3/\text{kg}$

$A = n \times A_m = 1,1 \times 11,3 = 12,43 \text{ Nm}^3/\text{kg}$

Gases : $H = 12,9 \text{ Nm}^3/\text{kg}$

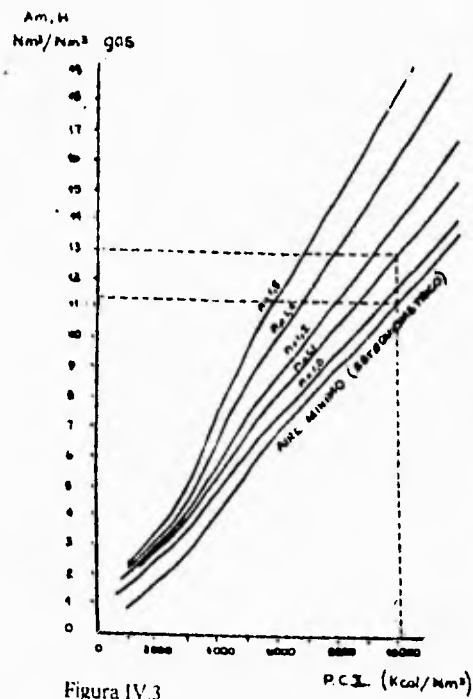


Figura IV.3

IV.3.4 DIAGRAMAS DE COMBUSTIÓN

Aunque las calculadoras programables y los analizadores de gases microcomputarizados los han desplazado, los diagramas de combustión construidos en función de la composición del combustible para calcular gráficamente los valores correspondiente a los gases de combustión, a partir de los datos por el análisis de gases, resultan siempre de importante utilidad.

Existen 3 tipos de diagramas :

1. El diagrama de Bunte, que se utiliza para combustiones completas y para cualquier tipo de combustible.
2. El diagrama de Ostwald para combustiones incompletas con inquemados solo en forma de CO.
3. El diagrama de Keller, similar al anterior, solo que incluye también inquemados en forma de H₂.

En la practica industrial el de Bunte resulta muy teórico y el de Keller muy poco frecuente, resultando mas difundida en diagrama de Ostwald.

En la figura IV.4 se presenta un diagrama de Ostwald para un residual de 6 de las siguientes características :

Gravedad especifica :	0.963
Densidad :	15.4
Composición :	C = 83.85 %
	H = 10.74 %
	S = 3.60 %
	N = 0.30 %
	O = 0.30 %
	H ₂ O = 1.21 %

En el eje horizontal se indican los % de O_2 y en el vertical los de CO_2 . El punto P_1 corresponde al % de CO_2 máximo, en este caso de 15.94 %, es decir a combustión completa estequiométrica : $n = 1$ y $\% O_2 = 0$.

El punto P_2 corresponde a $\% CO_2 = 0$ ya que todo el carbono del combustible a pasado solamente a CO. En este punto correspondiente a $n = 1$ existe un contenido de $O_2 = 7.38 \%$ debido a la no transformación de CO en CO_2 .

El punto P_3 corresponde a $CO_2 = 0$ y $CO = 0$ en el que $O_2 = 21 \%$ corresponde al aire puro.

La recta P_1P_2 corresponde a las combustiones incompletas con índice de exceso de aire $n=1$, en la que hay una mezcla de CO y CO_2 .

La recta P_2P_3 es también de combustiones incompletas, pero en donde no aparece CO_2 .

La zona delimitada por el triángulo $P_1P_2P_3$ corresponde a combustiones incompletas con exceso de aire.

La zona del triángulo P_1P_2 indica las combustiones con defecto de aire.

Las líneas paralelas a la P_1P_3 son del % de CO = cte. Las líneas paralelas aparentemente a la P_1P_2 corresponden a $n = cte$.

Si se conocen dos valores cualesquiera de CO_2, O_2 y CO, con ayuda del diagrama se puede determinar el tercero de estos valores así como el índice de exceso de aire n.

Ejemplo : Si se tienen los valores de $CO_2 = 12.4 \%$, $O_2 = 2.90 \%$, encontrar CO.

Levantando una vertical por $O_2 = 2.9$ y trazando una horizontal por $CO_2 = 12.4$, el punto de corte se encuentra en las líneas de $CO = 2 \%$ y $n = 1.10$.

Analogamente, si se conocen $CO_2 = 12.4$ y $CO = 2.0$, trazando la horizontal hasta el punto de corte con la recta de $CO = 2\%$ y desde aquí una vertical, vemos que $O_2 = 2.9\%$ y $n = 1.1$.

Y así de igual forma se haría conociendo los valores de O_2 y CO para poder encontrar CO_2 .

Por lo anterior se puede decir que para toda planta industrial que utilice normalmente un determinado combustible en forma estable, debe disponerse de un diagrama de Ostwald, construido para la composición específica conocida y actualizada de dicho combustible.

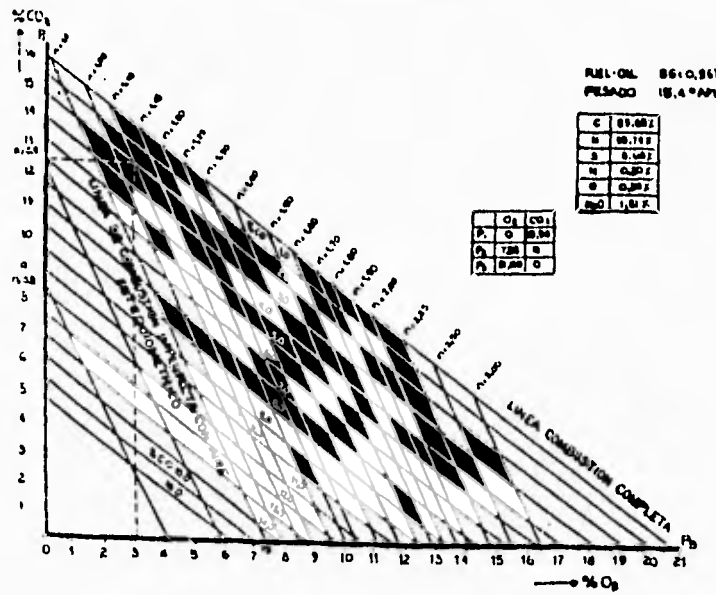


Figura IV.4 Diagrama de Ostwald

IV.4 ANALISIS DE LOS GASES DE LA COMBUSTION

Las mediciones de la temperatura de los gases de combustión permiten apreciar el nivel de pérdidas de calor al arrojar gases calientes a la atmósfera; el conocimiento de la composición de los gases permitirá identificar las causas y percibir los ajustes que permiten evitarlas o minimizarlas.

Para el caso de una combustión completa resultará suficiente medir el CO_2 y el O_2 para calcular la eficiencia de la combustión y el exceso de aire utilizado. En la práctica, al presentarse las posibilidades de combustión incompleta o imperfecta, con presencia de inquemados, resultará necesario medir además el CO y el H_2 .

Aunque de presencia menos frecuente, puede resultar necesario el análisis de hidrocarburos gaseosos, sobre todo para combustibles gaseosos y de inquemados sólidos para carbones combustibles líquidos.

Finalmente, se analizará el contenido en SO_2 . Esta medida desde el punto de vista de la combustión, es poco útil por 3 razones:

- 1) El porcentaje de SO_2 en gases es muy bajo.
- 2) El SO_2 no es un inquemado y por tanto su calor de combustión se aprovecha.
- 3) En los métodos más comunes de análisis, al medir el CO_2 se mide conjuntamente el SO_2 .

Con buenas condiciones de mezcla, la combustión perfecta se obtiene cuando el análisis de gases de combustión no muestra CO , H_2 u O_2 y cuando el porcentaje de CO_2 es el máximo.

Ajustando la relación aire/combustible hasta que se obtenga el máximo porcentaje de CO_2 y se disminuya al mínimo el porcentaje de O_2 y residuos combustibles, un operador puede poner un quemador en el punto de operación de máxima eficiencia.

Esto permite la regulación aproximada de la relación aire/combustible en quemadores individuales sin medir los flujos de combustible y aire.

Para aplicaciones que requieren combustión oxidante o reductora, al análisis de los gases puede ser usado como medio de reproducir ciertas condiciones deseadas, si todas las otras condiciones son exactamente las mismas. En la tabla IV.8 se presenta los métodos de análisis de gases de combustión.

Método de análisis	Componentes					Relación gas:gas	Ingeniería	Industria
	CO ₂	O ₂	CO	O ₂ + O ₂	O ₂			
Precipitación con Ba(OH) ₂	1							
Conductividad eléctrica								1
Calentamiento con hidracina	1							
Reacción con hidracina	1	1	1	1	1			
Conductividad eléctrica	1							1
Relación de gases				1				
Absorción química	1							
Relación de gases				1				
Relación de gases	1							
Relación de gases				1				
Relación de gases				1				
Relación de gases	1							
Relación de gases				1				
Relación de gases	1							
Relación de gases				1				
Relación de gases				1				
Relación de gases	1							
Relación de gases				1				
Relación de gases				1				
Relación de gases	1							
Relación de gases				1				
Relación de gases				1				
Relación de gases	1							
Relación de gases				1				
Relación de gases				1				
Relación de gases	1							
Relación de gases				1				

Tabla IV.8

IV.4.1 MEDICION DEL CO₂

La medición del CO₂ resulta ser muy adecuada para comprobaciones puntuales del estado de la combustión pero no se emplea para casos de medidores en sistema continuo que son la base de los modernos sistemas de regulación automática de la combustión.

El % de CO₂ en conjunto con la temperatura de los gases de combustión, nos permiten calcular el rendimiento de la combustión.

Los métodos de análisis del CO₂ son:

- Precipitación con hidroxido barico [Ba(OH)₂].
- Conductividad eléctrica
- Reacción con hidracina
- Absorción química con potasa.

- Conductividad térmica.
- Espectrofotometría de infrarrojos no dispersivos.

Los 3 primeros métodos no son normalmente utilizados bien por su laboriosidad, bien por su inexactitud y el último es más utilizado para el análisis del CO. Por tanto, los métodos más comunes son la absorción química y la conductividad térmica.

Absorción química

Este método se basa en la absorción del CO₂ por una solución alcohólica de potasa, lo que se traduce en una disminución del volumen de gases introducido y en un aumento del nivel del líquido, graduado directamente en porcentaje de CO₂.

Los dos equipos más conocidos que operan con este método son el Fyrite y el Orsat.

La extracción de gases se efectúa en el Fyrite mediante una pera de goma (figura IV.5).

En los tipos más sencillos de aparatos de Orsat no está incluido el elemento aspirador de gases, por lo que la muestra puede introducirse mediante un extractor análogo al interior o bien mediante la utilización de un balón o una botella de toma de gases. En el caso de las botellas, la muestra puede introducirse haciendo un vacío previo en la botella, o bien mediante una bomba, bariendo previamente el aire contenido. Así mismo, puede acoplarse una bomba al Orsat, que aspira los gases del conducto y los mete al aparato, en cuyo caso hay que prever una válvula de 3 vías, a fin de que durante el barrido previo se expulsen el aire y los gases, y cuando se haya efectuado el barrido, introducir la muestra en el aparato.

Comparando el Fyrite con el Orsat, el primero tiene la ventaja de la sencillez y rapidez con que se efectúan los análisis. Por el contrario, el Fyrite tiene el inconveniente de una menor precisión en las medidas, por dos razones:

- El volumen de gases introducidos no se mide con exactitud, ya que aunque se den las emboladas indicadas por el fabricante, depende de la presión que se aplique a la pera de goma. En cambio el Orsat, el volumen de muestra de 100 cm³ se mide con precisión por medio de una bureta graduada.
- Cuando se efectúan varios análisis consecutivos por el Fyrite, no se da tiempo a los gases a enfriarse por el corto recorrido del tubo de extracción, variando el volumen de gases introducido por el aumento de temperatura, pudiéndose llegar incluso a la condensación del vapor de agua.

Conductividad térmica

Este método se basa en la baja conductividad térmica del CO₂ en relación con otros gases, efectuándose una comparación con un gas de referencia, normalmente aire.

La lectura puede verse influenciada por el vapor de agua y por el hidrógeno, por ello, es necesario secar la muestra de gas para eliminar el agua. En cuanto al hidrógeno, dada la pequeña proporción del mismo, su influencia es mínima, a no ser que este presente en porcentajes superiores al 1%.

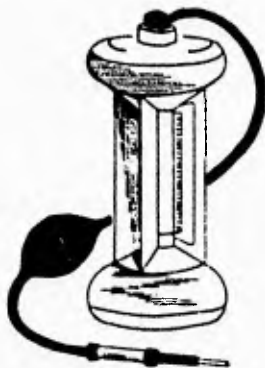


Figura IV.5

IV.4.2 MEDICION DEL O_2

La principal razón para medir el O_2 en los gases de combustión es determinar el nivel de exceso de aire. A bajas lecturas de O_2 , el exceso de aire es aproximadamente 5 veces el porcentaje de O_2 presente. Por ejemplo, si el analizador portátil da una lectura de 2% de O_2 , luego el exceso de aire es aproximadamente 10%.

Para medir el O_2 se pueden emplear el llamado sistema paramagnético y la célula de zirconio. El primer método se funda en el efecto de atracción que un campo magnético ejerce sobre las moléculas de oxígeno contenidas en un gas. Las moléculas atraídas pasan a través de una resistencia eléctrica y la refrigeran; el cambio de temperatura en la resistencia modifica el valor de resistividad eléctrica en un valor proporcional al contenido de oxígeno. Este sistema es bastante preciso, salvo cuando los contenidos de oxígeno son muy bajos. En la figura IV.6 aparece un esquema de este tipo de equipos.

En instalaciones de control automático de combustión, es preciso tener una referencia continua del exceso de aire; esto se consigue midiendo el contenido de oxígeno. El sistema paramagnético tiene un tiempo de respuesta largo y poca precisión en niveles de exceso de aire bajos, lo que lo hace adecuado para estos sistemas.

Si un disco de zirconio recubierto con una fina capa de platino, se calienta $700^\circ C$ y se coloca de forma que una de sus caras este en contacto con la atmósfera y la otra con los gases, se crea una diferencia de potencial entre sus caras que es proporcional a la presión parcial de oxígeno en ambas. Cuanto menor sea el nivel de oxígeno en los gases, mayor es la señal. La tensión creada se emplea para controlar el caudal de aire o de combustible y la respuesta a variaciones es muy rápida (en la figura IV.7 aparece un esquema de este tipo de analizador).

El método de absorción química, también empleado frecuentemente en la práctica para medir el O_2 en gases de combustión, es el mismo que el indicado para el CO_2 , a excepción del absorbente, que en este caso es pirogalato sodico.

Los equipos más comunes que usan este método son así mismo el Orsat y el Fyrite, siendo por tanto valido todo lo expuesto en el caso del CO_2 . El pirogalato sodico se gasta rápidamente que la potasa, por lo que es necesario verificar periódicamente el estado del reactivo, comprobando, por ejemplo, que el porcentaje de oxígeno en el aire es del 21%.



Figura IV.6



Figura IV.7

IV.4.3 MEDICION DEL CO

La medición del contenido de CO proporciona indicación sobre el contenido de este inquemado. Su empleo es particularmente aconsejable cuando el combustible es un gas. En los combustibles líquidos o sólidos, la producción de inquemados suele ser ostensiblemente visible por la aparición de humos negros. Cuando el combustible es gaseoso, el único signo visible suele ser un cambio en la tonalidad de la llama.

Quemando gas, si únicamente nos guiamos por el resultado del análisis de CO₂ cabe la posibilidad de que inadvertidamente se regulase la combustión con defecto de aire y se emitiese una peligrosa cantidad de CO.

Los principales métodos para la determinación del monóxido de carbono son:

- Oxidación con I₂O₅ y colorimetría.
- Oxidación con H₂O a 200° C y la valoración del mercurio formado por absorción atómica.
- Oxidación catalítica a CO₂.
- Absorción química.
- Espectrofotometría de infrarrojos no dispersivos.
- Espectrofotometría de infrarrojos dispersivos.

El primer método es práctico, pero solamente permite obtener magnitud de concentraciones. El segundo es un método muy exacto y adecuado para concentraciones muy pequeñas de CO, pero es muy costoso y bastante laborioso.

El método de absorción química es análogo al indicado para el CO₂ y el O₂, siendo empleado en este caso, como absorbente, el cloruro cúprico en solución amoniacal. El principal equipo que opera por este método es el Orsat, pero sólo es adecuado para niveles relativamente altos de CO, siendo detectable, pero sin ninguna precisión en la medida, a partir del 0,1 %.

El método de infrarrojos dispersivos es muy poco frecuente, siendo las principales características de las restantes:

Oxidación catalítica

En este método el CO se quema a CO₂ mediante una combustión facilitada por catalizadores, es decir, sustancias que aceleran este proceso. Los catalizadores empleados son a base de óxidos de plata, manganeso y cobalto.

El calor desprendido en la combustión conduce a una elevación de la temperatura de la masa del catalizador y del gas que sale de la celda de combustión. Para un caudal de gas dado, esta elevación de temperatura se estabiliza cuando se alcanza el equilibrio, es decir, el calor desarrollado por la combustión y el que se pierde por radiación, convección o conducción, son iguales. La medida de esta elevación de temperatura es directamente proporcional a la concentración de CO.

Espectrofotometría de infrarrojos no dispersivos

Este método se basa en la diferencia de absorción de radiación infrarroja entre el CO y un gas de referencia (normalmente nitrógeno o helio), que se traduce en una producción de calor que pone en vibración una membrana que forma parte de las armaduras de un condensador, variando su capacidad y originando una corriente que, rectificadas, sirve de medida de la cantidad de CO que existe en los gases de combustión.

Este método es bastante preciso y tiene la ventaja de la poca frecuencia de la calibración del aparato.

IV.4.4 MEDICIÓN DE INQUEMADOS SÓLIDOS (ÍNDICE DE BACHARACH)

La presencia de inquemados sólidos en los gases de combustión permite detectar que está produciendo una combustión incompleta por defecto de aire o una combustión imperfecta por no existir condiciones

adecuadas de mezcla, incorrecta atomización de los combustibles, puntos fríos en la cámara de combustión, etc; estas condiciones producen depósitos de hollín, disminución de la eficiencia de combustión y crean problemas de contaminación ambiental.

La medición de opacidad o ennegrecimiento de humos permite efectuar un rápido ajuste aproximado de las condiciones operativas del quemador y, complementada con el conocimiento del CO_2 y la temperatura de los gases, afinarlo al punto de máxima eficiencia.

El medidor de opacidad True-Spot de Bacharach (figura IV.8) junto con la escala que lo acompaña, permiten medir el contenido de humos en los gases de escape (Índice de Bacharach).

El método consiste en succionar gases de chimenea mediante el True-Spot realizando 10 emboladas completas; los gases pasan a través de una tira de papel filtro colocado en la ranura provocando su ennegrecimiento en forma proporcional a su contenido de inquemados sólidos. El papel filtro se compara luego con la escala Bacharach, la cual está numerada del 0, correspondiente al blanco, hasta el 9, negro. Un valor de 3 puede ser considerado de aceptable para calderos que emplean combustibles líquidos y sólidos.

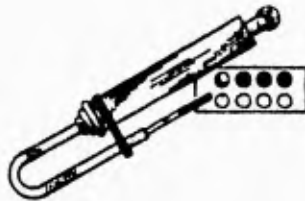


Figura IV.8

IV. 5 CONTROL DE LOS GASES DE LA COMBUSTION

Los gases de la combustión de la caldera o del horno contienen los productos finales del proceso de la combustión, además de infiltraciones y diluciones de gases. En la combustión completa y estequiométrica de un combustible, debe pasar todo el hidrógeno a agua, todo el carbono a dióxido de carbono y el nitrógeno del aire pasará a través de la caldera u horno y saldrá inalterado por la chimenea. Por tanto, en los gases no existirán ni oxígeno, ni carbono en estado libre.

En la práctica, al ser los quemadores equipos mecánicos alejados de una perfección teórica, las reacciones anteriores nunca son completas ni estequiométricas. Siempre existen cantidades apreciables de oxígeno y trazas de carbono y CO.

Las primeras medidas que hay que efectuar son las de O_2 y CO_2 . Se puede afirmar que con una lectura precisa y correcta de la concentración de oxígeno, la reducción de 1 % en el nivel del 5%, provoca una mejora del 1% en el rendimiento de la combustión. En campos más bajos, la reducción de 1% en la concentración de O_2 , proporciona solo un 0.5% de mejora en el rendimiento de la combustión.

Debe tenerse bien presente que si la zona donde se está efectuando la medida de oxígeno está en depresión, existe el riesgo de infiltraciones de aire a través de los quemadores fuera de servicio, bocas de registro, juntas de expansión, grietas, conductos de recirculación de los gases de la combustión, aberturas de los sopladores de hollín y otras zonas.

Este efecto de dilución de los gases de combustión con el aire infiltrado tiene como consecuencia una lectura del % de O_2 , superior a la real. Si además el aire no ha tenido tiempo de mezclarse con los gases, por que la infiltración se produce en la zona de medida, el error de lectura se incrementa considerablemente

IV. 5 CONTROL DE LOS GASES DE LA COMBUSTION

Los gases de la combustión de la caldera o del horno contienen los productos finales del proceso de la combustión, además de infiltraciones y diluciones de gases. En la combustión completa y estequiométrica de un combustible, debe pasar todo el hidrógeno a agua, todo el carbono a dióxido de carbono y el nitrógeno del aire pasará a través de la caldera u horno y saldrá inalterado por la chimenea. Por tanto, en los gases no existirán ni oxígeno, ni carbono en estado libre.

En la práctica, al ser los quemadores equipos mecánicos alejados de una perfección teórica, las reacciones anteriores nunca son completas ni estequiométricas. Siempre existen cantidades apreciables de oxígeno y trazas de carbono y CO.

Las primeras medidas que hay que efectuar son las de O_2 y CO_2 . Se puede afirmar que con una lectura precisa y correcta de la concentración de oxígeno, la reducción de 1 % en el nivel del 5%, provoca una mejora del 1% en el rendimiento de la combustión. En campos más bajos, la reducción de 1% en la concentración de O_2 , proporciona solo un 0.5% de mejora en el rendimiento de la combustión.

Debe tenerse bien presente que si la zona donde se está efectuando la medida de oxígeno está en depresión, existe el riesgo de infiltraciones de aire a través de los quemadores fuera de servicio, bocas de registro, juntas de expansión, grietas, conductos de recirculación de los gases de la combustión, aberturas de los sopladores de hollín y otras zonas.

Este efecto de dilución de los gases de combustión con el aire infiltrado tiene como consecuencia una lectura del % de O_2 , superior a la real. Si además el aire no ha tenido tiempo de mezclarse con los gases, por que la infiltración se produce en la zona de medida, el error de lectura se incrementa considerablemente.

Con la medida del CO₂, el objetivo debe de ser siempre alcanzar el máximo porcentaje de CO₂ compatible con el combustible que se este quemando, y con la mínima aparición de inquemados sólidos y gaseosos

Un bajo porcentaje de CO₂ es indicativo de algunas de las siguientes causas que deben corregirse:

- 1.- Tiro excesivo.
- 2.- Exceso de aire en la combustión.
- 3.- Hogar incorrecto o defectuoso
- 4.- Filtraciones de aire.
- 5.- Mala pulverización de combustible.
- 6.- Boquilla gastada destruida o incorrecta.
- 7.- Defectos en el ventilador y conductos de aire.
- 8.- Mal funcionamiento del regulador de tiro.
- 9.- Presión del combustible incorrecta.

Una medida de gran significación es la del CO. Normalmente, en cualquier sistema de combustión, para excesos de aire medios o ligeramente altos, la cantidad de CO permanece a un nivel muy bajo, del orden de algunas partes por millar (ppm), y prácticamente constante. No obstante , cuando se va disminuyendo el aire de combustión, llega un momento en que la cantidad de CO prácticamente se dispara. Esta zona en la que el CO aumenta rápidamente depende del tipo de quemador utilizado y su estado, así como del generador de calor, y se debe determinar en cada caso para el quemador ajustado y en perfectas condiciones.

Normalmente, en esta zona existe un equilibrio energético entre el calor que se pierde por gases y el calor perdido por el combustible sin quemar, por lo que en primera aproximación, se le debe tomar como punto de consigna.

En una caldera típica alimentada por fue/oil el CO se debe controlar entre 300 y 500 ppm.

Puede decirse que entre estos valores de CO puede haber una diferencia en O₂ del orden del 0.05 %.

Además del análisis del CO puede poner sobre aviso de la presencia de combustibles ricos en el hogar , las cuales proviene del mal funcionamiento de los quemadores. Esto es particularmente importante durante el encendido, cuando el hogar esta frio y los quemadores no son estables. Si el contenido de CO sobrepasa las 1.000 ppm debe sonar una alarma , y a las 1.500 ppm debe dispararse una alarma silenciosa. Estos niveles de CO son tan bajos que no presentan una concentración inflamable (no son causa de explosión), pero pueden avisar de que hay quemadores que están a punto de apagarse. El analizador de CO no es un sustituto de los detectores de llama si no que los complementan. Proporcionan un aviso previo a fin de evitar problemas.

Una combustión con muchos gases indican que es imperfecta o incompleta y producirá depósitos de hollín. Estos depósitos producirán una disminución del rendimiento de la combustión por dos motivos :

- 1.- Calor perdido por los combustibles sin quemar
- 2.- Pérdidas suplementarias de los gases, al no existir una buena transmisión de calor en los tubos y salir los gases a mayor temperatura creando además problemas de contaminación atmosférica.

No obstante y en una primera aproximación, como normalmente se usa el rápido incremento de la concentración de CO es casi simultáneo o precede ligeramente a la aparición de cantidades importantes de inquemados sólidos, mediante el control del CO, estos también quedan controlados.

Entre las causas a comprobar de un alto indice de inquemados sólidos, están las siguientes :

- 1.- Mal funcionamiento del ventilador
- 2.- Tiro insuficiente

- 3.- Mal suministro de fue
- 4.- Bomba de fue funcionando mal
- 5.- Boquilla defectuosa o inadecuada
- 6.- Filtraciones de aire en la caldera
- 7.- Relación de aire / fue inadecuada
- 8.- Hogar defectuoso
- 9.- Regulador de tiro mal ajustado

Otro de los parámetros que es necesario controlar es la temperatura de los gases de combustión, que deberá estar de acuerdo con las especificaciones del fabricante del horno a caldera.

Refiriéndose a calderas de vapor, la temperatura de los gases no debe ser superior, como norma general, en mas de 50⁰C a la temperatura del vapor saturado que genere

Muchas regulaciones de los limites de las emisiones de NO_x desde la existencia del ácido nítrico en las plantas, el 2.8 kg./ton de ácido producen 5.5 de elementos oxidantes y dañinos, lo cuál es equivalente para una emisión en concentraciones de 400 ppmv. La EPA New Source Performance Standard (NSPS) limita las emisiones a 1.5 Kg./ton de ácido a casi 215 ppmv.

En los generadores de vapor, la operación con grandes excesos de aire generalmente son ineficientes, por que el calor que se desperdicia lleva grandes cantidades de contaminantes; una aproximación teórica del cada elemento de los gases contaminantes de los grandes generadores de vapor se menciona a continuación.

El ensayo que se lleva acabo con gotas de amoniaco y gas natural tienen una operación primero con un 60 o 70 % teóricamente del aire resultante y con una conversión lenta para el nitrógeno combustible hasta que se convierte en NO_x, el cuál se generará en el aire desde un 10 hasta un 15 % dependiendo de la capacidad del combustible suministrado.

Ahora bien, según encuestas realizadas y datos proporcionados por las leyes de contaminación ambiental se tiene que la contaminación atmosférica lleva cantidades grandes de componentes como son CO, CO₂, SO₂, SO, etc. que son producidos por los combustibles que se usan en los generadores de vapor los cuales al llevarse a cabo la combustión estos salen a la atmósfera en porcentajes considerables según se muestra en la siguiente tabla:

GASES	% en la atmósfera
CO ₂	20
CO	12
O ₂	Ambiente

Esto quiere decir, que si se están manejando diferentes combustibles dependiendo del tipo de generador de vapor, el exceso de aire para el caso de CO₂ = 20 % serán :

Combustible	Exceso de aire
Gases	5- 10 %
Líquidos	15-20 %
Sólidos	20-35 %

Esto quiere decir, que si se desprenden de los gases de escape hacia la atmósfera 20 % de CO₂, el exceso de aire será de 5 a 10 % para combustibles gaseosos, 15 a 20 % para combustibles líquidos y 20 a 35 % para combustibles sólidos.

Ahora bien, estos gases se deben a la combustión interna en la cámara, en la cuál mientras haya menos exceso de aire habrán menores pérdidas (pérdidas por purga, pérdidas por radiación convectiva y pérdidas por conducción) , pero a su vez no se llevaria a cabo una combustión satisfactoria con el CO y prácticamente se produciría mayor NO_x y por lo tanto más

contaminantes anexos, por otro lado, si se tiene mayor exceso de aire habrá mayores pérdidas y como consecuencia una mejor combustión.

NOTA : Las pérdidas en los generadores de vapor deben de andar en el orden de :

Pérdidas	Porcentaje
Por	13 - 20 %
Purga	2 - 3 %
Por radiación convectiva	2 - 5 %

En un generador de aceite caliente con alta intensidad de combustión las emisiones de NOx son disminuidas 50 % con una limpieza de las paredes del generador de vapor, con los cuales los elementos de las emisiones se dan en el medio en porcentajes muy bajos como son:

CO₂ = 14 % , CO = 1.5 % , SO₂ = 10.5 % , SO = 7.8 %

Tomando como ejemplo una planta de generación de energía, la chimenea de uno de sus generadores no es emisora de humo espeso donde la combustión eficiente puede ser asumida por arriba del 99.5 % , las emisiones de CO arriba de 500 ppmv en los gases de escape reducen la relación de calor en un 0.2 % o menos. Una pequeña cantidad de carbón sin quemar dando menores pérdidas de eficiencias al 0.2%, puede crear una notoria pluma de humo

IV.6 EFICIENCIA DE LA COMBUSTION

En todos los sistemas de combustión y en particular, en el de un generador de vapor, el proceso de quemado de combustible se puede realizar con diversos grados de eficiencia.

Considerando el proceso desde el punto de vista de una reacción química del tipo:



La máxima eficiencia de combustión correspondería al caso en que tanto el combustible como el aire se consumen completamente para dar lugar a los productos, esto es, lo que se ha definido como una combustión estequiométrica.

Como ya se ha dicho, diversas imperfecciones del proceso se hacen necesario incorporar una cierta cantidad de aire adicional o "exceso de aire" para que las reacciones tiendan a completarse y como es natural, esté exceso de aire se incorporará a los productos de la combustión; si bien cuanto mayor sea al exceso de aire más podrán completarse las reacciones de combustión e incrementar la conversión de SO_2 a SO_3 y de NO a NO_x , así como de V_2O_3 a V_2O_5 y con ello la corrosión del propio generador.

De lo expuesto anteriormente puede decirse que para un sistema de combustión dado, la combustión más eficiente será aquella que se verifique con un exceso de aire tal que, a un mismo tiempo sea lo suficientemente grande como para minimizar la formación de los productos de combustión incompleta (CO y partículas) y a la vez lo suficientemente pequeño como para no incrementar la producción de SO_3 y V_2O_5 y el NO_x , así como para no disminuir la eficiencia térmica.

El control de la eficiencia de la combustión podrá, por lo tanto, llevarse a cabo mediante el conocimiento de la composición de los gases de combustión, particularmente, las concentraciones de CO , partículas, O_2 , SO_3 y NO_x .

La relación entre estas concentraciones para diversas condiciones de operación permitirá definir las condiciones más favorables para una combustión eficiente y al mismo tiempo, el mínimo exceso de aire requerido por el proceso.

IV.7 OPTIMIZACION DE LA COMBUSTION EN GENERADORES DE VAPOR

De acuerdo con las condiciones expuestas y teniendo en cuenta la calidad de los combustibles utilizados en México para la generación de energía, resulta evidente la necesidad de adecuar los parámetros de operación de los sistemas de combustión de los generadores de vapor a las nuevas características de los combustibles en uso, con el objeto de contribuir a incrementar su disponibilidad y restituir en la medida que sea posible su eficiencia a los valores esperados por el diseño.

Para alcanzar tal objetivo, se requiere de una metodología que permita caracterizar el funcionamiento de los sistemas de combustión con los combustibles actuales y con base a los resultados de la caracterización, definir los valores de los parámetros de operación que permitan que el proceso se realice en forma óptima.

Desde 1981 a la fecha se han venido realizando trabajos de diagnóstico para la puesta a máximo grado del sistema de combustión. La experiencia adquirida en los mismos, ha permitido ir enriqueciendo la metodología inicial, incorporando nuevas pruebas y mejorando el modo de interpretar y obtener los resultados. La cantidad de los resultados obtenidos, así como la diversidad de los diseños de generadores de vapor sobre los que se trabajó, hacen ver la conveniencia de realizar un ordenamiento de las pruebas tanto para la realización de las mismas como para la interpretación de los resultados.

Ahora bien, la metodología que se propone consiste básicamente en una evaluación del comportamiento del sistema de combustión para diversas condiciones de operación, Las más importantes son:

La relación entre estas concentraciones para diversas condiciones de operación permitirá definir las condiciones más favorables para una combustión eficiente y al mismo tiempo, el mínimo exceso de aire requerido por el proceso.

IV.7 OPTIMIZACION DE LA COMBUSTION EN GENERADORES DE VAPOR

De acuerdo con las condiciones expuestas y teniendo en cuenta la calidad de los combustibles utilizados en México para la generación de energía, resulta evidente la necesidad de adecuar los parámetros de operación de los sistemas de combustión de los generadores de vapor a las nuevas características de los combustibles en uso, con el objeto de contribuir a incrementar su disponibilidad y restituir en la medida que sea posible su eficiencia a los valores esperados por el diseño.

Para alcanzar tal objetivo, se requiere de una metodología que permita caracterizar el funcionamiento de los sistemas de combustión con los combustibles actuales y con base a los resultados de la caracterización, definir los valores de los parámetros de operación que permitan que el proceso se realice en forma óptima.

Desde 1981 a la fecha se han venido realizando trabajos de diagnóstico para la puesta a máximo grado del sistema de combustión. La experiencia adquirida en los mismos, ha permitido ir enriqueciendo la metodología inicial, incorporando nuevas pruebas y mejorando el modo de interpretar y obtener los resultados. La cantidad de los resultados obtenidos, así como la diversidad de los diseños de generadores de vapor sobre los que se trabajó, hacen ver la conveniencia de realizar un ordenamiento de las pruebas tanto para la realización de las mismas como para la interpretación de los resultados.

Ahora bien, la metodología que se propone consiste básicamente en una evaluación del comportamiento del sistema de combustión para diversas condiciones de operación, Las más importantes son:

1. Carga de la unidad (Potencia generada).
2. Temperatura del combustible a quemadores.
3. Relación vapor-combustible en los atomizadores.
4. Diferencia de presiones entre la caja de aire y el hogar.
5. Posición de la compuerta de aire a quemadores

La evaluación se realizó a través de una serie de pruebas, en las que para cada conjunto de valores de las condiciones mencionadas se modifica el exceso de aire con que opera el generador de vapor y para cada exceso de aire se determina la composición de los gases de la combustión a la salida del economizador mediante el análisis de las concentraciones de:

- a) Oxígeno
- b) Monóxido de carbono
- c) Dióxido de azufre
- d) Trióxido de azufre

Con los datos obtenidos se construyen las llamadas "curvas de operación" del sistema, las cuales muestran las variaciones en el contenido de SO_3 , CO y NO, así como partículas de gases de la combustión en función del contenido de O_2 . Estas curvas permiten definir el exceso de aire más adecuado para cada conjunto de valores de las condiciones de operación siguiendo los lineamientos explicados en el tema anterior.

Comparando entre sí las curvas, se puede poner de manifiesto la influencia aislada de cada una de las condiciones de operación en el comportamiento del sistema de combustión y de este modo seleccionar los valores que brinden una combustión más eficiente.

Durante las pruebas se toman muestras del combustible utilizado y se realizan mediciones de temperatura y presión del circuito aire-gases del generador para detectar cualquier alteración.

Además, se determina la eficiencia del generador de vapor tanto en condiciones iniciales como finales de modo que los valores de la misma permitan cuantificar los resultados que en este aspecto brinda la aplicación de la metodología.

CAPITULO V CLASIFICACION DE LOS SISTEMAS DE COMBUSTION

Los requerimientos de cantidad y distribución de calor de una operación de calentamiento nos definen un tipo particular de proceso de combustión.

El objetivo principal de un sistema de combustión es transportar y entregar los reactivos al equipo de transferencia de calor, en forma tal que se cubran los requerimientos de un proceso de combustión específico en las condiciones óptimas de estabilidad, seguridad y control, para lograr la eficiencia máxima posible, tanto en la distribución de calor como en la economía de la operación.

Un sistema de combustión esta integrado por una serie de elementos que proveen las condiciones anteriormente descritas.

Debido a los efectos del estado físico del combustible sobre el proceso de combustión, éste representa el criterio necesario para analizar los distintos tipos de sistemas de combustión, por lo cual dividiremos su análisis en:

- a) SISTEMA DE COMBUSTION DE GASES
- b) SISTEMA DE COMBUSTION DE LIQUIDOS
- c) SISTEMA DE COMBUSTION DE SOLIDOS

V.1 SISTEMA DE COMBUSTION DE GASES

Existe una gran variedad de combustibles gaseosos, sin embargo los combustibles gaseosos utilizados comercialmente en México se reducen al gas natural y al gas L.P. En algunas regiones al norte del país también se utiliza el gas de coque y de alto horno, sin embargo todo el gas producido por las industrias es exclusivamente de consumo interno y en aplicaciones particulares.

Basandonos en consideraciones de energía podemos clasificar los sistemas de combustión de gases de la siguiente forma:

- SISTEMA I Alimentación separada del gas y del aire a la cámara de combustión.
- SISTEMA II Mezclado de boquilla.
- SISTEMA III Premezclado parcial con requerimiento de aire secundario.
- SISTEMA IV Premezclado completo utilizando energía cinética solamente.
- SISTEMA V Premezclado completo utilizando mezcladores mecánicos.

V 1.1 SISTEMA I ALIMENTACION SEPARADA DEL GAS Y DEL AIRE A LA CAMARA DE COMBUSTIÓN

En este sistema no se utiliza ninguna clase de mezcladores, como puede verse en el arreglo típico mostrado en la figura V.1

Este sistema es utilizado en instalaciones grandes en las cuales existen temperaturas elevadas y aseguran la ignición continua de la mezcla aire-combustible.

La velocidad del mezclado es relativamente lenta, debido a la forma en que se alimentan el aire y el gas.

La combustión se lleva a cabo en un área muy grande, y solamente utilizando aire precalentado se pueden lograr las temperaturas elevadas para mantener la ignición.

Como el aire y el gas no se mezclan hasta que entran al horno, la temperatura a que debe ser precalentado el aire está limitada únicamente por factores económicos.

La relación de aire-gas puede regularse manual o automáticamente.

Cuando se trata de control manual, el control de relación se hace accionando una válvula en la línea de gas y otra en la línea de aire.

El control automático de relación puede ser clasificado de dos tipos:

a) Balance de presiones, el cual consiste en un regulador instalado en la línea de gas y recibe una señal de impulso (presión de la línea de aire), la cual es la que controla por medio de un diafragma y la válvula del regulador, una cantidad proporcional de flujo de gas.

b) El control de la relación se logra por la unión mecánica de las manivelas que accionan el vástago de

las válvulas.

Estos sistemas son utilizados en grandes instalaciones donde se tengan temperaturas altas que aseguren la ignición continua.

V.1.2 SISTEMA II MEZCLADO DE BOQUILLA

Este es un sistema muy simple y flexible que puede ser utilizado en casi todas las instalaciones industriales comunes cuyo rango de operación sea de 1000 a 2800° F. Cuando se disponga de una cámara de combustión es posible obtener valores arriba que estén por arriba de 250 MBtu/hr-ft³.

El control de la relación de aire-gas puede ser logrado en dos formas principales:

- a) Válvulas separadas en las líneas de aire y gas con las manivelas que accionan los vástagos unidad entre sí. Estas válvulas controlan además los gastos de aire y gas.
- b) Balance de presiones. La línea de gas tiene un regulador operado por una línea de impulso de la línea de aire.

Se usa un quemador de mezclado de boquilla, como su nombre lo indica, el aire y el gas no son mezclados hasta que no abandonan el cuerpo del quemador. Los dos fluidos se mantienen separados dentro del quemador, pero las boquillas son diseñadas en tal forma que favorecen la mezcla de los reactivos una vez que abandonan el cuerpo del quemador. La figura V.2 muestra la sección transversal de un quemador de mezclado de boquilla.

Dependiendo del perfil de las boquillas es posible obtener diversos tipos de flama con características particulares.

El quemador mostrado en la figura V.2 presenta en la boquilla una serie de tubos cuya finalidad es suministrar aire en la periferia del ladrillo de ignición (internamente) y evitar que los gases de la cámara

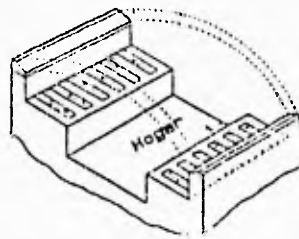


FIG V 1 Alimentación Separada del Gas y del Aire a la cámara de combustión

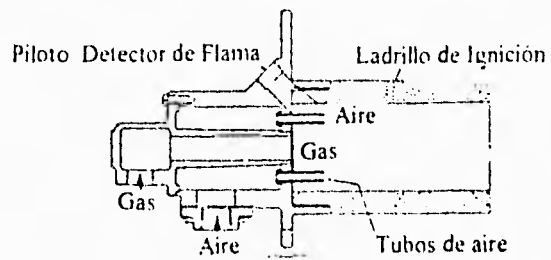


FIG V 2 Sección transversal de un Quemador de Mezclado de Boquilla

de combustión sean succionados por el efecto de Venturi producido por el aire y el gas al salir del quemador.

Las principales ventajas de los quemadores de mezclado de boquilla es su rango amplio de gastos y las escasas probabilidades de un "flash back", en algunos casos se pueden utilizar ventiladores de baja presión, ya que el aire de combustión no pierda energía para premezclarse con el gas. Y estos quemadores son mas adaptables a las configuraciones especiales de ultraestabilidad, flamas planas y combinación de combustibles.

Otro equipo usado en este tipo de sistema es el quemador de mezclado retardado. En algunas operaciones se requiere que la radiación de la flama caliente una gran superficie, lo cual se logra con flamas luminosas largas.

Las flamas luminosas presentan una longitud considerable y pueden llenar un gran volumen del equipo de transferencia con una flama de temperatura mas o menos constante. En estos casos se puede utilizar un área mayor de superficie de material refractario para radiar hacia el material. Lo cual permite una utilización mas eficiente del área del equipo de transferencia debido a la distribución uniforme de temperaturas en el espacio de combustión.

El calentamiento a elevadas temperaturas del gas en ausencia de aire origina una descomposición térmica en los hidrocarburos presentes en el gas produciendose carbón e hidrógeno. Las partículas incandescentes de carbón son las que originan la luminosidad de la flama.

Tanto las flamas largas como las luminosas son producidas por la misma acción mecánica del quemador. La figura V.3 muestra una sección transversal de un quemador de flama larga luminosa.

Cuando se utiliza uno de estos quemadores, la relación aire-gas no puede ser juzgada por la apariencia de la flama, ya que puede existir suficiente aire como para que exista una flama oxidante. De hecho, el quemador mostrado en la figura V.3 es un quemador muy estable con la combustión de aire en exceso,

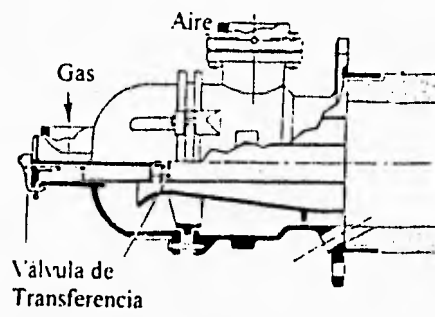


FIG V.3 Quemador de flama Luminosa Larga
La válvula de Transferencia permite un
premezclado de aire y de gas

ya que su configuración interna llena completamente el ladrillo de combustión con aire y gas reviniendo cualquier inducción de gases producidos por la combustión.

El sistema de mezclado de boquilla puede ser utilizado en casi todas las instalaciones industriales comunes cuyo rango de operación sea de 1000 a 2800° F. Existe una gran variedad de procesos y hornos que utilizan este sistema entre los que se encuentran: calentadores de aire, hornos de tratamiento térmico, hornos de forja, etc.

V.1.3 SISTEMA III PREMEZCLADO PARCIAL CON REQUERIMIENTO DE AIRE SECUNDARIO

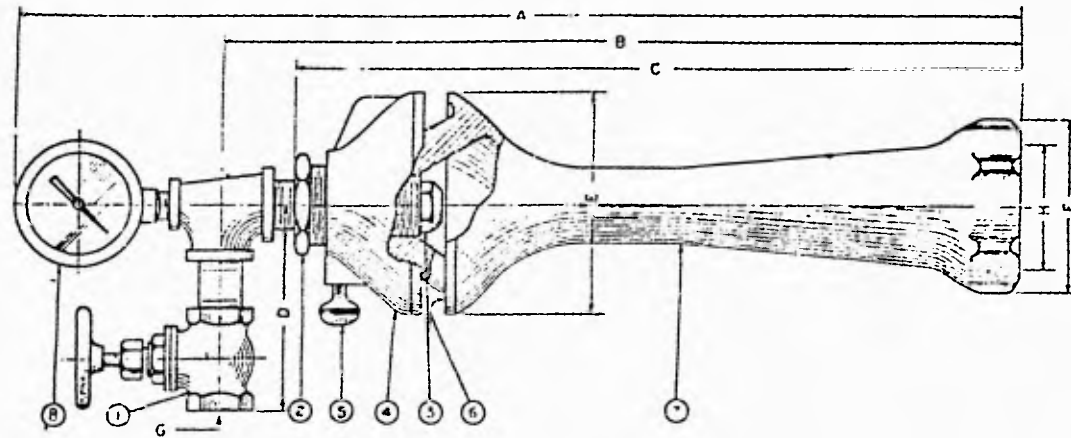
Para este tipo de sistema se emplea un inspirador, ver figura V.4 también designado como mezclador Venturi, que utiliza la energía del gas para inducir el aire primario en proporción al flujo de gas.

La cantidad de aire primario necesario en estas aplicaciones es suficientemente pequeña como para ser inducida por las presiones de gas tan bajas como las de los quemadores domésticos.

Ya que las aplicaciones industriales generalmente requieren un rango bastante amplio y mayor liberación de calor del que es posible conseguir utilizando quemadores atmosféricos, el uso de inspiradores en instalaciones industriales está limitado a aquellos casos en que se disponga alta presión de gas.

Los inspiradores pueden utilizarse tanto en sistemas abiertos como sellados mientras se conserve una atmósfera en la cámara de combustión a una presión constante.

La principal limitación para un inspirador es la presión interna del horno, debido a que la energía del gas se ve disminuida al inducir el aire, y debe contraponerse a la presión interna del horno. Por esto mismo la distancia entre el quemador y el inspirador debe ser mínima.



1. Válvula de gas
2. Reducción
3. Boquilla de gas
- 4, 6 y 7 Cuerpo del inspirador
5. Manivela
8. Manometro

FIG V 4 Inspirador

El mezclador utilizado en este sistema es un aspirador que se muestra en la figura V.5. Este tipo de mezclador además controla la relación aire-gas, para aire a baja presión (3 a 24 psi). El aire es forzado a fluir por un venturi, y la presión reducida en la garganta del mismo induce al gas en proporción al flujo de aire.

Controlando el flujo de aire se controla el flujo de gas, por lo que podemos controlar el gasto de la mezcla aire-combustible con la válvula de la línea de suministro de aire.

El funcionamiento apropiado de un aspirador debe considerar una relación definida entre el tamaño de la garganta y el orificio del quemador. Si el orificio del quemador es muy pequeño, se producirá un aumento en la presión de la mezcla, pero la succión en la garganta del venturi disminuirá, reduciendo la capacidad. Si el diámetro del orificio del quemador es muy grande, la presión de la mezcla será menor, reduciendo la presión disponible para el rango de operación.

Para lograr un mejor mezclado de la relación aire-gas se utiliza un premezclador mecánico que es un turboventilador. Este tipo de equipo no controla la relación aire-gas, excepto en el caso en que el gas se encuentra a presión atmosférica.

La mezcla aire-gas debe mantenerse dentro de los límites de flamabilidad para poder reaccionar. Algunos sistemas de combustión dependen del espacio del horno para conseguirlo; sin embargo, es necesario tener un sistema más eficiente de mezclado y que además pueda ser regulado con precisión.

Las mezclas aire-gas cercanas a las cantidades del balance estequiométricos, reaccionan muy fácilmente. Por lo que el quemador debe estar diseñado en tal forma que reduzca al mínimo la posibilidad de que el frente de flama se regrese.

El diseño apropiado de un sistema de combustión para estas condiciones permite que las velocidades a través de las boquillas del quemador igualen las altas velocidades de propagación de la flama. Esto se logra colocando un ladrillo de ignición corriente arriba del quemador para asegurar la reignición de la mezcla aire-gas.

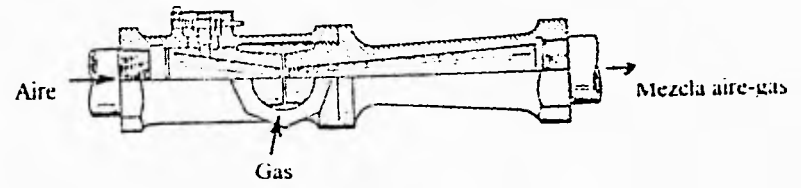
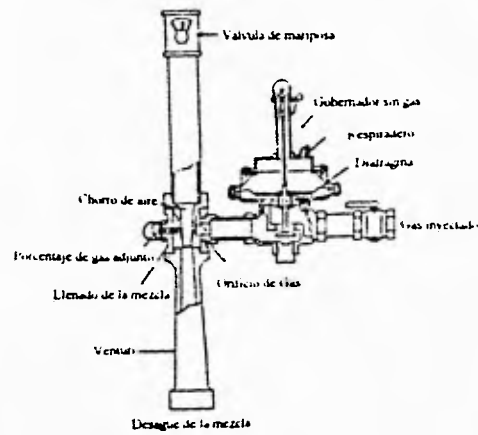


FIG. V 5
Aspirador

Teóricamente, si la velocidad de la mezcla es igual a la velocidad de propagación de la flama, la flama permanecerá estacionaria en cualquier punto en que se mantenga ignición, sin embargo, es necesario que exista una protección para que al ser mayor la velocidad de la flama ésta no siga en la trayectoria del flujo aire-gas corriente arriba del quemador.

Uno de los quemadores mas comunes de este tipo consiste en un cabezal con un gran número de orificios. La mayoría de los quemadores domésticos son de este tipo.

Estos quemadores son generalmente estables y silenciosos. Si la flama de una parte del quemador se extinguiera la flama de la parte adyacente actúa como piloto logrando la reignición.

Debido a su estructura física, este tipo de quemadores está limitado a operaciones de baja temperatura.

Este sistema de combustión puede ser utilizado en todas las aplicaciones en las que el exceso de aire no sea perjudicial.

V.1.4 SISTEMA IV PREMEZCLADO TOTAL UTILIZANDO ENERGIA CINETICA

Este sistema está basado en quemadores que requieren una mezcla total de aire y del gas en una proporción cercana a la estequiométrica. Por su simplicidad y relación razonablemente precisa, además de su control de temperatura, es uno de los sistemas más utilizados en la industria.

La ausencia de aire secundario facilita la aproximación a temperaturas relativamente elevadas, así como atmósferas continuas, neutrales, ricas o pobres, de control preciso según los requerimientos.

El rango de temperaturas en que se utiliza este sistema varía entre 1200 y 3000° F.

El tipo de mezcladores empleados es un inspirador y el aspirador explicados en el sistema anterior.

El metodo de control y la relación aire-gas es igual al mencionado en el sistema III.

El control de gasto consiste esencialmente en una válvula que controla el fluido principal del premezclador.

El tipo de quemador utilizado es un quemador de una sola boquilla, este quemador permite la liberación de una gran cantidad de calor en volúmenes relativamente pequeños. Estos quemadores producen una flama corta y muy radiante, la combustión es casi completa en el ladrillo de ignición. Se caracterizan por una sola conexión para la mezcla aire-gas. Pueden instalarse en sistemas abiertos o sellados. Cuando son utilizados en sistemas sellados e instalados en un ladrillo de ignición son designados como quemadores de tunel. La figura V.6 muestra uno de estos quemadores.

Frecuentemente este tipo de quemadores presenta un elemento para la retención de la flama, el cual consiste en una serie de pequeñas recirculaciones causadas por pequeños orificios alrededor de la boquilla principal. Este quemador se muestra en la figura V.7 Como los pequeños orificios presentan una resistencia muy alta comparada con la boquilla principal, la velocidad a través de ellos es menor y consecuentemente, la tendencia a que el frente de flama se aleje demasiado del quemador es prácticamente eliminada.

V.1.5 SISTEMA V PREMEZCLADO TOTAL CON MEZCLADORES MECANICOS.

Este sistema produce y quema mezclas a cualquier presión deseada para utilizarse en equipos de combustión de alta presión, o para dar un rango amplio de operación al equipo de quemado.

En este tipo de sistema se obtiene un mayor rendimiento de la energía, ya que la mezcla aire-gas es utilizada directamente de la máquina mezcladora no se tienen pérdidas en el mezclado.

El mezclador mecánico empleado en este sistema se muestra en la figura V 8.



FIG V 6

Quemador tunel

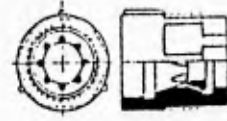


FIG V 7

Quemador de retención de flama

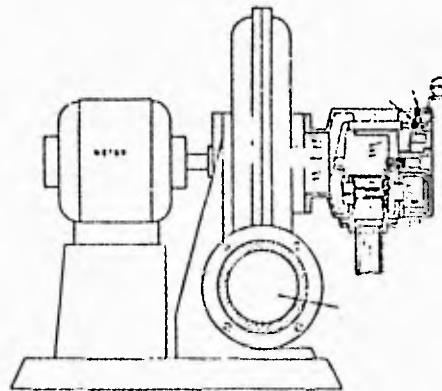


FIG V 8

Mezclador mecánico

1. Soplador
2. Mezcla aire-gas
3. Presión de vacío
4. Desagüe de gas
5. Inyección de gas
6. Mezcla aire-gas para la cámara
7. Quemador

Es necesario instalar equipos de protección entre el mezclador mecánico y el equipo de quemador para evitar cualquier daño en caso de que ocurra un regreso del frente de flama siguiendo la trayectoria de la mezcla aire-gas.

La relación aire-gas se ajusta en la succión del turboventilador, por medio de una válvula que controla la cantidad de gas. De esta manera el control de la relación será independiente del volumen manejado por el turboventilador, lo que permitirá alimentar varios quemadores independientemente sin que la operación de uno de ellos afecte el flujo a los restantes.

Esto es muy ventajoso en aquellas operaciones con patrones de liberación de calor muy especiales o en los casos en que se obtiene un rango amplio solamente si se apagan algunos quemadores.

El control de la cantidad de mezcla aire-gas se efectúa por medio de una válvula en la línea de cada quemador, la cual puede ser operada manual o automáticamente. Los quemadores utilizados son los mismos que en el sistema IV.

Este sistema es utilizado en hornos de calentamiento, hornos para fundir metales, calderas, etc. En general en aquellos equipos de combustión, o un rango de operación muy amplio.

V.2 SISTEMA DE COMBUSTION DE LIQUIDOS

Los combustibles líquidos industrialmente en México son el diesel, el combustóleo ligero, el combustóleo pesado, y en menor proporción, el petróleo diáfano.

Por las propiedades físicas que presentan los combustibles, estos definen dos tipos principales de sistemas de combustión. Los que requieren calentamiento y los que no lo requieren.

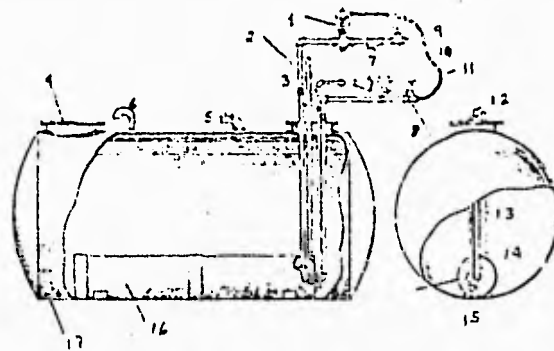
Los sistemas típicos de suministro de combustible se muestran en la figura V.9, constan, principalmente, de tanques de almacenamiento, calentadores, válvulas, filtros, bombas, quemadores y tubería.

Los tanques de almacenamiento deben ser de una capacidad suficiente para satisfacer los requerimientos máximos de la planta y proveer un margen razonable de seguridad, tomando en cuenta el tiempo de entrega mas largo probable de proveedores.

Cuando se trate de combustóleo ligero o pesado, es necesario que el tanque cuente además con las conexiones necesarias y un calentador de succión.

Los combustóleos ligero y pesado, presentan a temperatura ambiente una viscosidad muy alta, como se muestra en la figura V.10, por lo que es necesario calentarlos para reducir la viscosidad hasta el punto que puedan ser manejados por las bombas.

El calentamiento del combustóleo se lleva acabo en el mismo tanque de almacenamiento, utilizandose un intercambiador de calor de vapor, figura V.10, o bien un calentador eléctrico, figura V.11. A estos intercambiadores se les denomina calentadores de succión. El intercambiador de vapor puede ir integranente dentro del tanque de almacenamiento o bién un serpentín en el que los tubos entran y salen del tanque de almacenamiento.



- 1 Regulador automático de temperatura de aceite
- 2 Línea de condensación de vapor
- 3 Línea de retorno de aceite
- 4 Tapa auxiliar
- 5 Dopa de llenado
- 6 Dopa de ventilación
- 7 Salida de vapor
- 8 Válvula termomática
- 9 Vapor de salida
- 10 Trampa de vapor condensado
- 11 Salida de aceite
- 12 Tapa de vapor
- 13 Línea de retorno de aceite
- 14 Salida de aceite
- 15 Línea de condensación de vapor
- 16 Calefacción de aceite en la succión
- 17 Tanque de almacenamiento de aceite



FIG V 10

Calentador de succión operado con vapor

Válvula manual de extensión de vapor para el tipo cerrado de aceite
 calentando con el calor los elementos internos

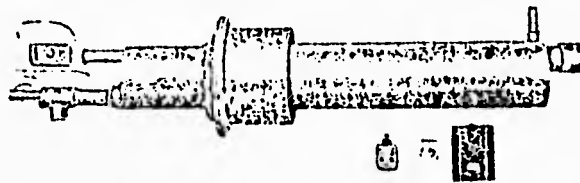
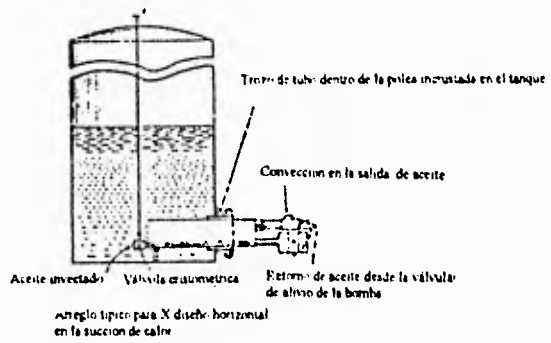


FIG V.11

Calentador eléctrico de succión

La utilización de serpentines no es muy recomendable ya que tienen la tendencia a calentar todo el contenido del tanque, desperdiando calor y demorando el arranque de las bombas. Esto se debe a que el combustible caliente asciende en el tanque por diferencia de densidades.

Otro problema que se presenta, es que al adicionar más combustible a diferentes temperaturas, se desbalancean las características del sistema.

El tipo de calentador de succión más eficiente es aquel que no calienta el contenido total del tanque de almacenamiento, sino únicamente la cantidad de combustible que es consumido por los quemadores y recirculado.

Esto reduce el tiempo de arranque del sistema de bombeo, permite un control más preciso de la temperatura y ahorra en el costo de calentamiento del combustible.

El filtro de succión debe instalarse justamente antes del sistema de bombeo, con el fin de proteger los elementos del mismo.

El filtro debe ser del tipo de doble canasta para permitir su limpieza durante la operación, simplemente haciendo pasar el combustible por una de las canastas mediante una válvula, y sacando la otra.

Para el sistema de bombeo es recomendable la instalación de bombas duplex, cada una de ellas con capacidad suficiente para bombear el gasto máximo del sistema, considerando un exceso suficiente para asegurar una presión constante en la línea. Las bombas utilizadas son de desplazamiento positivo rotatorias.

La tubería de la succión debe ser suficientemente amplia y libre de fugas. Esto último es de gran importancia, ya que muchos sistemas de combustible trabajan deficientemente debido a alguna fuga en las conexiones, por donde puede introducirse aire y bloquear el flujo de combustible total o parcialmente.

Las válvulas de relevo de presión de combustible es un elemento de seguridad que evita sobrepresiones en la línea de las bombas a los quemadores, y al mismo tiempo mantiene una presión constante y uniforme recirculando automáticamente cualquier exceso de combustible. Cuando se trata de diesel la recirculación se envía al tanque de almacenamiento, y cuando se trata de combustóleo ligero y pesado debe enviarse a la succión del calentador de succión.

El filtro de descarga debe instalarse después de la válvula de relevo, y su función es entregar al sistema un combustible con mucho menor impurezas, sin la limitación de presión del filtro de succión.

En los sistemas de combustóleo pesado es necesario instalar un intercambiador tan cerca como sea posible de los quemadores para reducir al máximo las pérdidas de calor, asegurar una presión constante en los quemadores y un arranque rápido de las bombas. Este intercambiador es denominado calentador de línea.

Los sistemas muy grandes necesitan varios calentadores, cada uno para cubrir las necesidades de un horno o de un grupo muy cercano de hornos. De esta manera es posible compensar la disminución de la temperatura del combustóleo debido a las pérdidas de calor con los alrededores, y las variaciones en el gasto de combustóleo que se presentan en las líneas muy grandes.

Los calentadores de línea pueden ser eléctricos o de vapor.

Estos intercambiadores reciben el combustóleo parcialmente calentado en el calentador de succión, y elevan su temperatura hasta el punto en que puede ser atomizado satisfactoriamente.

La temperatura a que debe calentarse el combustóleo debe ser tal que una pequeña variación en la misma no cause un efecto apreciable sobre la viscosidad.

Es necesario instalar además una válvula de seguridad en la descarga del calentador, para que en caso de que las válvulas de ambos lados del calentador sean cerradas accidentalmente, pueda relevar la

presión excesiva debida a una expansión térmica del combustóleo. Esta válvula debe instalarse en tal forma que descarguen en la línea de suministro de combustóleo con una presión alrededor de 1 y 1½ veces la presión máxima de trabajo del sistema de combustóleo.

La tubería utilizada debe ser de un diámetro suficiente para entregar la cantidad requerida de combustible a los quemadores con la menor pérdida posible de presión.

Los sistemas de combustóleo deben presentar dos circuitos de recirculación con el objeto de mantener las líneas en condiciones de transportar y atomizar el combustóleo. Uno de los circuitos de recirculación transporta el combustóleo a los calentadores de línea, y el segundo transporta el combustible a cada uno de los quemadores.

Las líneas de combustóleo deben estar aisladas para evitar lo más posible la transferencia de calor a los alrededores. Sin embargo, esto no es suficiente en la mayoría de los casos, por lo que se recurre al trazado.

El trazado consiste en una línea de vapor o un elemento eléctrico unido a la tubería de combustóleo, y su función es proveer calor a la línea para mantener el combustóleo a una viscosidad apropiada para su transporte y control de temperatura.

Conforme se incrementa la temperatura del combustóleo este tiende a expandirse. Por ejemplo, un combustóleo calentado de 60 a 212° F puede incrementar en un 6% su volumen. Este incremento en el volumen puede originar un aumento considerable en la presión, en especial en los calentadores de línea, por lo que se debe contar además de la válvula de relevo con una cámara de expansión que permita la expansión del combustóleo, ver figura V.12.

Para la operación de los quemadores se requiere de un filtrado más fino que los de succión y descarga de las bombas, ya que los orificios para la atomización del aceite puede obstruirse, y además afectar la operación de las válvulas de control y de los reguladores de la relación aire-combustible, debido al

depósito de impurezas. Estos filtros están constituidos por una gran cantidad de laminillas que son capaces de retener partículas hasta de 0.008 pulgadas.

Para lograr la relación apropiada entre el aire y el aceite existen dos formas principales, las que a su vez definen el equipo de control de gastos.

- a) Válvulas interconectadas en las líneas de aire y de aceite, las cuales controlan el gasto y la relación.
- b) Balance de presiones, el cual consiste básicamente en un regulador que controla la relación aire-aceite, y la cantidad de combustible se modula por medio de una válvula en la línea de aire.

A diferencia del gas, donde el contacto mínimo necesario para el mezclado con el aire se logra con gran eficiencia, y en el estado en que se dispone el combustible, los combustibles líquidos presentan poca superficie de contacto con el aire, por lo que es necesario fraccionarlos para lograr un mezclado eficiente con el aire.

La atomización consiste en el fraccionamiento de una corriente de líquido en pequeñas partículas, mediante la acción mecánica de fricción o presión. Mientras menor sean las partículas, mayor será la superficie de contacto con el aire y se logrará una combustión más completa.

La eficiencia máxima de la combustión, es decir la ignición rápida y temperatura elevada, se logra con la cantidad estequiométrica de los reactivos. Por lo que es importante conseguir el menor tamaño posible de partículas para poder encontrar fácilmente el aire necesario para la combustión total del combustible.

Si un quemador no atomiza apropiadamente, no producirá una ignición rápida, requerirá aire en exceso para completar la combustión, y su operación causará muchos problemas.

Mediante una atomización eficiente, es posible aproximarse a la combustión estequiométrica, y reducir la pérdida de calor al calentar el exceso de aire, reduciendo también el costo del combustible.

Existen tres métodos o formas principales para lograr la atomización de un combustible líquido, estos son: 1) Quemadores de atomización con aire a baja presión, 2) Quemadores de atomización con aire a presión o con vapor y 3) Quemadores de atomización mecánica.

La selección de la capacidad y número de quemadores para un horno depende de la naturaleza del proceso de calentamiento, el tipo de horno y la limitación de los quemadores en relación al espacio disponible en el horno para la combustión.

A partir de experiencias prácticas se ha llegado a la conclusión que el uso de múltiples quemadores asegura una distribución de calor más uniforme y a la vez un mejor control de la temperatura.

Utilizando un menor número de quemadores de mayor capacidad que el mantenimiento de una distribución igual de calor sea más difícil, ya que:

- 1) Las distancias que deben recorrer los productos de combustión del quemador a la zona de calentamiento son necesariamente mayores.
- 2) La uniformidad en el calentamiento se ve adversamente afectada cuando es necesario disminuir la capacidad de los quemadores más grandes para evitar un sobrecalentamiento.

En hornos y calderas donde se requiere un rango muy amplio de cantidad de calor, la utilización de varios quemadores es especialmente deseable; por ejemplo, un horno con un quemador grande capaz de quemar 50 GPH máx. y 10 GPH mín., tiene un rango de relación de 5 a 1. Mientras que en la misma instalación dos quemadores más pequeños, cada uno de 25 GPH máx. y 5 GPH mín., el rango de relación será de 10 a 1. Esto se debe a que los dos quemadores a capacidad máxima pueden quemar 50 GPH apagando uno de los quemadores.

Los límites de rango de relación de 5 a 1 se han escogido a propósito en este ejemplo, ya que se ha encontrado difícil asegurar una relación mayor y mantener una combustión estable en un ladrillo de ignición.

Esto es, un ladrillo que sea suficientemente pequeño y con el perfil correcto para mantener la estabilidad de la flama de 1 GPH, no podrá mantener la flama con 5 GPH y tenderá a depositarse carbón en el ladrillo. De la misma manera, si el perfil interno está diseñado para 5 GPH el calor radiado por el ladrillo de ignición será insuficiente para mantener la combustión de 1 GPH.

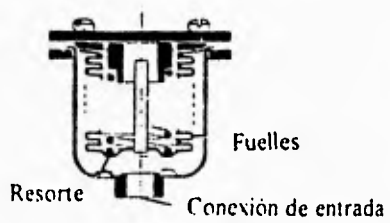


FIG V.12

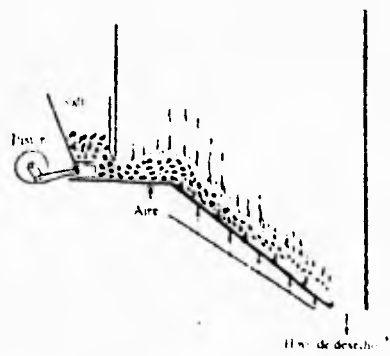


FIG V 13 Lecho fijo

V.3 SISTEMA DE COMBUSTION DE SOLIDOS

En comparación con los combustibles líquidos y gaseosos, los combustibles sólidos son consumidos en mucha menor proporción y en aplicaciones particulares.

Los combustibles sólidos que se consumen en México a nivel industrial, son el carbón, el bagazo, y en menor proporción la madera, basura, etc.

Al igual que los combustibles líquidos el material sólido que va a ser quemado debe exponer la mayor área posible al aire de la combustión, ya que de esta manera se reducirá la cantidad en exceso de aire necesaria para que la combustión sea completa.

Sin embargo, no todos los combustibles sólidos pueden ser pulverizados ya sea por dificultades técnicas o económicas lo que da origen a diversas formas para quemarlos. Básicamente estas son:

- a) Lecho fijo.
- b) Lecho fluidizado.

V.3.1 LECHO FIJO

En este sistema el combustible no se encuentra pulverizado y es alimentado a la cámara de combustión por medio de elementos mecánicos.

El combustible sólido cae en una "cama" o "lecho", como se muestra en la figura V.13, y el aire de combustión se alimenta por la parte inferior de la cámara de combustión.

Las principales ventajas de este sistema son:

- 1.- El combustible sólido puede ser quemado sin necesidad de un proceso previo.
- 2.- Emiten poca cantidad de polvo y contaminantes.
- 3.- Son fáciles de entender y operar.

Entre sus desventajas tenemos:

- 1.- Requieren mucho mantenimiento por los equipos pesados para transportarlos y expuestos al sol.
- 2.- Ocupan bastante espacio.

V.3.2 LECHO FLUIDIZADO

La combustión en lecho fluidizado ha sido utilizada por varias décadas. Originalmente, en la década de los veinte, se empleó en procesos de gasificación de carbón dentro del campo de la industria química. Posteriormente, durante la Segunda Guerra Mundial se desarrolló un proceso para el "cracking" del petróleo utilizando un lecho fluidizado y con el fin de producir gasolina de alto octanaje para aviones. Durante el período de la postguerra se iniciaron experimentos relacionados con la generación de vapor quemando materiales en un lecho fluidizado. Pero el mayor auge en la investigación y desarrollo de esta tecnología fue a fines de la década de los sesentas e inicio de los setentas, esto motivado, por el interés en generar vapor usando cualquier combustible sólido, sin importar su calidad, pero con un poder calorífico adecuado, y sin producir un alto grado de contaminación, al igual que lograr bajos costos de capital y de operación.

Los países industrializados, principalmente Estados Unidos y Gran Bretaña, fueron los precursores en el desarrollo de esta tecnología. Después de varios años de investigaciones se logró implementar una nueva tecnología para la generación de vapor, que aporta las siguientes ventajas:

- 1.- Permite quemar combustibles de baja calidad y costo.
- 2.- Las temperaturas de combustión son menores a las de fusión de las cenizas del carbón, evitándose

el problema de escoriamiento y ensuciamiento del equipo y por lo tanto necesitando de poco mantenimiento.

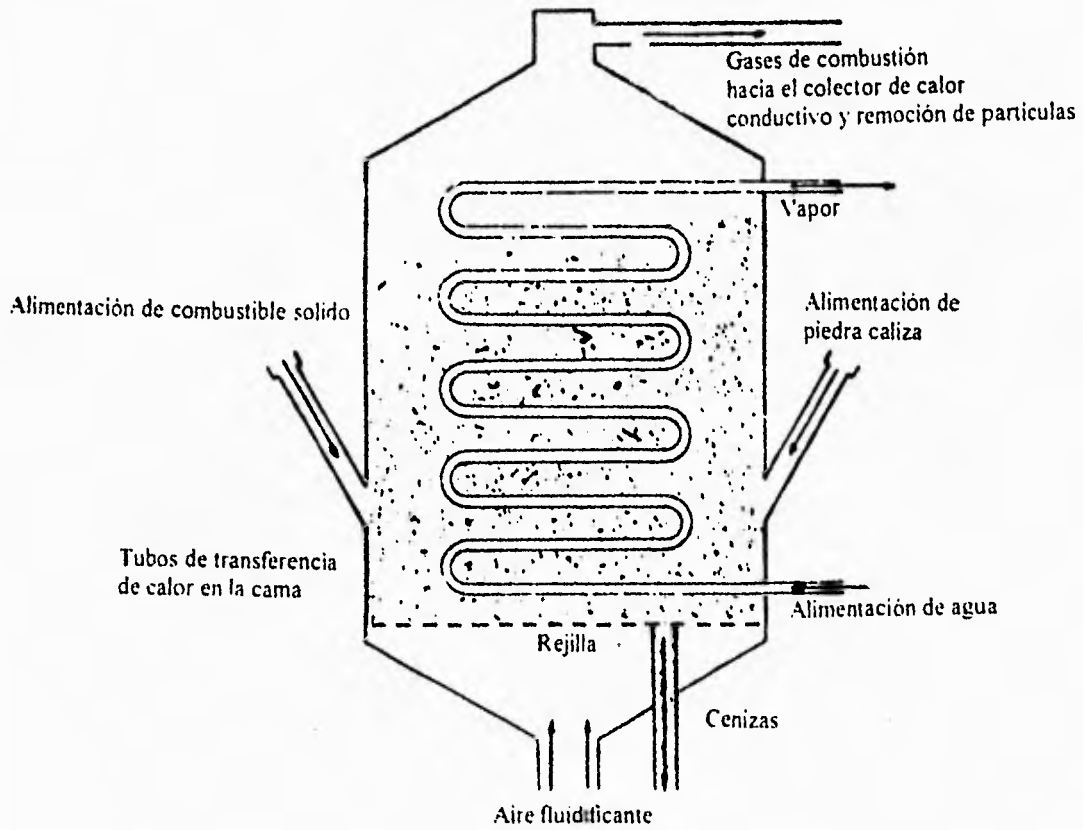
- 3.- Las temperaturas de operación son menores a las temperaturas en que se forman grandes cantidades de NO_x, por esta razón no es necesario adicionar equipo alguno para la eliminación de estos gases.
- 4.- El lecho fluidizado está formado de piedra caliza, que reacciona con el azufre contenido en el combustible, eliminándose así las emisiones de dióxido de azufre.
- 5.- Los combustores de lecho fluidizado ocupan menor espacio que las unidades convencionales, de la misma capacidad.
- 6.- Como el azufre es captado al momento de formarse reaccionando con la piedra caliza y transformándose en sulfato de calcio, es más fácil disponer de estos desechos que de los obtenidos en un desulfurador tradicional.

Ahora bien, así como esta nueva tecnología presenta todas las ventajas enumeradas, también es cierto que es algo que en la actualidad está aun en proceso de investigación, aunque existen diversas plantas piloto de las que se han obtenido datos muy alentadores y de los cuales se puede inferir que esta tecnología tendrá un gran futuro.

La tecnología de combustión de lecho fluidizado se ha desarrollado a través de varias generaciones en su diseño.

La primera generación de este tipo de generadores de vapor es el llamado burbujeante (figura V.14), del inglés bubbling, consiste básicamente en una cama de partículas sólidas formada por el combustible sólido y la piedra caliza, las cuales son mantenidas en suspensión por medio de una corriente de aire que entra por la sección baja de la cámara de combustión. Con la fluidización, que consiste en mantener en movimiento constante a las partículas de combustible y piedra caliza mediante el paso de una corriente de aire por debajo de la cama, se adquieren las condiciones de turbulencia necesarias para una buena combustión. Al experimentar con este equipo se descubrió que se tenían muchos problemas en relación a la operación y eficiencia del mismo.

FIG. V. 14 COMBUSTOR DE LECHO FLUIDIZADO DE CÁMARA BURBUJEANTE



Para eliminar y solucionar estos problemas, los diseñadores idearon variaciones en la cama fluidizada clásica, que es generador de vapor de tipo burbujeante, originándose una segunda generación de combustores de lecho fluidizado, representada por dos diseños, el primero llamado de circulación de sólidos (Figura V.15) y el segundo conocido como de dos etapas (Figura V.16).

El primer diseño de esta segunda generación de generadores de vapor de lecho fluidizado burbujeante eran inferiores a los valores que teóricamente se esperaban. Esto se atribuyó a los siguientes factores:

- Existía una alta elutriación de partículas de combustible sin quemar, así como piedra caliza sin reaccionar, lo que también producía un elevado consumo de ambas materias primas.
- El volumen libre de la cámara de combustión no era suficiente para permitir tiempos de residencia adecuados para una completa combustión.

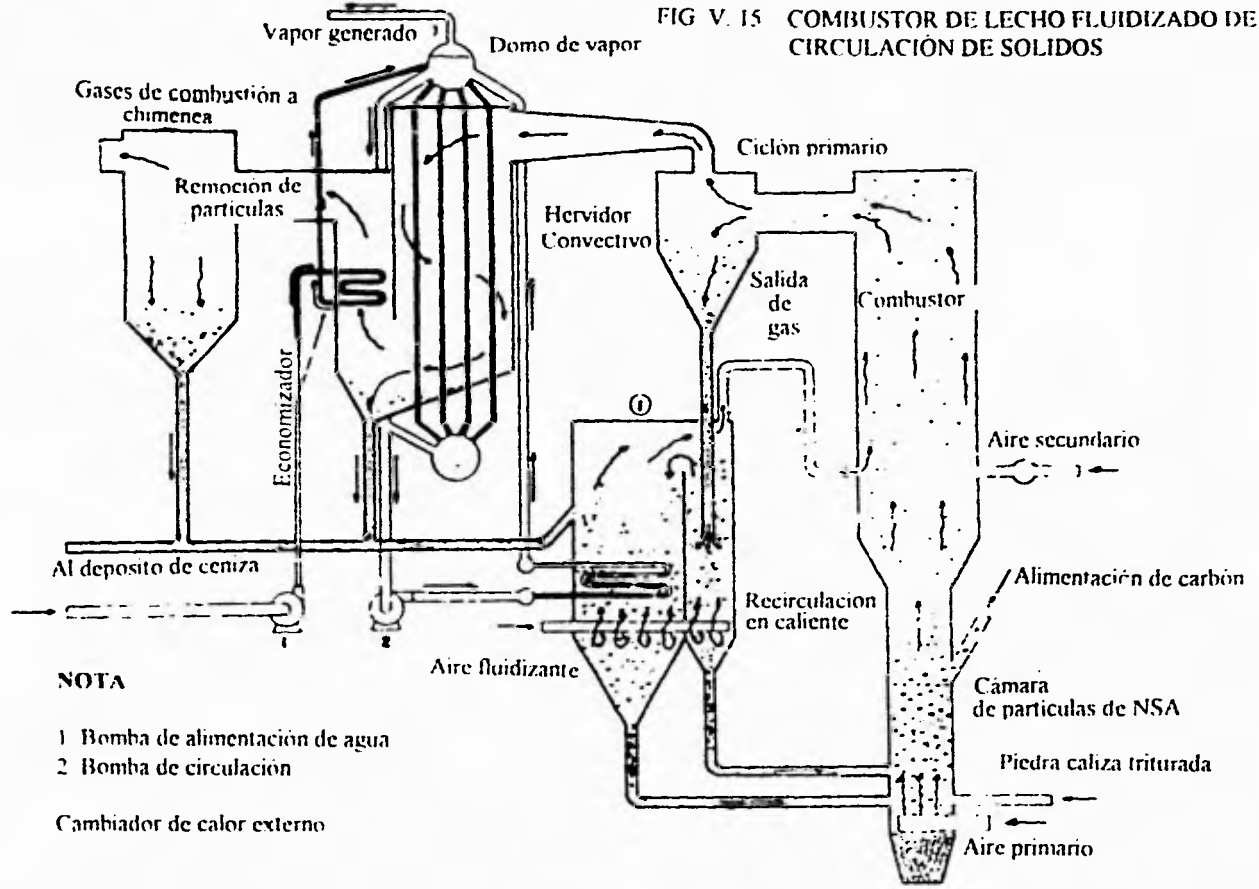
Para solucionar estos problemas, se adicionó un sistema de reinyección de los sólidos que son arrastrados afuera de la cámara de combustión. Esta recirculación permite además, que tanto el combustible como la piedra caliza tengan un mayor tiempo de residencia, obteniéndose una mayor eficiencia de combustión, así como también un aumento en el rendimiento de las reacciones de eliminación de azufre.

Este tipo de combustores tienen una mayor longitud de cama efectiva, permitiendo a su vez que la reacción del combustible con la piedra caliza se complete en su totalidad; para esto es necesario aumentar la velocidad del aire con el objeto de lograr una buena fluidización del material de la cama.

El segundo diseño de la generación que se está exponiendo, el de dos etapas, optimiza la eficiencia de combustión, por medio de la separación física de la combustión en una cama, y la desulfuración, en la otra.

La cama inferior, que opera a altas temperaturas, es de menor profundidad que la de los hervidores clásicos midiendo de 1 a 2 pies, aquí se lleva a cabo la combustión.

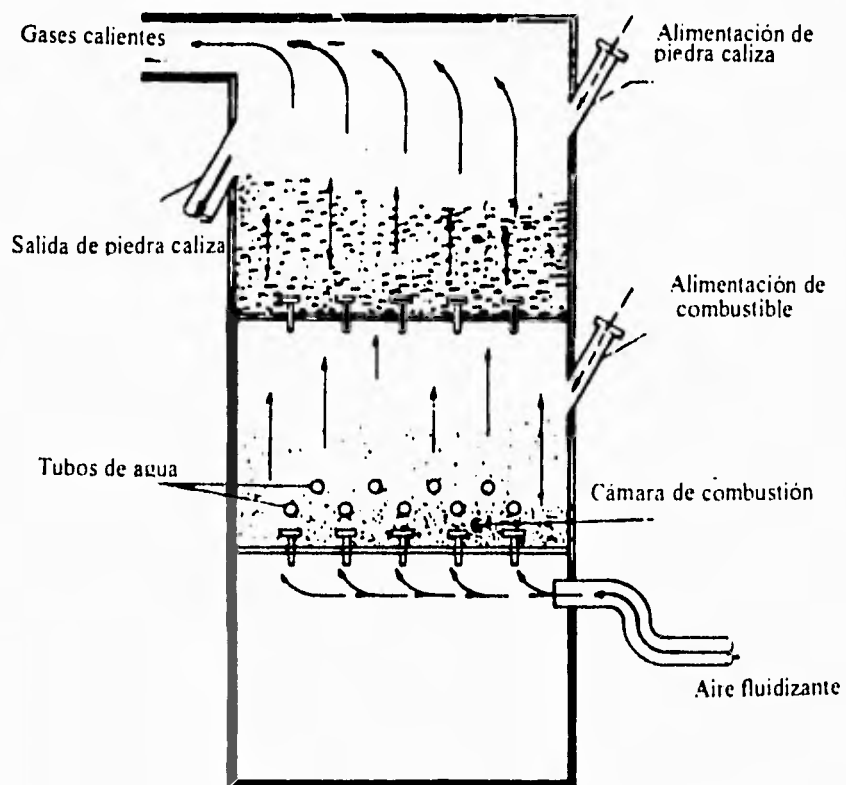
FIG V. 15 COMBUSTOR DE LECHO FLUIDIZADO DE CIRCULACIÓN DE SÓLIDOS



NOTA

- 1 Bomba de alimentación de agua
 - 2 Bomba de circulación
- Cambiador de calor externo

FIG. V. 16 COMBUSTOR DE LECHO FLUIDIZADO DE DOS ETAPAS



La cama superior contiene piedra caliza y opera a las temperaturas óptimas para que se lleven a cabo las reacciones de desulfuración. Su profundidad es aproximadamente de 0.5 a 1.5 pies. Además este diseño tiene una zona en donde se queman las partículas de carbón que son arrastradas fuera de la cama inferior.

Los combustores anteriormente descritos, operan a la presión atmosférica, pero también se han desarrollado combustores de lecho fluidizado que operan a presiones más altas. Investigaciones y experimentos realizados en plantas piloto mostraron que las eficiencias de combustión y desulfuración en estos equipos son mayores; igualmente las emisiones de Nox son 2 ó 3 veces menores en comparación con los combustores que trabajan a la presión atmosférica.

Con este tipo de generadores de vapor, los gases de la combustión escapan directamente para mover una turbina y el calor residual puede ser recuperado por medio de intercambiadores de calor, que después de abandonar la turbina producen vapor que moverá la segunda turbina.

Otra de las ventajas de la combustión en lecho fluidizado a presión y relacionado al desarrollo en transferencia de energía, es su potencial en la generación de corriente eléctrica, lo que hace que se requieran plantas de 3 a 4 veces más pequeñas que las convencionales.

CAPITULO VI QUEMADORES DE BAJO NO_x

VI.1 NATURALEZA DEL SMOG FOTOQUIMICO

La purificación del aire fotoquímico consistente para mezclas complejas de gases contaminantes y aerosoles, son producidos fotoquímicamente por que presentan entre sí componentes gaseosos de espacios oxidantes como son :

O ₃	NO ₃	NO ₂
Ozono	Bióxido de Nitrógeno	Peróxido de nitrato

El último miembro de esta serie más comúnmente estable en la atmósfera es de 3 componentes :

Ozono, NO₂, PAN que son agrupados muchas veces juntos y llamados posteriormente oxidante fotoquímico.

En el smog fotoquímico se encuentran las siguientes características : humo, mezclas de partículas del material y gases nocivos justamente como ocurre en el smog típico de Londres, en el cuál la diferencia está en el colorido químico entre el oxidante petroquímico y el SO_x.

El SO_x existe en los agentes, por que reduce los efectos oxidantes del ozono y los resultados para bajas cantidades de oxidante

En relación con el gas heterógeno-líquido-sólido podemos decir que la mezcla anterior es lo que caracteriza al smog fotoquímico, por que presenta una clasificación cuando el combustible sólido o líquido reacciona después de la combustión convirtiéndose así en gases contaminantes.

VI.1.1 CLASIFICACIÓN

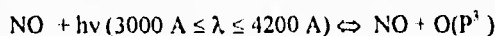
a) Contaminadores Primarios y Secundarios

Los contaminadores primarios son emitidos directamente de la atmósfera y los contaminadores secundarios son formados químicamente por reacción fotoquímica, para los contaminantes primarios tienen que ser admitidos por la atmósfera y expuestos a la luz.

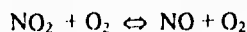
Hidrocarburos sin quemar, partículas NO y óxidos sulfúricos son ejemplo de contaminantes primarios, las partículas pueden ser dirigidas desde el óxido hasta la oxidación para el tetracileno producido por los automóviles, cenizas volátiles y varios tipos de formación de carbón.

VI 1.2 EFECTOS DEL NO_x

Se ha de establecer bien que si la cámara de laboratorio contiene NO a costas del NO₂ en el cual el aire es irradiado con rayos ultravioleta debe de seguir las reacciones que a continuación se presentan :



El efecto neto por la irradiación sobre esos sistemas orgánicos es establecido por el equilibrio dinámico siguiente :



En medio de los mayores productos al final de las reacciones se dan resultados semejantes correspondientes a la partición de la doble ligadura y de la adición de átomos de oxígeno al final de la reacción.

La irradiación de mezclas al final con óxidos nítricos y de óxido de nitrógeno en el aire, muestra que el dióxido de nitrógeno asciende a grandes concentraciones; si es eventualmente consumida por una reacción; sin embargo, es probable que el dióxido de nitrógeno sea formado por reacciones secundarias más rápidas.

El punto importante a realizar es que las cantidades de NO_x sean solo reconocidas donde el hidrocarburo es presentado, así pues, el peso total sumado a las reacciones 1 y 3 no sería una representación adecuada para reacciones fotoquímicas atmosféricas, sin embargo, si es asumido que O₃ permanezca constante en concentraciones en la atmósfera; unas reacciones semejantes a

las anteriores son mostradas en la tabla VI.1.

Considerando las reacciones anteriores, podemos decir que son generalmente lentas pero muy importantes para el estudio de las emisiones de NO_x en el medio ambiente.

VI.2 CINÉTICA PARA LA FORMACIÓN DE NO_x

La teoría que se permite asumir es que solo el NO_x es producido en cantidades notables durante los procesos de combustión del NO, por lo que solo las reacciones cinéticas pueden ser tomadas dentro de las consideraciones que se muestran en la tabla VI.2.

Entonces el porcentaje de reacción para la formación del NO pueden ser expresadas como sigue

$$d/dt(\text{NO}) = 9 \times 10^{14} \exp(-135000/RT) (\text{N}_2) (\text{O}_2)^{1/2} - 4.1 \times 10^{13} \exp(-91600/RT) (\text{NO})^2 (\text{O}_2)^{1/2}$$

Donde :

$$R = 1.987 \text{ Cal/Mol/ K}$$

$$T = \text{Temperatura absoluta en } ^\circ \text{K}$$

Introduciendo en la ecuación anterior los valores de equilibrio para N₂ y O₂ y asumiendo la constante adiabática de temperatura durante toda la reacción, podemos calcular el porcentaje de formación de NO para una medida estequiométrica de la combustión de un gas natural desde los siguientes puntos a considerar :

1) Para diferentes porcentajes de oxígeno en la oxidación:

$$\theta = \frac{O_2}{O_2 + N_2} \times 100$$

2) Para diferentes temperaturas iniciales de la mezcla aire-gas :

Estos resultados son mostrados en las figuras VI.1 y VI.2 sabiendo que:

TABLA VI.1

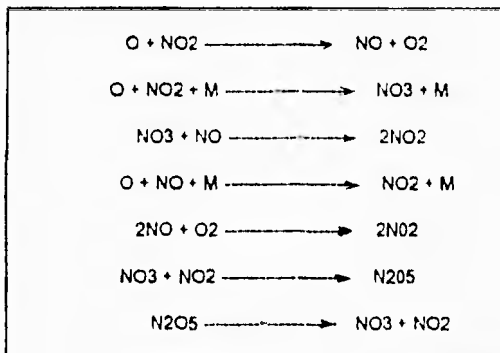
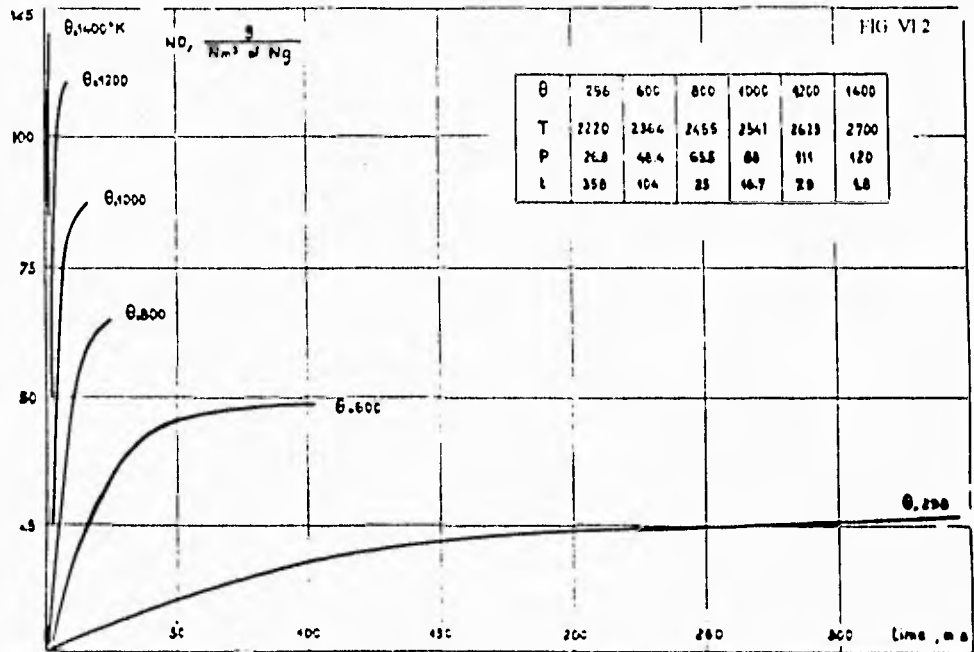
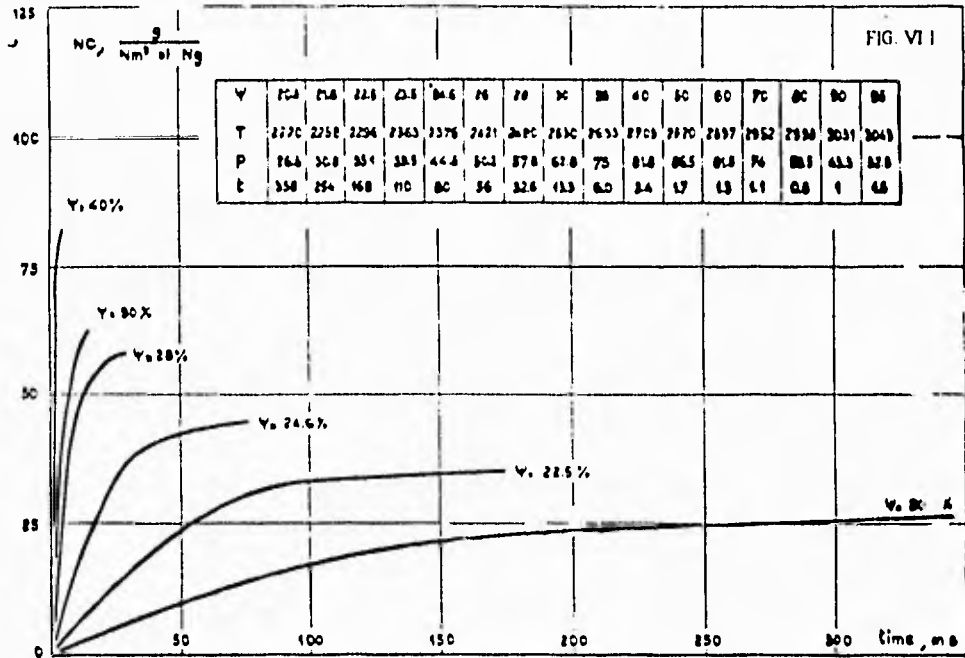


TABLA VI.2

REACCION	RADIO CONSTANTE cc / mole·sec
$N_2 + O \rightleftharpoons NO + N$	$7 \times 10^{13} \exp(-75\,000 / RT)$
$NO + N \rightleftharpoons N_2 + O$	1.55×10^{15}
$O_2 + N \rightleftharpoons NO + O$	$13.3 \times 10^9 T \exp(-7080 / RT)$
$NO + O \rightleftharpoons O_2 + N$	$3.2 \times 10^9 T \exp(-39100 / RT)$



- Las temperaturas de combustión adiabática en ° K.
 - El tiempo en milisegundos para llegar al peso de equilibrio dentro de 1/100.
- Además de esto se puede decir que :

Las curvas muestran el porcentaje de la formación de NO contra el tiempo para el gas natural quemado.

Los resultados anteriores, muestran el efecto de la temperatura sobre el peso de NO posiblemente combinado con el efecto para la concentración de N₂, moderando la acción para el cual es bastante notable cuando el ángulo θ esta por encima del 50 %, éste efecto sería alguna causa no existente cuando la mezcla es precalentada, prevaleciendo el efecto de la temperatura con una escases alterada por las concentraciones de N₂ en el porcentaje de la formación de NO.

Sin embargo la comparación con el oxígeno enriquecido, nos lleva a que :

$$\theta = 40\%$$

y ha que el precalentamiento de la mezcla venga dado por :

$$T = 1400 \text{ } ^\circ \text{K} \text{ con } t = 2700 \text{ } ^\circ \text{K}$$

en ambos casos se muestran que todas la concentraciones de nitrógeno aumentan considerablemente, por lo que :

$$\begin{aligned} \text{-con } 40\% \text{ --- } p &= 81.8 \text{ g} \\ t &= 3.4 \text{ ms} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{-con } T = 1400 \text{ --- } p &= 120 \text{ g} \\ t &= 1.8 \text{ ms} \end{aligned}$$

Donde :

Los datos anteriores representan los efectos de la relación equivalente.

Una vez que el efecto por la temperatura en la formación de NO es bien establecida por arriba de los resultados citados anteriormente, y si es lógico lo calculado para otros parámetros de otro efecto de reacción equivalente, se confirmaría un efecto notable en la temperatura y en el porcentaje en la formación de NO comenzando con $r = 1$, $r = 1.05$ y $r = 1.1$, se mostrarían efectos muy fuertes por excesos o por escasos en la oxidación del NO producidos.

Por ejemplo, cuando r es aumentada desde 1 a 1.1 la temperatura adiabática permanece casi igual mientras que el peso del NO es producido por más de la mitad.

A comparación del aumento de la emisión para NO debida a la diferencia del contenido de nitrógeno combustible, para el combustible crudo y para el combustible residual cuando son calentados, intensifican la alta combustión por ejemplo:

Cuando debido a las diferencias de las características del combustible, decidieron ser minimizados los efectos producidos por el nitrógeno, como se muestra en la tabla VI.3.

El grado de conversión para el aumento de nitrógeno combustible, es el incremento en igual cantidad de exceso de aire de combustión con el combustible líquido residual, debido a la conversión restringida para el nitrógeno combustible. A comparación con grandes porcentajes de recirculación $r \neq 0$, indican que el grado para la conversión de nitrógeno combustible que crece, aumenta la razón de recirculación por consiguiente, si son concluidas las reducciones en las emisiones de óxido nítrico debido a las recirculaciones externas de los gases de escape, toda la reducción de NO sería formada desde el nitrógeno atmosférico.

Para que se tenga un efecto por enriquecimiento de oxígeno precalentado para la oxidación en la formación de NO_x, se necesita que el nivel de residencia de la temperatura sea considerable y muy bien conocida en el efecto de la formación del óxido de nitrógeno (en cuanto a cantidad y porcentaje durante los procesos de combustión se refiere), por lo que ese factor no es impedimento, si sólo por aproximación teórica se determinan las condiciones de formación de NO_x cuando las altas temperaturas son alcanzadas por bajos enriquecimientos del oxígeno en el aire y por el precalentamiento de los gases mixtos, por lo que estos efectos serían la base principal en la formación del NO_x como se mencionó anteriormente.

TABLA VI.3 CONVERSION DE NITROGENO COMBUSTIBLE

NIVEL DE EXCESO DE AIRE %	CONCENTRACIONES DE ACIDO NITRICO : lb / 1000 lb COMBUSTIBLE		
	CONVERSION COMPLETA DE L_N	INCREMENTOS OBSERVADOS EN NO	% CONVERSION DE NITROGENO COMBUSTIBLE
15	4.28	1.9	44
10	4.28	1.65	36
5	4.28	0.55	13

VI.3 PRODUCCIÓN DE NO_x POR QUEMADORES DE COMBUSTIBLE OPERANDO CON PEQUEÑOS EXCESOS DE AIRE

La investigación sobre la producción de NO_x para los quemadores de combustión operando con muy poco exceso de aire (2%), es muy bien conducido por el Instituto Francés del Petróleo (I.F.P) de bajo de los términos para el contrato señalados junto con la Comisión de Electricidad Francesa (E.D.F).

Dado el punto a tratar de la E.D.F./I.F.P, proyecta más trabajo fuera del diseño para exceso de aire pequeños en quemadores pero no en plantas de poder.

Un experimento con quemadores con flujo de combustible tiene un porcentaje de 100 Kg/hr más que en el diseño. Esos quemadores son usados para análisis en la formación de NO_x.

El trabajo inicial que se describe es ejecutado con fluido (del combustible) destilado, conteniendo cerca del 0.01% de nitrógeno, los resultados así obtenidos conciernen a la formación NO_x desde el nitrógeno atmosférico hasta el tratamiento para que así contengan nitrógeno aditivo, haciendo lo posible para determinar el papel jugado por nitrógeno orgánico en la formación de NO_x.

Durante éste estado, el esfuerzo hecho para situar la parte de la flama donde los óxidos de nitrógeno son formados nos lleva a los siguientes resultados :

La extinción de las pequeñas concentraciones de los óxidos de nitrógeno determinados dentro de los diferentes quemadores, se dan a las condiciones de operación que a su vez son separados del vapor de aire, el vapor central ajustado con el gas de la flama podría anular dicho vapor de aire.

Si se realizarán experimentos, el flujo de aire primario sería 30% del flujo del aire total por lo que el combustible sería de 50 kg/hr y el flujo de aire sería de 750 kg/hr, dando así la relación de mezclas 1.02, que es definida por la razón de oxidante/combustible estequiométrico en el cual el aire es precalentado a 250° C.

Considerando un generador de vapor con cámara vertical con un cuadro de mezclas de medidas $2 \times 2 \times 4$ m, si las paredes son de agua fresca, el quemador sería ajustado verticalmente en el centro para que de esta forma sea el fogón del generador de vapor que se quiera utilizar.

VI.4 QUEMADORES DE BAJO NO_x

De las grandes cantidades de oxidantes en el aire, el 79% de nitrógeno es inerte, lo que da mayores características a los quemadores diseñados para los generadores de vapor donde la presión debe ser baja (0.3 psi - 2000 N/m²). Estos resultados no generan flamas turbulentas, por lo que cualquier tipo de aire abastecido al sistema es susceptible a la inestabilidad del flujo y a la oscilación de los gases de combustión.

Un quemador diseñado para gas natural es mostrado en la figura VI.3, donde el gas natural es inyectado a grandes velocidades cuidando que la máxima radiación de flama sea inyectada por los conductos de los quemadores, si el combustible es inyectado en el centro de esos tipos de quemadores se introduce bastante vapor atomizado como se muestra en la figura VI.4.

La velocidad axial del aire secundario en la garganta con flama máxima tiene un porcentaje de casi 200 ft/seg. y para gas natural es de casi 120 ft/seg. Primeramente, si el aire es portador de combustible (carbón pulverizado caliente) como se ilustra en la figura VI.5, donde si la velocidad esta por debajo de 90 ft/seg. se reduce la erosión en el quemador.

Debido a la baja presión en el suministro del combustible, las flamas producidas por este tienden a ser muy pequeñas en todo el quemador. En este caso, la vaporización y la volatilidad del combustible interior de la flama baja, se daría fijando la máxima turbulencia en la orilla del quemador y la mezcla de aire interno, desde una medida estequiométrica del límite de la flama se define en algunos casos a dicho quemador.

En los equipos pequeños donde la presión de cada gota de combustible es muy semejante a la considerada en el análisis económico del quemador, hace más intenso el giro de la penetración del aire completamente através de una nube, formándose así las partículas que dan origen a una buena o mala combustión.

Considerando un generador de vapor con cámara vertical con un cuadro de mezclas de medidas $2 \times 2 \times 4$ m, si las paredes son de agua fresca, el quemador sería ajustado verticalmente en el centro para que de esta forma sea el fogón del generador de vapor que se quiera utilizar.

VI.4 QUEMADORES DE BAJO NO_x

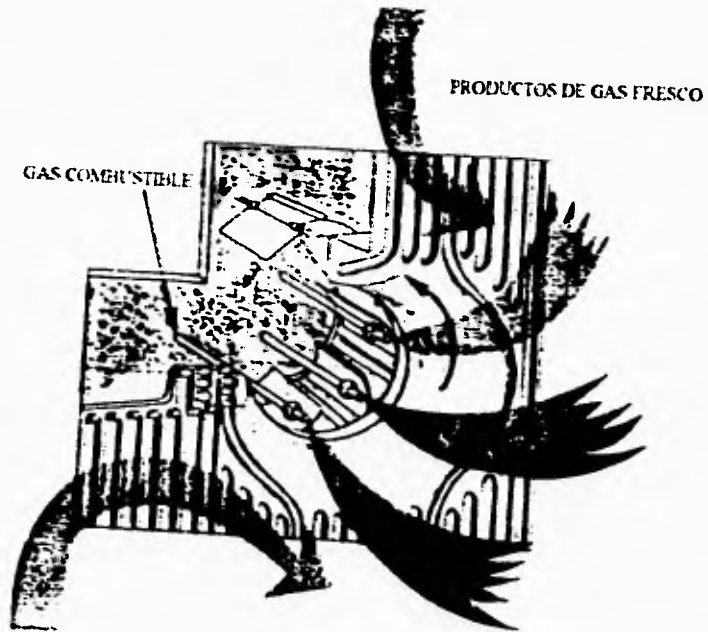
De las grandes cantidades de oxidantes en el aire, el 79% de nitrógeno es inerte, lo que da mayores características a los quemadores diseñados para los generadores de vapor donde la presión debe ser baja ($0.3 \text{ psi} - 2000 \text{ N/m}^2$). Estos resultados no generan flamas turbulentas, por lo que cualquier tipo de aire abastecido al sistema es susceptible a la inestabilidad del flujo y a la oscilación de los gases de combustión.

Un quemador diseñado para gas natural es mostrado en la figura VI.3, donde el gas natural es inyectado a grandes velocidades cuidando que la máxima radiación de flama sea inyectada por los conductos de los quemadores, si el combustible es inyectado en el centro de esos tipos de quemadores se introduce bastante vapor atomizado como se muestra en la figura VI.4.

La velocidad axial del aire secundario en la garganta con flama máxima tiene un porcentaje de casi 200 ft/seg. y para gas natural es de casi 120 ft/seg. Primeramente, si el aire es portador de combustible (carbón pulverizado caliente) como se ilustra en la figura VI.5, donde si la velocidad esta por debajo de 90 ft/seg. se reduce la erosión en el quemador.

Debido a la baja presión en el suministro del combustible, las flamas producidas por este tienden a ser muy pequeñas en todo el quemador. En este caso, la vaporización y la volatilidad del combustible interior de la flama baja, se daría fijando la máxima turbulencia en la orilla del quemador y la mezcla de aire interno, desde una medida estequiométrica del límite de la flama se define en algunos casos a dicho quemador.

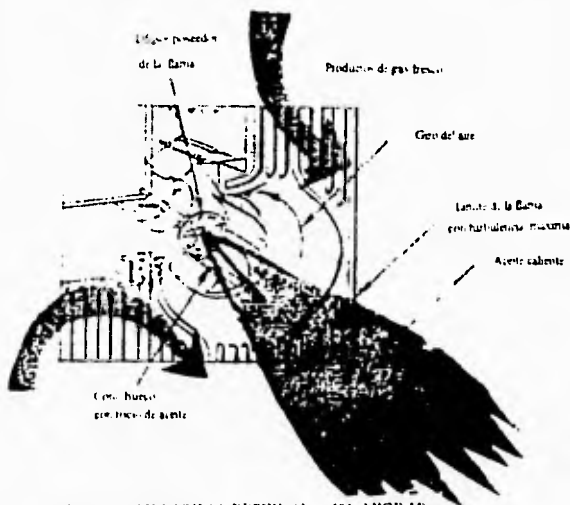
En los equipos pequeños donde la presión de cada gota de combustible es muy semejante a la considerada en el análisis económico del quemador, hace más intenso el giro de la penetración del aire completamente através de una nube, formándose así las partículas que dan origen a una buena o mala combustión.



TIPOS DE INYECTOR ANILLO, BOTE Y PISTOLA
 GAS 15 PSIG. SONIDO RAPIDO
 AIRE 200 FT/S. 600 F

FIG. 173 QUEMADOR PARA QUEMAR GAS NATURAL

COMBUSTION EN BOYLERS GRANDES



ACEITE COMBUSTIBLE RESIDUAL 400 MICRAS
 ATOMIZACION MECANICA (CON O SIN DE REAMI)
 VAPOR (USADO) 50 A 150 PSIG SATURADO
 SONIDO DEL AIRE 200 FT 5.600 F
 PRESION DE VAPOR DE ACEITE 300 A 12000 PSIG

FIG. VI-4 QUEMADOR PARA ACEITE CALIENTE

SISTEMAS DE PODER

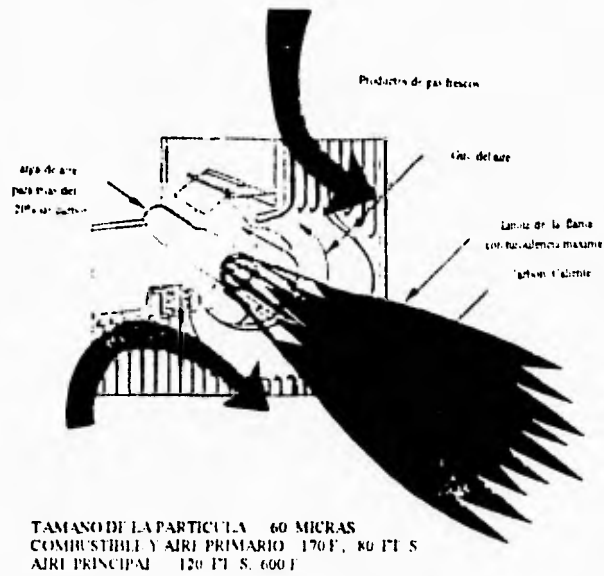


FIG. VI.5 QUELMAJOR PARA CARBON PULVERIZADO CALIENTE:

La temperatura y la cantidad de los gases frescos que entran por fuera de la flama del quemador, dependen directamente del espacio del mismo puesto que son muy importantes al ser formadas las variables de diseño, como son: temperatura, tiempo de vida en correlación con el óxido nítrico y el área de transferencia de calor, por lo que si la recirculación y el proceso adiabático son permanentes, la flama en el lecho de aire primario perturbaría la estabilidad y aumentaría la producción de NO respectivamente.

Los quemadores de BTU manufacturados pueden distinguirse por el hecho de que el flujo volumétrico del combustible rugoso es igual al del aire y además, porque los conductos de estos son de mayor área.

Los quemadores de bajo NOx son especialmente diseñados para reducir óxidos de nitrógeno, están equipados con las tecnologías como son: la recirculación de los gases de la combustión y la combustión en etapas. Estos tipos de quemadores se enuncian a continuación.

TIPOS COMPLEMENTARIOS DE QUEMADORES DE BAJO NOx

Quemador	Combustible	Eficiencia
Combustión mezclada	Aceite pesado	30-40%
De flama dividida	Aceite pesado	50-70%
De circulación interna	Aceite pesado	30-40%
De combustión en dos etapas	Gas	30-40%
De combustibles pesados y ligeros	Aceite pesado	10-20%

Según todo lo anterior, podemos decir que las altas emisiones de NOx generalmente son causadas por las altas temperaturas y las altas concentraciones de O₂. Esas concentraciones ocurren en muchas regiones adiabáticas donde el aire se presenta en la primera zona de combustión cercana a la garganta del quemador.

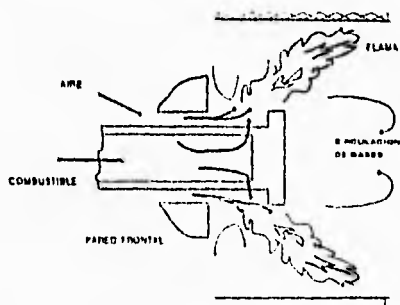


Fig. VI.5.1 Quemador con combustión mezclada

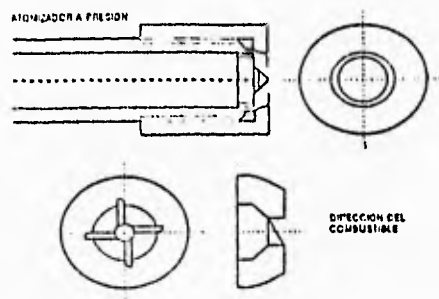


Fig. VI.5.2 Quemador de flama dividida

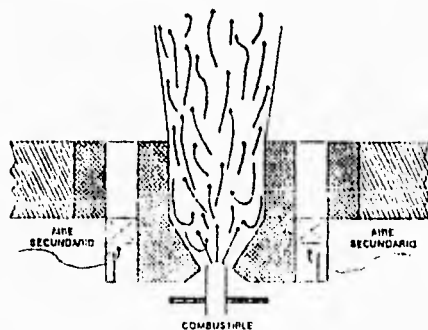


Fig. VI.5.3 Quemador de recirculación interna

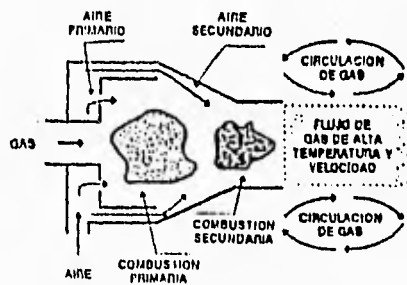


Fig. VI.5.4 Quemador de combustión de dos etapas

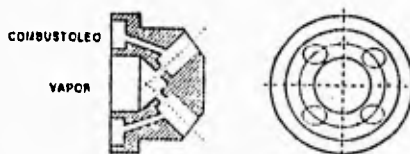


Fig. VI.5.5 Quemador de combustóleo con inyección de vapor

VI.5 EFICIENCIA DEL QUEMADOR

Hoy en día, todas las plantas termoeléctricas generadoras de energía tienen como principales recursos de trabajo al vapor de agua y al vapor atmosférico, lo cual hace que se tome la transmisión eléctrica de estas en línea.

En algunos casos, al tener baja cantidad de vapor limita la eficiencia del ciclo, así mismo las condiciones de temperatura de los combustibles usados en este (generalmente el ciclo Rankine), por lo que los avances en cuanto al diseño de quemadores de NOx abarcan diferentes conceptos semejantes al usado para el vapor de potasio en una turbina.

Ahora bien, en grandes plantas de vapor se tiene que su tiempo de vida es de 30 a 40 años, por lo cual se tiene que abastecer a las plantas con este nuevo tipo de quemadores de NOx porque dan mayores eficiencias y mayor adaptabilidad al medio ambiente (en cuanto a menor producción de gases contaminantes se refiere) y además prometen hacer que dichas plantas tengan tiempos de vida más largos.

Por otro lado, el capital invertido en el costo de estos nuevos sistemas es de gran consideración, debido a las investigaciones que se han hecho en plantas de poder en los Estados Unidos dando excelentes resultados, por lo que quiere decir que los quemadores que usan para el control del NOx son operados con la relación aire-combustible muy abajo estequiométricamente hablando.

El promedio de las concentraciones de O₂ y el promedio de las temperaturas del quemador, son reducidas así como las razones de óxidos de nitrógeno donde podría darse una combinación en las caras que presenta el quemador del generador de vapor.

En otro caso, en el estado de la combustión las temperaturas son relativamente bajas porque el combustible y el aire son diluidos en un punto por los productos de la combustión.

VI.6 DESENVOLVIMIENTO DE LOS NOx DENTRO DE LA FLAMA DEL QUEMADOR

El quemador más usado es diseñado para producir menor combustión, está puede ser dependiendo

VI.5 EFICIENCIA DEL QUEMADOR

Hoy en día, todas las plantas termoeléctricas generadoras de energía tienen como principales recursos de trabajo al vapor de agua y al vapor atmosférico, lo cual hace que se tome la transmisión eléctrica de estas en línea.

En algunos casos, al tener baja cantidad de vapor limita la eficiencia del ciclo, así mismo las condiciones de temperatura de los combustibles usados en este (generalmente el ciclo Rankine), por lo que los avances en cuanto al diseño de quemadores de NO_x abarcan diferentes conceptos semejantes al usado para el vapor de potasio en una turbina.

Ahora bien, en grandes plantas de vapor se tiene que su tiempo de vida es de 30 a 40 años, por lo cual se tiene que abastecer a las plantas con este nuevo tipo de quemadores de NO_x porque dan mayores eficiencias y mayor adaptabilidad al medio ambiente (en cuanto a menor producción de gases contaminantes se refiere) y además prometen hacer que dichas plantas tengan tiempos de vida más largos.

Por otro lado, el capital invertido en el costo de estos nuevos sistemas es de gran consideración, debido a las investigaciones que se han hecho en plantas de poder en los Estados Unidos dando excelentes resultados, por lo que quiere decir que los quemadores que usan para el control del NO_x son operados con la relación aire-combustible muy abajo estequiométricamente hablando.

El promedio de las concentraciones de O₂ y el promedio de las temperaturas del quemador, son reducidas así como las razones de óxidos de nitrógeno donde podría darse una combinación en las caras que presenta el quemador del generador de vapor.

En otro caso, en el estado de la combustión las temperaturas son relativamente bajas porque el combustible y el aire son diluidos en un punto por los productos de la combustión.

VI.6 DESENVOLVIMIENTO DE LOS NO_x DENTRO DE LA FLAMA DEL QUEMADOR

El quemador más usado es diseñado para producir menor combustión, está puede ser dependiendo

de como se de la mezcla de aire secundario y el chorro de aire secundario durante la combustión.

Acorde con la temperatura y con las lecturas de la composición del gas, las dos zonas de combustión son bastas por lo que debido a la complejidad de sus características se pasará a describir cada una de ellas como sigue .

1) Zona I. Esta es localizada cerca del quemador donde la combustión principal toma un lugar girando el aire primario, esa es la zona donde las temperaturas altas se originan y son localizadas en la flama donde la mezcla es rica con altas proporciones de elementos inquemables en la presencia de oxígeno residual.

2) Zona II. Localizada más lejos fuera del quemador donde el aire secundario llega en grandes cantidades a la flama y la combustión de mala calidad se da eficientemente con una gran cantidad de exceso de aire que puede ser localizada en mas del 20% además de que se alcanzan las máximas temperaturas y disminuciones, por lo que la extracción natural para la combustión puede ser menos pronunciada dependiendo de las condiciones aerodinámicas consumidas.

Después seleccionando las condiciones de abastecimiento de las dos flamas con diferentes modelos de gases de escape, la ruta del NOx desarrollada en la flama es determinada desde sus perfiles axial y radial.

Los parámetros del quemador son iguales para ambas flamas excepto que en el caso de menores concentraciones de la flama según la fig. V1.6 el quemador es tal que con la velocidad del cuarzo para la mezcla de: aire secundario va aumentando en este caso.

Los perfiles de óxido de nitrógeno axial es visto en las figuras V1.7 y V1.8 a lo largo con la temperatura y con la relación de los perfiles de la mezcla.

A comparación de las diferentes curvas mostradas en las figuras 1 y 2, la concentración de los NOx aumenta en la zona I y disminuye en la zona II (el máximo NOx puede ser menos compensado en la zona II). En la misma ruta, la concentración radial de NOx aumenta en el interior de la flama cuando la distancia de los ejes de los quemadores incrementa.

Con la corriente de calor a cierta distancia desde el quemador axial y radial de las concentraciones de NOx es casi igual a los gases de escape, es así como se puede deducir que el NOx es formado principalmente en la flama cerca del área del quemador (zona de reacción), y es entonces diluido por una fracción de aire secundario cuando no es interceptada una fracción de aire en esta zona.

La cantidad total de NOx producido en la salida del quemador de vapor depende de algunos parámetros, influenciando uno u otro en la zona de reacción (la temperatura, la relación de la mezcla y el tiempo residente de los gases en esa zona) o los fenómenos de dilución por ejemplo, la ruta el aire secundario que es distribuida dentro de la flama.

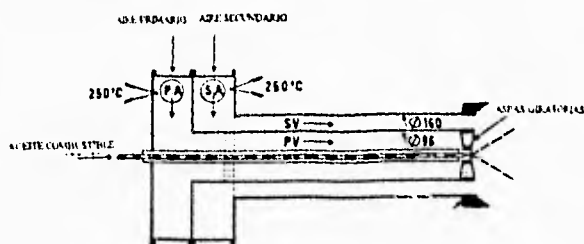


FIG. VI.6 QUEMADOR EXPERIMENTAL.

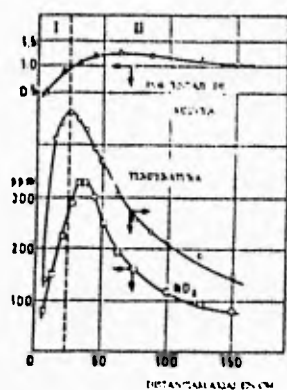


FIG VI 7

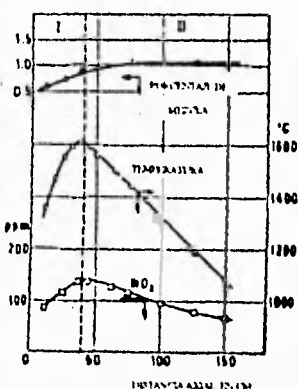


FIG VI 8

VI.6.1 EFECTOS DE LA ESTRUCTURA DE LA FLAMA

La importancia del efecto de la temperatura en la formación del NOx puede ser discutida, si bien el renombrar que la estructura de la flama puede variar más, significa que se quiere determinar el total del NOx emitido para un sistema premezclado semejante al obtenido en un mechero de Bunsen y diferente a la flama de los quemadores, casi obteniéndolo en carbohidratos donde la temperatura y el porcentaje de mezcla son los primeros parámetros a determinar en cantidades para NOx formado.

La temperatura para esta difusión de flama es de valores estequiométricos durante parte de tiempo en el quemador, cuidando la dilución de las especies de los productos de la flama para así obtener una temperatura de equilibrio final.

Así en las flamas de difusión desde la formación del NOx pueden ser exportados los análisis de éste desde los cálculos de la temperatura de equilibrio para todo el porcentaje de mezcla.

Ahora bien, para visualizar adecuadamente la estructura de los óxidos de nitrógeno algunos investigadores tienen ensayos analíticos de investigación en la formación de NOx en sistemas aire-combustible, por la disponibilidad de enormes capacidades de NOx que son computarizadas, se ha comprobado que se tienen archivadas todas las posibles reacciones de NOx para aprovecharlas lo mejor posible.

Pero desafortunadamente algunas de esas investigaciones son ignoradas por el hecho de que más reacciones escritas pueden ser eliminadas debido a las consideraciones tomadas anteriormente.

VI.7 RECIRCULACION DE LOS GASES DE ESCAPE (NOx)

Los gases de escape desde el generador de vapor auxiliar son inyectados dentro del aire entregado al quemador, donde el porcentaje de recirculación es del 15 % así hasta que el oxidante formado tenga una composición del 78.3 % N₂, 17.9 % O₂, 2 % CO₂ y 1.8 % H₂O, si la variación de flujo es aumentada a 850 kg/h y permanece la razón de mezcla en 1.02, quiere decir que el oxidante será precalentado a 250° C por la unión del flujo.

MEDIDAS

Los óxidos de nitrógeno NO y NO_x (NO + NO₂) son medidos por análisis en el interior de las paredes del generador de vapor para las pruebas de muestra que son hechas a base de cuarzo, para el cuál el agua fresca es introducida a 50° C.

El banco de agua fría en la red y en los dos filtros son ajustados a una línea de muestra, los gases de escape son analizados por gas de cromatografía y las temperaturas son medidas con un pirómetro de sección.

Por otro lado, la recirculación de los gases de escape es analizada por encima de las flamas del quemador, por lo que la baja recirculación de la temperatura de la flama no cambia su estructura, por lo que se da una disminución máxima de NO_x a consecuencia de las causas que se citan en la tabla VI.4.

La recirculación es analizada para otros dos quemadores con las siguientes condiciones :

En cada caso, la disminución final de NO_x debe ser desde 44 ppm hasta 30 ppm.

El efecto de recirculación es netamente plano por que esta indicado en la tabla de datos anterior, siendo que la atención debe de ser puesta en los oxidantes que contienen 20 ppm de NO_x, formándolo durante la combustión con recirculación que solo es de 10 ppm.

VI.8 FORMACIÓN Y REDUCCIÓN DE NO_x

Las emisiones de óxido nítrico desde los tres combustibles (sólido, líquido y gaseoso) disminuye a bajos excesos de aire a pesar del aumento de temperatura de la flama adiabática, por lo que el mínimo oxígeno que es aprovechable disminuye el porcentaje de las reacciones que se den llevando a la producción de NO; las reducciones ocurridas en la emisiones de NO en el combustible tienen una alta cantidad de nitrógeno, si aparece por consiguiente que la disminución aprovechable sea más que la reacción para el nitrógeno atmosférico, éste tendría que ser referido y mostrado en la discusión para el grado de conversión del nitrógeno combustible.

TABLA VI.4

FLAMA	NOx MAXIMO PPM	TEMP. MAXIMA ° C	GASES DE ESCAPE NOx PPM
32 (0% DE RECICLAJE)	330	1725	50
32 (15% DE RECICLAJE)	108	1620	28
234 (0% DE RECICLAJE)	138	1590	53
234 (15% DE RECICLAJE)	75	1475	30

Ahora bien, existen fuertes evidencias que el mayor productor de NOx es el automóvil, pero sus emisiones promedio son forzadas para detectar así su grado de contaminación, siendo esto muy difícil por lo que nos tenemos que enfocar a las grandes plantas generadoras de electricidad que entran en acción desde gas natural hasta combustible líquido, del cual no se duda el origen estacionario que contribuye en una fracción pesada en el total del NOx emitido a la atmósfera.

Consecuentemente ahí se tendrá gran interés en predecir las emisiones de NOx permitiendo la formulación de varios modelos analíticos, prediciendo específicamente la formación de NOx en sistemas combustibles.

El gran número de ensayos analíticos y estudios experimentales tienen que ser importantes en la formación del NO, sólo la mayor porción del NO₂ para el NOx ha de ser establecido por éste mismo.

Un sistema controvertido en el cual se ha hecho el estudio para el NOx es el medio ambiente, para evitar las emisiones de NOx provenientes de la atmósfera.

Para dar una idea mas a fondo de lo que significa este tipo de emisiones diremos que :

La formación del NOx desde el nitrógeno atmosférico, es una sustancia específica de NO formado en sistemas de combustión, en el cual el combustible original no contiene átomos de nitrógeno que pasan automáticamente a otros elementos semejantes a carbón e hidrógeno.

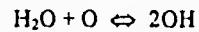
Generalmente esto nos hace pensar que el NO debe ser formado en el aire, por lo que la formación de NOx desde el combustible pasa al nitrógeno, que es una sustancia específica en la formación de NO desde sus componentes que pasan a otros átomos.

VI.8.1 REDUCCIÓN DE NOx.

A causa de las normas de las emisiones impuestas para varios orígenes de poder estacionario, los métodos de la reducción del NOx deben ser impuestos para que no dañen la eficiencia del

mecanismo, los métodos simples de reducción de NOx particularmente de la turbina de gas son dados por la adición del agua en el poder del combustor.

El vapor de agua puede reducir el oxígeno en concentraciones radicales siguiendo la siguiente reacción:



Los sistemas heterogéneos semejantes a otros sistemas directos de inyección de combustibles líquidos, son conocidos mediante la difusión de la flama del quemador por lo cual el problema para la reducción de NOx es más difícil.

Una posible disminución de NOx, es con el aumento de tamaño de las gotas de combustible promedio formadas desde la inyección. Kasten y Bracco tienen muestra de la cantidad de NO formado desde el combustible de la difusión de la flama, que pueden ser caracterizadas por el tamaño de las gotas de dicho combustible, considerando que en las gotas grandes se da más NO que el obtenido en un grupo de pequeñas gotas, siendo estas igual a la masa de una gota grande.

Otra posible solución práctica es la emulsificación del combustible con una alta presión de vapor con componentes insolubles semejantes al agua.

Un beneficio adicional es el obtenido no solo por tener presente agua por difusión, sino que esta misma agua se presente en el interior cerca de la flama.

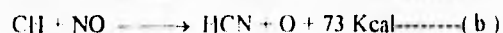
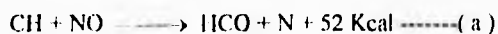
Myerson muestra que si es posible reducir el NOx por medio de pequeñas concentraciones de combustible y oxígeno, la adición para casi 0.1 % de hidrocarburos (isobutano) y 0.4 % de O₂ así como de NOx, daría un sistema a 1260 ° C, para así reducir las concentraciones de NOx por el doble del factor en casi 125 mseg.

Myerson establece que la relación O₂ / HC es muy importante donde a grandes concentraciones de O₂ y de hidrocarburos da formación del HNC que puede causar grandes problemas.

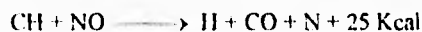
Esos procedimientos sólo tienen al combustible reposando en sistemas donde el oxígeno es el

creador y el destructor de otras especies complicando la reducción de NO.

Continuando con el aumento de los valores estequiométricos con los hidrocarburos, se presenta la eliminación del hidrocarbón radical para un rango de temperatura de 1200° K a 1300° K, por lo que la producción de hidrocarburos radicales por obstaculación del hidrógeno por el O₂ sigue las siguientes reacciones :



Donde la reacción exotérmica (a) es suficiente para fragmentos de la fórmula radical que pueden ser escritos como :



Otra técnica para la reducción de NO_x es por la adición de amoníaco para los sistemas de combustión, esa técnica es conocida con el nombre de EXXON TÉRMICO DE LOS PROCESOS DE NOX donde la reducción de nitrógeno por amonio, también es efectivo solo en rangos de temperaturas angostos de casi T = 1250° K.

A bajo de los 1000° K, la reacción se lleva a cabo más lentamente y a casi 1500° K se establece más la formación de NO en el sistema, ésta solo establece la desatención de los productos de combustión que pueden ser requeridos por la reducción de la combustión.

Por eso es que esta ruta no es probable a bajas temperaturas, por que en el NO₂ sería inevitable la formación del NH₃.

VI.9 REPERCUSIONES DEL NO_x

El NO_x rara vez ocurre en concentraciones que son directas y dañinas en plantas. Esas concentraciones pueden ser infrecuentes con los procesos de seguro industrial igual a la manufactura del ácido nítrico, pero en concentraciones urbanas rara vez son excedidas las tóxicas.

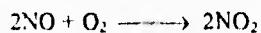
Algunos de los NOx son importantes en la mayor parte, por que son precursores de ozono y en combinación con éste se forma el 50 % de la contaminación atmosférica.

Dentro de las condiciones de predisposición, el NO₂ a altas concentraciones de 0.25 ppm, podrán causar daños crónicos fisiológicos que son más sensitivos en plantas donde éste sea expuesto en repetidas ocasiones.

Los NOx en términos colectivos, son usados para dos tipos de NOx gaseoso que son : NO y el NO₂. El NO es formado por la reacción de N₂ y O₂ en presencia de calor por lo que queda representado por la siguiente ecuación :



La más lejana reacción del NO con el O forma NO₂ por lo que :



En la incineración de los procesos, el N₂ y el O₂ para la formación del NOx vienen dados desde un sistema continuo (gas, carbón, gasolina) donde el exceso de aire es inyectado dentro del sistema, así como agua al material incinerado. Las variables semejantes en la temperatura de la flama del quemador y concentraciones de O₂ y N₂, provoca que agua del material reaccione químicamente con estos y la diferencia de presiones en el quemador determinan la cantidad de NOx producido en el sistema.

Por otro lado, en nitrógeno atmosférico así como los excesos de aire inyectados al sistema y el N₂ en la combustión junto con el agua, pueden ser combinados con O₂ para producir NOx.

Sin embargo, cabe señalar que el NO es formado primeramente en una porción de la flama procesada a altas temperaturas, por ejemplo el tiempo de residencia es de 0.5 seg y a T=1860° C, por lo que las concentraciones de NO son alrededor de 500 ppm por cada 10 mbar liquido y gas caliente en combustión unitaria.

La cantidad de exceso de aire inyectado dentro de la flama afecta la producción de NOx. En la

combustión unitaria del líquido combustible caliente tanto en forma tangencial como horizontal, por ejemplo en emisiones de NO_x disminuye el porcentaje de O₂ en los gases de escape y a su vez reduce el NO_x en la flama tangencial unitaria hasta un 28 % y en la horizontal hasta el 36 %, teniendo que observarse el contenido de O₂ en los gases de escape que baja desde 4 % hasta 2 %.

En relación a otros orígenes de las emisiones de NO_x desde el gas de incineración industrial, tiene que estar lejos de una fracción pequeña de las emisiones nacionales sin embargo, la posibilidad en el área específica produce NO_x a niveles elevados en un corto tiempo que no pueden ser evitados.

VI.10 CONTROL DEL NO_x

En medio del origen estacionario para las emisiones de NO_x con combustible caliente generalmente utilizado en los generadores de vapor industriales, constituye solo un gran abastecedor del sector de la contaminación. En 1977 ese tipo de equipos generaba casi el 55 % para todas las emisiones de NO_x desde el origen de combustión del combustible rotacionario y por arriba del 32 % para el total de las emisiones de NO_x en todos los países.

Las emisiones de NO_x desde los generadores de vapor utilizados son esperados con mayor auge lo cual ocasionará problemas futuros, los tres diferentes factores de emisión de NO_x son aplicados a los tres diferentes tipos de generadores de vapor que son de combustible sólido, líquido y gaseoso, de estos se pueden citar los siguientes ejemplos: combustible pulverizado, carbón caliente pulverizado, etc.

La formación de NO_x en los procesos de combustión, es causada por la fijación térmica del nitrógeno atmosférico en la combustión del aire, en el cual se produce el NO_x por la conversión química del nitrógeno en el combustible.

La principal opción para el control del NO_x desde el generador utilizado, consiste en la modificación de la combustión desde los gases de escape disminuyendo la generación de NO_x desde 60 % a 20 %.

En el esfuerzo por alcanzar grandes niveles de control, se adicionan técnicas avanzadas de combustión que pueden ser utilizadas también en combinación del combustible caliente, esta técnica incluye bajos excesos de aire y una medida estequiométrica de la combustión lo cual traería como consecuencia la reducción de las gases de escape.

Ahora bien pasaremos a mencionar algunas de las técnicas desarrolladas más recientemente para el control de los gases contaminantes :

La selección por reducción catalítica del NOx por inyección de amoníaco fue desarrollado por EXXON CORPORATION en donde los procesos llamados el NOx térmico, son comercializados para el líquido y el gas caliente existente en el generador de vapor, pero existen algunas desventajas que se pueden dar con el uso de éste combustible como son : las posibles emisiones de amoníaco y la variación en el rango de temperatura de operación.

El segundo proceso es conocer a la selección de reducción catalítica (SCR). El principio del proceso es similar al SNR, pero el uso de la catálisis minimiza la restricción del rango de temperatura impuesta por la SNR.

SNR : Selección de reducción no catalítica

SCR : Selección de reducción catalítica

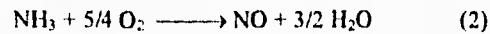
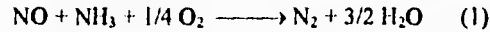
El proceso SCR ofrece un potencial para su uso con las modificaciones de la combustión donde son requeridas más altas eficiencias para continuar el alto contenido de NOx, pero bajo sus condiciones conducen mucho a su formación, lo que pone de manifiesto a los generadores y a la formación de cenizas que en estos se hayan.

Los procesos de control del NOx son tal vez mejores para el control de contaminación por reacción química, así el énfasis para éste capítulo son las técnicas de control de NOx las cuales no incluyen radiaciones catalíticas homogéneas por NH₃ ni reducciones catalíticas selectivas para éste mismo compuesto.

Dentro de estas técnicas se encuentran dos procesos que se consideran los mas importantes por que son los usados más frecuentemente a nivel industrial y que se describen como sigue:

VI.10.1 INYECCIÓN DE AMONIACO (NO CATALÍTICA)

La inyección de amoniaco en los procesos de control de NOx, provocan que los gases de escape reduzcan el NO, N₂ en presencia de H₂O y en presencia del oxígeno inyectado para el NH₃, reduzcan el agente de contaminación en grandes cantidades por lo que las reacciones características globales son las siguientes :



La primera reacción es denominada para los gases de escape en donde las temperaturas comprenden desde 1070 a 1270° K. El mecanismo de probables resultados en la reacción global (1) es dado a casi 1370° K, no obstante la reacción (2) que significa convenientemente la formación indeseable del NO produciendo así que la inyección de amoniaco en el proceso sea muy sensible con las máximas reducciones de temperatura.

En la figura VI.9 se muestran las técnicas de reducción de NOx que fueron tomadas desde los gases de escape, desde el gas caliente hasta el piloto del generador de vapor.

Donde así la dispersión de esa temperatura sensitiva se lleva a cabo, en donde la adición de hidrógeno puede bajar y extenderse la temperatura efectiva con H₂, NH₃ y con la relación entre estos de 2:1.

En las figuras VI.10 y VI.11 se muestran del 60-40 % de la reducción típica de NOx para algunas instalaciones y un esquema de una aplicación típica de inyección de amoniaco utilizada en el generador de vapor, siendo los mayores factores que afectan su desempeño los siguientes :

1. Sistemas de combustión / características del combustible.
2. Tiempo de residencia a temperaturas óptimas a (gases de escape).
3. Perfil de temperatura a través del generador de vapor.
4. La relación NH₃/NO y la concentración de NOx.

En las aplicaciones prácticas, la limitación de las funciones es la inyección para NH₃ en el propio

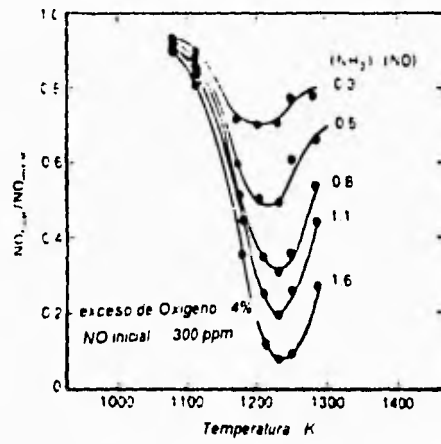


FIG VI-9 EFECTO DE TEMPERATURA EN LA REDUCCION DE NO CON INYECCION DE AMONIACO

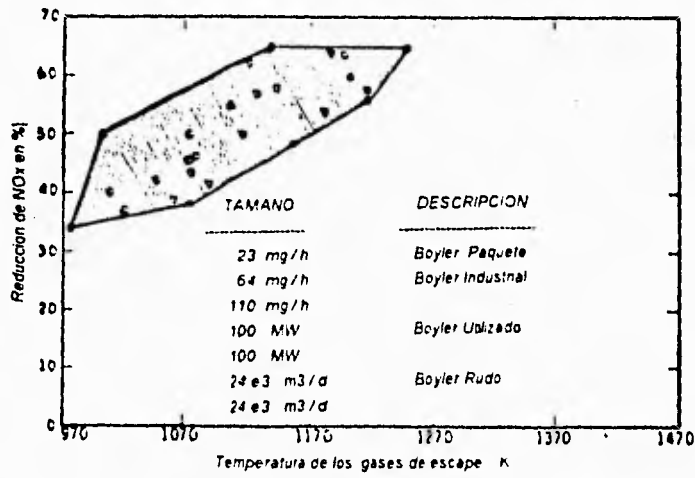


FIG. VI.10 REPRESENTACION DE LA INYECCION DE AMONIACO EN UNA APLICACION COMERCIAL.

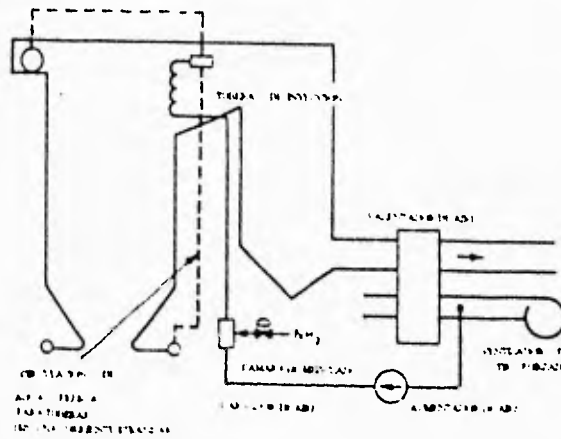


FIG. VI.11 DIAGRAMA ESQUEMATICO DE LA INYECCION DE NH₃ AL SISTEMA

generador de vapor localizado y llevado al máximo del NH_3/NO y posiblemente del H_2 , alcanzando la temperatura deseada en la operación normal del generador de vapor.

La relación de NH_3/NO será 1.5 que es comúnmente usado para la primera producción de NO_x en los gases de escape a un nivel menor de 200 ppm, si la relación es reducida a 1 del aumento de las concentraciones iniciales disminuiría las concentraciones de aire lo que beneficia la inyección de amoníaco para las técnicas del control del NO_x .

Después de la inyección de amoníaco se realiza el desarrollo de la tecnología para NO_x las cuales son severas implementaciones potenciales y problemas operacionales que pueden ocurrir como sigue :

1. La reducción no catalítica efectiva óptima del NO por NH_3 son ocurridos por arriba del rango de temperatura, es decir, la localización por inyección del NH_3 en las partes cruciales.
2. La temperatura cambia en el generador de vapor poco a poco con la carga de gases de la cual se pueden dictaminar restricciones.
3. Las emisiones de NH_3 son generalmente a bajo de 50 ppm.
4. El costo de los procesos puede ser muy alto por las técnicas de modificación de combustión.

Sin embargo, esos problemas pueden ser y se darán en instalaciones específicas modificadas con la múltiple inyección de amoníaco para todas las capacidades del NO_x , sugiriendo además la adición de agua para aumentar el control.

Por lo anterior, podemos decir que son necesarias las grandes reducciones así como las técnicas de tratamiento para gases de escape de la post combustión y que además existe una relación diversa con los grandes equipos y costos de operación que pueden ser considerados.

VI.10.2 TÉCNICAS DE CONTROL DEL NO_x EN LA POST-COMBUSTION

Las técnicas de control pueden ser divididas después de los procesos de combustión como se enuncian a continuación:

Los combustibles que limpian el proceso de combustión son semejantes al carbón lavado, pero no sólo puede ser provechoso reduciendo emisiones para cenizas volátiles y otros óxidos metálicos solubles en agua, el SO_x es el más indicado porque puede ayudar a disminuir la corrosión en el interior del generador de vapor, así como el escoriado y los problemas de erosión.

La eliminación orgánica del sulfuro y nitrógeno es sólo un concepto útil aunque el proceso comercial que se haga presente, por ejemplo hidrogenación, requiera una inversión de capital más grande. Desde que el hidrógeno tiene más valor que otros combustibles usados, el método empleado para la oxidación será desarrollado para el sulfuro y el nitrógeno eliminado.

Otro combustible empleado como alternativa para evitar tanto corrosión como un poco de contaminación son los combustibles que se localizan a media región, esto es, los combustibles que tienen baja cantidad de sulfuro y de carbón.

Los beneficios que pueden tener estos combustibles traídos desde la región media es que puede ser quemado a muy bajos excesos de aire y producir una baja sustancial en el combustible empleado ya que este se consume con una gran facilidad.

Recientemente los seis tipos representativos de carbón a nivel industrial se prueban por espacio de un mes para verificar si el combustible es compatible con el generador de vapor, excepto para una unidad del segundo tipo que son las de los antiguos diseños (con un mal diseñado y alimentado quemador).

En los quemadores donde puede ser establecido otro tipo de combustible, los gases productos pueden estar en términos del SO_x y del NO_x o en particular si son emisiones de hidrocarburos quemados.

La masa que no es limpia ni pura, es lo último que se emplea en la reducción de emisiones por que el proceso normalmente requiere de cantidades de cualquier material en masa de 20 tiempos y en 20000 tiempos en volumen para el combustible. Los problemas que se presentarían con esto es que si la humedad es restregada envuelve más al SO₂, y el calor humedecido adicionalmente en el combustible debe ser usado abajo del agua del retorno donde están los líquidos y sólidos restantes de la combustión que se acumulan generalmente en aguas que contienen óxidos metálicos solubles.

En el primer combustible caliente del generador de vapor se intensificó la alta combustión de las emisiones de NO_x las cuales se bajan a más del 50% con sólo limpiar el depósito cuando el generador de vapor esta inactivo.

VI.10.3 REDUCCIÓN CATALÍTICA SELECTIVA (RCS)

Un gran numero de técnicas de tratamiento de gases de escape para la post combustión tuvieron que ser investigadas para la reducción de las emisiones de NO_x.

Las cenizas de los procesos de NO_x tienden a bajar más por que los procesos de humedad son más complejos e inherentes y tienen asociados los problemas de la contaminación del agua que son de grandes costos económicos.

La RCS se refiere a los procesos de reducción químicos del NO_x con NH₃ sobre una catalización heterogénea en presencia del O₂, los términos del proceso son relativos por que el agente de reducción (NH₃) preferencialmente ataca el NO_x con un poco de O₂. Sin embargo, el O₂ aumenta la reacción que es una parte necesaria en el proceso, así el RCS es aplicable para los gases de combustión donde el flujo de gas se da sobre las condiciones de operación.

Por consiguiente, teóricamente la cantidad estequiométrica de NH₃ es suficiente para reducir el NO_x, en la practica la relación de NH₃ : NO es casi 2 : 1 y las reducciones típicas de las emisiones de NO_x son del 90 % al 80 % con las concentraciones residuales de NH₃ por abajo de 20 ppm, como referencia, se dan los mayores factores que afectan el desarrollo de la RCS y que se enuncian a continuación :

1. Sistemas de combustión y características del combustible.
2. Composición catalítica.
3. Actividad catalítica, selectividad y longevidad.
4. La relación NH₃ : NO y las concentraciones de NO_x.
5. Velocidad de esparciamiento.
6. Temperatura del reactor (RCS).

Por consiguiente la temperatura óptima para la reacción catalítica fluctúa entre 570° K y 720° K obteniéndose así la temperatura de los gases de escape en ese rango. En la figura VI.12 al final del capítulo se muestra el diagrama de flujo de los elementos críticos del proceso donde se mencionan con gran auge el reactor y la catálisis los cuales solo varían con una aplicación primaria de estudio de NOx.

VI.11 EJEMPLOS DEL CONTROL DE LA COMBUSTION

El control de la combustión en los generadores de vapor industriales puede ayudar a reducir las emisiones tanto de NOx como de CO, SO₃, hidrocarburos, humo y cenizas.

Sí se tiene un fondo húmedo en el horno, las cenizas sobrantes del combustible caliente disminuyen la intensidad de combustión que es necesaria para disolver las cenizas que pueden ser recolectadas como escorias. Sin embargo, la humedad que está en el fondo del horno no es buena conductora para el control del NOx, por lo que la intensidad de la combustión es conveniente, por que para estas existe una compatibilidad razonable en cuanto a la transferencia de calor y al vapor que se refiere.

Dentro de las unidades de fondo seco, la disminución de exceso de aire ayuda a reducir las emisiones de cenizas, reduciendo la velocidad de los gases de escape através de un precipitador electrostático. Aquí la reducción del 10% del exceso del aire puede disminuir la emisión de casi todas las cenizas aun nivel del 40%.

La reducción del exceso del aire disminuye sólo la conversión del SO₂ y SO₃. Reduciendo la formación de SO₃ se puede aligerar la corrosión en el generador de vapor y eliminar las plumas de ácido sulfurico que se tiene bajo punto de rocío. El poder de los hidratantes aumenta la aglomeración de la partícula, llevando las partículas de la corrosión a la precipitación. Así, bajando el exceso de aire se puede en algunos casos reducir las emisiones de las partículas abajo del máximo legal de la unidad del combustible caliente.

Los más críticos avances en el control de la combustión en los generadores de vapor industriales tiene que ser exclusivamente en las reducciones de NOx. En relación al ajuste y desarrollo del quemador, en adición a los métodos de control del NOx, se aumentará el orden de preferencia

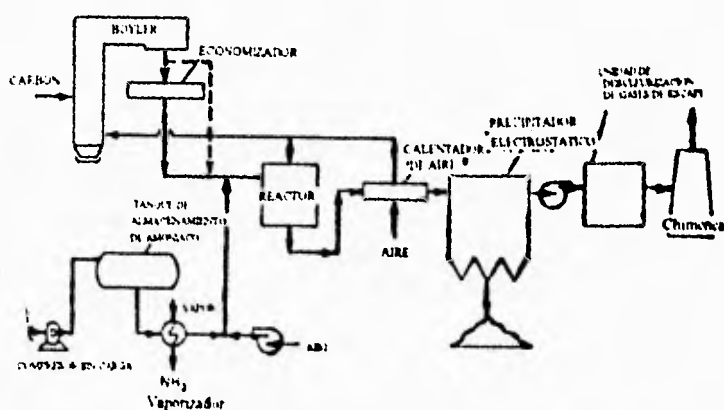


FIG. A7.12 EXTENSION TIPICA DEL FLUJO PARA NH₃ EN LOS PROCESOS DE REDUCCION CATALITICA SELECTIVA

respecto a la combinación efectiva y eficiente de los generadores de vapor industriales, dichos ordenes de preferencia se enuncian a continuación:

1. Operación con bajo exceso de aire.
2. Mejorando el quemador para aire y maximizando su control.
3. Etapa de combustión.
4. Aumento del espaciamiento del quemador para la transferencia de calor y enfriamiento de gas.
5. Improvisar el debanado en la distribución de aire.
6. Recirculación del flujo del gas dentro del aire de combustión.
7. Reducción del aire precalentado.
8. Inyección del agua dentro del área de combustión.

Por otro lado, el aumento en el horno del O_2 aumentaría las emisiones de NO_x hasta un 40%, sin embargo en la fig. VI.13 se muestra la mayor reducción de NO_x que puede acabar con el generador de vapor al estar funcionando. Sin embargo, las experiencias muestran que las reducciones de NO_x pueden ser acabadas conforme se va implantando un proceso nuevo (inyección de amoníaco), por lo que el diseño de los nuevos generadores para la reducción de NO_x ha invertido la tendencia tradicional hacia el pequeño horno con una combustión más intensa.

VI.12 COSTOS DEL CONTROL DEL NO_x

Los costos para el apropiado control del NO_x son dependiendo del tipo de quemador empleado, el costo estimado en 1980 para reemplazar al quemador circular por el quemador de bajo NO_x ha sido estimado en N\$ 16000.00, por lo que se ha visto la posibilidad de poderse emplear y de adquirir por la gran mayoría de las empresas que cuentan dentro de sus equipos con generadores de vapor. Actualmente el costo directo de un quemador de NO_x se puede aproximar a N\$ 90000.00 debido a que éste cuenta con características muy peculiares anteriormente citadas.

Los costos anuales de un quemador de NO_x consisten en el incremento de operación y mantenimiento. Ahora bien, el aumento incremental y el mantenimiento del costo es atribuido a la instalación del equipo de control de NO_x .

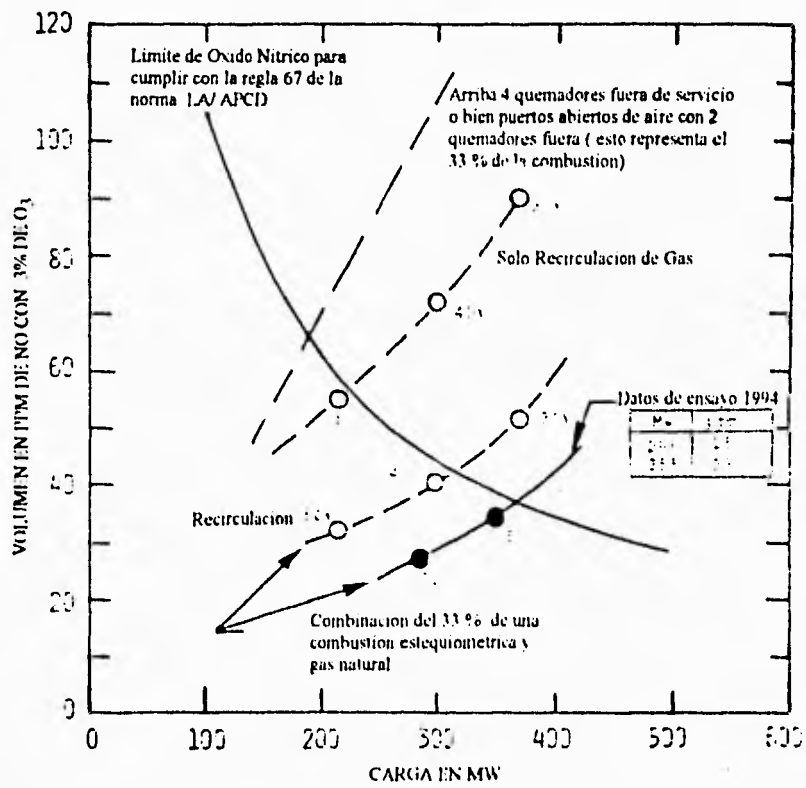


FIG. VI.13 EMISION DE OXIDOS DE NITROGENO ABAJO DE 35 PPM DE UNA UNIDAD DE DESCARGA

En la tabla VI.5 se da una relación del capital estimado y el costo analizado para implementar el control de la combustión en 36 plantas generadoras de energía.

Los costos no estimados son dados por detalles iguales y el potencial estimado en el generador de vapor reemplaza el poder de costo por un posible problema operacional, el costo de capital actual pueden variar para un factor de 2, y el costo de equipo puede representar sólo una pequeña parte de porción del costo estimado.

Dentro de cada clase, las características de combustión para el vapor de agua pueden diferenciar desde una a otra substancialmente, por lo que nunca los productos de combustión final son primeramente dependientes en la composición elemental para el vapor de agua y el combustible auxiliar.

En la adición de las tres clases de combustible, el vapor de agua puede ser discutido por el alto contenido de organofluoroides, organobromoides, organofosforos compuestos y el contenido de organismos de agua, para los cuales los organismos salientes y los óxidos son sólo disponibles por incineración.

VI.13 COSTOS DE EQUIPO DE CONTROL

A manera de referencia, analizaremos lo relacionado a los costos de los equipos de control para la prevención de las emisiones de NOx entre los cuales se pueden citar los siguientes : Precipitadores electrostáticos, filtros y colectores mecánicos; para los cuales se muestran las curvas de costos de cada tipo de técnica de control representando el costo del equipo adquirido, los costos de capital total y la anualización de éstos para cada uno de ellos. La precisión de cada curva es relativa para una aplicación específica, dependiendo de la similitud entre la suposición usada y las condiciones interiores de cualquier sistema que pueda emplearse en la actualidad, dichas curvas pueden ser consideradas en forma representativa en los orígenes de la combustión.

En cada sistema de control de las curvas son incluidos los costos del equipo auxiliar que son normalmente asociados con un sistema semejante. También en esas curvas se proporcionan los costos desde el inicio de la instalación, así como el costo de la instalación general que es del 10

TABLA VI.5 ESTIMACION DE COSTOS DE INSTALACION DE CONTROL DE NOx

NOMBRE	DATOS DE LA PLANTA		COSTOS DE CONTROL DE NOx				EMISIONES DE NOx		
	CAPACIDAD MW	CAPACIDAD FACTOR	COSTOS DE CAPITAL		COSTOS ANUALES		NO CONTROL	CONTROLADAS	REDUCCION
			\$ X 10 ³	\$/kW	\$ X 10 ³	mil\$/kW	10 ³ tons	10 ³ tons	DE NOx %
BALDWIN	634.5	0.67	1,041	1.64	186	0.04	141.91	130.83	8
GAVIN	2600	0.71	31,480	12.11	4,564	0.28	73.96	44.36	40
AMOS	2932.6	0.64	17,821	6.08	2,584	0.12	68.58	41.14	40
MUSKINGUM RIV	1054.6	0.7	8,344	7.91	1,335	0.21	62.24	40.78	20
CLIFTY CREEK	1303.56	0.75	2,496	1.91	427	0.05	58.93	36.38	40
MONROE	3279	0.63	36,632	11.78	5,800	0.31	58.35	35.01	40
BOWEN	3180	0.58	4,164	1.32	698	0.04	53.95	40.46	25
STUART	2440.8	0.64	28,616	11.72	4,148	0.30	53.42	32.05	40
LABADIE	2220	0.59	2,080	0.94	333	0.03	49.93	37.45	25
GIBSON	2672	0.52	3,332	1.25	478	0.04	47.66	28.6	40
KYGER CREEK	1096.5	0.7	2,080	1.91	356	0.05	46.47	27.88	40
CUMBERLAND	2600	0.48	31,480	12.11	4,564	0.42	43.81	26.29	40
GASTON	2012.8	0.71	2,861	1.42	463	0.04	43.39	28.78	34
HOMER CITY	1860	0.8	2,705	1.46	394	0.03	42.81	25.88	40
CONESVILLE	1711	0.44	2,801	1.52	458	0.07	42.01	34.97	17
BELEWS CREEK	2180	0.62	25,756	11.92	3,708	0.32	41.87	25	40
CARDINAL	1880.48	0.71	16,189	8.80	2,361	0.20	41.48	24.89	40
WANSLEY	1730	0.73	2,082	1.20	327	0.03	40.98	30.74	25
SHERBURNE	1440	0.54	2,082	1.45	329	0.05	39.83	29.72	25
MARSHALL	2000	0.65	3,122	1.56	507	0.04	37.56	28.17	25
KEYSTONE	1872	0.68	2,082	1.11	339	0.03	37.53	28.15	25
JOLIET	1320	0.78	2,080	1.58	343	0.04	37.5	30.65	18
NEAL	1445.2	0.52	1,977	1.37	284	0.04	36.19	25.05	31
KINGSTON	1723	0.65	4,880	2.72	885	0.09	35.87	28.9	25
SAMMIS	2303.5	0.49	16,422	7.13	3,527	0.36	35.71	21.42	40
MONTOUR	1534	0.78	2,082	1.36	333	0.03	35.47	26.8	25
ST. CLAIR	1547	0.24	2,184	1.41	374	0.12	34.41	24.55	29
HATFIELD	1728	0.65	21,428	12.48	3,135	0.32	34.39	20.63	40
BRUNNER ISLAND	1558	0.75	2,081	1.34	341	0.03	34.16	25.62	25
WILL COUNTY	897	0.51	1,040	1.16	178	0.04	33.97	29.48	13
COLUMBIA	1024	0.58	1,040	1.02	164	0.03	33.9	25.43	25
ROXBORO	1813.05	0.63	4,163	2.30	674	0.07	33.48	25.11	25
WIDOWS CREEK	1980	0.46	2,800	1.31	458	0.06	31.95	21.81	32
MANSFIELD	1670	0.53	2,186	1.31	312	0.04	31.01	16.61	40
MITCHELL	1632.3	0.67	2,082	1.28	304	0.03	30.48	18.27	40
KARN	530	0.74	988	1.86	164	0.05	29.17	25.1	14

% al 30 % más que el costo de la instalación inicial, todo esto dependiendo de las dificultades específicas que se presenten, por lo que dichos costos pueden ser calculados en base al porcentaje final.

La anualización de los costos se basan en la operación tiempo, que es 8700 hr/año respectivamente. Desde dicha anualización, los costos con la operación tiempo son más bajos que los costos mostrados en las curvas de los sistemas de control por ejemplo, las operaciones a seguir para el porcentaje de los costos de operación de 8700 hr/año son mostradas en las figuras VI.14, VI.15 y VI.16, así como en la tabla VI.6. Todas las alternativas de las plantas de poder tienen que ser diseñadas para cumplir con la Asociación Nacional de la Contaminación del Aire (NSPA), para emisiones particulares que se dan a 0.03 lb/10⁶ de potencia consumida y para las emisiones de SO₂ que son producidas a más del 85 %.

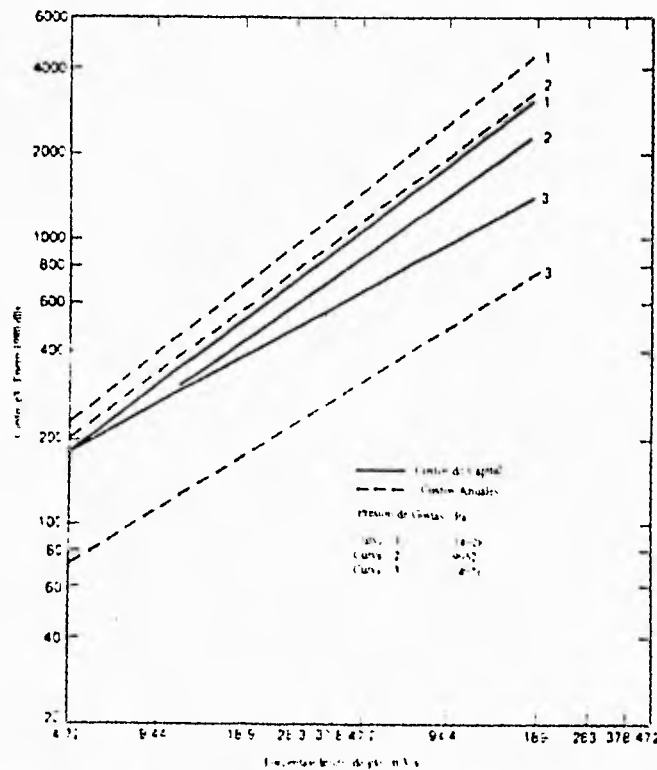


FIG VI.14 CAPITAL Y COSTOS ANUALIZADOS PARA ACERO AL CARBÓN

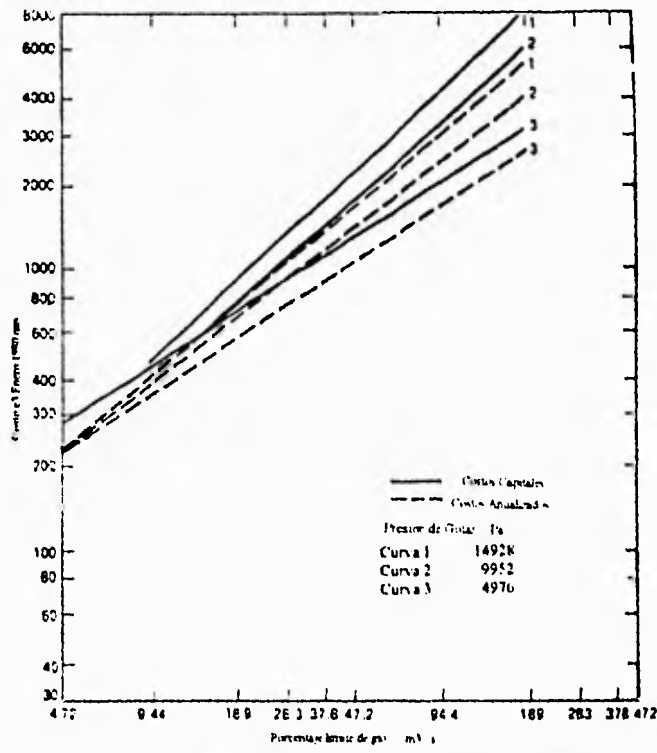


FIG. VI.15 CAPITAL Y COSTOS ESPECULADOS PARA ACERO INOXIDABLE.

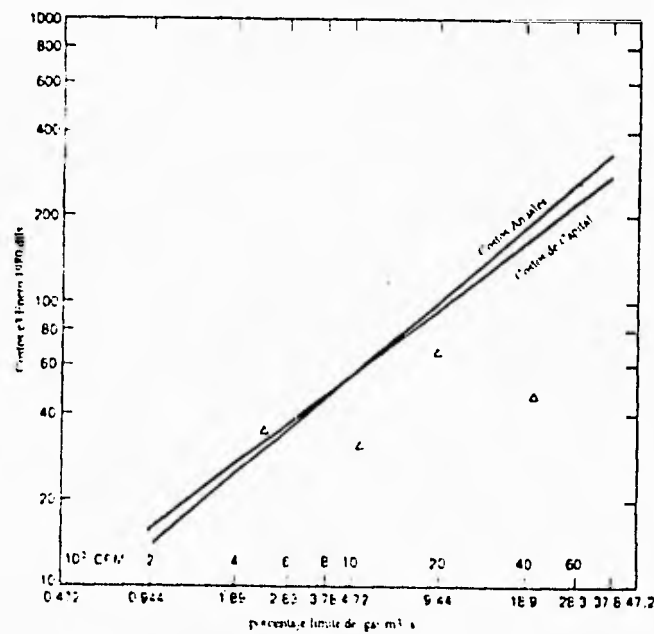


FIG. VI-16 CAPITAL Y COSTOS ANUALIZADOS PARA COLECTORES MECANICOS Y ACERO AL CARBON

TABLA VI.6 RESULTADOS DEL REPORTE Y AJUSTE DEL CAPITAL Y COSTOS ANUALES POR OPERACION DEL SISTEMA FGD.

	REPORTE						AJUSTE					
	CAPITAL			ANUAL			CAPITAL			ANUAL		
	RANGO \$/kW	PROMEDIO \$/kWh	σ	RANGO m\$/kWh	PROMEDIO m\$/kWh	σ	RANGO \$/kW	PROMEDIO \$/kWh	σ	RANGO m\$/kWh	PROMEDIO m\$/kWh	σ
ALL	23.7-213.6	80.2	44.3	0.1-13.0	2.3	2.8	38.3-282.2	118.8	58.1	1.6-20.8	7.6	4.1
NEW	23.7-213.6	80.4	46.1	0.1-5.5	1.7	1.8	38.3-283.9	110.8	48.4	1.6-14.8	6.8	3.2
RETROFIT	29.4-157.4	79.7	39.4	0.5-13.0	4.5	4.4	60.4-282.2	271.6	12.1	16.7-20.8	18.1	1.9
SALEABLE	132.8-185.0	153.1	20.6	13.0-13.0	13	0	254.6-282.2	271.6	12.1	16.7-20.8	18.1	1.9
THROWAWAY	23.7-213.6	75.8	41.5	0.1-11.3	2.1	2.4	38.3-283.9	110.9	47.6	1.6-17.6	7	3.4
ALKALINE FLY ASH/ LIME	43.3-173.8	93.9	44	0.4-5.4	2.1	1.9	52.5-184.4	122.8	51.4	3.0-14.1	7.2	3.8
ALKALINE FLY ASH/ LIMESTONE	40.3-49.3	49.3	0	0.8-0.8	0.8	0	102.6-102.6	102.6	0	5.4-5.4	5.4	0
DUAL ALKALI	47.2-174.8	97.8	55.3	1.3-1.3	1.3	0	87.8-263.9	146.7	82.9	5.0-13.9	8.7	3.8
LIME	29.4-213.6	81.8	43.7	0.3-11.3	3.2	2.7	60.4-210.0	116.5	44.2	4.0-17.6	8.1	3.6
LIMESTONE	23.7-170.4	67.9	37.2	0.1-7.8	1.6	2.2	38.3-194.3	98.9	44	1.6-14.8	6.1	3.1
SODIUM CARBONATE	42.9-100.8	69.2	26.8	0.2-0.5	0.4	0.1	87.1-150.9	110.9	26.4	5.8-7.4	6.4	0.7
WELLMAN-LORD	132.8-185.0	153.1	20.6	13.0-13.0	13	0	254.6-282.2	271.6	12.1	16.7-20.8	18.1	1.9

CAPITULO VII NORMATIVIDAD

Los generadores de vapor son equipos que generan compuestos contaminantes que no son controlados en su totalidad y se emiten a la atmósfera. Estas emisiones son controladas por las normas ecológicas que establece la Secretaría de Desarrollo Social.

Estas normas, día con día, son más estrictas ya que la calidad del aire de la Ciudad de México esta considerada como de las más bajas del mundo.

A continuación, citamos la norma que establece la SEDESOL:

NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-CCAT-019-ECOL/1993 (NE), QUE REGULA LA CONTAMINACION ATMOSFERICA EN FUENTES FIJAS Y ESTABLECE LOS NIVELES MAXIMOS PERMISIBLES DE EMISION A LA ATMOSFERA DE PARTICULAS (PST), MONOXIDO DE CARBONO (CO), OXIDOS DE NITROGENO (NO_x), OXIDOS DE AZUFRE (SO_x) Y HUMO, ASI COMO LOS REQUISITOS Y CONDICIONES PARA LA OPERACION DE LOS EQUIPOS DE COMBUSTION DE CALENTAMIENTO INDIRECTO UTILIZADOS EN LAS FUENTES FIJAS, QUE USAN COMBUSTIBLES FOSILES LIQUIDOS Y GASEOSOS O CUALQUIERA DE SUS COMBINACIONES.

VIII OBJETO

Esta norma oficial mexicana establece los niveles máximos permisibles de emisión de partículas, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre y humo, así como los requisitos y condiciones para la operación de los equipos de combustión de calentamiento indirecto utilizados en las fuentes fijas que usan combustibles fósiles líquidos y gaseosos o cualquiera de sus combinaciones.

Se exceptúan los calentadores de agua domésticos, las estufas, los anafres y los asadores.

VII.2 CAMPO DE APLICACION

Esta norma oficial mexicana es de observancia obligatoria en el uso de los equipos de calentamiento indirecto utilizados en las fuentes fijas que usan combustibles fósiles líquidos y gaseosos o cualquiera de sus combinaciones.

VII.3 REFERENCIAS

NMX-AA-09 Determinación de flujo de gases en un conducto por medio de un tubo de pitot.

NMX-AA-10 Determinación de emisión de material particulado contenido en los gases que fluyen por un conducto .

NMX-AA-23 Terminología.

NMX-AA-35 Determinación de bióxido de carbono y oxígeno en los gases de combustión.

NMX-AA-55 Determinación de bióxido de azufre en gases que fluyen por un conducto.

VII.4 ESPECIFICACIONES

4.1 Los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre y humo de los equipos de combustión de las fuentes fijas de esta norma oficial mexicana, son los establecidos en las tablas VII.1 y VII.2.

4.1.1 Para los efectos de esta norma oficial mexicana, se consideran zonas críticas por las altas concentraciones de contaminantes de la atmósfera que registran las siguientes:

Las Zonas Metropolitanas de la Ciudad de México, Monterrey y Guadalajara, los centros de población de: Coatzacoalcos-Minatitlán, Estado de Veracruz; Irapuato-Celaya-Salamanca, Estado de Guanajuato; Tula-Vito Apasco, Estados de Hidalgo y de México; Corredor Industrial de Tampico-

Madero-Altamira, Estado de Tamaulipas y la zona fronteriza norte.

4.2 Cuando un mismo equipo de combustión, ubicado fuera de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, se utilice la combinación de combustibles líquidos y gaseosos, la emisión de la fuente podrá compararse con los niveles máximos permisibles indicados en la tabla VII.1 para los combustibles líquidos.

4.3 Cuando existan dos o más equipos de combustión dentro de un mismo predio que utilicen en forma independiente combustibles líquidos o gaseosos y que estén ubicados fuera de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, podrán tomar para comparación con la tabla VII.1 la concentración ponderada, referida al equipo de combustión de capacidad mayor en el predio y tomar como máximo permisible la correspondiente a combustibles líquidos como sigue:

Ecuación de Ponderación.

$$C_p = \frac{Q_1 C_1 + Q_2 C_2 + \dots + Q_n C_n}{Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n}$$

Donde:

C_p = Concentración ponderada a 760 mm Hg, 25 °C, B.S. y 5% en volumen de oxígeno expresada en mg/m^3 para el caso de partículas o ppmv para contaminantes gaseosos. Valor a comparar con los niveles máximos permisibles de la tabla VII.1.

Q = Gasto volumétrico en cada fuente, expresado en m^3/min a 760 mm Hg, 25 °C, B.S. y 5% en volumen de oxígeno.

C = Concentración determinada en cada fuente a 760 mm Hg, 25 °C, B.S. y 5% en volumen de oxígeno expresada en mg/m^3 para partículas o ppmv para contaminantes gaseosos.

4.4 Los equipos de combustión considerados en la tabla VII.1 con capacidad hasta 5,250 MJ/hr (150 caballos caldera [cc]) deberán operar con un contenido de oxígeno menor de 6.3% para el caso de combustible líquido, mismos que deberán medirse de acuerdo a las especificaciones técnicas contenidas en la norma mexicana NMX-AA-114.

- 4.5 La operación de soplado, esto se refiere a el limpiado de hollin de los tubos de una caldera acuotubular mediante la inyección de aire, vapor u otro fluido a presión, que se requiere en los equipos de combustión de procesos continuos que utilicen combustibles líquidos, deberá efectuarse con la frecuencia de por lo menos una vez por turno, cada ocho horas, o de acuerdo a las especificaciones del fabricante. El tiempo de soplado no deberá exceder de 25 minutos.
- 4.6 Los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de neblinas de ácido sulfúrico para equipos de combustión con capacidad térmica de 5,250 MJ/hr (150 cc) y mayores que utilizan combustibles fósiles líquidos, son los establecidos en la tabla VII.3.

VII.5 REQUISITOS Y CONDICIONES PARA LA OPERACION DE LOS EQUIPOS DE COMBUSTION

5.1 REQUISITOS

- 5.1.1 Los responsables de los equipos de combustión de las fuentes fijas referidas en esta norma oficial mexicana deben observar los siguientes requisitos de operación:
- 5.1.1.1 Llevar una bitácora de operación y mantenimiento de los equipos de combustión, medición y análisis de las emisiones.
- 5.1.1.2 La medición y análisis de las emisiones deben realizarse con la frecuencia y métodos que se indican en la tabla VII.4.
- 5.1.1.3 Los métodos equivalentes a que se refiere la tabla VII.4 tendrán que ser los que se se contemplan en la tabla VII.6 de esta norma oficial mexicana.
- 5.1.1.4 El análisis tipo Fyrite (vía húmeda) sólo es válido para propósitos de la determinación del peso molecular.
- 5.1.1.5 El análisis de neblinas de ácido sulfúrico se deberá llevar a cabo de acuerdo al método de vía húmeda con torino.

5.2 CONDICIONES

5.2.1 Los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera establecidos en la tablas VII.1 y VII.2 de la presente norma oficial mexicana sólo podrán rebasarse en el caso de:

5.2.1.1 Operaciones de arranque del equipo de combustión, siempre que no excedan a periodos mayores de 15 minutos y no se repita la operación más de dos veces al día.

5.2.1.2 Operación de soplado, siempre y cuando se ajusten a lo establecido en los puntos 4.5 de esta norma.

5.2.2 Los combustibles líquidos, gaseosos u otros utilizados en equipos de combustión con capacidad térmica hasta 5,250 MJ/hr o 150 cc en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, deben tener un contenido de azufre menor del 2% en peso.

5.2.3 Para los efectos de cuantificación de las emisiones de partículas, óxidos de azufre, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y humo deben utilizarse los procedimientos establecidos en las normas mexicanas correspondientes o en su caso los que establezca la autoridad competente.

5.2.4 Cuando por una chimenea confluyan otras corrientes gaseosas para ser descargadas a la atmósfera conjuntamente con las generadas por las de combustión, la medición de las emisiones deberá realizarse por separado.

5.2.5 En el caso de que no se cuente con las especificaciones sobre la capacidad térmica del equipo de combustión, ésta se determina mediante la siguiente ecuación:

$$H_t = H_c \cdot V$$

Donde:

H_t = Capacidad térmica del equipo de combustión, expresada en MJ/hr.

H_c = Poder calorífico del combustible empleado, expresado en MJ/Kg.

V = Consumo de combustible, expresado en Kg/hr.

Para la presente norma oficial mexicana se consideran los poderes caloríficos indicados en la tabla VII.5.

VII.6 VIGILANCIA

6.1 La Secretaría de Desarrollo Social por conducto de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, así como los Gobiernos del Distrito Federal, de las entidades federativas y, en su caso, de los municipios, en el ámbito de sus respectivas competencias, vigilarán el cumplimiento de la presente norma oficial mexicana.

VII.7 SANCIONES

7.1 El incumplimiento de la presente norma oficial mexicana, será sancionado conforme a lo dispuesto por la Ley General del Equilibrio Ecológico y la protección al Ambiente, su Reglamento en materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera y los demás ordenamientos jurídicos que resulten aplicables.

TABLA VII.1 EQUIPO EXISTENTE

CAPACIDAD	TIPO DE COMBUSTIBLE EMPLEADO	DENSIDAD DE HUMO	PARTICULAS (PST) mg/m ³ (1)			DIOXIDO DE AZUFRE (ppm v) (1)			OXIDOS DE NITROGENO (ppm v) (1)			CO (ppm v) (2)	
			NUMERO DE MANCHA U OPACIDAD	ZONAS CRITICAS		RP	ZONAS CRITICAS		RP	ZONAS CRITICAS			RP
				ZMCM	OTRAS		ZMCM	OTRAS		ZMCM	OTRAS		
HASTA 5,250 MJ/h (150 CC)	COMBUSTOLEO / GASOLEO	6	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	250	
	OTROS LIQUIDOS GASEOSOS	5	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA		
		NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA		
DE: 5,251 A 43,000 MJ/h (151 A 1,200 CC)	LIQUIDOS	NA	100	300	400	1,100	1,650	2,600	150	200	270	400	
	GASEOSOS	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	130	150	180		
DE: 43,001 A 110,000 MJ/h (1,201 A 3,100 CC)	LIQUIDOS	NA	70	250	350	1,000	1,500	2,500	140	180	250	400	
	GASEOSOS	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	120	140	160		
MAYOR DE 110,000 MJ/h (3,100 CC)	LIQUIDOS	10% (3)	70	200	300	800	1,200	2,200	130	150	230	400	
	GASEOSOS	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	100	130	150		

TABLA VII.2 EQUIPO DE NUEVA INSTALACION

HASTA 43,000 MJ/h (1,200 CC)	CUALQUIER TIPO DE COMBUSTIBLE	DEBEN CUMPLIR CON LOS LIMITES INDICADOS EN LA TABLA I PARA LA ZMCM Y CONTAR CON TECNOLOGIA DE BAJA EMISION DE OXIDOS DE NITROGENO										350
MAYORES DE DE: 43,000 MJ/h (1,200 CC)	LIQUIDOS	10% (3)	50	150	250	400	400	1,500	100	140	200	350
	GASEOSOS	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	75	100	130	
REPARACION MAYOR O RECONVERSION DE EQUIPOS EXISTENTES		DEBERAN CUMPLIR CON LOS LIMITES INDICADOS EN LA TABLA I PARA LA ZMCM E INTRODUCIR TECNOLOGIA DE BAJA EMISION DE OXIDOS DE NITROGENO										

NOTAS: (1) CONCENTRACIONES REFERIDAS A 25°C, 760mm de Hg, 5% DE OXIGENO EN VOLUMEN Y BASE SECA, CON LA FORMULA SIGUIENTE: $F = 16 / (21 - O_2)$ (medido)

(2) CONCENTRACIONES REFERIDAS A CONDICIONES DE OPERACION

(3) % DE OPACIDAD

RP: ZONAS DEL RESTO DEL PAIS

ZMCM: ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MEXICO

NA: NO APLICA

TABLA VII.3 NIVEL MAXIMO PERMISIBLE DE ACIDO SULFURICO

ZONAS		mg/m ³ (a)
ZONAS CRITICAS	ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MEXICO	40
	OTRAS	60
RESTO DEL PAIS		90

(a) Concentracion referida a condiciones de 298°K (25°C), 101,325 Pa (760 mm de Hg) base seca y 5% en volumen de O₂.

TABLA VII.4 MEDICION Y ANALISIS DE GASES DE COMBUSTION

CAPACIDAD DEL EQUIPO DE COMBUSTION MJ/h (CC)	PARAMETRO	FRECUENCIA MINIMA DE MEDICION	TIPO DE MEDICION	TIPO DE COMBUSTIBLE
HASTA: 5250 MJ/h (150 CC)	DENSIDAD DE HUMO	1 VEZ CADA 3 MESES	PUNTUAL (3 MUESTRAS) MANCHA DE HOLLIN	LIQUIDOS
	CO	1 VEZ CADA 3 MESES	CONTINUA (MINIMO POR 45 MIN) CELDA ELECTROQUIMICA O EQUIVALENTE (1)	LIQUIDOS Y GASEOSOS
	CO ₂ , CO, O ₂ , N ₂	1 VEZ CADA MES	PUNTUAL (3 MUESTRAS) ORSAT O EQUIVALENTE (2)	LIQUIDOS Y GASEOSOS
DE: 5251 A 43,000 MJ/h (151 A 1,200 CC)	PARTICULAS TOTALES Y NEBLINAS DE ACIDO SULFURICO	UNA VEZ POR AÑO	ISOCINETICO (MINIMO POR 60 MIN) (3), 2 MUESTRAS DEFINITIVAS	LIQUIDOS
	NOx	UNA VEZ POR AÑO	CONTINUO (MINIMO POR 45 MIN) QUIMILUMINISCENCIA O EQUIVALENTE	LIQUIDOS Y GASEOSOS
	SO ₂	UNA VEZ POR AÑO	PUNTUAL POR TORINO, INFRARROJO NO DISPERSIVO O EQUIVALENTE	LIQUIDOS
	CO	UNA VEZ CADA MES	CONTINUO (MINIMO POR 45 MIN) INFRARROJO NO DISPERSO O ELECTROQUIMICO	LIQUIDOS Y GASEOSOS
	CO ₂ , CO, O ₂ , N ₂	DIARIO	PUNTUAL (3 MUESTRAS) ORSAT O EQUIVALENTE	LIQUIDOS Y GASEOSOS

NOTAS: (1) VER 5.1.1.3
(2) VER 5.1.1.4
(3) VER 5.1.1.5

TABLA VII.4 MEDICION Y ANALISIS DE GASES DE COMBUSTION (CONTINUACION)

CAPACIDAD DEL EQUIPO DE COMBUSTION MJ/h (CC)	PARAMETRO	FRECUENCIA MINIMA DE MEDICION	TIPO DE MEDICION	TIPO DE COMBUSTIBLE
DE: 43,001 A 110,000 MJ/h (1,201 A 3,100 CC)	PARTICULAS TOTALES Y NEBLINAS DE ACIDO SULFURICO	UNA VEZ POR AÑO	ISOCINETICO (MINIMO POR 60 MIN) 2 MUESTRAS DEFINITIVAS	LIQUIDOS
	NOx	1 VEZ CADA 6 MESES	CONTINUO (MINIMO POR 45 MIN) QUIMILUMINISCENCIA O EQUIVALENTE	LIQUIDOS Y GASEOSOS
	SO2	1 VEZ POR AÑO	PUNTUAL POR TORINO, INFRARROJO NO DISPERSIVO O EQUIVALENTE	LIQUIDOS
	CO	1 VEZ POR MES	CONTINUO (MINIMO POR 45 MIN) INFRARROJO NO DISPERSIVO, ELECTROQUIMICO O EQUIVALENTE	LIQUIDOS Y GASEOSOS
	CO2,CO,02,N2	UNA VEZ POR TURNO	PUNTUAL (3 MUESTRAS) ORSAST O EQUIVALENTE	LIQUIDOS Y GASEOSOS
MAYOR DE: 110,000 MJ/h (3,100 CC)	PARTICULAS TOTALES Y NEBLINAS DE ACIDO SULFURICO	1 VEZ CADA 6 MESES	ISOCINETICO (MINIMO POR 60 MIN) 2 MUESTRAS DEFINITIVAS	LIQUIDOS
	OPACIDAD	PERMANENTE	CONTINUA OPACIMETRO CON REGISTRADOR COMO MINIMO	LIQUIDOS
	NOx	PERMANENTE	CONTINUA QUIMILUMINISCENCIA CON REGISTRADOR COMO MINIMO	LIQUIDOS Y GASEOSOS
	SO2	PERMANENTE	CONTINUA INFRARROJO NO DISPERSIVO, ULTRAVIOLETA O EQUIVALENTE CON REGISTRADOR COMO MINIMO	LIQUIDOS
	CO	PERMANENTE	CONTINUA INFRARROJO NO DISPERSIVO O EQUIVALENTE CON REGISTRADOR COMO MINIMO	LIQUIDOS Y GASEOSOS
	O2	PERMANENTE	CONTINUA CAMPO MAGNETICO O EQUIVALENTE CON REGISTRADOR COMO MINIMO	LIQUIDOS Y GASEOSOS

TABLA VII.5 PODER CALORIFICO

COMBUSTIBLE	MJ/Kg DE COMBUSTIBLE
GAS NATURAL	52
GAS L.P.	48
BUTANO	49
PROPANO	50
BUTILENO	49
PROPILENO	49
METANO	55
PETROLEO DIAFANO	46
GASOLINA	47
DIESEL	48
GASOLEO	42
COMBUSTOLEO PESADO	42
COMBUSTOLEO LIGERO	42

**TABLA VII.6 CONTAMINANTES Y SUS METODOS DE MEDICION PARA FUENTES FIJAS
(METODO EQUIVALENTE)**

CONTAMINANTE	METODO DE MEDICION	METODO EQUIVALENTE
PARTICULAS SUSPENDIDAS TOTALES	<ul style="list-style-type: none"> • ISOCINETICO • HUELLA O MANCHA DE HOLLIN • OPACIDAD 	
OXIDOS DE NITROGENO	<ul style="list-style-type: none"> • QUIMILUMINISCENCIA 	<ul style="list-style-type: none"> • INFRARROJO NO DISPERSIVO
OXIDOS DE AZUFRE	<ul style="list-style-type: none"> • VIA HUMEDA (TORIN) • INFRARROJO NO DISPERSIVO 	<ul style="list-style-type: none"> • FLUORESCENCIA PULSANTE • ULTRAVIOLETA
MONOXIDO DE CARBONO	<ul style="list-style-type: none"> • INFRARROJO NO DISPERSIVO • CELDAS ELECTROQUIMICAS 	
BIOXIDO DE CARBONO	<ul style="list-style-type: none"> • INFRARROJO NO DISPERSIVO • CELDAS ELECTROQUIMICAS 	<ul style="list-style-type: none"> • ORSAT (O₂, CO₂ Y CO)
OXIGENO	<ul style="list-style-type: none"> • CELDAS ELECTROQUIMICAS • PARAMAGNETICOS 	<ul style="list-style-type: none"> • ORSAT (O₂, CO₂ Y CO) • OXIDOS DE ZIRCONIO (CELDAS ELECTROQUIMICAS)

Las tablas anteriores son del año de 1993, por lo cual, a continuación, se citarán las tablas más recientes que rigen los parámetros de emisiones contaminantes. La tabla VII.7 y VII.8 sustituyen a la tabla VII.1 y las demás tablas permanecen igual.

TABLA VII.7 1994 AL 31 DE DICIEMBRE DE 1997

CAPACIDAD DEL EQUIPO DE COMBUSTION M/R	TIPO DE COMBUSTIBLE EMPLEADO	CANTIDAD DE HUMO Número de manchas o manchas	PARTICULAS (PST) mg/m ³ (b/d) (10 ⁶ kcal) (11/12)			DÍÓXIDO DE AZUFRE ppm V (b/d) (10 ⁶ kcal) (11/12)			ÓXIDOS DE NITRÓGENO ppm V (b/d) (10 ⁶ kcal) (11/12)			EXCESO DE AIRE DE COMBUSTION % (10/11)
			ZMCM	ZC (1)	RP	ZMCM	ZC (1)	RP	ZMCM	ZC (1)	RP	
			NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
Hasta \$ 150 C150cc	Combustibles o sólidos	4	NA	NA	NA	1100 (4.04)	2100 (7.61)	2500 (8.81)	NA	NA	NA	60
	Otros líquidos	3	NA	NA	NA	1100 (4.04)	2100 (7.61)	2500 (8.81)	NA	NA	NA	
	Gaseosos	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
150 a 1000 De \$ 150 a \$2.000	Líquidos	NA	100 (0.34)	426 (1.50)	600 (2.13)	1100 (4.04)	2100 (7.61)	2500 (8.81)	170 (0.58)	300 (1.03)	400 (1.36)	50
	Gaseosos	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	220 (0.75)	300 (1.03)	400 (1.36)	
	Líquidos	NA	100 (0.34)	426 (1.50)	600 (2.13)	1100 (4.04)	2100 (7.61)	2500 (8.81)	170 (0.58)	300 (1.03)	400 (1.36)	
De \$3.000 a \$10.000	Líquidos	NA	100 (0.34)	426 (1.50)	600 (2.13)	1100 (4.04)	2100 (7.61)	2500 (8.81)	170 (0.58)	300 (1.03)	400 (1.36)	40
	Gaseosos	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	170 (0.58)	300 (1.03)	400 (1.36)	
	Líquidos	NA	100 (0.34)	426 (1.50)	600 (2.13)	1100 (4.04)	2100 (7.61)	2500 (8.81)	170 (0.58)	300 (1.03)	400 (1.36)	
Mayor de \$10.000	Sólidos	NA	70 (0.24)	326 (1.17)	435 (1.55)	1100 (4.04)	2100 (7.61)	2500 (8.81)	160 (0.54)	280 (0.93)	400 (1.36)	30
	Líquidos	NA	70 (0.24)	326 (1.17)	400 (1.41)	1100 (4.04)	2100 (7.61)	2500 (8.81)	160 (0.54)	280 (0.93)	400 (1.36)	
	Gaseosos	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	160 (0.54)	280 (0.93)	400 (1.36)	

TABLA VII.8 1o. ENERO DE 1998 EN ADELANTE

CAPACIDAD DEL EQUIPO DE COMBUSTION M/R	TIPO DE COMBUSTIBLE EMPLEADO	CANTIDAD DE HUMO Número de manchas o manchas	PARTICULAS (PST) mg/m ³ (b/d) (10 ⁶ kcal) (11/12)			DÍÓXIDO DE AZUFRE ppm V (b/d) (10 ⁶ kcal) (11/12)			ÓXIDOS DE NITRÓGENO ppm V (b/d) (10 ⁶ kcal) (11/12)			EXCESO DE AIRE DE COMBUSTION % (10/11)
			ZMCM	ZC (1)	RP	ZMCM	ZC (1)	RP	ZMCM	ZC (1)	RP	
			NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
Hasta \$ 150	Combustibles o sólidos	2	NA	NA	NA	550 (1.94)	1,100 (4.04)	2,200 (8.16)	NA	NA	NA	50
	Otros líquidos	2	NA	NA	NA	550 (1.94)	1,100 (4.04)	2,200 (8.16)	NA	NA	NA	
	Gaseosos	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
De \$ 150 a \$3.000	Líquidos	NA	15 (0.10)	350 (1.25)	450 (1.61)	550 (1.94)	1,100 (4.04)	2,200 (8.16)	150 (0.51)	150 (0.51)	150 (0.51)	40
	Gaseosos	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	150 (0.51)	150 (0.51)	150 (0.51)	
	Líquidos	NA	15 (0.10)	350 (1.25)	400 (1.41)	550 (1.94)	1,100 (4.04)	2,200 (8.16)	150 (0.51)	150 (0.51)	150 (0.51)	
De \$3.000 a \$10.000	Líquidos	NA	15 (0.10)	350 (1.25)	400 (1.41)	550 (1.94)	1,100 (4.04)	2,200 (8.16)	150 (0.51)	150 (0.51)	150 (0.51)	30
	Gaseosos	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	150 (0.51)	150 (0.51)	150 (0.51)	
	Líquidos	NA	15 (0.10)	350 (1.25)	400 (1.41)	550 (1.94)	1,100 (4.04)	2,200 (8.16)	150 (0.51)	150 (0.51)	150 (0.51)	
Mayor de \$10.000	Sólidos	NA	10 (0.03)	250 (0.88)	350 (1.25)	550 (1.94)	1,100 (4.04)	2,200 (8.16)	150 (0.51)	150 (0.51)	150 (0.51)	25
	Líquidos	NA	10 (0.03)	250 (0.88)	350 (1.25)	550 (1.94)	1,100 (4.04)	2,200 (8.16)	150 (0.51)	150 (0.51)	150 (0.51)	
	Gaseosos	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	150 (0.51)	150 (0.51)	150 (0.51)	

CAPITULO VIII MEDIDAS PRACTICAS PARA OPTIMIZAR LA COMBUSTION

VIII.1 RAZONES DEL USO DEL COMBUSTIBLE GASEOSO Y NO SOLIDO NI LIQUIDO EN LA COMBUSTIÓN.

Generalmente, en las industrias se utilizan los combustibles en sus tres estados: gaseoso, líquido y sólido; pero por su mayor facilidad de manejo y economía se ha optado por el uso de los combustibles gaseosos, principalmente el gas natural.

El empleo del gas natural en la combustión en general presenta notorias ventajas respecto a los combustibles industriales sólidos y líquidos por las siguientes razones :

1 - Facilidad para un buen control de la combustión.

Debido a que el combustible (gas) y carburante (aire) están en la misma fase, se pueden regular las cantidades de ambos que llegan al quemador con mayor facilidad que en el caso de combustibles líquidos y sólidos.

2.- La mezcla de carburantes y combustibles gaseosos es mas perfecta.

Aumenta la probabilidad de reacción entre moléculas del combustible y el oxígeno del aire al estar en mas estrecho contacto.

3.- Menores excesos de aire para completar la combustión.

Las condiciones favorables de mezcla garantizan la velocidad de la reacción de combustión y descartan la presencia de inquemados, , permitiendo altos rendimientos en la combustión.

4.- Mejores condiciones para procesos en hornos industriales.

El mejor control de la combustión permite así mismo el manejo adecuado de las temperaturas que a su vez mejoran las condiciones durante el desarrollo del proceso.

5.- No se presentan problemas de corrosión.

Los productos de su combustión están exentos de los óxidos de azufre y otras impurezas, como ocurre con los otros combustibles.

6.- No produce cenizas ni emite partículas sólidas a la atmósfera.

Al no contener sólidos, evita los problemas que ocasionan las cenizas en el interior de equipos, la necesidad de su evacuación y la contaminación ambiental de partículas finas.

7.- Mayores posibilidades de recuperación de calor.

El bajo punto de rocío de los gases y la ausencia de óxidos de azufre, permiten disminuir las temperaturas de chimenea.

8.- Menores gastos de mantenimiento.

Los gastos de mantenimiento resultan un 20 % más bajos que en las instalaciones con combustibles líquidos y 40 % menores que en el caso de combustibles sólidos.

9.- Menor inversión para las industrias de nueva instalación.

Al no ser necesarias las instalaciones para mantenimiento, transporte y preparación que resultan necesarias para otros combustibles, la inversión para otras instalaciones resulta menor.

10.- Reduce el choque térmico y pérdidas de rendimiento.

Al mejorar las condiciones de continuidad de operación reduciendo el número de paradas y encendidos, favorece los rendimientos y la mayor duración de refractarios.

Como desventaja de la utilización del gas natural puede considerarse la mayor proporción de volúmenes de gases de combustión que produce con respecto al carbón y el petróleo residual para la misma cantidad de unidades térmicas.

VIII.2 MODIFICACION DE LA COMBUSTIÓN

Combustión con una relación baja de aire/combustible la operación será mas baja de lo que se cree. Generalmente se suministra más aire a las flamas que el requerido teóricamente. Al eliminar tal exceso de aire, la formación del NOx térmico puede ser abatida. Sin embargo, relaciones bajas de aire/combustible, pueden inducir que una combustión imperfecta incremente los contaminantes tales como hollin, monóxido de carbono e hidrocarburos inquemados.

Para evitar estos tipos de problemas se desarrolló una serie de modificaciones de la combustión para mejorarla y controlarla mas eficientemente tales modificaciones se enuncian como sigue :

A) Combustión de dos etapas

Como ya se indico, el efecto de un bajo exceso de aire en la formación de NOx es importante, a partir de esto se puede aprovechar este efecto para aplicarse a la combustión en dos etapas.

El proceso de dos etapas consiste en llevar a cabo una combustión primaria con aire insuficiente (relación de aire 0.8-0.9). En la etapa siguiente se añade el aire necesario para completar la relación requerida de aire hasta que se consiga una combustión perfecta.

La combustión de dos etapas disminuye los NOx térmicos y los NOx combustibles por los siguientes factores :

- 1) Concentración baja de oxígeno en la combustión primaria
- 2) La combustión secundaria reduce ligeramente el tiempo de residencia del gas de combustión.

Las figuras VIII.1 y VIII.2 muestran los generadores de vapor equipados con un sistema de doble combustión. En la figura VIII.1 se puede apreciar que los difusores de aire secundario se colocan

en la parte superior de la pared del horno en la cual se instalan los quemadores. Para generadores de vapor pequeños con un solo quemador, como se muestra en la figura VIII.2 los difusores se colocan de manera que formen un círculo alrededor del quemador.

Como se indica en las figuras VIII.3 y VIII.4 los NOx térmicos y los NOx combustibles, se pueden reducir mas eficientemente con relaciones de aire menores en la combustión primaria sin embargo, si esta relación es muy baja se incrementan las emisiones de hollin.

La combustión de dos etapas es mas difícil de adaptar en las calderas de carbón, ya que por la falta de exceso de aire ,podrían ocurrir distribuciones del combustible y del aire que provocarían altas generaciones de CO. Finalmente podemos observar la comparación entre la combustión de una etapa y la combustión de dos etapas en la siguiente figura VIII.5. La cantidad de gas recirculado que se mezcla con el aire nuevo a combustión normalmente fluctúa entre 15 y 20 %. Los resultados obtenidos en hornos domésticos alimentados con petróleo muestran que con un 50 % de recirculación de gases a 15 % de exceso de aire, conduce a una reducción de NOx hasta de un 60 %.. En la figura VIII.5 se puede ver el efecto de la recirculación de gases en la emisión de NOx para el gas natural con 7.5 % de exceso de aire sin precalentamiento

b) Combustión de combustibles pesados y ligeros

Como se muestra en la figura VIII.6, el panel cuenta con quemadores ricos y pobres en combustible, y alternados además con el suministro de aire para cada uno de los quemadores.

Debido a que la flamas de los quemadores ricos en combustibles se queman a una proporción limitada, la temperatura permanece baja y estable. Después se forma parcialmente una atmósfera reductora y por lo tanto, se reducen los NOx térmicos y los NOx combustibles.

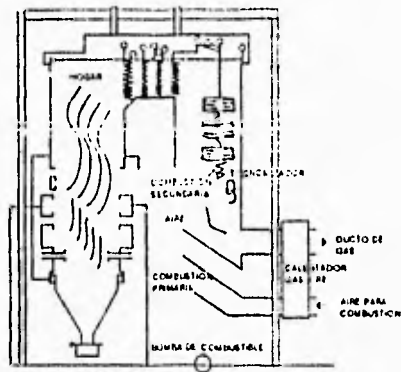


Figura VIII.1 Combustión de dos etapas en generador de vapor.

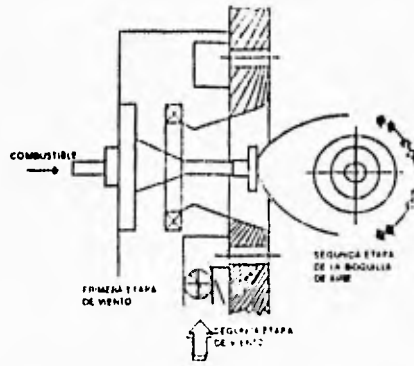


Figura VIII.2 Quemador en dos etapas para un generador de vapor.

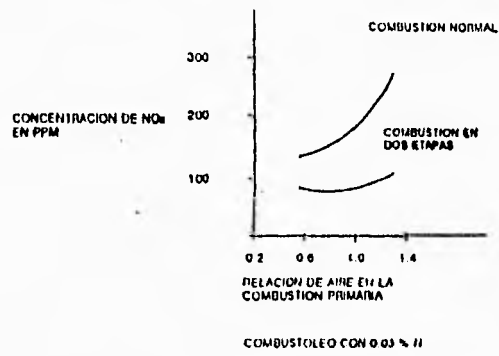


Figura VIII.3 Eficiencia de reducción del NOx-térmico.

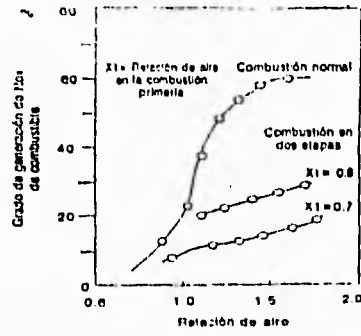


Figura VIII.4 Eficiencia de reducción de NOx de combustible.

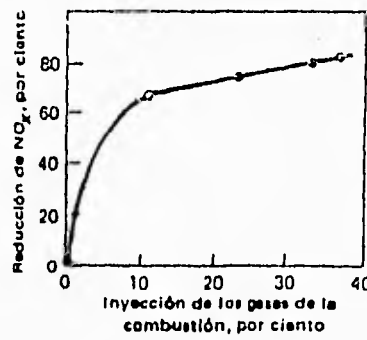


Figura VIII.5 Efecto de la recirculación de gases en la emisión de NOx para el gas natural con 7,5% de exceso de aire sin precalentamiento

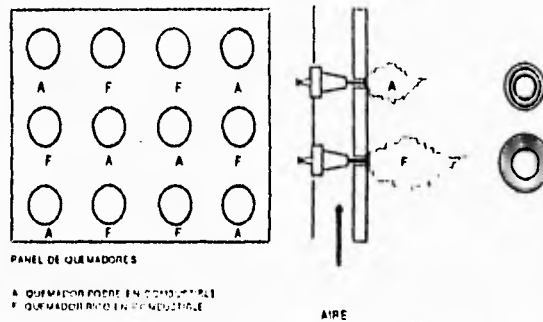


Figura VIII.6 Quemador de combustibles pesados y ligeros.

La razón del suministro de combustible para quemadores ricos en combustible y para los quemadores pobres en combustibles se deben de mantener entre 1.5 y 1.8, si se tiene una relación mayor se puede incrementar la cantidad de hollín y otros combustibles no quemados.

c) Combustión de tres etapas

El proceso de la combustión en tres etapas es de los métodos en los que se necesita de mayor control en cada una de las etapas, pero a su vez brinda como resultado bajas emisiones de NOx.

La combustión de tres etapas se lleva acabo de la siguiente manera :

- 1.- Combustión primaria o parcial
- 2.- Combustión secundaria o de reducción
- 3 - Combustión terciaria o perfecta

En la primera etapa se lleva acabo la combustión con un ligero exceso de aire, en la cual se generan las principales cantidades de NOx térmico y de combustible.

En la segunda etapa sin embargo, los gases llegan con suficiente oxígeno para llevar acabo la reducción del NOx térmico por la inyección de combustible como se muestra en la figura VIII.7, la cual alimenta únicamente a las flamas en la combustión secundaria.

Finalmente en la tercera etapa, se inyecta el aire secundario a las flamas hasta que se obtiene una combustión perfecta, abatiendo la formación de NOx. La figura VIII.8 muestra la eficiencia de reducción de NOx en los quemadores de carbón. En este proceso, se debe tener cuidado de no suministrar aire innecesario en la tercera etapa; si se suministra más aire que el requerido, la temperatura de la flama se elevaria e incrementaría la formación de NOx.

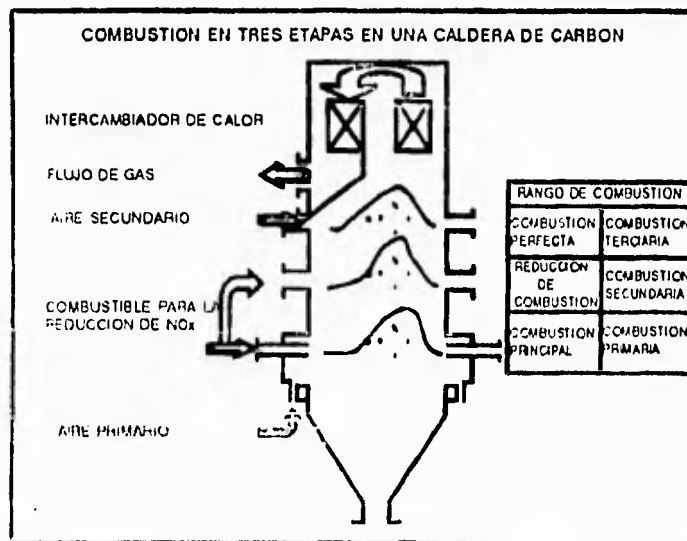


Figura VIII.7 Combustión en tres etapas en una caldera de carbón.

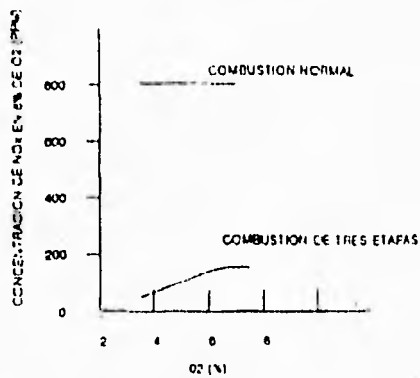


Figura VIII.8 Eficiencia de reducción de NOx en la combustión en tres etapas.

VIII.3 CONDICIONES BÁSICAS QUE UN QUEMADOR DEBE SATISFACER PARA UNA BUENA COMBUSTIÓN.

Desde la concepción del quemador hasta su uso en los generadores de vapor, estos deben de cumplir con ciertas características y condiciones de operación que los restringen a un uso particular. Estas características y condiciones para mejorar la combustión en la cámara se enuncian a continuación:

1.- Elegido en Función del Hogar o Cámara de Combustión y del Proceso.

El diseño o selección del quemador debe elegirse de acuerdo a :

- La forma , dimensiones y temperaturas de las paredes del hogar de combustión.
- El tipo de funcionamiento : continuo o intermitente.
- El tipo de combustible y exceso de aire requerido.

2.- Margen de Regulación Adecuado.

Este indica la relación entre el caudal máximo y mínimo que gasta un quemador. Esta relación es propia de cualquier tipo de quemador y depende fundamentalmente de los siguientes factores:

- Combustible utilizado
- Dimensiones de los conductores de aire y combustible
- Velocidad del aire y del combustible
- Forma de mezcla de los mismos

3.- Estabilidad de Funcionamiento.

Esta depende en gran medida del equilibrio que debe existir entre la velocidad de la mezcla aire-combustible y la de propagación de la llama; si una supera a la otra se producirá un despegue de

llama; o en caso contrario un retroceso de la misma hasta extinguirse en el quemador.

Métodos para estabilizar la llama en el quemador :

- Aumento de la transmisión de calor por conducción utilizando una gran turbulencia en la mezcla aire-combustible y aumentando con ello la velocidad de propagación de la flama.
- Elevando el nivel térmico de la mezcla, lo cual puede lograrse calentando el aire de combustión.
- Instalando un cono invertido a la salida del quemador para provocar un vórtice de recirculación de gases calientes.
- Alargamiento tubular sobre el cabezal para favorecer la mezcla y rápida ignición.
- Empleo de llamas piloto que producen una zona de reignición continua junto a la periferia de la llama principal.

4.- Control Sobre la Forma y Dimensiones de la Flama.

Vienen determinadas fundamentalmente por la potencia del quemador; sin embargo, pueden modificarse dentro de ciertos límites, por una serie de variables entre las que se pueden destacar :

- Grado de turbulencia
- Velocidad de la mezcla
- Exceso de aire
- presión del aire de combustión
- tamaño de las gotas pulverizadas en los combustibles líquidos.

5 - Sistemas de Protección Adecuados.

Los quemadores deben de disponer de sistemas de protección principalmente en los siguientes puntos :

- Puesta en marcha : Antes de la ignición debe de procederse al barrido de la cámara de combustión para evitar el riesgo de explosiones.
- Protección ante el fallo de flama : La pérdida de flama por cualquier causa cortar inmediatamente la alimentación de combustible.
- Bajo nivel de agua en la caldera : La alimentación de combustible debe interrumpirse si el nivel de agua asciende por de bajo del punto de seguridad. Este control es particularmente importante en el caso de calderas pirotubulares.

Deberían producir el paro del quemador :

- Presión mínima de combustible.
- Temperatura mínima del residual
- Falta de aire de combustión
- Presión elevada en la cámara de combustión
- Falta de fluido atomizador.

VIII.4 CONTROL DE LA OPERACION DE LOS QUEMADORES DE BAJO NOX

El control de las condiciones de operación del quemador, como protagonista principal de la combustión, requiere especial cuidado y atención permanente. Para conseguir este propósito resultan importantes las siguientes recomendaciones :

1.- Efectos tales como la suciedad y desgaste en la boquilla del quemador por productos abrasivos del combustible y anomalías en el registro del aire, contribuyen a reducir la eficiencia de la combustión. Por ello los quemadores deben de inspeccionarse frecuentemente.

2.- El propio combustible actúa de agente engrasante del quemador, por lo que no es de extrañar que puedan producirse lodos e incrustaciones en algunas piezas del mismo.

Un aditivo del tipo dispersante sirve para disminuir el efecto del lodo. Los aditivos del tipo disolvente pueden utilizarse en limpieza de quemadores cuando esta se efectúa manualmente. Sin embargo, son mas efectivos los primeros cuando se trata de mantener limpias las piezas del quemador durante su funcionamiento.

3.- El montaje incorrecto del quemador, una vez limpio, puede también dar lugar a un mal funcionamiento, a pérdidas de rendimiento y en casos extremos a averías de arranque. Cambios en el reglaje del quemador pueden obligar por lo general a que haya que reajustar también la regulación de la combustión.

4.- Una purga cuidadosa antes de cada encendido es el único medio de impedir las humaredas. El programa del sistema de enclavamiento del regulador mantiene este ciclo de purga e impide la introducción del combustible, hasta que el numero de barridos necesarios del aire del hogar sea llevados a cabo y verificados. No obstante, los operadores deben cronometrar el ciclo de purgas independientemente, para asegurar diferentes puestas en marcha sin dificultad. Deben asegurarse también que el quemador se enciende inmediatamente y continua quemando. Si los detectores de

llama funcionan correctamente, interrumpirán la alimentación de combustible automáticamente al presentarse una combustión inadecuada. Esto no excluye de que los operadores deban comprobar también la llama en un periodo programado.

5.- Como se ha indicado, es necesario vigilar cada cierto tiempo el estado de la boquillas, por la importancia que representan en el consumo energético. Así, en un sistema con varios quemadores iguales, el tamaño de los orificios de las boquillas de estos pueden tener variaciones que oscilan entre un 5 % más o menos del caudal del combustible. Estas variaciones requerirán de un mínimo de exceso de aire, del 7 % al 10 %, para que los quemadores funcionen sin producir humos, suponiendo que existe una distribución uniforme para cada uno de ellos.

6.- El perfecto conocimiento de las características de diseño del quemador resultará determinante para ajustar su operación correcta y controlar la estabilidad de su operación.

VIII.5 CRITERIOS DE SELECCIÓN DE SISTEMAS DE REGULACIÓN Y CONTROL

Los factores que determinan la conveniencia de selección de un sistema desde el más sencillo hasta el más sofisticado y exacto, son los ahorros potenciales que se pueden lograr, consiguiendo mejores rendimientos y condiciones operativas más estables con sistemas más complejos, haciendo frente a los mayores costos de inversión, operación y mantenimiento que se incrementan en proporción directa.

En la tabla VIII.1 se presentan las variaciones del exceso de aire para los diferentes sistemas, por efecto de las variables de mayor importancia del combustible y del aire carburante.

En la tabla VIII.2 se presenta las variables relativas de precios entre los distintos sistemas de control. El campo de variación según la potencia a controlar, suele ser el 3 % para un valor medio de 5000 th/h (termias/hora) y unos extremos de 2500 y 10000 th/h.

Con los datos de este cuadro y el anterior se debe elegir en cada caso particular, el tipo de control a efectuar, teniendo en cuenta los ahorros conseguidos y las inversiones requeridas para conseguir una rentabilidad óptima.

**PROCEDIMIENTOS PARA AJUSTAR LOS CONTROLES EN EL GENERADOR DE VAPOR
PARA BAJOS EXCESOS DE OXIGENO.**

- 1.- Colocar el sistema de control en manual y tener la relación de calor en el generador de vapor bien conocida.
- 2.- Después de la estabilización, observar las condiciones de la flama y hacer una tabla de resultados.
- 3.- Subir el exceso de oxígeno de 1 a 2 % dejando el tiempo de estabilización y hacer un escrito de las lecturas.
- 4.- Reducir el exceso de oxígeno y en pequeños ratos observar las figuras de la flama y las condiciones de esta. Dejar la unidad de estabilización siguiendo cada cambio y el récord de datos.
- 5.- Continuar con la reducción del exceso de aire hasta que el mínimo exceso de Oxígeno sea requerido.
- 6.- Mezclar el CO con el oxígeno.
- 7.- Comparar el mínimo valor esperado de exceso de oxígeno con el valor abastecido por la manufactura del generador de vapor.
- 8.- Establecer el margen de exceso de oxígeno por encima del mínimo y reiniciar con los controles del quemador manteniendo este nivel. Esta es la operación ZONA DE AMORTIGUACIÓN la cual esta basada sobre una estimación de las cantidades de repartición en el sistema de control y los efectos de otras influencias como temperatura y presiones.
- 9.- Repetir pasos 1-8 para cada relación de calor que sea considerada.
- 10.- Después de que estos ajustes sean hecho, verificar la operación de estos engastes, por la rápida acción de los recogedores de cargas y gotas. Si las condiciones fueron encontradas indeseables reiniciar los controles.

VIII.6 MÉTODOS PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DEL GENERADOR DE VAPOR

A medida de que la eficiencia en los generadores de vapor es muy baja se han implementado nuevos métodos para mejorarla además, de que con estas de paso se introducen las formas que nos lleven a reducir los costos de operación y los sistemas del mismo. Estas opciones son el resultado de una serie de ensayos e investigaciones tanto a nivel comercial, institucional e industrial en las plantas a nivel nacional y mundial.

Aunque se presentan mas de 50 opciones para mejorar la eficiencia , el impacto del combustible para cada cambio propuesto se pueden incluir en

- a) Costos y beneficios de los cambios propuestos
- b) Seguridad
- c) Impacto que existen en los sistemas y operaciones del generador de vapor.

En más casos, el análisis completo de la operación de los generadores de vapor en las plantas, es necesario que se identifiquen las causas del gasto de energía y que a su vez se conozcan las soluciones a los costos efectivos.

Por lo tanto podemos escribir los métodos con dos metas en consideración, la primera es que sirvan de guía para identificar los problemas del gasto de energía en la combustión para cualquier tamaño de generador de vapor, y segundo que puedan servir de instrumento educacional mostrando lo lógico para así acercarnos más a la complejidad del problema.

A continuación se darán a conocer solamente algunos de los métodos para mejorar la eficiencia, los cuales son considerados dentro de todos los de mayor relevancia por su aplicación constante.

- 1 - Manejo de las Cargas en el Generador de Vapor
- 2 - El sistema 2M : Medida y Manejo

- 3.- Selección de Combustible
- 4.- Oxígeno Recortado
- 5.- Afinado del Generadores de Vapor
- 6.- Monóxido de Carbono Recortado
- 7.- Válvula Característica de Combustible
- 8.- Control del Sobrecalentamiento de la Corriente de Aire
- 9.- Bajo Exceso de Aire en el Quemador
- 10.- Enriquesimiento de Oxígeno
- 11.- Aditivos de Aceite Combustible
- 12.- Reemplazo de Quemadores Atmosféricos con Quemadores de Poder
- 13.- Tipo de Retención de Flama Caliente en los Quemadores
- 14.- Reducción del Porcentaje de combustible caliente
- 15.- Reemplazo de los controles On/Off con Controles de Modulación
- 16.- Conversión del aire o vapor atomizado quemados
- 17.- Calor Recobrado
- 18.- Combustión Sumergida
- 19.- Uso de Vapor para Controlar Equipo Semejante a Bombas y Ventiladores

1.- Manejo de Cargas del Generador de Vapor

Costo : Alto

Potencial Ahorrado : 2 % a 50 % o mas

Descripción : teniendo información específica de la eficiencia para cada generador de vapor, se puede proporcionar un uso mas eficiente para las cargas. También, usando generadores de vapor pequeños, los cuales mantienen una alta eficiencia durante periodos de carga ligeras, las pérdidas están asociadas a los generadores de vapor largos que pueden ser eliminadas. La respuesta general es usar el mayor número posible de los generadores de vapor para igualar el sistema requerido.

Algunas plantas generadoras de vapor por su carga son de diferentes tamaños, los generadores de vapor pequeños no son utilizados para cargas ligeras en verano o en periodos de producción parcial de la planta. Las figuras VIII.9 y VIII.10 muestran los perfiles de carga para un sistema de calentamiento común donde el generador de vapor a plena carga alcanza un 20 % del tiempo de carga y a media carga de mas del 55 % al año. Comúnmente los generadores de vapor tienen una eficiencia pobre para bajas cargas, por eso este tipo de operaciones pueden ser ineficientes.

El término de eficiencia anual para la utilización del combustible figura VIII.11 es usado para describir el efecto de este problema mas correctamente. Constantemente, los generadores de vapor con eficiencias medidas de casi 80 % han sido creados para ser operados por lo menos con un 60 % de eficiencia sobre una base anual.

EFICIENCIA DEL GENERADOR DE VAPOR PARA DIFERENTES CARGAS

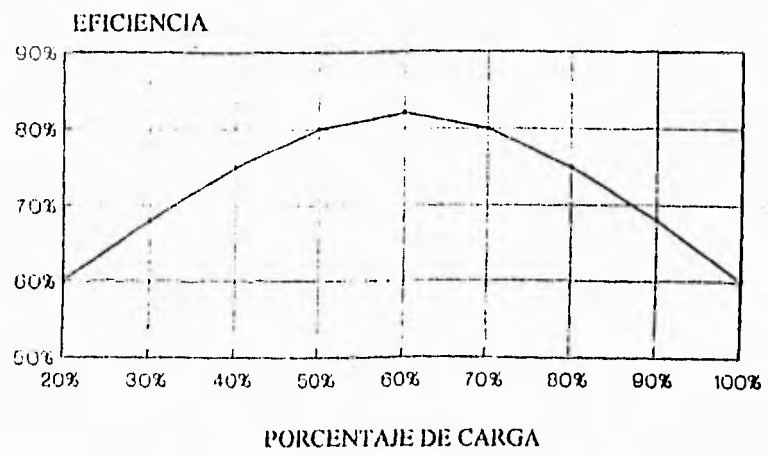


Figura VIII.9

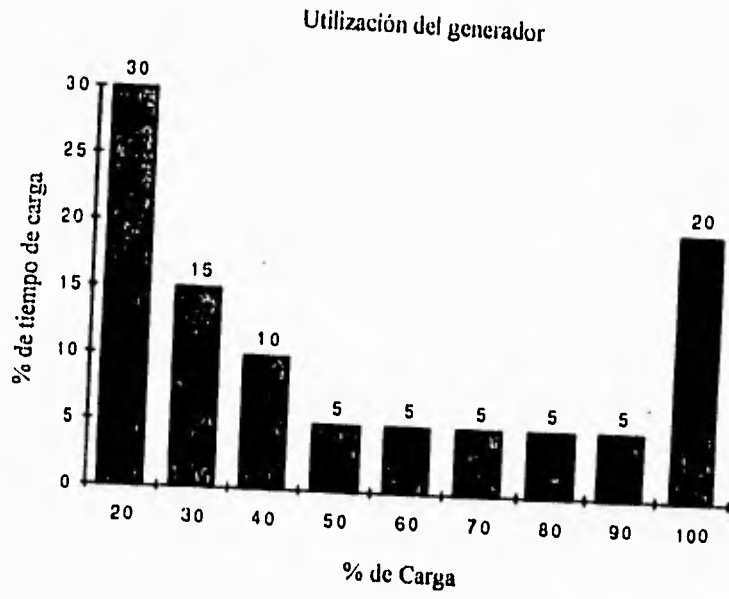


Figura VIII.10

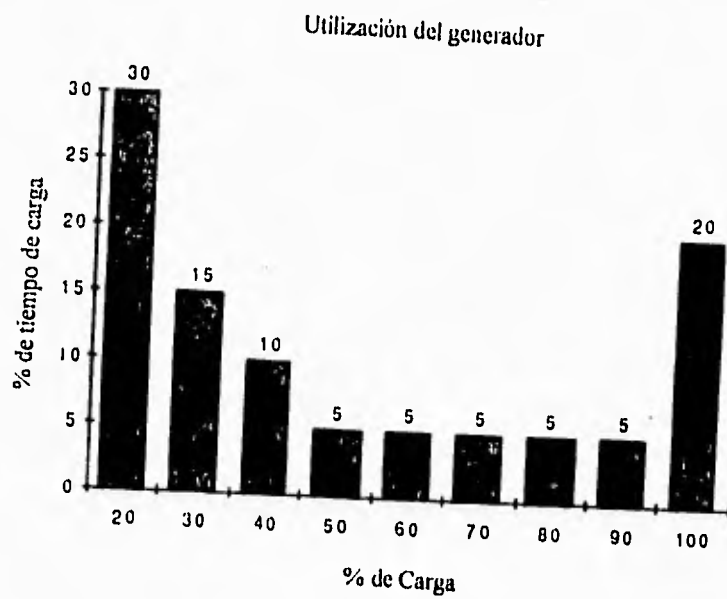


Figura VIII.10

Curvas de eficiencia
con carga parcial

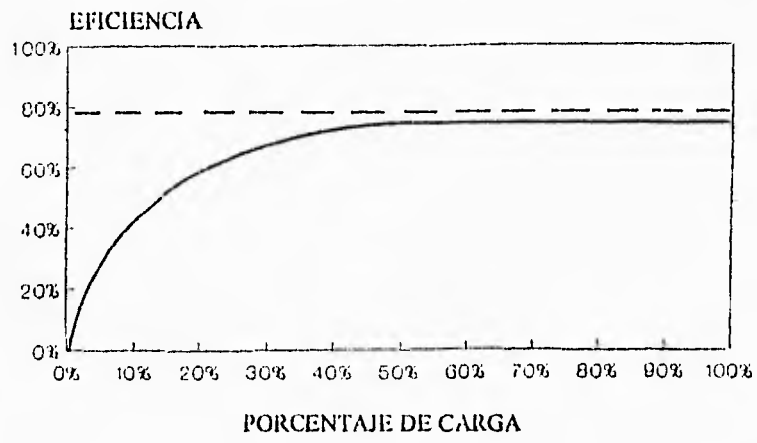


Figura VIII.11

2.- Medida 2M : Medida y Manejo

Costo : Moderado

Potencial ahorrado : Grande

Descripción : Ese tiene accesos ilimitados de energía por su uso, porque cuando se abren las válvulas la energía es disponible e inmediata para su uso.

Los grandes ahorros tienen que ser recordados desde el uso de monitores de energía. El medidor de flujo y otros instrumentos son instalados y monitoreados. Las bombas y los motores corren donde más se necesita, el vapor y los equipos de proceso se dejan apagados y los generadores de vapor pueden ser calentados con carga y con o sin ellos. El listado parcial que se da en este proceso, puede ser dado sin responder al uso de energía sin incentivos lo que puede salvar una gran utilidad en dólares para el uso de este método.

Ventajas y Desventajas

Los instrumentos muchas veces son costosos y no se cuentan para cualquier ahorro de energía, ellos son sin embargo solo una ruta para terminar problemas, las fuerzas disponibles pueden ser muy necesarias en otra partes que deben ser asignadas para recoger e interpretar los datos desde el campo de las mediciones. Es justo que el buen manejo se haga hasta saber que está pasando con la energía, asignando responsabilidades para este uso y así controlar este sensible camino.

3.- Selección de Combustible

Costo : Bajo costo, análisis básicos y toma de decisiones

Alto costo, si el mejor equipo se cambia en el interior del generador de vapor

Descripción : La línea de fondo es produciendo vapor para calor y fuerza con el más bajo costo posible. El primer vistazo de lo que se podría hacer, es comprar más aditamentos usando el combustible con mas BTUS por dollar. Ese tipo de registro muestra que también está el carbón y el aceite pesado en el generador de vapor para posteriormente comprar más y mejor.

Bajo estas condiciones se tiene que saber más acerca de la situación del BTUS por dollar. Eso es también la conversión de eficiencia según se muestra en la siguiente tabla la cual relata los problemas de contaminación y transportación que se deben de considerar sabiendo que las ventajas de los costos y los problemas asociados con los diferentes combustibles pueden llevar a informar sobre las decisiones que se tomen.

Tabla Conversión de Energia con Diferentes Combustibles

Accite combustible No 6	85.95 %
Aceite combustible No 2	84.95 %
Gas natural	81.30 %
Propano	83.45 %
Madera	71.11 %
Lignito	80.86 %
Bituminoso	87.42 %
Antracita	89.36 %
Metano	81.20 %
Hidrogeno	77.47 %

Análisis del Costo Real del Vapor

Combustible	Costo x unidad	Costo x millón BTU	Eficiencia esperada	Costo por millón de BTU o 1000 lb de vapor
Madera		\$ 1.00	70 %	\$ 1.43
Carbón	\$ 40/ton	\$ 1.67	80 %	\$ 2.08
Gas Natural	\$ 0.287/term	\$ 2.87	80 %	\$ 3.58
Aceite comb 6	\$ 0.5/gal	\$ 3.26	85 %	\$ 3.85
Aceite comb 2	\$ 0.5	\$ 3.57	84 %	\$ 4.25
Electricidad	\$ 0.04/kwh	\$ 11.72	97 %	\$ 12.08

Ventajas y Desventajas : Un análisis completo pudo ser acabado a tiempo especialmente si la planta hubiera tenido que ser reconfigurada a otro tipo de quemadores de combustible pero por otro lado el ir a través de las perturbaciones puede ser poco provechoso.

4 - Recorte de Oxígeno

Costo : Moderadamente bajo

Potencial Ahorrado : Moderado

Descripción : Hay muchos factores que pueden influir e introducir errores dentro de la relación aire/combustible tales como : las propiedades del cambio del combustible, temperatura del aire, respuesta del sistema de control, presión del combustible y desempeño del quemador. Un sistema de recorte de oxígeno puede automáticamente y continuamente compensar a las variables en el proceso de combustión, asegurando que el generador de vapor sea programado para operar cerca de una eficiencia óptima.

Ventajas y Desventajas

Sin recorte de oxígeno los altos niveles de exceso de oxígeno son necesarios para compensar muchos errores originados en el proceso de combustión; este exceso de oxígeno puede gastar una gran cantidad de energía. Los sistemas de recorte de oxígeno no exigen el nivel de operación más eficiente. Algunas latitudes deben ser dadas en la realización de este engaste operacional. Entonces esto no termina por arriba de las eficiencias por que también incluye una zona de amortiguamiento. Además, el sistema de recorte de oxígeno debe ser mantenido en buenas condiciones de operación y calibrado, adicionando a la planta un desafío de mantenimiento (figura VIII.12).

5.- Afinado del Generador de Vapor

Costo : Alto

Potencial Ahorrado : 2 % a 20 %

Descripción : Para un buen afinado se usa un equipo de pruebas que sea preciso para detectar y corregir las pérdidas por exceso de aire, por combustible no quemado , hollín, y las altas temperaturas en la chimenea.

El tiempo real de uso de los instrumentos de medición que registran los valores de oxígeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono, combustibles y temperaturas en la chimenea dependen del estado y la operación del generador de vapor. Estos instrumentos son usados para restaurar la eficiencia en condiciones normales de operación según la figura VIII.13. Para probar el sistema de control y el quemador se ajustan y reparan para optimizar la alimentación como gas combustible figura VIII.14 y aceite combustible figura VIII.15

Ventajas y Desventajas : Para proponer un manejo de una planta de vapor y controlar sus pérdidas es necesario afinarla regularmente y checar la eficiencia de la combustión.

Recorte de Oxígeno

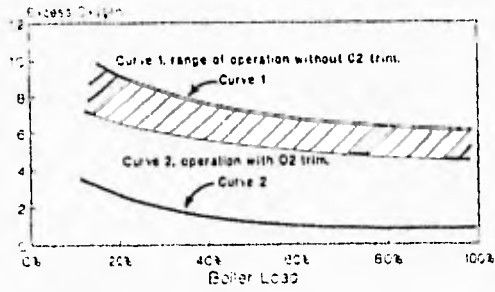


Figura VIII.12

Monóxido de carbono

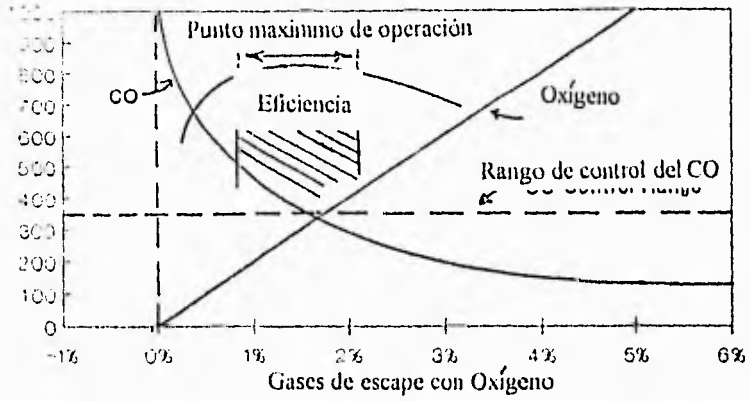


Figura VIII.13

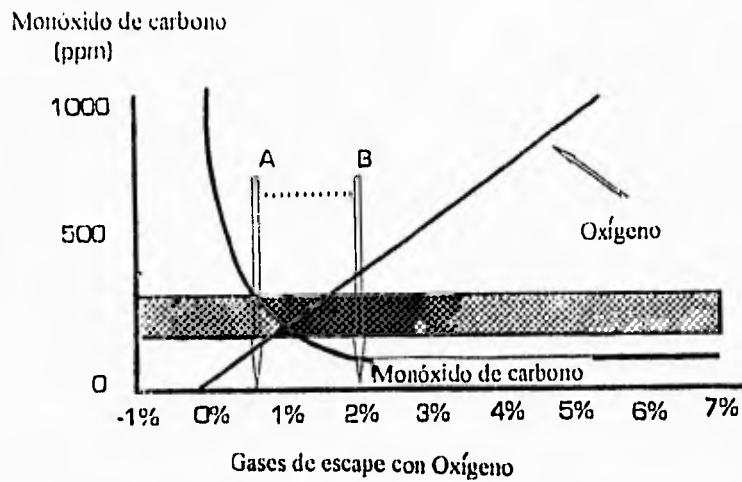


Figura VIII.114

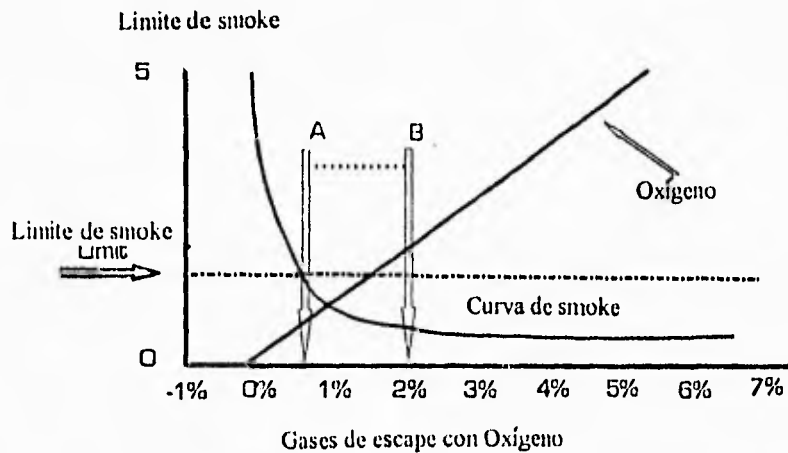


Figura VIII.15

6.- Recorte de Monóxido de Carbono

Costo : Alto

Potencial Ahorrado : moderado

Descripción : El mayor problema con el sistema de recorte del oxígeno es que no puede otorgar fuera del punto mas alto de la eficiencia de operación y debe ser operado poniendo puntos fijos de oxígeno. Por esta razón un combustible que es gastado en la zona de amortiguamiento es programado dentro de la operación de sistemas de recorte de oxígeno. Una medida de Monóxido de carbono y sistema de recorte es designada para solicitar mas eficiencias del nivel de operación sobre una base continua, asegurando las mas posibles eficiencias de operación (Figura VIII.16).

Ventajas y Desventajas : El recorte es más costoso y requiere de más mantenimiento. En el pasado ha tenido una pobre rehabilitación del récord en la combustión de los gases del medio ambiente, pero bajo correctas condiciones se pueden ahorrar gastos. Estos son instrumentos sensitivos que requieren especial atención en calibración y mantenimiento. Los sistemas de recorte de monóxido de carbono proporcionan el mejor aprovechamiento cuando se restituyen todas las partes del proceso de combustión para que operen perfectamente.

7.- Válvula característica de combustible

Costo: Bajo

Potencial ahorrado: 2% a 12%

Descripción: Una válvula característica de combustible se muestra en la figura VIII.17 las cuales han tenido una serie de ajustes los cuales son usados para encontrar la relación del aire/combustible a través de los rangos de carga. Sin esos tipos de válvulas se darán altos sonidos que serán imposibles de evitar. Por otro lado si los servicios de los instrumentos son valuados correctamente, los problemas mecánicos pueden ser desarrollados en el quemador y en los

sistemas de control, siendo necesaria una válvula para cada combustible empleado.

La razón de emplear una válvula característica de combustible puede ser que es muy útil, llegando a ser aparente cuando el combustible presenta curvas características que son comparadas con las del aire.

Ventajas y Desventajas : Si los bajos costos de operación una mejor inversión pueden ser hechos para la optimización de la combustión en los generadores de vapor tipo paquete, estos se harán generalmente para las válvulas características del combustible para cada combustible caliente de cada sistema.

8.- Control del Sobrecalentamiento de la Corriente de Aire

Costo : Bajo

Potencial Ahorrado : Moderado (2 % a 10 %)

Una de las primeras y simples ideas usadas para el control del exceso de aire, control de la corriente de aire saliente. Por que para los cambios de aire en los días fríos y calientes y la falta de un preciso control de estas, se tendría que experimentar en dampers barométricos, ahora bien los sistemas que operan con corrientes de aire saliente mantienen constante la presión negativa en la cámara caliente; esas condiciones preestablecidas para el control de la relación de aire/combustible se usan también en los sistemas de control de cualquier índole y en cualquier generador de vapor (Figura VIII.18).

Ventajas y Desventajas : El control de la corriente de aire caliente es simple, de bajo costo y más barato que en el proceso de recorte de oxígeno.

Eficiencia de la Combustión
Relación Oxígeno-CO

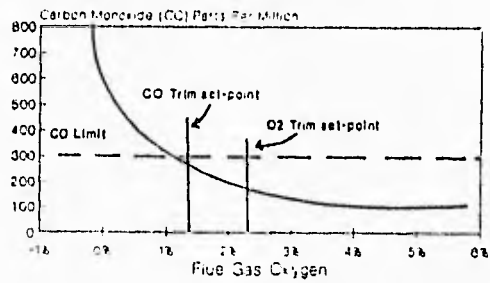
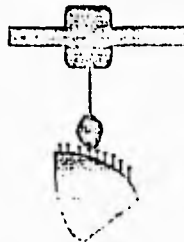


Figura VIII.16

Válvula de combustible



CAM
característico

Figura VIII.17

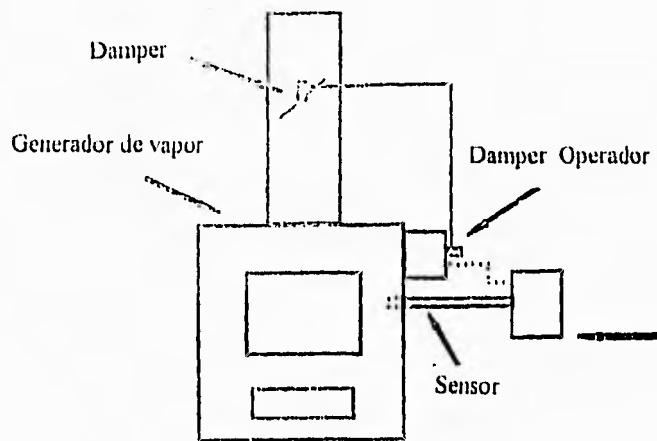


Figura VIII.18

9.- Bajo Exceso de Aire en el Quemador.

Costo : Moderado o Alto

Potencial Ahorrado : Moderado o Alto

Descripción : Como, a buena materia no se tiene muy bien en los controles, estos son como los sistemas de recorte, en los cuales los quemadores últimamente llevan los niveles de control de aire. Los quemadores antiguos no pueden ser diseñados con los bajos excesos de aire, por que pueden tener gastos fuera del punto donde los niveles de exceso de aire no son largos posiblemente.

La solución es instalar otro quemador el cual puede operar con bajos excesos de aire o vapor siendo, el quemador de bajo NOx el único en el cual se puede llevar acabo esta operación.

Ventajas y Desventajas : Alto costo de diseño para los generadores de vapor

10.- Enriquecimiento de Oxígeno

Costo : Variado

Ahorro : Moderado o pequeño

Descripción : La sustitución del oxígeno por el aire de combustión el cual contiene solo 20.9% de oxígeno reduce el volumen de calor absorbiendo el nitrógeno que fluye a través de los procesos de combustión y por consiguiente, reduce las pérdidas del flujo de gas.

La energía ahorrada debe ser medida repitiendo el costo del oxígeno y el costo que contempla adicionalmente las precauciones para una mayor seguridad de funcionamiento.

El oxígeno que se usa en la práctica y el cual enriquece el calor industrial es aquel que está en la combustión del aire normalmente desde 21 % a 25 % o 30 % respectivamente.

Si es preferible que se haga un premezclado con el aire de inyección este método se desechará de la práctica. La justificación económica para el uso del oxígeno que se da, es muchas veces marginal a menos que el oxígeno usado facilite el ahorro de la capacidad.

Ventajas y Desventajas : El buen ahorro de energía es posible por seguridad, siendo un factor importante en la mezcla del oxígeno con el aceite combustible.

11.- Aditivos en Aceite Combustible

Costo : bajo

Potencia ahorrada : baja arriba del 2 %

Descripción : Las tres clases de aditivos combustibles son :

Clase I : Es la que maneja los combustibles incluyendo los grasos impidiendo los de goma, detergentes, metales reactivados, estabilizador de calor, reducción del punto de servicio antiestético y componentes antiácidos impidiendo la corrosión.

Clase II : Aditivos en la combustión para mejorar la misma y la reducción de los contaminantes; en mejoramiento de la combustión se reduce el humo y las partículas tales como carbono, hidrocarburos, NOx y los ácidos de azufre.

Clase III : Tratamiento de aditivos en la Post-Flama la cual incluye remoción de hollín, aditivos y control en el hogar de corrosión y depósito de escoria, los aditivos engrandecen la colección de partículas y SOx

Ventajas y Desventajas : Si el punto de humo puede ser mejorado es posible que se tengan bajos niveles de exceso de aire. En caso de que se tenga bajas cantidades de hollín, y las paredes de la cámara estén sucias se pueden mantener bajas temperaturas. Sin ambas condiciones se mantienen los aditivos pueden ayudar a mejorar la eficiencia a mas del 2 % preestablecido.

12 - Reemplazo de los Quemadores Atmosféricos por Quemadores de Poder

Costo : Moderado

Potencial Ahorrado : Moderado

Descripción : El tipo de quemadores atmosféricos prácticamente no controlan los excesos de aire y los bajos lotes de calor se darán durante el desactivamiento del ciclo, si no se instalan dampers.

En otros manuales, el exceso de aire y las pérdidas pueden ser mas controladas con quemadores de poder el cual se enlazan eléctricamente con los controles, accionando el motor del ventilador y los dampers automáticamente.

Ventajas y Desventajas : Los tipos de quemadores atmosféricos no tienen control de los excesos de aire. Los niveles de exceso de aire muchas veces son medidos en niveles extremadamente grandes. La adición es por que ellos usan aire que es contaminado en la zona de combustión por los efectos de la chimenea, ese no es un camino positivo para prevenir el enfriamiento que puede ser absorbido desde el generador de vapor donde no es calentado.

Los quemadores de poder tienen dos claras ventajas, una es que pueden ser ajustados para el control de los bajos excesos de aire y la otra es que se pueden cerrar los dampers durante el apagado del ciclo guardando el calor en el generador de vapor.

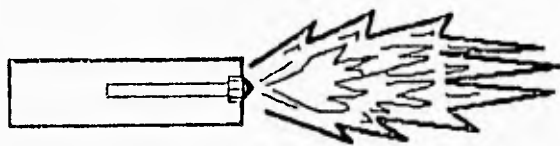
13.- Quemadores del tipo de retención de flama

Costo : Moderado

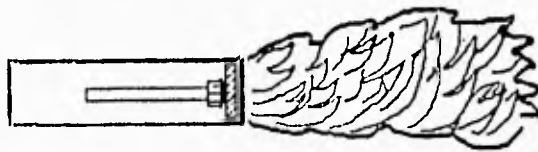
Potencial Ahorrado : Bajo (con unidades nuevas)

Descripción : Sin una buena mezcla de aire/combustible, los quemadores de aceite caliente requieren las mas altas cantidades de exceso de aire. La cabeza de retención del quemador provee la mejor mezcla de aceite y aire de combustión, reduciendo los requerimientos de exceso de aire (figura VIII.19). La aplicación de esta opción depende de un grado mayor sobre la existencia de los niveles de exceso de aire. Esta opción debe ser considerada cuando se reemplace el equipo viejo o en la fase de diseño de los sistemas mecánicos. El departamento de los EUA encontró mejoramiento en la eficiencia desde 5.9 a 12.7 % cuando la alta velocidad de retención de la flama de la cabeza del quemador fueron usadas sobre unidades standard de calor.

Ventajas y Desventajas : Este es un generador pequeño y ltrono opcional. La flama de retención de la cabeza de los quemadores deben ser especificados para cualquier nueva compra. Deben estar disponibles como una opción si la manufactura debe rediseñarse de modelos antiguos. Este es un articulo de bajo costo que puede reducir el exceso de aire.



Flama convencional del quemador .a.b.c



Retención de la flama en la cabeza del quemador



Figura VIII.19

14.- Reducción del Porcentaje de Combustible Caliente

Costo : Bajo a Moderado

Potencia Ahorrada : Baja a Moderada

Descripción : Condiciones de cambio en muchos quemadores se ha encontrado que son de lados gruesos para sus aplicaciones. Afortunadamente acciones en la conservación de energía, cambios en los requerimientos de carga y otros factores pueden ser reducidos por la menor demanda de calor, si el porcentaje de combustible caliente puede ser reducido, entonces las cantidades perdidas disminuirán a lo largo con la sustitución de estos.

Ventajas y Desventajas : El costo por la instalación de los nuevos quemadores y los costos de ingeniería y otros derechos para el rediseño del sistema existente no puede ser justificado. El estudio económico de la emisión mostrará si este es rentable. Esto hace no sensitivo al arrancador con gran cantidad de calor con altas temperaturas de gas, dejándolo lento por periodos largos. El tiempo mas largo de calentamiento con las bajas pérdidas lo hacen mas sensible. La precaución que puede ser necesaria para bajos porcentajes de calor donde la temperatura máxima de gas es abatida bajo el punto de rocío del ácido el cual puede causar daño en el generador de vapor.

15.- Reemplazo de los Controles On/Off por Controles Modulantes

Costo : Moderado

Potencial Ahorrado : Moderado

Descripción : El reemplace del control tipo on/off en el quemador por controles que puedan modular y encontrar las condiciones de carga, reducen las altas temperaturas y mantienen las pérdidas. El equipo on/off, debe ser colocado en contra de las altas expectativas de demanda y cuando esta este satisfacida, el equipo deberá estar apagado. Las altas temperaturas son disminuidas encontrando el porcentaje actual demandado; además, las pérdidas asociadas con la

purificación del generador de vapor antes y después del calentamiento del ciclo pueden ser eliminadas teniendo pocos ciclos on/off. La tabla VIII.3 muestra las eficiencias típicas y los engrandecimientos de esta para las diferentes cargas encontradas.

Tabla VIII.3 Comparación de los Sistemas de Control Desarrollados

Tipo de Control	Eficiencia en % de Carga			
	25 %	50 %	75 %	100 %
On/Off	70.3 %	74.4 %	75.6 %	76.3 %
On/Off con Flujo en Dampers	73.3 %	75.3 %	76 %	76.3 %
Alto/Bajo/Off	76.9 %	76.5 %	76.4 %	76.3 %
Moduladores	76.9 %	77.7 %	77.2 %	76.3 %

Ventajas y Desventajas : Los controles on/off son simples con los bajos costos primarios que pueden ser de fácil sonido al operar sin embargo, el desgaste de energía con las altas temperatura y las pérdidas en línea recta disminuyen la eficiencia del generador de vapor. Por otro lado, el más complejo y costoso control de modulación puede ser instalado y manejado sin ningún problema.

16.- Conversión del Aire o Vapor Atomizado en los Quemadores

Costo : Moderado

Potencial Ahorrado : Moderado de 2 % a 8 %

Descripción : La atomización de vapor o aire, permite el calentamiento de un amplio rango de combustible y la alta conversión de 20 : 1 en vez de 4 : 1, y una buena combustión. La atomización de aire y vapor produce un aerosol de finas gotas que se expanden en forma de cono para lograr la mezcla aire/vapor la cual es de sensibilidad baja para cambios de viscosidad del aceite. También se permite una mayor flexibilidad en el desarrollo de la flama para conformar las

condiciones del horno.

Ventajas y Desventajas : Los costos para instalación y operación para aire comprimido o un sistema de vapor, son una desventaja. El vapor usado para la atomización, se pierde en la chimenea y esta pérdida de energía tiene que ser considerada. La pérdida de energía es compensada con un mejoramiento de la eficiencia, esto se logra incrementando la relación de conversión y la versatilidad del combustible y especialmente para cuidado de la calidad del combustible.

17.- Recuperador de Calor

Costo : Moderado Alto

Potencial Ahorrado : Moderado

Descripción : El recuperador de calor de la figura VIII.20 es similar a un economizador, excepto por que usa un pequeño hidrogenador o sistema de agua caliente. Un intercambiador de calor es instalado en la chimenea con una bomba y una válvula reguladora y es básicamente una superficie de intercambio adicional a la unidad de calentamiento. La temperatura del gas en la chimenea puede ser controlada por la regulación del flujo del agua por medio del recuperador de calor. Muchos generadores de vapor viejos con hidrogenizadores, tienen altas temperaturas en la chimenea y altos niveles de exceso de aire, siendo esta una opción muy atractiva.

Ventajas y Desventajas : Los costos de instalación y diseño de las unidades pequeñas tal vez son difíciles de justificar por los altos costos de los equipos en si. Los recuperadores de calor tienen dos ventajas (1) Recuperan la pérdida de calor, (2) disminuye los excesos de aire en los generadores de vapor tipo atmosférico, debido al menor arrastre de los gases de enfriamiento en el horno para ambas condiciones; de apagado y encendido.

18.- Combustión Sumergida

Costo : Moderado

Potencial Ahorrado : Alto

Descripción : El proceso de combustión se lleva a cabo debajo del agua en contacto directo con un intercambiador de calor. Comúnmente se usa para el calentamiento de piscinas y lavanderías figura VIII.21.

Ventajas y Desventajas : El combustible y el aire son presurizados para vencer la sumersión. La eficiencia que es posible alcanzar es de 95 %.

19.- Uso de Vapor para Controlar Equipo Semejante a Bombas y Ventiladores

Costo : Moderado o Alto

Potencia Ahorrada : Moderada o Alta

Descripción : Los controles eléctricos de bombas y ventiladores son usualmente instalados por que son simples y requieren de menor mantenimiento, sin embargo, cuando el costo de la electricidad es considerado los controles auxiliares de vapor suelen ser mas económicos. Si en ese lugar se utilizan volúmenes de combustible para grandes cantidades de vapor desde el equipo de control, esta situación sería similar a la de cogeneración donde el calor rechazado puede ser utilizado para mejorar la eficiencia global del ciclo. Este tipo de control eléctrico se usa cuando los cambios de demanda eléctrica son muy grandes.

Ventajas y Desventajas : Los costos altos mantienen primero los requerimientos y segundo la necesidad de trabajar mas hábilmente con operadores automáticos, repitiendo los pasos anteriores. La energía y los costos ahorrados pueden ser muy significativos.

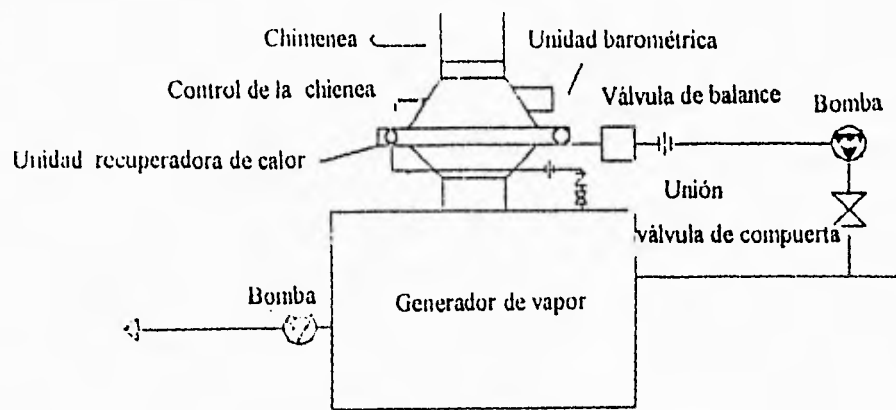


Figura VIII.20

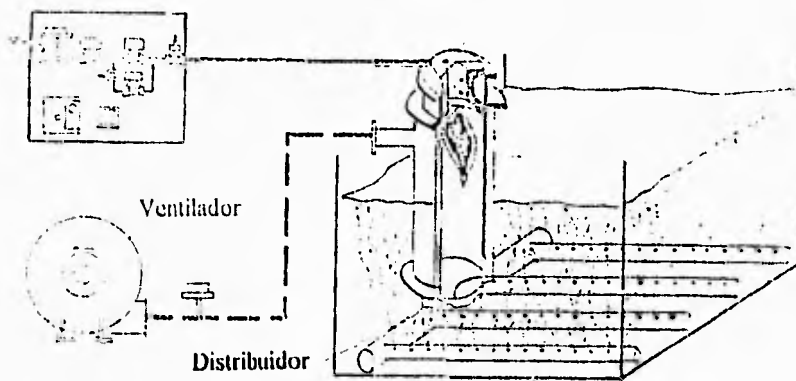


Figura VIII.21

VIII.7 PROBLEMAS TÍPICOS Y RECOMENDACIONES PRACTICAS

En el campo de la combustión industrial la experiencia practica resulta de gran utilidad; todos los casos particulares obedecen a un esquema básico fundamental, lo que determina condiciones favorables en cuanto a la reproducibilidad de problemas y soluciones.

Podemos considerar que son tres factores los que determinan la calidad de una combustión :

- Rendimiento térmico
- Ataque sobre los elementos de la instalación
- Emisiones a la atmósfera

Resultara siempre deseable conseguir los mayores rendimientos, afectando al minimo los equipos y produciendo la minima contaminación ambiental.

Podemos mencionar algunos problemas típicos que se presentan para conseguir estos objetivos, y las recomendaciones que aplicadas con el suficiente criterio de adecuación, permiten importantes ahorros de energía en plantas industriales :

1.- Control del Exceso de Aire

La mala regulación del exceso de aire representa la principal causa de pérdidas de energía en los procesos de combustión.

Cuando el aire aportado a la combustión es suficiente, los resultados son claramente visibles al producirse humos en los gases de chimenea causados por la presencia de inquemados; para evitarlos, se aumenta la regulación de aire hasta que los humos desaparecen.

Si se excede el nivel de aire estrictamente necesario las pérdidas de energía reaparecen, aunque ya no en forma visible por lo cual resulta menos fácil controlarlas y evitarlas.

En la práctica es muy común encontrar por las razones anotadas, equipos trabajando con elevados niveles de exceso de aire. La forma correcta de proceder en tales casos es la siguiente :

Debe tomarse en cuenta que el objetivo de cualquier cambio o modificación que se efectúe es el de conseguir una mejor calidad de la combustión en general.

La regulación " Al Ojo" se utiliza para consumos de combustible que no justifican la disponibilidad de analisis gases y para la fase inicial de cualquier proceso de regulación. Permite ajustar el exceso de aire a un nivel "moderado", actuando con la técnica conveniente : disminuir progresivamente el aire hasta notar en la chimenea la aparición de humos; el punto optimo de regulación lo representa para cada caso el máximo de aumento de aire que disminuye los humos pero sin que desaparezcan completamente.

A partir de este punto,la regulación visual para las condiciones actuales en que se desarrollan la combustión con lo cual se alcanzan normalmente valores cercanos a un 40 % de exceso de aire, resulta necesario utilizar equipos auxiliares para lograr niveles inferiores. Con el empleo de analisis gases portátiles y/o pirometros de radiación para observación de la llama, resulta posible alcanzar con cierta estabilidad un 20 % de exceso de aire.

Niveles inferiores al 20 % de exceso de aire en operación normal y estabilizada,exigen invariablemente sistemas de regulación y control automatizados asi como ajustes periódicos con equipos auxiliares.

Como norma general, la conveniencia de disponer de equipos de medición y/o sistemas máas o menos complejos de regulación depende del ahorro económico que puedan generar.

2 - Temperatura de Atomización Inadecuada

El residual pesado debe calentarse lo suficiente para que su viscosidad disminuya hasta el valor adecuado para su correcta atomización.

En un monograma viscosidad temperatura, se determina fácilmente el rango de temperaturas dentro del cual se debe calentar el combustible para que se encuentre en condiciones óptimas para su atomización. Para el residual 6 (fuel oil) de 300 ssf el rango estará al rededor de 105 a 115 °C.

Si el residual no alcanza este valor, por ejemplo 80 o 100 °C, en el quemador no se producirá la atomización en forma correcta, siendo menor la división en gotas individuales y por lo tanto, inferior la superficie de contacto con el aire carburante.

Las consecuencias de esta deficiencia son de mayor trascendencia que el caso anterior y las pérdidas de combustible mayores. La velocidad con que produce la reacción de combustión es menor, se producen inquemados y para evitarlos se incrementa la cantidad de aire; el exceso de aire enfría la llama y se demanda mas combustible creándose un círculo vicioso que implica ataque a las partes mecánicas así como emisión de inquemados a la atmósfera, etc.

3.- Inestabilidad de las Características del Combustible al Ingreso del Quemador.

El estado ideal teórico de la combustión industrial, sería aquel en el cual una vez ajustadas todas las variables en el óptimo de rendimiento térmico, tal situación se mantuviera en forma permanente.

En la práctica, son muchas las razones que establecen variaciones pero una muy frecuente proviene del tratamiento del combustible en su preparación previa.

En el caso del gas natural, las variables mas importantes son la presión de ingreso al quemador y la propia composición del gas. Cuando se utiliza carbón, el problema resulta mas complicado por ser muchas las variables que pueden atentar contra una alimentación estable y homogénea al sistema del quemador : La granulometría, composición química, humedad, fusibilidad de cenizas, gravedad específica, etc.

En el caso de combustible residuales el lograr condiciones homogéneas de alimentación al sistema del quemador resulta posible, por lo cual el hecho de que represente frecuentemente un motivo de problemas en la combustión solo obedece a descuido, desconocimiento o desinterés.

Algunas recomendaciones para una adecuada preparación del combustible residual son las siguientes :

- Debe de mantenerse sobre la recepción del combustible en planta, un control que permita detectar variaciones inusuales en la calidad del mismo.
- Tener un sistema de almacenamiento que permita mantener un stock de combustible por lo menos 10 veces al consumo diario, favorece efectuar una buena homogeneización de calidad.
- Las impurezas del combustible deben ser eliminadas en la recepción mediante filtros, la borra en el tanque de almacenamiento empleando aditivos y el agua mediante purgas periódicas en el tanque.
- Actualmente se utiliza reguladores de viscosidad que mantienen un valor prefijado variando la temperatura para compensar variaciones en las características del combustible; estos equipos resultan muy convenientes técnicamente, pero solo se justifican para grandes consumos por su aun elevado precio.

4.- Inadecuación entre las Condiciones de Operación y las Características de Diseño del Quemador

Sin el conocimiento detallado de las características de diseño del quemador no resulta posible adecuar la regulación de variables de operación de forma que permita alcanzar altos rendimientos.

Considerar en muchos casos que no se dispone en planta de un catalogo del fabricante del quemador, explica el por que tal inadecuación representa un problema típico y ocasiona considerables pérdidas. En la práctica, para evitarlo resulta recomendable recurrir al propio fabricante para solicitar información técnica sobre el quemador empleado, y de ser posible, el entrenamiento directo del personal encargado de su operación

El conocimiento teórico práctico de la teoría general de la combustión, complementariamente resulta de carácter imprescindible para que quienes conducen el proceso, tengan el criterio suficiente para actuar con mejores resultados.

Algunos casos de inadecuación son los siguientes :

- Margen de regulación inadecuada
- Potencia térmica excesiva o insuficiente
- Forma de llama inadecuada para el hogar o cámara de combustión
- Presiones y temperaturas de ingreso al quemador incorrectas
- Periodos de operación demasiado cortos

Con el suficiente criterio y conocimiento, resulta posible y en ocasiones necesario, variar algunas condiciones de diseño y/o operación del quemador para aplicarlos en casos de características particulares.

5.- Periodos de Marcha Demasiado Cortos en la Operación de Calderas

La gran mayoría de calderas dispone de un sistema de automatización simple que enciende y apaga al quemador de petróleo en función de un punto de operación prefijado para la presión del vapor producido.

En el momento de encendido, aun suponiendo que el quemador este previsto para ello, existe un periodo de normalización de las condiciones óptimas de operación en el cual la combustión es imperfecta, se producen inquemados o en su defecto se utilizan excesivas cantidades de aire.

Si esta desconexión o encendido se realizan con mucha frecuencia, las pérdidas de combustible resultan elevadas y se ocasionan problemas de corrosión. Cuando existe azufre en el combustible,

por producirse durante los periodos de normalización " Puntos Fríos" en los gases, estos se pueden disminuir por debajo del punto de rocío y condensar como rocío ácido en la chimenea.

Las causas que producen este problema pueden ser las siguientes :

- Incorrecta elección de la presión de vapor de desconexión
- Excesiva demanda de vapor para la capacidad de la caldera
- Condiciones demasiado variables en la demanda de vapor
- Producción de vapor de baja calidad
- Fugas de vapor incontroladas en el sistema

Determinación de las causas y eliminarlas es la recomendación mas práctica, teniendo en cuenta la perfecta adecuación entre la demanda de vapor en planta y la capacidad de la caldera, además de permitir periodos de marcha mas continuos y regulares, permite que la combustión se efectúe con mejores rendimientos y sin causar problemas de corrosión y emisión de contaminantes a la atmósfera.

6 - Mala Regulación del Tiro o Succión

La succión creada por un ventilador o el tiro natural de una chimenea juega un importante papel en la combustión estabilizada y funcionamiento del quemador.

La intensidad de tiro determina la velocidad de paso de los gases de combustión a través del sistema y fija la cantidad de aire aportado a la combustión. Un tiro excesivo puede incrementar la temperatura de los gases en la chimenea, y por tanto disminuir el rendimiento de la combustión.

Un tiro insuficiente, puede producir presurización del hogar y escape de gases al exterior o imposibilidad de ajustar bien el quemador por defecto de aire.

Algunas causas de irregularidad de tiro en la práctica industrial, son las siguientes :

- Mal funcionamiento del ventilador o trampillas de aire incorrectamente abiertas
- Filtraciones de aire falsos
- Regulador de tiro en mal estado
- Tiro insuficiente por obstrucciones o insuficiente altura de la chimenea
- Desgaste de los alabes de la turbina del ventilador

La recomendación mas general es seguir las instrucciones del fabricante.

7.- Entradas de Aire Falso en el Sistema

El ingreso de filtraciones de aire a la caldera produce efectos mas dañinos de lo que se considera normalmente, principalmente para mantener un buen control del exceso de aire en niveles mínimos.

El aire falso que pueda ingresar por sellos defectuosos, mirillas de observación, perforaciones en el casco, orificios de termocupulas, etc., crean puntos frios en el interior del hogar provocando el depósito de combustible inquemado que provoca pegaduras, hollín y ataque de cenizas, además de alterar las condiciones de equilibrio térmico y rendimiento del sistema.

En equipos con sistemas automáticos de regulación y control, filtraciones de aire falsos provocarán una incorrección en la señal de lectura de O_2 , el sistema ordenará cerrar la admisión de aire dando lugar a que exista defecto del mismo en la flama, producción de inquemados y menor liberación de calor.

Las infiltraciones de aire pueden detectarse utilizando una vela, la cual será absorbida por el tiro del hogar indicando los puntos de entrada de aire falso que deben ser sellados y hermetizados.

En caso de hornos con intercambiadores de calor, el aire falso se traduce en pérdidas de temperatura en los gases calientes, y mayores requerimientos de combustible para compensarlas y cumplir con las exigencias técnicas del proceso.

8.- Formación de Hollines

Los hollines están formados por inquemados sólidos y cenizas impregnados de NO_x , SO_2 , SO_3 , CO y CO_2 .

Al quemar combustibles sólidos y líquidos siempre aparecen partículas sólidas y líquidas originadas por las cenizas del combustible y por partículas de carbono que han abandonado la zona de combustión sin quemarse totalmente a causa de :

- Una atomización deficiente o una falta de homogeneidad en la mezcla aire/combustible
- Entorpecimiento de la llama por contacto con superficies frías
- Falta de exceso de aire

El proceso de formación de hollines depende además de :

- Las características del combustible
- Las características del equipo de combustión
- La relación de C/O
- Las temperaturas

El hollin formado, se ira depositando en la superficie de intercambio de la caldera dificultando la transmisión de calor de los gases al agua, lo que se traducirá en un aumento de temperatura de los gases en chimenea y por consiguiente mayores pérdidas y menor rendimiento de la caldera.

Cuando el combustible contiene azufre existe el riesgo de que los hollines se impregnen con ácido sulfúrico acelerando la corrosión en las superficies metálicas.

El soplado del hollín con aire comprimido es una práctica muy utilizada para evitar los problemas que ocasiona en tubos de calderas y en hornos de refineries, pero el mejor tratamiento que se puede recomendar es el evitarlos corrigiendo las causas que lo provocan.

CONCLUSIONES

Ha sido nuestro propósito y a todo lo largo del desarrollo del presente trabajo, mostrar tanto la problemática como resultados y expectativas de aplicación del dispositivo en estudio.

El problema de la contaminación atmosférica es muy complejo, es por eso que la tecnología en equipos anticontaminantes ha tenido un avance muy acelerado. Uno de los aspectos más relevantes que podemos mencionar es la existencia de diferentes sistemas los cuales son dispositivos esenciales en los generadores de vapor como es el caso de los quemadores de bajo NO_x, del cuál desprendemos la necesidad de constantes búsquedas de nuevas alternativas para mejorar la calidad del aire.

Uno de los principales contaminantes que hoy en día no se le ha dado la importancia debida son las masas de gases contaminantes que desprenden las pequeñas, medianas y grandes industrias; esa densa neblina que impide la visibilidad es debido a los gases tóxicos y a los desechos de partículas del combustible quemado.

El uso de equipos que impidan en grandes proporciones la contaminación implementados a los generadores de vapor tienen una eficiencia de operación muy elevada; la cuál ha permitido que el problema en este aspecto no sea tan crítico.

El tema se desarrollo sin ningún antecedente experimental de quemadores de bajo NO_x, los cuales a través de este trabajo se explican presentando una metodología y una serie de técnicas para caracterizar el comportamiento de estos en los sistemas de combustión.

La interpretación de los resultados teóricos que la constituyen, permiten poner de manifiesto la influencia individual de las principales variables que afectan a dicho comportamiento y de este

modo, definir aquellos valores que para cada combustible y cada diseño particular del generador de vapor, aumente la calidad del proceso de combustión.

Con el objeto de mostrar su validez, se presentaron en este trabajo los resultados de la aplicación de una metodología y procesos de reducción de las emisiones de gases contaminantes, los cuales fueron de gran utilidad y por lo consiguiente, serán un beneficio en los próximos años en cuanto a prevención de la contaminación se refiere.

La operación continua de un generador de vapor, manteniendo sus parámetros (temperatura del combustible, calidad de la atomización y exceso de aire) en los valores que brindan mayor eficiencia de combustión producen múltiples beneficios que pueden evaluarse en forma inmediata, a lo que otros sólo podrán hacerse patentes mediante evaluaciones a corto y largo plazo.

Desde el punto de vista de ahorro energético, los incrementos obtenidos en la eficiencia del generador de vapor con estos nuevos diseños de quemadores y de metodología se expresan por sí mismo.

A este respecto es necesario tener presente que siempre será posible incrementar la eficiencia del generador en las magnitudes del caso estudiado, ya que esto dependerá no sólo de los resultados sino también de las condiciones en que operaba este antes de aplicarlas. No obstante a lo anterior, lo que si puede afirmarse es que el cambio de signo de la eficiencia será siempre positivo.

Desde el punto de vista de la política energética esto es, que la necesidad o conveniencia de utilizar combustibles alternativos en función de su costo y/o su disponibilidad en el mercado nacional, resulta claro que la metodología y las técnicas de control desarrolladas, pueden constituir una herramienta valiosa para determinar tanto la factibilidad de la sustitución de un combustible por otro como los cambios de las condiciones de operación que requerirá el nuevo combustible para su adecuada combustión.

Desde el punto de vista de disponibilidad de equipos, si bien las ventajas de operar en las condiciones de combustión óptimas no son susceptibles de ser cuantificadas en forma inmediata, (debido a que por una parte la indisponibilidad debe evaluarse en periodos relativamente largos y por otra, a que en esta problemática influyen numerosos factores, muchos de ellos ajenos a los procesos de combustión); puede afirmarse que serán importantes para su aplicación.

Dado que los resultados de la aplicación de las técnicas de control y a la utilización de los quemadores de bajo NO_x, permiten definir las condiciones que posibilitan operar al generador de vapor con el mínimo exceso de aire de combustión compatible con la no emisión de productos inquemados, la operación en tales condiciones, llevará a disminuir la producción de óxido de vanadio, trióxido de azufre, partículas inquemadas y óxidos de nitrógeno. Esto a su vez traerá como consecuencia menores velocidades de corrosión y ensuciamiento de los diferentes componentes del generador de vapor, lo cual deberá producir un impacto positivo en su disponibilidad y eficiencia.

Desde el punto de vista de la contaminación ambiental, las ventajas de reducir al mínimo posible las emisiones de algunos contaminantes ya mencionados resultan evidentes.

En cuanto a los alcances de las técnicas y métodos prácticos para mejorar la combustión se ubican aproximadamente en un 95% de las reducciones de gases contaminantes. Si bien, estas han sido desarrolladas para ser aplicadas a los generadores de vapor, también pueden aplicarse a cualquier equipo que involucre procesos de combustión durante su operación.

Esto puede revestir particular importancia para las industrias que utilicen en forma intensiva energía calorífica, ya sea como parte de sus procesos o para la producción de vapor.

Finalmente, es oportuno no perder de vista que las medidas y las técnicas de reducción de NO_x presentadas es perfectible y de hecho sería útil perfeccionarlas. En tal sentido, se desea sinceramente poder contar en el futuro con este perfeccionamiento, esperando que el esfuerzo

realizado sea de algún modo benéfico para el desarrollo de la tecnología en este campo y en particular, en el aspecto ambiental.

BIBLIOGRAFIA

1. AVALOS Y VELASQUEZ, LEON
"GENERADORES DE VAPOR"
ESIME. MEXICO.
2. SEVERNS
"LA PRODUCCION DE ENERGIA MEDIANTE VAPOR, AIRE Y GAS"
EDIT. REVERTE. BARCELONA.
3. DE LORENZI, OTTO
"COMBUSTION ENGINEERING"
NEW YORK, 1955
4. INSTITUTE OF PITTSBURGH ON COMBUSTION
"SYMPOSIUM INTERNATIONAL ON COMBUSTION"
EDIT. MASSACHISSETTS INSTITUTE TECNOLOGY. 1976, 1978, 1980 Y 1982.
5. GUNN DAVID & ROBERT HORTON
"INDUSTRIAL BOYLERS"
1979.
6. MORSE
"TEORIA Y PRACTICA DE LAS PLANTAS GENERADORAS DE ENERGIA
ELECTRICA". EDIT. CONTINENTAL. MEXICO.
7. ANGULO DEL RIO, YARA /VARGAS MADRAZO, HECTOR
"GENERADORES DE VAPOR DE LECHO FLUIDIZADO"
FACULTAD DE QUIMICA. UNAM. 1988.
8. WARK, KENNETH
"CONTAMINACION DEL AIRE, ORIGEN Y CONTROL"
EDIT. LIMUSA. MEXICO, 1992.
9. SECRETARIA DE DESARROLLO SOCIAL
"DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACION".
18 DE NOVIEMBRE DE 1994

10. GLASSMAN, I.
"COMBUSTION"
ACADEMIC PRESS, INC. LONDRES, 1977.
11. LENOZ, W Y WITTMER, V.
"INFORME FINAL: ASPECTOS TEORICOS SOBRE COMBUSTION".
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELECTRICAS. 1981.
12. MILAN FORESSI, J.
"DIAGNOSTICO PARA LA PUESTA A PUNTO DE SISTEMAS DE COMBUSTION DE
GENERADORES DE VAPOR INDUSTRIALES".
13. LAND COMBUSTION LIMITED
"MEASUREMENT ACID SULFURIC AND NO_x IN BOILERS FLUE GAS"
14. BECKMAN INSTRUMENTS
"MANUAL DE OPERACION: INFRARED ANALIZER CO"
FULLERTON, CAL. JANUARY, 1980.
15. TIPPING, E.
"THE DETERMINATION OF OXIGEN IN GASES"
PRESENTED OURING THE SPRING SCHOOL. OF PROCESS ANALYTICAL
INSTRUMENTATION HELD AT UNIVERSITY OF MARMICK. MARCH, 1974.
16. BECKMAN INSTRUMENTS
"MANUAL DE OPERACION: OXIGEN ANALIZER"
FULLERTON, CAL. JANUARY, 1980.
17. CASTILLO NEIRA, PERCY
"MANUAL PRACTICO DE LA COBUSTION INDUSTRIAL"
EDIT. SERVICIOS INTEGRADOS PERU.