



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

C U R S O S A B I E R T O S

CONTROL DE CONTAMINACION Y AHORRO DE ENERGIA EN CALDERAS

CONFIGURACIONES Y COMPONENTES DE CALDERAS

ING. MARTINIANO AGUILAR R.

I.- CONFIGURACIONES Y COMPONENTES DE CALDERAS

1.- DEFINICIONES Y COMPONENTES

Generador de vapor o caldera es un dispositivo para generar vapor o agua caliente que se utiliza en la alimentación a otros equipos que producen energía, directamente en procesos, o bien, para propósitos de calentamiento.

El diseño de los generadores de vapor o calderas considera la transmisión de calor de una fuente externa de combustión a un fluido (agua) contenido dentro de ella.

Estrictamente el término de caldera se aplica únicamente al recipiente contenedor de agua y a las superficies de convección sin embargo, en este trabajo se utilizarán indistintamente los términos de generador de vapor o caldera.

El generador de vapor está compuesto por las siguientes partes principales, algunas de las cuales se muestran en la Fig. 1, que ilustra una caldera de tubos de agua.

- . ventiladores de aire y gases
- . precalentadores de aire
- . ductos, compuertas
- . chimenea
- . economizador
- . domo
- . evaporadores
- . hogar
- . sopladores de hollín
- . registros de inspección
- . bombas de recirculación
- . inyección de sustancias químicas y nitrógeno

- . muestreos de agua, vapor y gases
- . sobrecalentadores
- . recalentadores
- . desobrecalentadores
- . quemadores y encendedores
- . accesorios como válvulas de seguridad y de aislamiento, conexiones, purgas, venteos, etc.
- . instrumentación
- . sistemas de control y protección
- . estructura soporte
- . filtros de ceniza

Dependiendo del tipo y tamaño, la caldera puede estar constituida por todas las partes anteriores o por sólo una parte de ellas.

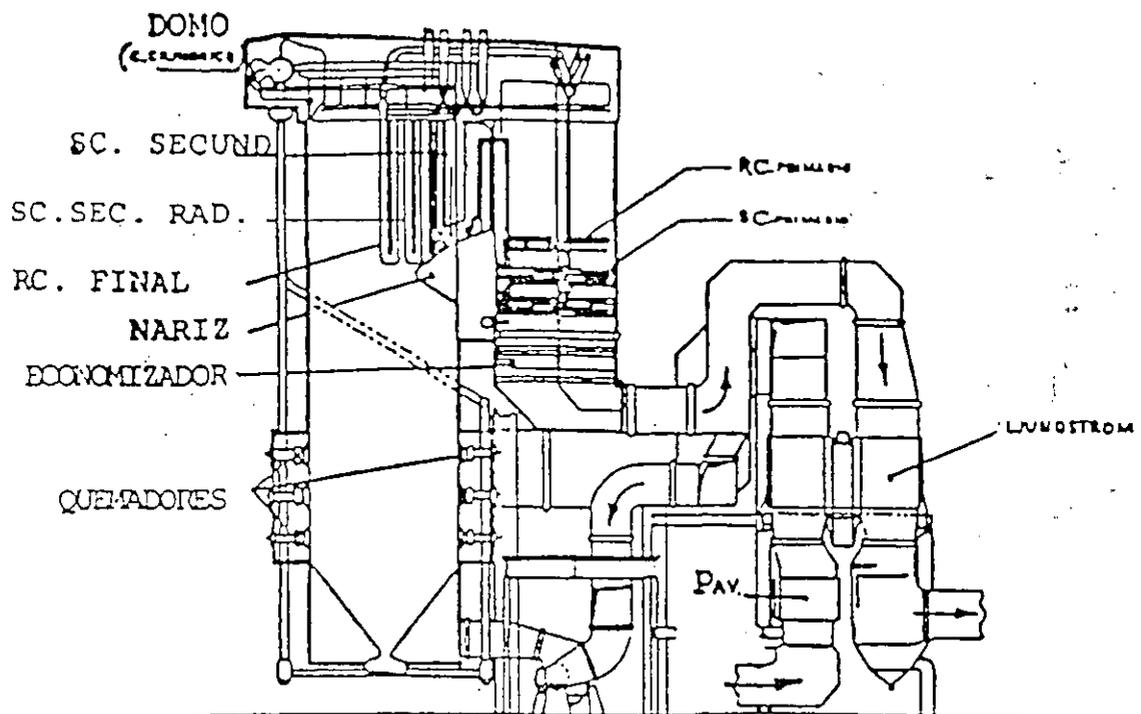


FIG. COMPONENTES PRINCIPALES DE UN GENERADOR DE VAPOR

En las Figs. 2 y 3, se muestran también algunas partes de calderas que ilustran a las llamadas de tubos de humo o piro tubulares.

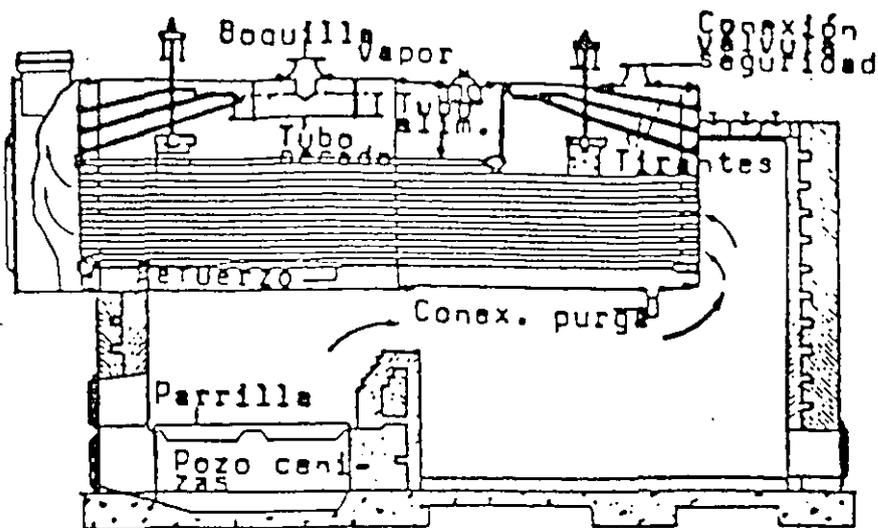


FIG. Sección de Caldera de Retorno Horizontal Tubular (HRT)

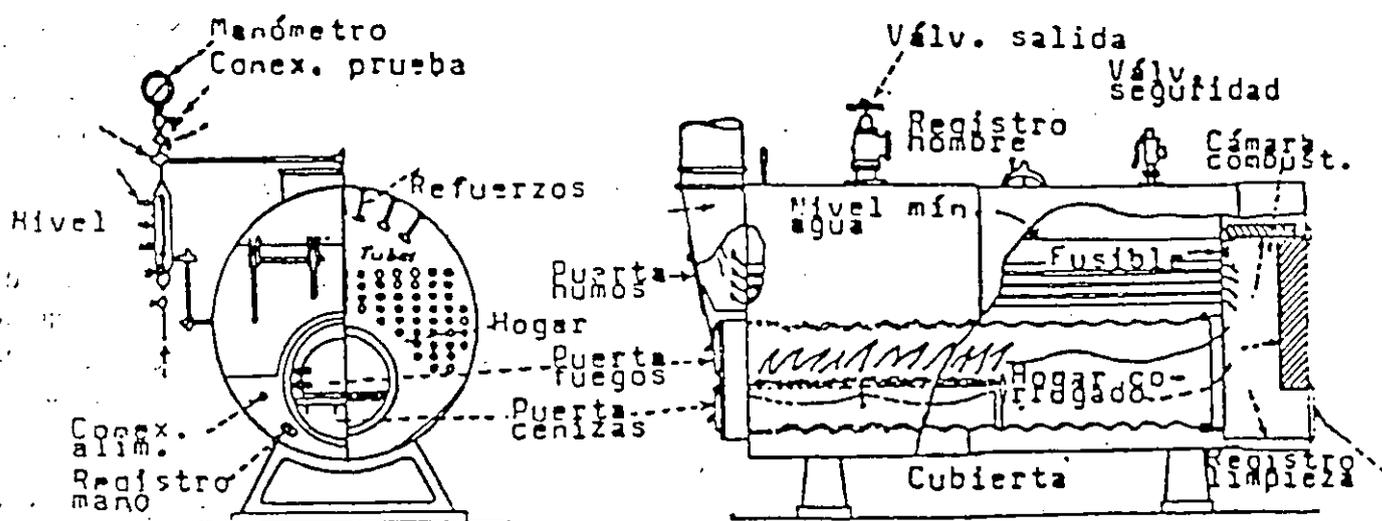


FIG Caldera Escocesa Marina, de Fondo Seco, dos pasos de gases y Hogar Corrugado

2.- DESARROLLO Y CONFIGURACIONES

A fines del Siglo XVIII y como consecuencia del desarrollo de la fabricación de la máquina de vapor, apareció por primera vez la caldera de vapor realizada en la forma de un tambor calentado por el exterior, en donde se hervía el agua y el vapor se recogía en la parte superior y se conducía a la máquina de fuerza.

En la Fig 4, se esquematiza parte del desarrollo de las calderas.

En un principio la evolución fue lenta debido en especial a las dificultades para la obtención de los materiales necesarios como placas y tubos, además de que no se tenía una política económica energética para emplear vapor de presiones y temperaturas elevadas con lo cual se pueden obtener mayores eficiencias en la conversión de energía.

La primera etapa marcada en la evolución de la caldera apareció como una derivación directa de la caldera de tambor calentado, siendo una variedad de calderas mayores con la categoría de volumen grande de agua; este nuevo diseño trajo consigo el contenido en el interior del tambor, del hogar y ductos convectivos para los gases de combustión en la forma de tubos en el interior del tambor y ductos convectivos exteriores al tambor. Estas nuevas calderas permitieron la obtención de mayores flujos de vapor y la obtención de un rendimiento más elevado del combustible, además de una ventaja sobre las primeras calderas consistente en una inercia térmica mayor con la cual se tenía una mayor flexibilidad en la operación para las variaciones aceleradas de carga sin regulación continua de los fuegos y además de menor sensibilidad a la calidad del agua de alimentación.

Desde el punto de vista de fabricación, las calderas tienen diferentes esquemas de principio: las calderas para producir agua caliente tienen una fabricación específica para calentamiento de agua, mientras que las calderas para producir vapor tienen un esquema más complicado en función de los parámetros del vapor producido, sin embargo ciertos elementos son comunes a todas las calderas como el espacio para la combustión del combustible denominado hogar, dispositivos para la combustión, conductos para la circulación de los gases de combustión y la superficie utilizada para la absorción del calor.

De acuerdo con lo presentado la instalación de la caldera comprende una serie de sistemas: para alimentación del agua, alimentación de combustible (quemadores y manejo de combustible), alimentación de aire (inyección de aire y precalentador externo), evacuación de los gases de combustión (chimenea y ventilador), evacuación de escoria y cenizas, etc.

Asimismo, como componente de las calderas puede considerarse la instalación de automatización para optimizar el funcionamiento y la instalación automática de protección para prevenir el peligro de averías.

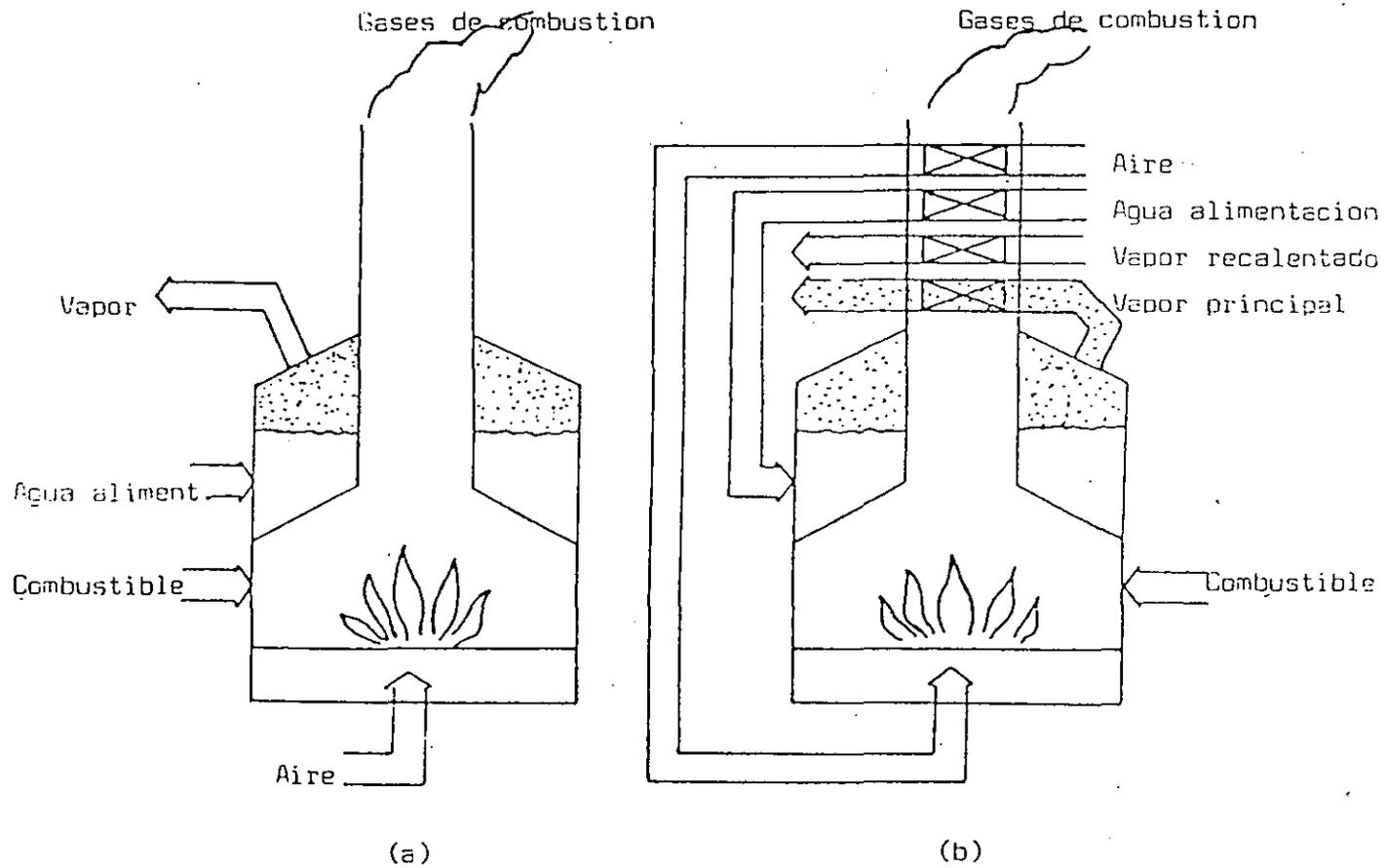


FIG. - ESQUEMA DE LA EVOLUCION DE LAS CALDERAS

3.- TIPOS DE CALDERAS

Existen numerosas formas de clasificación de las calderas, algunas de las cuales se indican a continuación:

- por el fluido que circula en el interior de los tubos:
 - . tubos de humo (horizontales, verticales)
 - . tubos de agua (rectos, curvos)
- por la forma de circulación del agua, en:
 - . circulación natural
 - . circulación forzada
- por la presión de los gases en el hogar, en:
 - . hogar presurizado
 - . tiro balanceado
- por el volumen de agua relativo:
 - . gran volumen
 - . pequeño volumen
- por la colocación del hogar:
 - . externo
 - . interno
- otras clasificaciones incluyen:
 - . estacionarias
 - . portátiles
 - . marinas
 - . paso de gases sencillo
 - . paso de gases con retorno
 - . paso de gases múltiple
 - . domo sencillo
 - . domos múltiples
 - . etc.

De acuerdo con lo anterior, se tiene una variedad grande de tipos constructivos de calderas, la descripción de cada uno de los tipos es bastante extensa por lo que a continuación solo se resumirá la descripción de algunos tipos representativos con lo que se ilustrarán ciertos conceptos constructivos válidos para las demás clases de caldera.

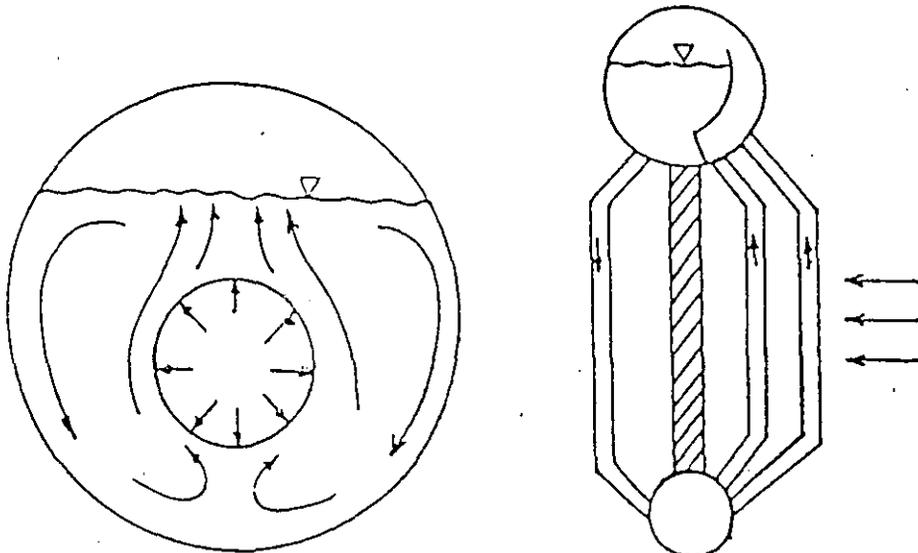
Desde el punto de vista funcional las calderas se destinan, de acuerdo con su finalidad, en calderas pequeñas de calentamiento que suministran agua caliente, agua hirviendo o vapor de baja presión, en calderas para centrales térmicas menores que suministran como agente térmico, vapor de baja y media presión en estado saturado o con pequeño sobrecalentamiento y, en calderas para centrales térmicas mayores o plantas termoeléctricas que suministran vapor de presión elevada, normalmente con bastante sobrecalentamiento, y finalmente calderas para propósitos específicos como móviles, navales, de recuperación, etc.

Desde el punto de vista constructivo, las calderas se pueden clasificar en dos grandes categorías.

Calderas con gran volumen de agua en que el agua está comprendida dentro de un tambor de dimensiones grandes cuyo interior está calentado en su superficie por los gases de combustión y calderas de pequeño volumen de agua en que el agua circula en el interior de un sistema de tubos que recogen el calor de los gases de combustión que circulan en el exterior de los tubos, estando la zona de gases delimitada por muros de tubos o paredes de membrana.

Otro factor importante que determina la solución constructiva de calderas es el modo en que se asegura la circulación de agua y emulsión en el interior del sistema hervidor. Las calderas llamadas clásicas o de circulación natural se basan en la realización dentro de un circuito de diferentes presiones estáticas entre dos columnas con contenido diferente de vapor en emulsión. En otra categoría de calderas llamada de circulación forzada, la circulación del agua se asegura con una bomba especial colocada en el circuito de agua; si la bomba se coloca a la entrada del agua por el economizador, hervidores y sobrecalentador se puede eliminar el domo de agua y la caldera se denomina de un paso, circulación forzada o de circulación única, pero si la bomba tiene solo el papel de activar la circulación por el sistema hervidor, entonces la caldera se denomina de circulación controlada.

En las calderas de circulación natural, la circulación en el interior se asegura por el movimiento natural de la agua en el proceso de calentamiento; en la Fig. 5, se muestra la producción de la circulación natural dentro de un espacio grande (a) y dentro de un sistema de tubos (b). El contacto con la superficie calentada por el flujo térmico genera una circulación ascendente y el circuito se cierra por la circulación descendente en la superficie sin calentamiento.



a. Gran volumen de agua

b. Pequeño volumen de agua
(tubos de agua)

FIG. CIRCULACION NATURAL



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

C U R S O S A B I E R T O S

CONTROL DE CONTAMINACION Y AHORRO DE ENERGIA EN CALDERAS

LA COMBUSTION

ING. MARTINIANO AGUILAR R.

IV.-LA-COMBUSTION

1.- CONCEPTOS GENERALES

El proceso de combustión es un fenómeno físico y químico en donde una sustancia llamada combustible se combina con el oxígeno (contenido en el aire), resultando gases de combustión y una cantidad de calor por el efecto térmico de la reacción. El aspecto físico de la combustión considera los factores aerodinámicos que determinan una cierta velocidad de desarrollo de la reacción y factores térmicos que determinan ciertos flujos de calor en ciertas etapas de la combustión. Prácticamente los dos aspectos, químico y físico no pueden separarse y se influyen recíprocamente.

El fenómeno de combustión es el aspecto primario en el diseño de calderas y afecta en una u otra forma a los demás procesos que tienen lugar, como por ejemplo, la transferencia de calor, resistencia estructural, contaminación, materiales, etc. Su influencia no solo comprende la parte de Diseño, sino también la operación y mantenimiento.

Como la combustión está condicionada a factores aerodinámicos y térmicos, el significado del proceso de combustión no puede ser estudiado independientemente del quemador y el hogar o parillas en donde tiene lugar el proceso de combustión; en este sentido la combustión debe correlacionarse con los estudios de quemadores y hogar para poder comprender el conjunto del fenómeno que se desarrolla dentro de la instalación.

En la combustión completa, los elementos combustibles C, H y S se transforman por oxidación en CO_2 , H_2O y SO_2 ; además de los productos de oxidación, se obtienen en los gases de combustión N_2 , proveniente del aire para la combustión y agua en la forma de vapor, contenida en el combustible y en la humedad del aire.

El proceso real de combustión no puede ser descrito con las reacciones químicas de oxidación, ya que éstas solo marca el estado inicial y final en el sistema; en realidad un número grande de reacciones intermedias en que aparecen transformaciones con velocidades grandes que producen inestabilidades intermedias (con radicales libres) caracterizan el proceso de combustión desde el punto de vista de desarrollo como velocidad, aportación de calor, elementos que frenan la reacción, etc. Un proceso de este tipo puede llamarse de reacción en cadena. El proceso de combustión se inicia por el calentamiento local de un cierto volumen de la mezcla combustible hasta la temperatura de reacción, y el desprendimiento de calor de la reacción local hace que continúe la reacción en el volumen circundante; el aumento de la cantidad de calor desprendida durante el tiempo del proceso hace que se eleve la temperatura que acelera la reacción de combustión de acuerdo con una ley exponencial. A esta fase del proceso se le denomina encendido.

A continuación el proceso se desarrolla con velocidad constante denominada velocidad de combustión y durante esta etapa existen por una parte factores que tienden a aumentar la velocidad de reacción ramificando las cadenas de reacción, y por otra parte, factores que disminuyen la velocidad de la reacción como la interrupción de la reacción en cadena al incidir las llamas en paredes frías o el encuentro con moléculas inertes.

En la descripción anterior del fenómeno de combustión, se considera que se tiene una mezcla homogénea de combustible y aire para la combustión con lo que se tiene una combustión cinética, sin embargo existen algunas situaciones en que el aire no está mezclado con el combustible y entonces tiene lugar un proceso de difusión en el cual la combustión se denomina difusiva y el proceso se desarrolla en dos etapas, siendo la primera la penetración del combustible en el aire por difusión y la segunda, la combustión del combustible. Debido a que el proceso de difusión es mucho más lento que el proceso de combustión, las velocidades de reacción de las flamas difusivas se determinan por la velocidad de difusión.

Estequiometría de la Combustión

Para que un combustible arda completamente, es necesario que el hidrógeno y el carbono contenidos en el mismo se transformen por reacción con el oxígeno en agua y en anhídrido carbónico respectivamente. Si la transformación se realiza parcialmente, la combustión se denomina incompleta: el carbono da lugar en este caso, aparte del CO_2 a una cierta cantidad de óxido de carbono (CO), y parte del hidrógeno puede encontrarse entre los gases libres o en forma de hidrocarburos.

Para lograr una combustión completa, es necesario ante todo mezclar el combustible con una cantidad suficiente de aire, o mejor de oxígeno. Como es prácticamente imposible efectuar una mezcla perfecta o estequiométrica de los dos reactivos, hay que suministrar generalmente una cantidad de aire superior a la prevista en teoría, es decir trabajar con exceso de aire.

Como es obvio, cuando más elevado es el grado de mezcla obtenido, menor es la cantidad de aire que se necesita para completar la combustión; por esta razón, los combustibles gaseosos, a causa de su naturaleza que facilita la mezcla, necesitan menor exceso de aire que los combustibles sólidos; éstos precisan notables cantidades en exceso, variables según el tipo, dimensiones y disposición de los quemadores en las cámaras de combustión. Un exceso de aire demasiado fuerte produce efectos negativos, ya que hace bajar la temperatura de combustión y consiguientemente reduce el rendimiento de los aparatos.

Cuando mayor es la temperatura de combustión, más rápida es la vaporización y la gasificación del combustible y menor es la probabilidad de que los gases o vapores no ardan o lo hagan sólo parcialmente; a estos efectos positivos hay que añadir los fenómenos de descomposición de los productos de la combustión y la obtención de productos de oxidación parcial. Junto a los gases sin quemar pueden encontrarse en los humos partículas sólidas (hollines) que en parte se vierten al exterior junto con los gases y en parte quedan en el interior, depositándose en los puntos de menor velocidad del gas.

La formación de carbón se debe a la mala transformación de los hidrocarburos o de las sustancias carbonosas de los combustibles sólidos; el hidrógeno en general arde fácilmente, mientras que los fragmentos de hidrocarburos del tipo C₂ pueden originar la formación de hollines.

Si los fragmentos moleculares que se originan por el cracking parcial tienden a combinarse para formar alquitrán, el humo adquiere un color amarillo oscuro, con depósitos de hollines de aspecto brillante.

Una combustión sin humos da lugar a gases que contienen los siguientes productos: CO₂, H₂O, O₂ y N₂ (H₂O en forma de vapor); con los combustibles que contienen azufre aparecen también SO₂ y SO₃.

El análisis de los gases facilita un medio de valorar el grado de combustión alcanzado; puede efectuarse por medio del clásico aparato Orsat o con instrumentos cromatográficos, espectrográficos, etc.; el primero es de más fácil uso, pero ofrece datos menos seguros que el segundo.

La marcha de la combustión puede establecerse basándose en el porcentaje de CO₂ en los gases quemados; y puesto que el exceso de aire hace aumentar la cantidad de gases producidos, el porcentaje de CO₂ es siempre inferior al valor estequiométrico.

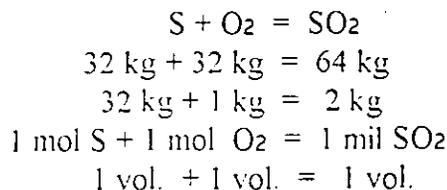
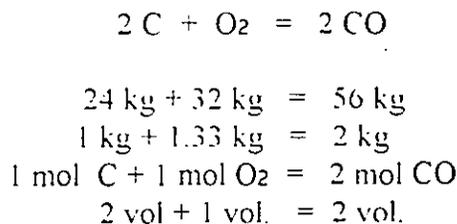
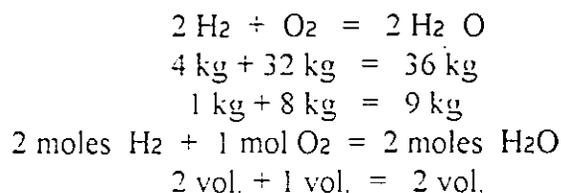
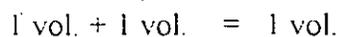
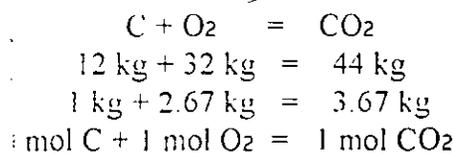
Si, por ejemplo, se emplea 1 m³ de O₂ para la combustión de un carbón, se obtiene como producto de la combustión 1 m³ (m³ normal) de CO₂. Como el comburente suele estar constituido por aire (21 por 100 de O₂ y 79 por 100 de N₂) un combustible sin nitrógeno e hidrógeno, debería dar lugar a un gas de combustión de la siguiente composición 21 por 100 de CO₂ y 79 por 100 de N₂. Pero como en realidad el combustible contiene siempre cierta cantidad de nitrógeno, hidrógeno y vapor de agua, resulta que el valor máximo del CO₂ de los humos no puede llegar al 21 por 100; en la práctica se acerca tanto más a este valor cuanto menor es el contenido en N₂ y H₂O del combustible (utilizando aire estequiométrico).

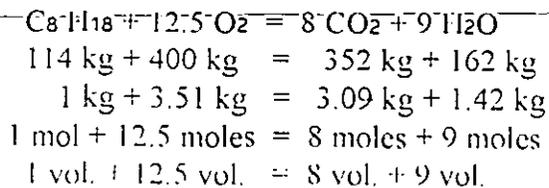
Para una combustión con exceso de aire y con un combustible prácticamente sin hidrógeno, la suma de CO₂ + O₂ se acerca al 21% en volumen; los % de CO₂ y O₂ son complementarios, y función del exceso de aire empleado.

Reacciones Químicas.- Las reacciones de combustible-comburente son la base del proceso de combustión que involucra fenómenos muy complejos porque las reacciones son confluídos en movimiento y con fuertes variaciones de temperatura.

Las leyes que gobiernan la transmisión de calor y el transporte de masa controlan en muchos casos el proceso, ya que las reacciones químicas son generalmente mucho más rápidas; la mezcla del combustible con oxígeno determina la velocidad total del conjunto en algunos casos.

En las ecuaciones siguientes se indican las reacciones químicas de los materiales combustibles más importantes al mezclarse con el oxígeno, que en la mayoría de los procesos industriales provienen del aire atmosférico; se incluyen también los pesos, moles y volúmenes de los materiales que intervienen en la reacción. Desde el punto de vista de la mayoría de los procesos de ingeniería al aire atmosférico es una mezcla que tiene 21% de oxígeno y 79% de nitrógeno en volumen, y 23.15 de oxígeno y 76.85% de nitrógeno en peso; el peso molecular de aire es de 28.15 en las condiciones estándar.





Las reacciones anteriores pueden efectuarse bajo tres regímenes:

- Oxidación lenta a temperatura limitado y en ocasiones sin flama.
- Mezcla de combustible-comburente obligado a reaccionar por una fuente de calor externa, obteniéndose una onda de deflagración o frente de flama.
- Ondas de detonación directamente o por transición de una onda precedente de deflagración.

Factores Físicos de la Combustión.- En condiciones de flama estable a altas temperaturas y presiones arriba de la atmosférica, los aspectos físicos son los que adquieren más importancia en el proceso de combustión.

En el caso de los combustibles líquidos, los aerosoles de pequeñas gotas con dimensiones inferiores a 10 micras se comportan como mezclas normales de gas-aire y en las que tienen dimensiones superiores a 10 micras se obtiene una combustión separada de las gotas sueltas en el aire que las rodea, con ignición en cadena; la presencia de gotas de estas dimensiones reduce el límite inferior de inflamabilidad.

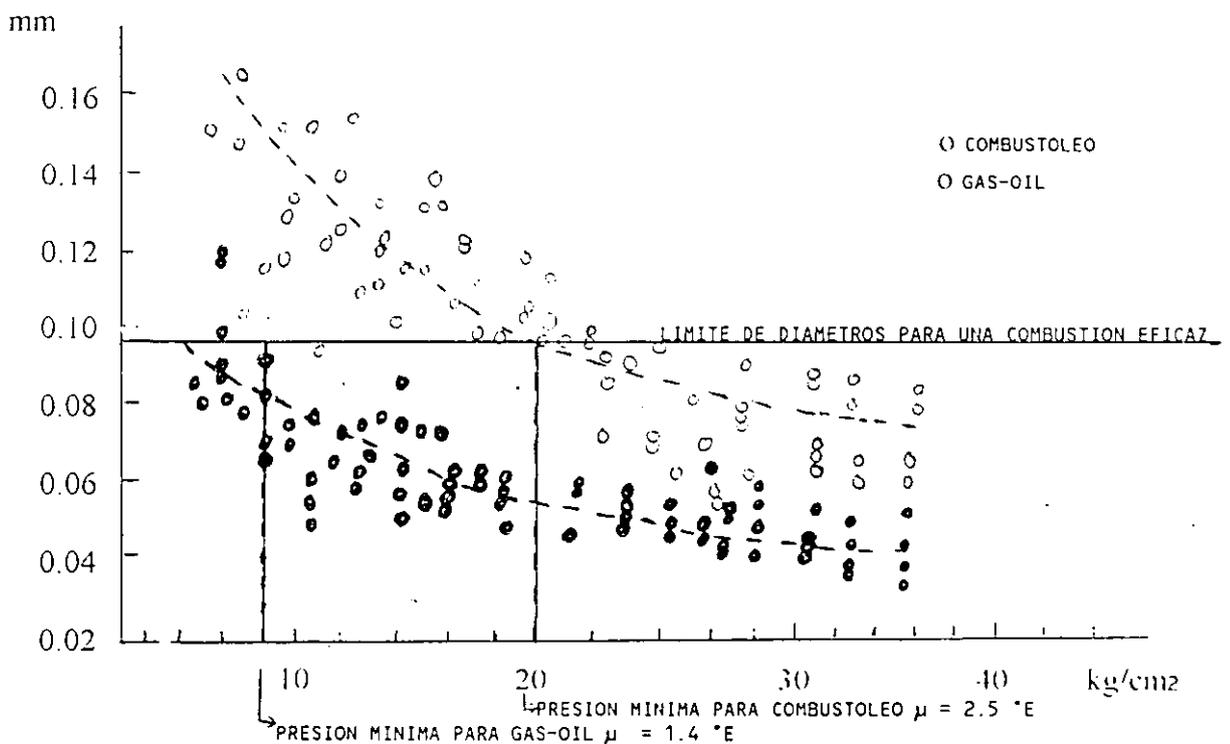
Los combustibles, gasóleos y diesel tienen temperaturas medias de ebullición elevadas y estabilidades térmicas reducidas, por lo que para quemarlos no se puede proceder mediante evaporación, requiriéndose para una buena combustión, realizar una subdivisión forzada de líquido para producir pequeñísimas gotas infinitesimales dispersas en el aire para formar una niebla muy uniforme (pseudo mezcla gaseosa), dentro de la cual puede provocarse la flama.

La subdivisión del aceite combustible conocida como atomización, se efectúa mecánicamente por medio de presión o bien por medio de un fluido auxiliar (vapor o aire); en la Fig. , se muestra el tamaño de la subdivisión de gotas con la presión de atomización (pulverización) tanto para combustible como gasóleo. En la Fig. , se muestran la zona de los diferentes tipos de atomización.

Los aceites combustibles en condiciones de no excesiva turbulencia se caracterizan por llamas muy luminosas y radiantes.

De los diversos procesos físicos que intervienen en la combustión la turbulencia es con mucho el más importante. Corresponde a un movimiento desordenado de los fluidos con formación de un gran número de torbellinos que interfieren unos con otros, dispersos en todo el medio en reacción, de volumen y características cinéticas muy diversas entre sí.

RELACION DE LOS DIAMETROS DE PULVERIZACION CON LA PRESION



Aire Teórico.- La cantidad de aire teórico necesario para la combustión A_t , de acuerdo con las ecuaciones de las reacciones químicas y la tabla de combustión, puede calcularse por medio de la siguiente ecuación conociendo la proporción de sus constituyentes:

$$A_t = \frac{11.47C + 34.48 (H - O) + 4.31S}{8}, \text{ en kg}$$

$$A_t = \frac{8.89C + 26.77 (H - O) + 3.33S}{8}, \text{ en m}^3$$

En donde H es el disponible para la combustión, que no está combinado en el oxígeno formando agua.

La cantidad de aire teórica para la combustión también puede ser expresada en forma práctica y conveniente, relacionándola con el poder calorífico superior del combustible y que para los aceites combustibles es de 6.1 kg de aire/10,000 kcal/kg.

Exceso de Aire.- Con objeto de asegurar que todo el combustible se mezcla con el oxígeno del aire, en la práctica se utiliza una mayor cantidad de aire que la teórica o estequiométrica, llamada exceso de aire que depende del tipo de combustible y sistema de combustión; si se designa al exceso de aire como E, la cantidad de aire real Ar empleado será:

$$A_r = A_t (1 + E)$$

Los valores usuales de E, son los siguientes:

Combustible gaseoso	5 a 10%
Combustible líquido	5 a 20%
Combustible sólido (en suspensión)	20 a 40%
Combustible sólido (en parrillas)	40 a 80%

FLAMAS.- El fuego y las llamas o flamas son las manifestaciones visibles del proceso fisico-químico de la combustión.

Existen varios límites para que se produzca la flama, siendo estos los siguientes:

- límite de inflamabilidad, que se refiere a las relaciones combustible- comburente mínimas y máximas.
- límites de temperatura a las cuales debe estar el combustible.
- límites de presión (el inferior está abajo de 10^{-3} atmósferas y en el superior se ha llegado hasta 100 atmósferas).
- el efecto pared, que se refiere a la limitación que tienen las paredes sobre la flama.

La temperatura teórica de la flama puede calcularse mediante las siguientes ecuación.

$$T = \frac{H}{\sum (n C_p)}$$

En donde

H = calor de combustión de 1 kg de combustible

$\sum (n C_p)$ = volumen de los gases de combustión CO_2 , SO_2 , H_2O y N_2 , multiplicados por sus respectivos calores específicos.

En una combustión estequiométrica, se podría alcanzar una temperatura teórica de $2100^\circ C$, en aceites combustibles.

En la práctica no se alcanza la temperatura anterior, debido a las siguientes causas:

- exceso de aire;
- calor sensible del aire;
- cantidad y calor de combustión de los productos de la reacción;
- radiación de la flama a las paredes del horno y caldera.

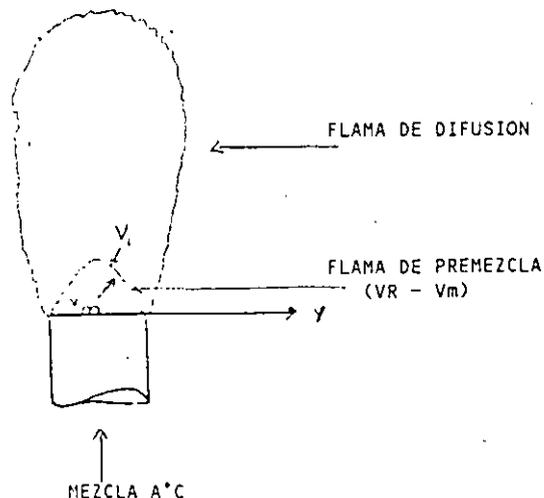
Flamas de Premezcla.

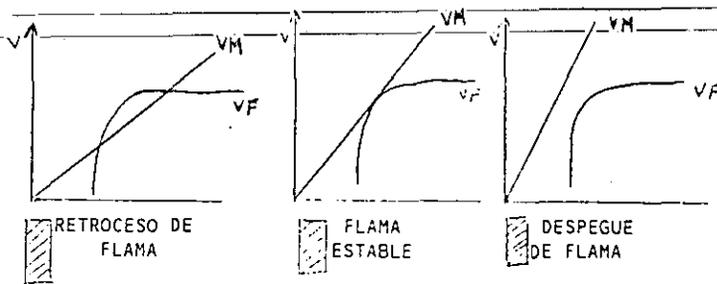
Este tipo de flamas tiene lugar cuando el combustible y el aire se mezclan antes de que comience la reacción química. El ejemplo más típico es el de un mechero de Bunsen cuando opera con su registro de aire abierto o bien la flama piloto de una caldera pequeña (aunque esta última suele ser mixta).

En las flamas de premezcla la velocidad del proceso está controlada por la velocidad de la reacción química de combustión, la que es propia para cada combustible.

Es obvio que este tipo de flamas sólo pueden obtenerse con combustibles gaseosos (o que se encuentren vaporizados antes de alcanzar el frente de flama).

Son flamas poco luminosas, de color azul.





ESTABILIDAD DE FLAMAS PREMEZCLA

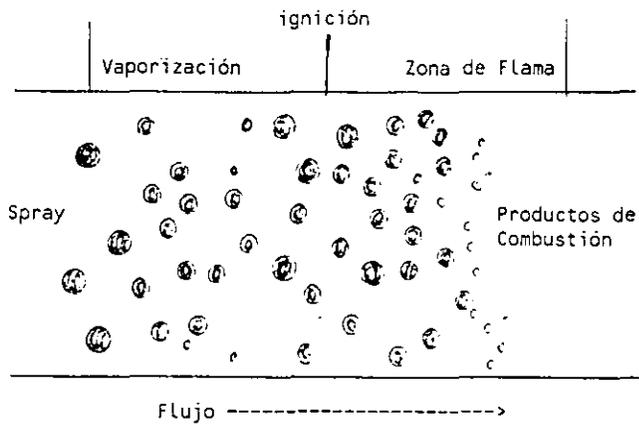
Flamas de Difusión.

Son aquellas en que el combustible y el oxidante alcanzan al frente de flama separados, formando una mezcla heterogénea. Este tipo de flamas tiene lugar cuando se quema un combustible líquido o sólido, y una de sus principales características es que la velocidad de quemado no depende de la rapidez de la reacción química de combustión (que es muy grande) sino de la velocidad de difusión interfacial de los componentes del combustible y del oxidante. Como ésta depende a su vez del área interfacial entre combustible y aire, se hace necesario desintegrar o atomizar el combustible para producir pequeñas gotas o partículas a modo de incrementar su área superficial y alcanzar de ese modo las velocidades de quemado necesarias para una combustión eficiente. Como ejemplo ilustrativo se puede mencionar que la atomización de 1cm³ de líquido en gotas de 1 mm de diámetro aumenta 1,128 veces su área superficial.

De lo anterior se desprende que el quemado de líquidos (o sólidos) atomizados difiere de la combustión de un sistema gaseoso premezclado en que, además de ocurrir a diferente velocidad, su composición no es uniforme.

El combustible se encuentra en forma de gotas o partículas discretas las que generalmente no son totalmente uniformes en tamaño y pueden moverse en diferentes direcciones y con diferentes velocidades respecto de la corriente gaseosa de aire.

Esta falta de uniformidad de la mezcla se refleja en irregularidades en la propagación de la flama y por lo tanto las zonas de combustión no resultan tan bien definidas como en el caso de las flamas de premezcla. Un esquema simplificado de las etapas que componen la combustión de un líquido atomizado permite distinguir dos zonas: en la primera (zona de evaporación), las gotitas formadas comienzan a evaporarse (y por tanto a disminuir de tamaño) a medida que se acercan a la superficie de ignición. En ésta, los vapores de combustible que rodean a las gotas entran en combustión y comienzan a formarse los productos de la misma. En la segunda (zona de flama), las gotas se siguen quemando hasta transformarse totalmente en productos de combustión.

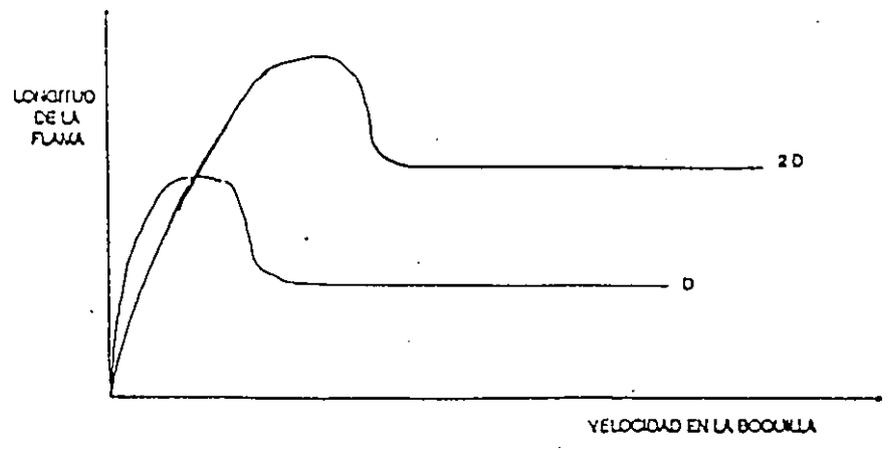
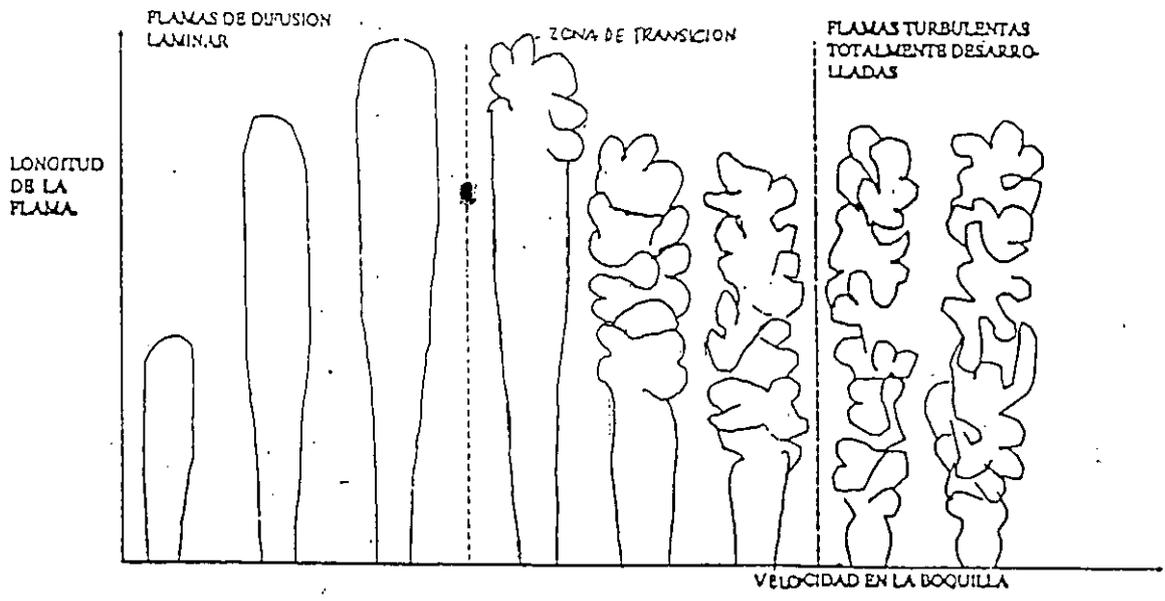


Flamas Laminares y Turbulentas.

Tanto las flamas de premezcla como las de difusión puede ser laminares o turbulentas.

En las flamas de tipo laminar, la propagación de la misma tiene lugar en un zona discreta y lisa, bien definida y que no presenta picos.

En las flamas de tipo turbulento (como la de un soplete), la zona de propagación es muy irregular, la relación de consumo de la mezcla aire/combustible es muy grande y por lo general van acompañadas de ruido.



2.- PRODUCTOS DE COMBUSTION

Cuando se tiene una combustión completa existen los siguientes productos en los gases de combustión.

Composición

CO₂
O₂
N₂
H₂O (en forma de vapor)

En los combustibles que contienen azufre (S), se tienen además SO₂ y SO₃.

En la combustión estequiométrica, se emplea 1 m³ de O₂ para la combustión de un m³ de carbono y se obtiene como producto de combustión 1 m³ de CO₂, pero como el O₂ se obtiene del aire atmosférico que está constituido por 21% de O₂ y 79% de N₂ en volumen (23.13% de O₂ y 76.87% de N₂ en peso), resulta que un combustible que no contenga Hidrógeno, Nitrógeno y Azufre deberá producir gases de combustión compuestos de 21% de CO₂ y 79% de N₂ en volumen. Como en la práctica el combustible no sólo está constituido por C, el valor máximo de CO₂ en los gases de combustión nunca llega a 21% y sólo se acerca más cuanto menor es el contenido de H₂, N₂ y S en el combustible. Para una combustión con exceso de aire y con un combustible formado prácticamente por C, la suma de CO₂ y O₂ se aproximan al 21%, siendo sus volúmenes complementarios para alcanzar esta cifra en función del exceso de aire empleado.

Cantidad de Gases de Combustión.- Los gases de combustión se componen de los gases secos y del vapor de agua; la cantidad de gases teóricos G₁ se puede obtener de la Tabla No. de combustión.

$$G_1 = 12.47 C + 26.48 \left(\frac{H - O}{8} \right) + 5.31 S + N, \text{ en kg}$$

$$G_1 = 8.89 C + 21.1 \left(\frac{H - O}{8} \right) + 3.36 S + 0.796 N, \text{ en m}^3$$

El valor $26.48 \left(\frac{H - O}{8} \right)$ ó bien $21.1 \left(\frac{H - O}{8} \right)$ es el nitrógeno que es liberado por el aire de combustión durante la combustión del H y 0.796 es el volumen específico del nitrógeno.

El vapor de agua contenido en los gases G_2 se calcula de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$G_2 = 9 H + E, \text{ en kg}$$

$$G_2 = 11.49 H + 1.244 E, \text{ en m}^3$$

En donde E es el contenido de agua o humedad en el combustible.

La cantidad total de gases teóricos G_3 , será:

$$G_3 = G_2 + G_1$$

$$G_3 = 12.47 C + 35.48 H - 26.48 \frac{O}{8} + 5.31 S + N + E, \text{ en kg}$$

$$G_3 = 8.89 C + 32.29 H - 21.1 \frac{O}{8} + 3.33 S + 0.796 N + 1.244 E, \text{ en m}^3$$

Si u es el exceso de aire, la cantidad real de aire A_r , será:

$$A_r = A_i (1 + u)$$

Y la cantidad de gases reales G_r , será:

$$G_r = G_3 + (A_r - A_i)$$

Densidad.- La densidad P de los gases de combustión de composición media a 0° y a 1.102 bar es:

$$P = 1.34$$

Calor Específico.- El calor específico es función de la composición y temperatura de los gases; el valor promedio de calor específico entre 0 y t °C de temperatura de un gas se designada por:

cp referido a 1 kg de gases

Cp referido a 1 m3 de gases

El calor específico aumenta con el incremento de temperatura; los gases de combustión que contienen vapor de agua tienen un calor específico mayor que los gases secos.

En la tabla , se muestran los calores específicos de algunos de los gases que componen los gases de combustión; como éstos en realidad son mezclas, el calor específico debe calcularse proporcionalmente a la composición.

Calor Total.- La cantidad de calor Q contenido en una masa G de gases con calor específico Cp o cp a la temperatura t es la siguiente:

$$Q = G C_p T, \text{ en Kcal/Gm}^3 \text{ de gas}$$

$$Q = G c_p t, \text{ en Kcal/Gkg de gas}$$

Si se enfrían Gm3 o Gkg de gases de la temperatura t a t', la cantidad de calor Q extraída de los gases es:

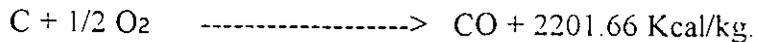
$$Q = G C_p (t - t'), \text{ en Kcal}$$

$$Q = G c_p (t - t'), \text{ en Kcal}$$

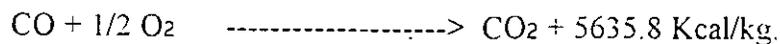
Siendo cp y Cp los calores específicos promedios entre t y t'.

Productos de Combustión de carbono:

En las primeras etapas de la combustión y como resultado de la combustión incompleta del carbono del combustible se forma monóxido de carbono según la reacción:



Casi inmediatamente, en presencia de oxígeno y siempre que la temperatura sea superior a 1000°C, el CO se oxida a CO₂ siguiendo la reacción:



Para que la oxidación de CO a CO₂ se complete antes de que los gases abandonen la región fuertemente reactiva de la flama, se requiere un buen mezclado aire combustible.

Si la aerodinámica de los quemadores no propicia esta mezcla, en los gases de salida se observarán altas concentraciones de CO coexistiendo con concentraciones de O₂ también elevadas.

Esta situación es perjudicial ya que, debido al elevado calor de combustión de la reacción de oxidación de CO, su presencia en los gases de escape implica una disminución apreciable de la eficiencia del generador de vapor.

Por ello es conveniente quemar el combustible utilizando todo el exceso de aire que resulte necesario para evitar la presencia de CO en los gases de combustión, esto es, para lograr la oxidación completa del C a CO₂. En la práctica esta oxidación puede considerarse "completa" cuando la concentración de CO en los gases de combustión es menor o igual que 200 p.p.m. en volumen.

También provienen de la combustión incompleta del C las partículas sólidas presentes en las regiones de baja temperatura (precalentador de aire y chimenea); dichas partículas son, como se ha dicho, básicamente de dos tipos: el hollín (o soot), constituido predominantemente por carbón y con un tamaño inferior a 5 micras, y las cenósferas, de tamaño entre 10 y 100 micras, formadas por una matriz carbonosa que incluyen óxidos y sulfatos provenientes principalmente de los metales presentes en el combustible.

La concentración de partículas carbonosas, así como su contenido de carbón y su morfología, están ligados a varios factores: cantidad de compuestos asfálticos y polar-aromáticos del combustible, diámetro medio de las gotas producidas por los atomizadores, exceso de aire de combustión y tiempo de residencia en la región de muy alta temperatura.

Las partículas pequeñas (soot) deben quemarse después de efectuar su aporte a la radiación total de la flama. Su presencia en los productos finales de combustión se debe a defectos locales de oxígeno, es decir, a una aerodinámica defectuosa.

Asimismo, la presencia de cenósferas en dichos productos, indica que la atomización no fue suficientemente buena como para permitir la combustión eficiente del combustible utilizando.

Productos de Combustión del Hidrógeno.

La combustión de hidrógeno forma agua siguiendo la reacción:



Productos de Combustión del Azufre.

Durante las primeras etapas del proceso de combustión, el azufre del combustible se oxida a bióxido de azufre:



En posteriores etapas, una pequeña cantidad de dióxido de azufre (1 a 3%) se oxida a trióxido de azufre (SO₃) siguiendo diversos mecanismos de reacción. La reacción es en realidad un equilibrio representado por:



El SO₃ es susceptible de combinarse con el agua presente en los gases de combustión para formar ácido sulfúrico, en cual puede depositarse en las zonas de baja temperatura del generador de vapor causando corrosión en las mismas.

Debido a que, cualquiera que sea el mecanismo de la reacción, siempre se requerirá oxígeno para convertir al SO₂ en SO₃, y este oxígeno solo podrá provenir del exceso de aire de combustión, resulta evidente la conveniencia de quemar al combustible con el menor exceso de aire posible para minimizar esta conversión.

Productos de Combustión del Nitrógeno.

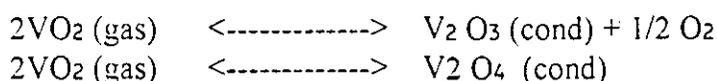
El aire contiene 79% en volumen de nitrógeno, parte del cual reacciona con el oxígeno junto con el nitrógeno que posee el combustible, a temperaturas superiores a 1500°C, formando diversos óxidos (NO_x) que se incorporan a los productos de combustión. La combustión de estos productos, depende del combustible utilizado, de la reacción aire/combustible y de las condiciones en que se realice la combustión.

Productos Provenientes del Vanadio.

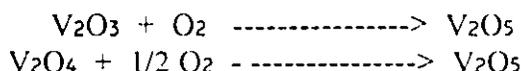
Los productos iniciales en que se transforma el vanadio durante el proceso de combustión son probablemente VO y VO₂ (monóxido y dióxido de vanadio respectivamente). La proporción relativa de los mismos queda determinada por la temperatura y la concentración de oxígeno en los gases.



Como estos óxidos tienen una presión de vapor muy baja aparecen en la flama como partículas sólidas o semisólidas de V₂O₃ y V₂O₄ (trioxido y tetraóxido de vanadio respectivamente) debido a las reacciones:



A medida que los gases se van enfriando, las partículas de V₂O₃ y V₂O₄ pueden absorber oxígeno transformándose en V₂O₅ (pentóxido de vanadio, con P.F. 687°C), siguiendo las siguientes reacciones:



Por su gran agresividad química y su bajo punto de fusión, el V₂O₅ es uno de los principales promotores de la corrosión en las zonas de alta temperatura del generador de vapor (bancos de sobrecalentadores y recalentadores). Combinado con el Sodio (Na) del combustible, forma sobre dichos bancos depósitos fundidos que, además de corrosivos son aislables del calor y reducen la eficiencia del generador de vapor. Por ello resulta conveniente tratar de inhibir la formación de V₂O₅. El modo más simple de hacerlo es reduciendo el exceso de aire de combustión para que los óxidos inferiores de vanadio (V₂O₃ y V₂O₄) no dispongan de oxígeno para oxidarse a V₂O₅.

3.- ENERGIA O CALOR DE COMBUSTION

La energía calorífica que producen los combustibles en el proceso de combustión puede ser determinada a partir del conocimiento de la composición de los combustibles. Esta energía calorífica está representada por el Poder Calorífico (superior o inferior) descrito para los diferentes tipos de combustibles en el Capítulo II, en la siguiente forma:

Gas natural:

$$9400 \text{ Kcal/m}^3$$

ó bien a partir de la composición elemental del gas multiplicados por sus respectivos poderes caloríficos.

Aceite combustible:

$$\text{PCS} = 7500 \text{ C} + 33\,830 \text{ H} + 2,000\text{S}; \text{ Kcal/kg}$$

Carbón:

$$\text{PCS} = 8,111 \text{ C} + 34,444 \left(\frac{\text{H} - \text{O}}{8} \right) + 2,250\text{S}, \text{ Kcal/kg}$$

Temperatura de Rocío. - La temperatura de rocío de los gases de combustión, es decir, la temperatura de condensación del H₂O en los gases no debe alcanzarse o trabajarse por debajo de ella, debido que las superficies de cambio de calor se humedecen con lo que se vuelven susceptibles a ataques de corrosión.

La temperatura de rocío varia con el exceso de aire empleado, con la humedad y con el contenido de azufre del combustible.

La temperatura de rocío aumenta con el contenido de S en el combustible; el S se quema y da SO₂ (Anhídrido Sulfuroso) que a temperaturas inferiores a 700°C para un exceso de aire dado produce SO₃ Anhídrido Sulfúrico. A temperaturas inferiores a 500°C el SO₃ por reacción en el vapor de agua de los gases de escape, se transforma en H₂ SO₄ Acido Sulfúrico que aproximadamente a 250°C alcanza el límite de saturación; de acuerdo con lo anterior, la temperatura de rocío se vuelve extremadamente importante en las calderas que queman aceite combustible con alto % de S como en el caso del combustóleo de México que tiene hasta un 4% de S.

Diagrama de Calor Total-Temperatura (J-t) Fig.

El diagrama de calor total-temperatura (J-t) es válido con una buena aproximación para todos los combustibles (sólidos, líquidos y gaseosos) y está fundamentado en el hecho de que en el caso de la combustión con la cantidad de aire teórico, el calor total por m³ de gas de combustión es aproximadamente el mismo para el carbono y para el hidrógeno.

En efecto 1 kg de C produce 1,867 m³ de CO₂ y 7.02 m³ de N₂ que dan en total 8.887 m³ de gases de combustión; el PCI de 1 kg de C es de 8080 Kcal, de tal forma que m³ de gases de combustión contienen $8080/8.887 = 909$ Kcal.

Por otra parte, 1 kg de H₂ produce 11.9 m³ de H₂O y 21.1 m³ de N₂, que dan en total 32.29 m³ de gases de combustión que contienen el PCI de H₂, es decir 28570 Kcal y en consecuencia, 1 m³ de gases de combustión contiene $28570 / 32.29 = 885$ Kcal.

La diferencia en el calor de los gases es de ± 1.33 en promedio.

En la misma forma el calor específico de los dos gases de combustión tiene poca diferencia.

En la parte vertical del diagrama se tiene el calor total de los gases y en la parte horizontal la temperatura, en tal forma que cuando se conoce el exceso de aire y el calor total por m³ de gas de combustión, se puede conocer la correspondiente temperatura de gas, o bien inversamente cuando se conoce la temperatura se puede determinar el calor total.

Densidad ρ , en kg/cm ³	1,257	1,429	1,293	1,977	0.804
t, en °C	N ₂	O ₂	Aire	CO ₂	H ₂ O
0	0.311	0.313	0.311	0.390	0.356
100	0.312	0.315	0.311	0.412	0.358
200	0.313	0.319	0.313	0.433	0.367
300	0.314	0.324	0.315	0.451	0.372
400	0.317	0.330	0.318	0.465	0.378
500	0.319	0.335	0.321	0.481	0.384
600	0.322	0.339	0.324	0.493	0.390
700	0.325	0.343	0.328	0.504	0.397
800	0.328	0.347	0.331	0.514	0.403
900	0.331	0.334	0.350	0.523	0.410
1000	0.334	0.354	0.337	0.530	0.416
1100	0.337	0.356	0.340	0.538	0.423
1200	0.340	0.359	0.343	0.545	0.427
1300	0.342	0.365	0.345	0.550	0.434
1400	0.345	0.364	0.348	0.556	0.439
1500	0.347	0.366	0.350	0.560	0.444
1750	0.352	0.370	0.354	0.571	0.453
2000	0.356	0.375	0.360	0.580	0.464

6

TABLA .-. CALORES ESPECIFICOS MEDIOS DE GASES, AI
RE Y VAPOR DE AGUA EN KCAL/M³ (A PRESION

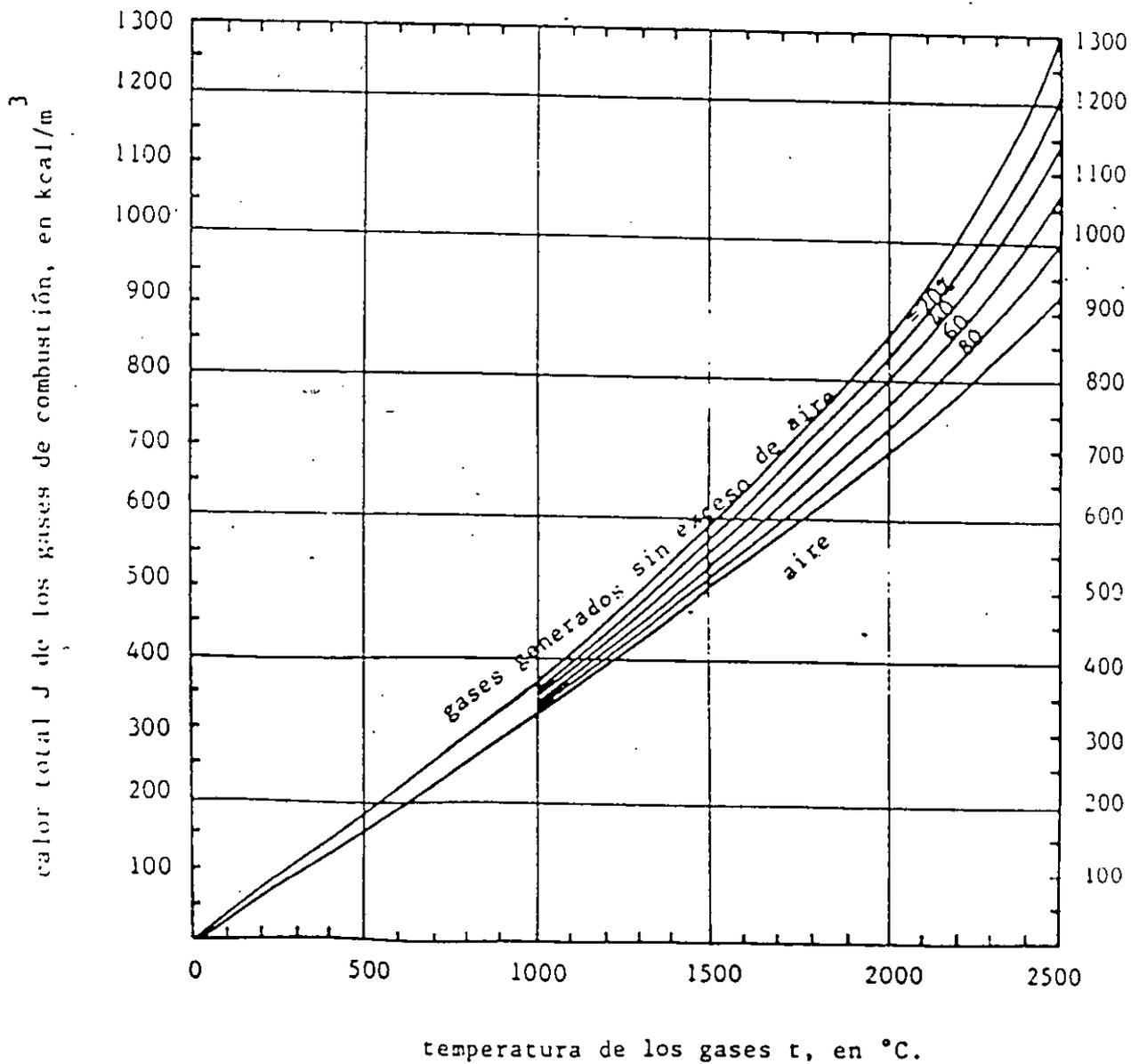


FIG. 1.- DIAGRAMA CALOR TOTAL-TEMPERATURA (J-t) DE GASES DE COMBUSTION.

4.- EL QUEMADO DE ACEITES COMBUSTIBLES

El quemado de aceite combustible en calderas es un proceso de naturaleza crítica, particularmente en lo que respecta al contenido de oxígeno en los gases de salida: insuficiente oxígeno resulta en problemas de emisiones en la chimenea, mientras que excesivo oxígeno está asociado a regímenes altos de corrosión, además de los problemas de eficiencias y económicos.

El éxito del proceso depende de la satisfactoria combinación de cámara de combustión-quemador, y se juzga por la extensión en la cual se incrementan los productos sin quemar en los gases de escape conforme la relación aire/combustible se aproxima a la estequiométrica.

Características de flama estable de aceite.

El mayor factor para asegurar la estabilidad, es la recirculación de gases calientes hacia atrás dentro del chorro de aire cargado con aceite atomizado, según puede observarse en la Fig. , de la valoración hipotética de la forma de una buena flama de aceite; éste retroceso o recirculación se facilita por el uso de ensambles de atomizadores que dan un rociado en la forma de un cono hueco. Debido a que la inversión tiene lugar dentro de un cono de mezcla casi quemándose, la ignición se afecta menos por la temperatura de combustión; después de que la ignición se ha establecido al final del área de flujo invertido, el resto de la combustión tiene lugar progresivamente en forma de difusión turbulenta.

Es muy conveniente que la mezcla sea uniforme; si se eleva la temperatura de una gota en ausencia de oxígeno (por falta de una mezcla uniforme), en la fase de vapor o líquido, puede ocurrir un rompimiento (cracking) con la producción de hollín.

El requisito primario para obtener una flama estable, es una buena boquilla de quemador y un suministro de aire secundario adecuadamente controlado en:

- . flujo de masa
- . velocidad
- . turbulencia

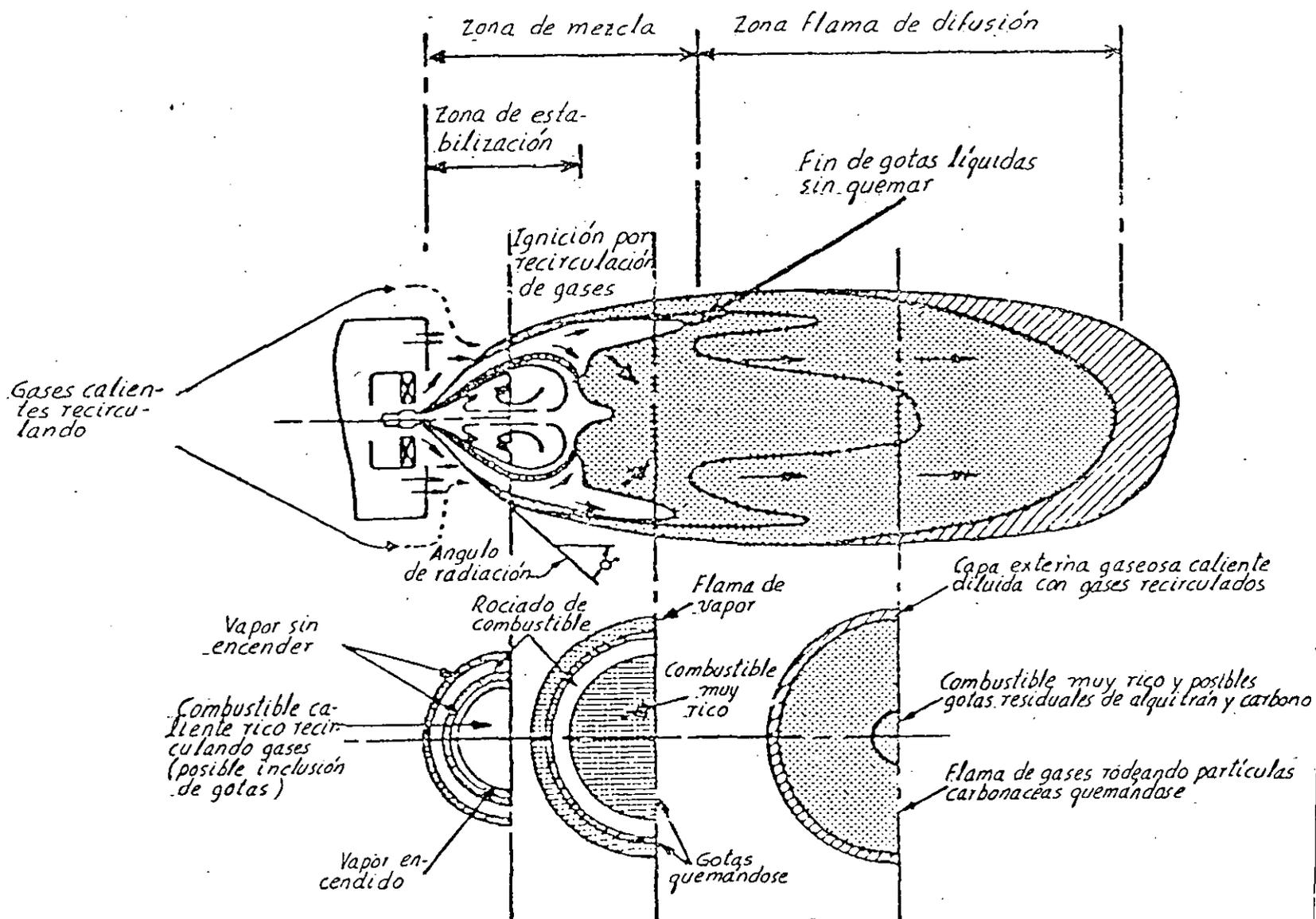
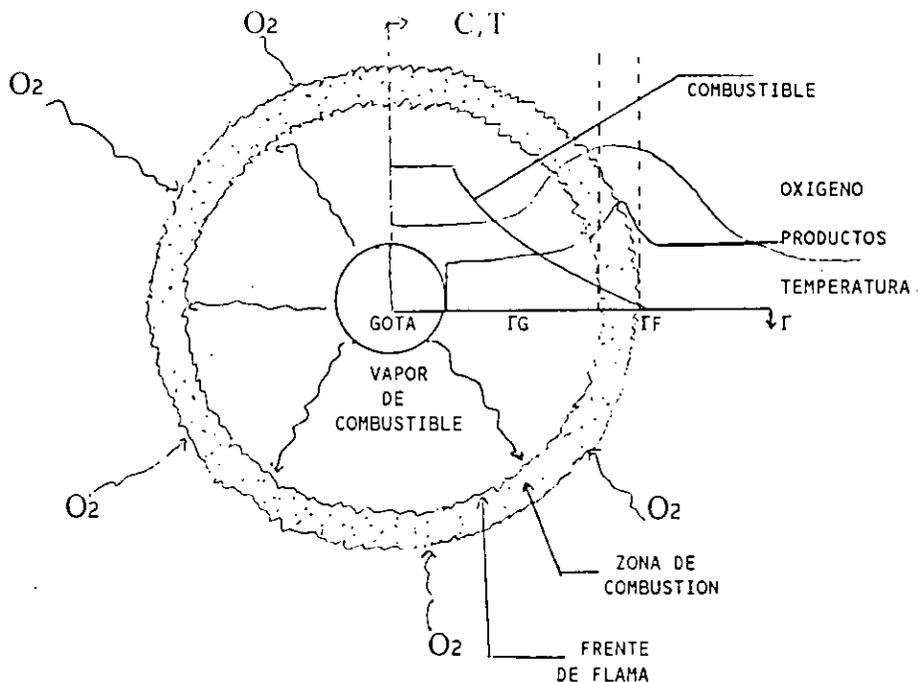


FIG COMPOSICIÓN ESPECULATIVA DE LAS FLAMAS DE ACEITES COMBUSTIBLES.

Exceptuando algo de control en la presión de la caja de aire, los tres factores anteriores no están bajo el control inmediato del operador, siendo dependiente del tamaño y precisión del cañón disposición de aire dentro de la caja de aire, forma del ducto de trabajo que lleva el aire secundario al cañón del quemador, etc., sin embargo hay dos cosas bajo el control del operador:

- . Boquilla del quemador
- . Fugas de la cubierta

Si se considera la combustión de una gota aislada, el modelo puede esquematizarse del siguiente modo:



Como puede verse, la flama "envuelve" a la gota, pero se encuentra separada de ella debido a que para que tenga lugar la reacción de combustión es necesario que los vapores de combustible difundan desde la gota hacia el exterior y que el oxidante lo haga en sentido inverso lo cual pone de manifiesto la importancia de la atomización en el proceso de combustión de gotas. De este modo y debido a las diferentes velocidades de difusión, la superficie de la flama tiene un radio r_f mayor que el radio r_g de la gota.

En la figura ~~se describen los perfiles de temperatura y concentración que se establecen durante el quemado de una gota esférica según el modelo anterior.~~

Puede demostrarse a partir de las ecuaciones fundamentales de transferencia de energía, masa y momento que bajo las suposiciones asumidas en el planteo del modelo, el tiempo de quemado de una gota es proporcional al cuadrado de su diámetro inicial, o sea, tiempo de quemado D_i^2 .

Es necesario sin embargo tener en cuenta que las consideraciones anteriores corresponden a un modelo idealizado.

La combustión real de un combustible líquido pesado como el combustóleo en el hogar de un generador de vapor es un proceso mucho más complejo que el planteado, ya que involucra una gran cantidad de gotas que interactuarán entre sí y con el aire de combustión.

En este tipo de flamas, la gota primeramente se calienta (absorbiendo calor de los alrededores) hasta que se forma suficiente vapor a su alrededor como para formar una mezcla combustible de vapor de combustible y aire. El tiempo requerido para que esto ocurra es usualmente llamado "retardo de transición" y es una función del tamaño de la gota (gotas más grandes requieren más tiempo) y de las propiedades del combustible (principalmente de su punto de ebullición promedio). Una vez que se alcanza la mezcla combustible de vapor y aire ocurre la ignición y la flama inunda a la gota quemando la fase vapor que la rodea a cierta distancia finita de la superficie de la gota.

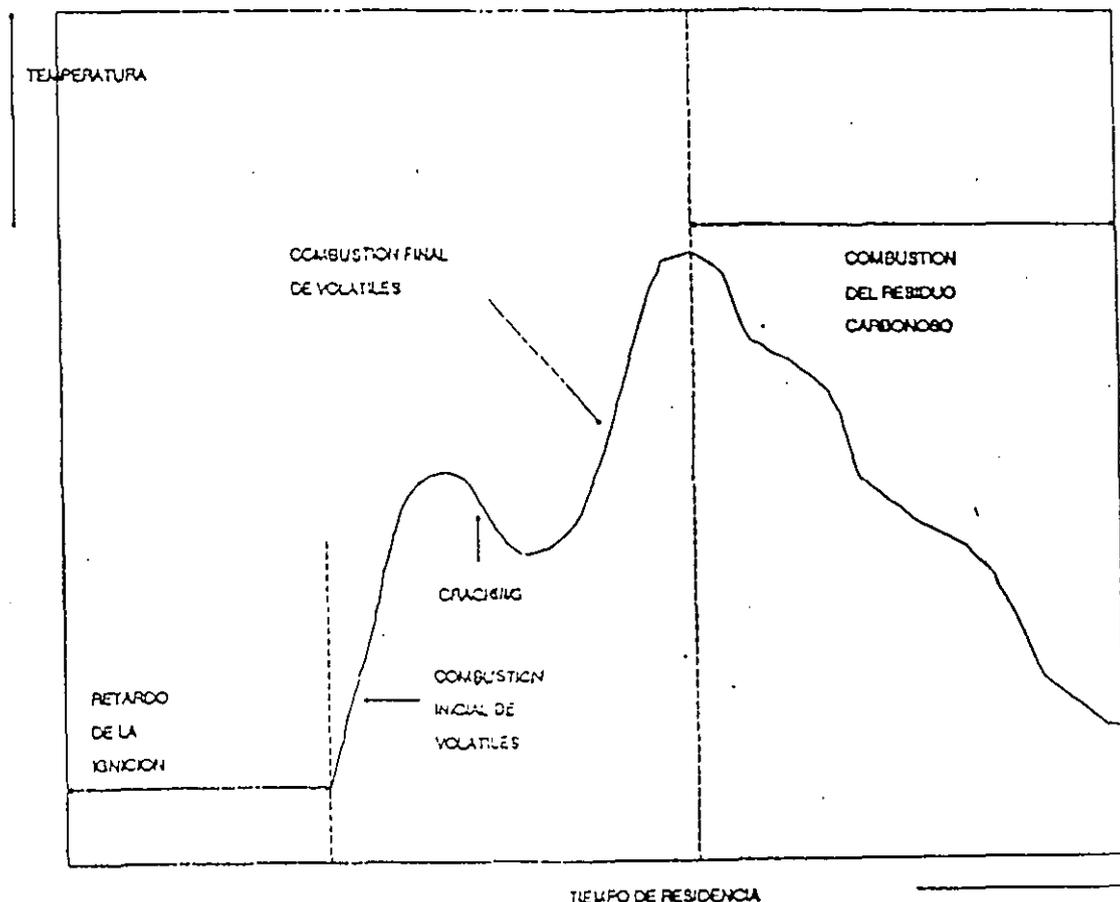
La radiación emitida por la flama continua calentando la gota y haciendo aumentar su temperatura.

Durante la combustión de aceites residuales, las fracciones más volátiles se vaporizan y se queman primero produciendo el aumento inicial de la temperatura de la gota ya visto.

Entonces ocurre algo curioso: la temperatura de la gota cae por un cierto tiempo y luego comienza a aumentar de nuevo. La razón de esta caída de la temperatura se piensa que se debe a que ocurren varias reacciones endotérmicas complejas que resultan en un craqueo químico de las moléculas grandes que están en la gota. El tramo final de la combustión de gotas no ocurre en fase vapor sino como combustión superficial del residuo carbonoso. Durante esta fase final el carbón puede romperse formando partículas más pequeñas las cuales finalmente se queman transformándose en cenizas. Esta etapa final de la combustión generalmente requiere entre el 30% y el 40% del tiempo total de quemado de la gota.

La combustión de flama envolvente casi siempre ocurre en flamas de premezcla de combustibles líquidos. Esto es, flamas en las que el combustible es atomizado al punto en el que no existen prácticamente gotas mayores a 10-20 μ seguido por casi completa evaporación y mezclado de este aerosol con el aire de combustión antes de que se inicie la combustión. Debe enfatizarse que la luminosidad de las flamas también varía como función del combustible (residuo carbonoso en el combustible) y no debería esperarse flamas de premezcla con combustóleo. No obstante, para combustible con bajo residuo de carbón este tipo de flama es usualmente no luminosa. El conocimiento de combustión de flama envolvente es de gran valor para entender el mecanismo de combustión en grandes flamas industriales.

VARIACION TIPICA DE LA TEMPERATURA DE UNA GOTA CON EL TIEMPO DE RESIDENCIA EN EL HOGAR



Un segundo tipo de combustión de gotas es normalmente asociado con gotas grandes de combustibles (gotas mayores que 20-50 μ m), que no siguen las líneas de corriente de aire de combustión como lo hacen las gotas pequeñas.

Este tipo de combustión se llama "heterogénea" o "combustión de estela" y simula más precisamente lo que ocurre en la raíz de flamas industriales en las que el tamaño de las gotas es grande.

La combustión de estela es básicamente controlada por convección forzada sobre la gota que se está moviendo a velocidad relativamente alta con respecto al aire de combustión.

Se dice que una gota se quema con combustión de estela cuando ha alcanzado su "velocidad de extinción" (la velocidad relativa entre la gota y el aire a la cual la flama envolvente alrededor de la gota se extingue). Esta velocidad de extinción depende de la concentración de O_2 y CO_2 en el aire. En la combustión de estela, el calor es transferido a la gota por sus alrededores vía convección forzada de los gases calientes que la rodean. Los vapores desprendidos fluyen dentro de la estela turbulenta detrás de la gota hasta alcanzar una mezcla de aire y vapor capaz de quemarse, y entonces ocurre la ignición si la temperatura en la estela es suficientemente alta para ello.

Una vez que ocurre la ignición, el calor se transfiere desde la estela al gas que rodea de atrás a la gota por transferencia de masa turbulenta de productos de combustión calientes y muy poco o nada de calor, es transmitido a la gota por su propia estela. La transferencia de calor por radiación a la gota en este modo de combustión es incluso despreciable. Por esas razones, es virtualmente imposible mantener la ignición de una gota grande que se está quemando con combustión de estela si se mueve a una región en la que los gases que la rodean están por abajo de la temperatura de ignición correspondiente al vapor de combustible que se está produciendo. Por lo tanto, las flamas con mala calidad de atomización tienden a tener menor cantidad de gotas pequeñas recirculando cerca de la ficha de atomización y son muy difíciles de encender.

Existe otro problema que posteriormente complica los problema de combustión de gotas grandes en combustión de estela. Los productos de combustión al expandirse tienden a llenar otra estela turbulenta detrás de la gota y el resultado es una reducción significativa de el coeficiente de arrastre de la gota. Cuando esto ocurre, el movimiento de la gota es dominado por su inercia y se acelera respecto de los gases que la rodean. Si el tamaño inicial de las gotas es grande, el efecto de aceleración puede ser significativo. En algunas flamas reales el efecto es el de empujar a las gotas completamente fuera de la región de combustión.

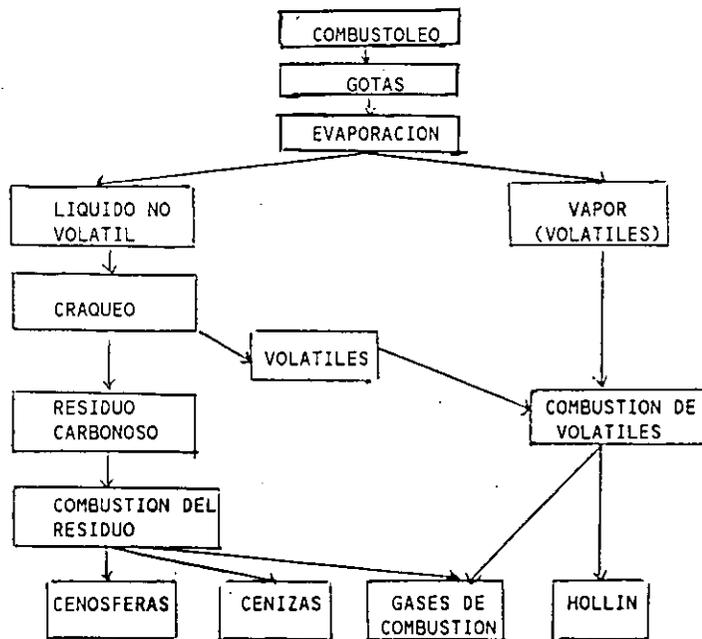
En combustión de estela (igual que en flama envolvente) una vez completada la combustión de la fase vapor, comienza la combustión del residuo o carbonoso. Si el diámetro de éste excede las 10-20 μ m la combustión cerca de la superficie de la partícula ocurrirá en la estela turbulenta detrás de la partícula. El calor se transfiere por conducción a las partes internas de las partículas intensificando la combustión en la superficie y dentro de la partícula misma.

Si se mantiene la combustión continuamente eventualmente se quemará toda partícula sin dejar residuo de carbón, sin embargo, si la partícula se mueve hacia una región de baja temperatura (como el eje de la flama) el gas relativamente frío que fluye sobre ella, puede enfriar la superficie exterior y extinguir la combustión de la misma.

Así se forman las cenósferas (esferas huecas de carbón con unas porciones de la superficie quemada durante la etapa de la combustión de estela).

Quemado de Combustóleos.

Desde un punto de vista físico, el proceso de combustión del combustóleo puede representarse mediante el siguiente esquema:



El primer paso del proceso lo cumplen los atomizadores. Su función es inyectar el combustible en la cámara de combustión en forma de pequeñas gotas con velocidad y trayectorias tales que propicien un buen mezclado con el aire de combustión. Si bien existen múltiples diseños, el tipo de atomizador más usado es el que emplea vapor como fluido auxiliar. En este caso, el tamaño de las gotas producidas aumenta con la viscosidad del combustible (a mayor viscosidad, gotas más grandes), y disminuye con el incremento de la cantidad de vapor utilizando (a mayor relación vapor/combustible gotas más pequeñas).

El diámetro medio de las gotas es necesario para lograr una buena combustión, depende primordialmente de la calidad del combustible. Para el caso de combustóleo con altos contenidos de asfaltenos se requiere una atomización muy fina (diámetro promedio 100 micras), para evitar la producción de partículas carbonosas.

Producida la atomización del combustible, se forma una mezcla macroscópica de las gotitas con el aire de combustión y con los gases calientes recirculantes.

Esta mezcla produce un calentamiento de las gotitas por transferencia convectiva de calor del aire precalentado y de los flujos recirculantes de gases de combustión y por radiación de la flama, lo que determina la evaporación parcial de las gotitas y la mezcla de los vapores de combustible con el aire de combustión. Durante la evaporación se separan los volátiles de los no-volátiles. Dentro de los no-volátiles se encuentran los asfaltenos y los metales pesados.

Cuando la composición y temperatura son adecuadas (mezcla dentro de los límites de inflamabilidad y temperatura necesaria para iniciar las reacciones), se produce el encendido de la mezcla. Las gotitas más pequeñas se evaporan y encienden más rápido. La combustión es esencialmente la del vapor de combustible.

Simultáneamente los asfaltenos son fraccionados por efecto térmico. Este efecto denominado craqueo produce volátiles y un residuo carbonoso, los volátiles se queman produciendo gases de combustión y hollín, mientras que el residuo carbonoso se puede quemar total o parcialmente, produciendo cenósfera, cenizas y gases de combustión (las cenósferas se forman a partir del residuo carbonoso, por la combustión incompleta del mismo).



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

C U R S O S A B I E R T O S

CONTROL DE CONTAMINACION Y AHORRO DE ENERGIA EN CALDERAS

QUEMADORES Y HORNOS

ING. MARTINIANO AGUILAR R.

III.- QUEMADORES Y HORNOS

I.- QUEMADORES

A.- GENERAL

El objeto de usar quemadores para quemar el combustible en las calderas, es el de extender la liberación de calor en el horno a través de un volumen más grande de el hogar, que el que fue posible primeramente con los equipos de parrillas para el quemado de combustible; los quemadores de combustible introducen este junto con el aire en una mezcla tan bien realizada, que la combustión se completa mientras el combustible está todavía en suspensión.

Como la combustión esta condicionada a factores aerodinámicos y térmicos, el significado del proceso de combustión no puede ser estudiado independientemente del quemador o parrillas y el hogar en donde tiene lugar el proceso de combustión; a continuación se presentan algunos principios fundamentales sobre los quemadores.

El quemador es un elemento del hogar para combustión en suspensión que asegura la alimentación del combustible con aire en proporciones bien estables y crea las condiciones aerodinámicas necesarias para producir en el hogar una flama con características adecuadas a la instalación.

De la definición general anterior de quemador, resultan sus principales funciones:

- Preparación del combustible para la mezcla con el aire.
- Asegurar la dirección y velocidad del chorro de aire y de combustible para el mezclado.
- Regulación del flujo de aire y de combustible para asegurar una cierta carga térmica con una cierta relación de aire-combustible.
- Crear las condiciones de estabilidad de la flama en su campo de funcionamiento.
- Realizar la turbulencia inicial necesaria para obtener una cierta velocidad de combustión.
- Dirigir el combustible y el aire de modo que se realice una cierta distribución de la flama de acuerdo con las zonas de temperatura del hogar.

La variedad de combustibles utilizados y las características de las flamas necesarias en el hogar hacen que existan numerosos tipos de quemadores; la clasificación de estos tipos es solo posible bajo ciertos criterios de funcionamiento y fabricación.

Los quemadores de atomización o pulverización mecánica están constituidos por un inyector o atomizador que tiene la misión de dividir el aceite en finisimas gotas, o bien, de proyectar en el interior de la cámara las partículas de carbón previamente pulverizado y por un sistema de entrada de aire estudiado en forma que asegure una mezcla lo más íntima posible de las gotas de atomización o de las partículas de carbón con el aire en forma tal que cada una disponga de la cantidad de oxígeno necesaria para su combustión.

B.- QUEMADORES PARA COMBUSTIBLE GASEOSO

Normalmente el combustible gaseoso que se emplea en las calderas es gas natural compuesto principalmente por metano y sólo en calderas muy pequeñas se emplean otros combustibles como gas licuado a presión, gas de alto horno, etc., provenientes de procesos de industrias.

En general los combustibles gaseoso se queman y se regulan con mayor facilidad. La combustión se realiza en una sola fase y no existen problemas de atomización y vaporización de combustibles sólidos. Los quemadores de gas se pueden regular fácilmente y su presión es más baja que el de los quemadores de combustibles líquidos y sólidos.

Según la forma de introducción del gas y del aire en el horno los quemadores de gas se clasifican en: quemadores con llamas de difusión, en los que el gas y el aire penetran sin mezclar en la cámara; quemadores con premezclado parcial, y quemadores con llamas de premezclado total. Esta clasificación es indicativa puesto que a menudo muchos quemadores de gas presentan propiedades de dos categorías.

Las propiedades típicas de los quemadores con premezclado son: llama corta, intensa y fuerte, de gran velocidad, alta temperatura y baja luminosidad. Por el contrario los quemadores de difusión producen llamas largas y suaves, poco intensas y de temperaturas relativas bajas.

Los quemadores con premezclado representan la categoría más difundida de quemadores industriales de gas. Generalmente son capaces de producir todo tipo de mezclas mediante la simple regulación del aire y del gas con lo que se obtiene el premezclado total y se consigue la liberación de calor mas uniforme o lo que es lo mismo el menor volumen de combustión para una determinada capacidad.

~~En la construcción de quemadores de grandes flujos se prevén dispositivos que crean condiciones para una combustión intensa.~~ El movimiento axial de gran turbulencia necesario para la combustión intensa se puede obtener introduciendo el chorro de la mezcla en obstáculos no aerodinámicos que provocan turbulencia por aceleración brusca de la corriente y por turbulencia local creada en los espacios de los obstáculos. Los obstáculos pueden ser rejillas auxiliares cuyo efecto turbulento se determina siempre experimentalmente. El método que más se emplea para intensificar la combustión es el de la mezcla turbulenta del aire antes de la zona de combustión que, en forma general, asegura un movimiento helicoidal del aire de combustión que siendo relativamente grande le da también movimiento helicoidal al combustible. La turbulencia se obtiene introduciendo el aire al quemador en una carcasa espiral o introduciendo en el tambor de aire una serie de paletas que eventualmente pueden ser con dirección regulable, que imprime al aire un movimiento circular.

Desde el punto de vista funcional estos quemadores, debido a la turbulencia creada en el movimiento helicoidal y de una mezcla bien realizada, dan flamas cinéticas cortas y con un ángulo grande de salida; los quemadores de este tipo solo pueden efectuarse con admisión periférica del gas. En el centro de la turbulencia se crea una zona con velocidad axial pequeña que a veces es nula o negativa y en la periferia se tiene la velocidad mayor por lo que es normal que el combustible se introduzca en esta parte en donde el flujo de aire específico por sección es mayor.

En el caso de turbulencias muy fuertes puede aparecer una zona de depresión en el centro del quemador con circulación inversa del fluido (del hogar hacia el quemador); esta situación debe evitarse ya sea disminuyendo la turbulencia, o acelerando la salida del chorro con dispositivos auxiliares para aumentar la velocidad en el centro. El regreso de la flama hacia el quemador produce el apagado de la flama.

C.- QUEMADORES PARA COMBUSTIBLE LIQUIDO

Para realizar la combustión del combustible líquido en un tiempo breve (2 a 3"), tiempo de recorrido en el hogar, el combustible líquido debe pulverizarse en partículas finas con lo que se aumenta la superficie de contacto con el aire de combustión y se disminuye el espesor del estrato de quemado; la energía necesaria para separar el combustible en partículas se hace, ya sea comprimiendo el combustible con ayuda de una bomba (pulverización mecánica) o con un agente secundario que puede ser aire para combustión o vapor. Para obtener partículas suficientemente finas la viscosidad del combustible debe ser de 1.5 a 2°E admitiéndose, en algunos casos, hasta 5°E. El combustible especial utilizado en las calderas pequeñas es suficientemente fluido para pulverizarse, pero el combustóleo debe precalentarse de 360 a 420 °K para obtener la fluidez necesaria.

Si se intenta quemar un aceite, en estado líquido, la única parte que participa en la combustión es el vapor que se forma en la superficie del líquido y que se quema a una velocidad que va unida a la posibilidad del vapor de mezclarse con el oxígeno presente.

Los combustibles líquidos pueden quemarse, ya sea mediante su evaporación para que reaccionen como gases, o mediante la subdivisión en gotas diminutas que, calentadas por radiación y mezcla turbulencia, se evaporarán durante la combustión.

Generalmente, el diámetro de las gotas producidas, oscila entre 10 a 200 micras, aunque también pueden darse gotas más gruesas.

Suele admitirse que un buen atomizador comercial produce más de un 85% de las gotas con un diámetro inferior a 50 micras.

La necesidad de subdividir el aceite en gotas pequeñas y de que éstas tengan que mezclarse con el aire por turbulencia se explica por la condición de aumentar con la evaporación la superficie del líquido en la combustión y además por las siguientes consideraciones: el aceite combustible se compone de moléculas que sufren rompimiento ("cracking") fácilmente con el calentamiento y durante la pirolisis se pasa por una fase en que se produce carbono libre mezclado con residuos parcialmente "craquizados" y moléculas de anillos condensados poliaromáticos con un peso molecular elevado.

Si estas mezclas se encuentran con superficies sólidas y faltas del aire necesario se producen formaciones de una masa carbonosa que se acumula y tiende a obstruir los conductos del horno, si las paredes se hayan alejadas del quemador no es estrictamente necesario que la subdivisión y la mezcla sean perfectas pero si el espacio de la cámara de combustión es limitada se manifiesta la exigencia de una subdivisión finísima y una buena mezcla.

Una buena instalación de combustión de aceite debe reunir los siguientes requisitos:

- a) lograr una intensidad elevada de combustión, es decir quemar la mayor cantidad de aceite en un volumen determinado.
- b) conseguir el máximo campo de regulación que sea compatible con el rendimiento de la combustión.
- c) llegar a un rendimiento de combustión, relación entre el calor liberado y al poder calorífico, que sea superior a 99%.
- d) evitar desperfectos en las paredes o en los tubos de la cámara de combustión debido a depósitos de carbón y hollín.

- e) capacidad de modificar la forma de la llama dentro de algunos límites para permitir la posibilidad de adaptación a las dimensiones de la cámara de combustión.
- f) lograr la temperatura más alta de llama, o dicho de otro modo funcionar con el mínimo exceso de aire sin producción de elementos sólidos o gaseosos no quemados en los gases de combustión.

D.- QUEMADORES DE CARBÓN PULVERIZADO

La complejidad de las instalaciones para alimentar carbón en polvo a las calderas, hace que esta solución sea utilizada solo para calderas medianas y grandes, con lo que resulta que el quemador respectivo sea para flujos grandes de combustibles. El transporte del carbón pulverizado se hace en forma neumática con lo cual se beneficia el quemador de llevar una mezcla formada de aire primario-carbón (de 20 a 50% del aire total), con lo que el quemador sólo tiene el papel de efectuar una buena mezcla del chorro primario con el aire secundario.

En los quemadores de carbón pulverizado, el ventilador de aire primario trabaja a presiones de 100 a 200 mm de H₂O, con lo que se obtiene la energía necesaria para el transporte del carbón en la mayoría de los casos. El flujo necesario de aire primario varía entre el 10% del aire total de combustión en el sistema con almacenamiento y el 40% en el sistema de alimentación directa, siendo estas cifras únicamente informativas, ya que la cantidad de aire primario es función también de la cantidad de materias volátiles presentes en los carbones.

2.- HORNOS (HOGARES)

A.- GENERAL

El horno de las calderas es una cámara en donde se quema el combustible, normalmente de sección cuadrangular o circular, cerrada en sus cuatro lados con tubos de agua que se conocen por paredes de agua y también en el fondo y en el techo; el diseño del horno no solo considera el fenómeno de combustión, sino también la evacuación o transmisión de calor.

Las principales funciones del horno u hogar son las siguientes:

- mantener una combustión estable del combustible suministrado y realizar la combustión completa de éste, para la cual deberá tener un tamaño adecuado.
- permitir una circulación de agua suficiente a través de las paredes para enfriar todos los tubos de las paredes de agua a un nivel apropiado de temperatura.
- mantener una temperatura de los gases, a la salida del hogar, adecuada para que en las superficies de calentamiento por convección, se tenga un efectivo cambio de calor y una temperatura del metal de los tubos apropiada.

El combustible se inyecta al hogar junto con el aire para la combustión, en donde se quemará completamente y el calor radiante de la flama y de los gases de combustión es absorbido por los tubos de las paredes de agua que los transmiten al agua que fluye dentro de ellos. Los gases de combustión enfriados por los tubos de las paredes de agua a una temperatura apropiada, salen del hogar y entran a las superficies de calentamiento por convección del sobrecalentador, recalentador y economizador.

Considerando el desarrollo de los fuegos y la colocación de quemadores, los hogares pueden clasificarse en la siguiente forma:

- paralelos (quemadores al frente o al frente y atrás)
- turbulento (quemadores en las esquinas que inyectan el combustible en forma tangencial cerca del centro).

Los factores que influyen en el diseño (volumen y proporciones) del hogar son principalmente los siguientes:

- . tipo de combustible
- . características de las cenizas del combustible
- . régimen de variación de carga
- . régimen de liberación de calor, % de recuperación de calor en forma económica.
- . paredes (material, fabricación, etc.)
- . otros como temperatura máxima, exceso de aire, longitud de la flama, etc.

En la Fig. , se muestran las proporciones y tamaños relativos de los hogares para los diferentes tipos de combustibles: carbón, petróleo y gas. En el caso del carbón los hogares pueden ser para quemarlo en lechos o parrillas y para quemarlo en suspensión utilizando quemadores.

El espacio necesario para la combustión está estrechamente relacionado con la forma de la flama. Generalmente el modelo de quemador es el que determina la forma del horno y sólo en casos excepcionales es preciso que un quemador se ajuste a las dimensiones de una cámara de combustión; esto no excluye que para las dimensiones de una flama determinada se pueda fabricar un horno con medidas diferentes.

En la Fig. , se muestran las longitudes de las cámaras de combustión, según el flujo de aceite combustible.

Se entiende por rendimiento de una flama en una cámara de combustión, la relación entre el calor absorbido por el material a calentar, o bien, transformado en potencia y el calor liberado durante la combustión.

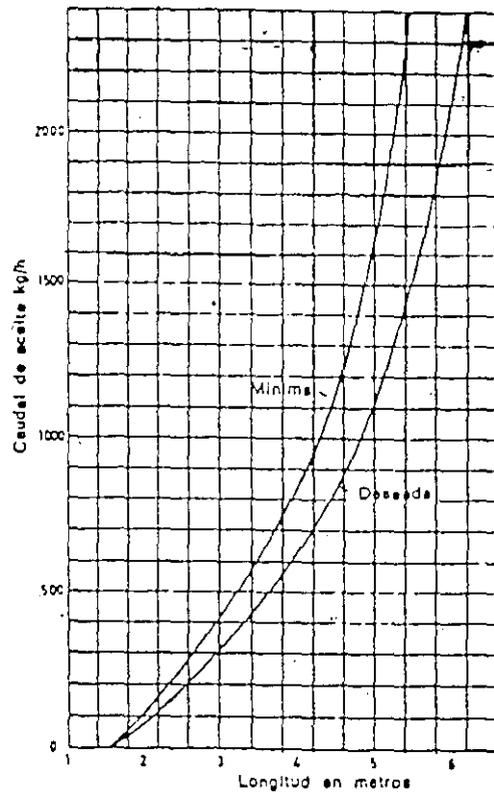
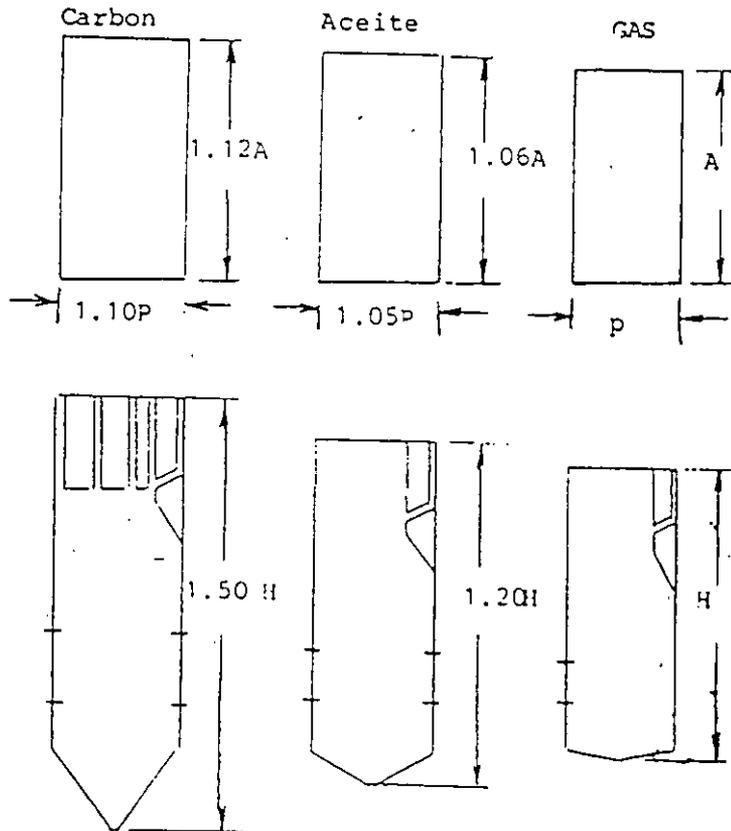


Fig. -Longitud de la cámara de combustión según el caudal del quemador (Peabody).
 (Nota: por longitud "deseada" se entiende la que aconseja el constructor del quemador).



Exceso de aire	25	10	8
Relación C/H	15	6 a 8	3
Relación en peso aire / combustible	12	16	18

FIG. TAMAÑOS RELATIVOS Y PARAMETROS AIRE-COMBUSTIBLE DE HOGARES DE CALDERAS

B.- REGIMENES DE LIBERACION DE CALOR.

El régimen de liberación de calor volumétrico en el hogar Cl_v de las calderas, en Kcal/m³h, de acuerdo con el tipo de combustible y método de quemado así como con el tipo de pared de agua es el siguiente:

combustible y método de quemado	paredes sólidas refractarias (Kcal/m ³ h)	paredes metálicas enfriadas con agua (Kcal/m ³ h)
carbón de parrillas	200 000	250 000
carbón pulverizado	150 000	200 000
aceite	200 000	300 000
gas	200 000	300 000

El volumen V del hogar, puede calcularse en la siguiente forma:

$$V = W_c \frac{PCS}{Cl_v} \text{ en m}^3$$

en donde:

W_c = cantidad de combustible necesario para la capacidad de la caldera, en kg/h.

PCS = poder calorífico superior del combustible, en Kcal/kg

Cl_v = régimen de calor liberado volumétrico, en Kcal/m³h (tabla anterior)

El régimen de liberación de calor superficial Cl_s , varía entre 210 000 y 250 000 Kcal/m²h, con el cual se puede calcular la superficie del hogar S_h , de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$S_h = W_c \frac{PCS}{Cl_s} \text{ , en m}^2$$

Temperatura de salida de gases.- La temperatura de salida del hogar de los gases de combustión tiene mucha influencia sobre la seguridad y economía de operación de las calderas, pues si es muy alta las cenizas fundidas son arrastradas y se depositan en las superficies de convección, pero si es muy baja entonces se tienen problemas por combustión incompleta o inquemados; para combustibles normales esta temperatura varía entre 950° y 1150°, recomendándose en general que sea de 50° a 100°C inferior a la temperatura de fusión de las cenizas.

Con objeto de poder hacer una estimación apropiada de la temperatura del hogar, enseguida se da la correlación que existe con el color de los fuegos en el interior del hogar:

rojo visible solamente en la oscuridad	500°C
rojo oscuro	700°C
rojo cereza oscuro	800°C
rojo cereza	900°C
rojo cereza claro	1000°C
naranja oscuro	1100°C
incandescente claro	1150°C
naranja claro	1200°C
blanco incandescente	1300°C
blanco deslumbrante	1400°C

La Fig. , se muestra la correlación de la temperatura de salida del hogar con la temperatura teórica de combustión, la transferencia de calor en Kcal/mzh y el grado de ennegrecimiento del hogar.

LOS PROBLEMAS DE LAS CENIZAS

Los principales problemas que causan las cenizas son el desgaste de los tubos o superficies metálicas, corrosión y depósitos que disminuyen la transferencia de calor y obstruyen el paso de gases. El término ceniza se aplica a los residuos que quedan después de quemar combustible sólido como carbón, coque, madera, etc. y puede ser: clinker, escoria o ceniza volante. El clinker es ceniza parcialmente fundida y después solidificada, la escoria es un material duro parecido al vidrio y las cenizas volantes son partículas de ceniza muy finas.

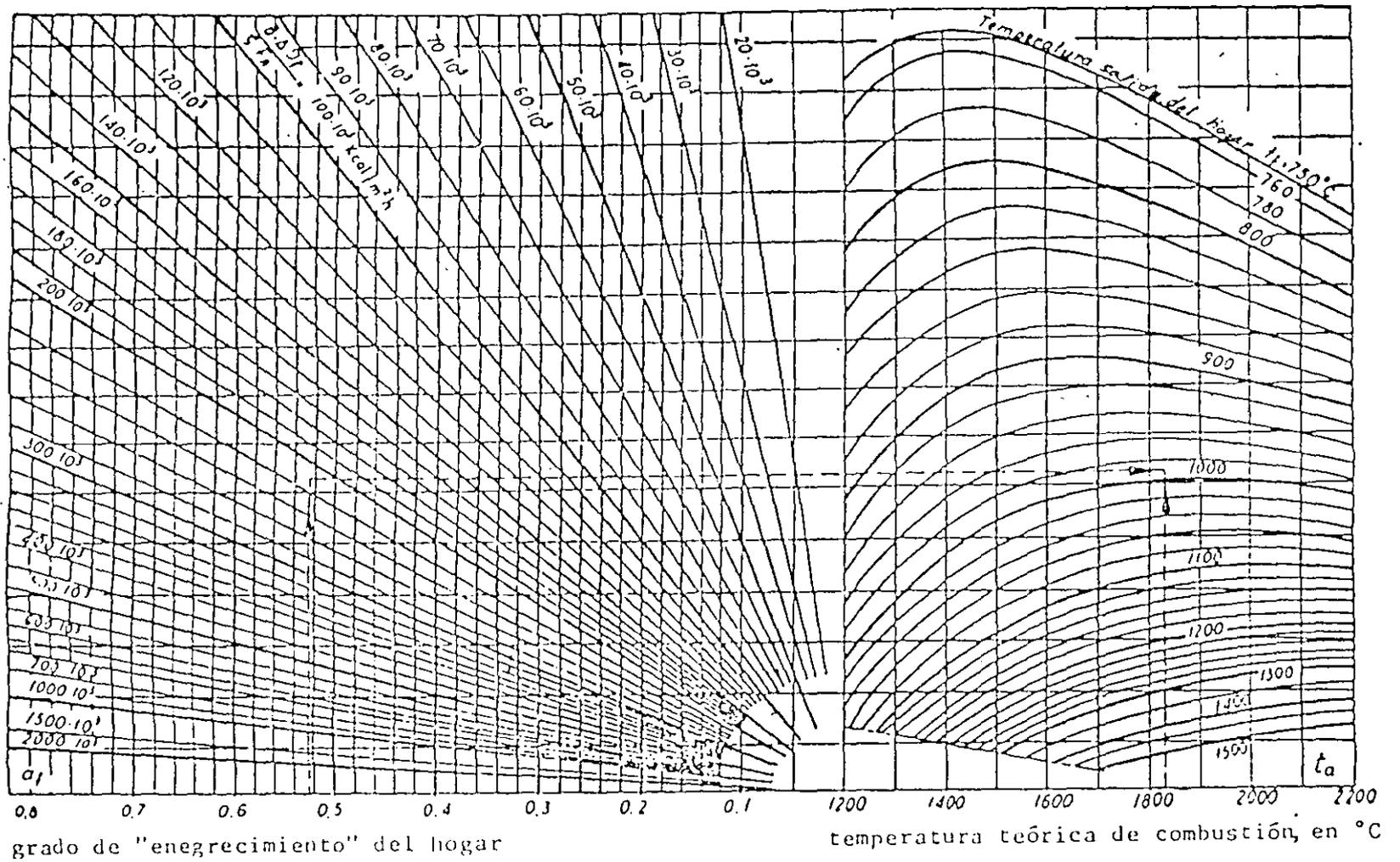


FIG. .-CALCULO DE LA TRANSMISION DE CALOR EN EL HOGAR

D.- COMBUSTIBLES LIQUIDOS Y GASEOSOS.

En el caso de combustibles gaseosos, la mezcla entre combustible y aire se hace esparciendo uniformemente el gas en el aire; en el caso de combustibles líquidos, esparciendo una pulverización fina de combustible y después mezclándolo con el aire de combustión.

Uno de los papeles importantes del hogar, en este caso, es el de terminar el proceso de mezcla y después crear las condiciones térmicas necesarias para el encendido de la mezcla.

En el caso de calderas pequeñas, se colocan los quemadores en la pared frontal del hogar y la parte anterior se protege en toda la circunferencia, en una longitud de 600 a 1000 mm., para protección de la flama en la zona frente a ésta para evitar el enfriamiento fuerte por contacto con paredes frías, en esta forma, se asegura un flujo de calor suficiente en el proceso permanente de encendido. En la mayor parte de los casos se tiene una aportación suplementaria de calor, para asegurar el encendido estable, suministrado por la recirculación local de gases de combustión en la zona de salida del chorro del quemador.

Aún en el caso del encendido con una mezcla de combustible bien estable la zona recubierta de la porción del hogar conserva su importancia para asegurar una combustión completa. En vista de que el enfriamiento fuerte de los productos de combustión que contienen CO y H₂ en una etapa en que la temperatura de los gases de combustión está relativamente baja, se produce el paro de la reacción de combustión en estos componentes y en consecuencia aparecen cantidades importantes de gases no quemados en la salida del hogar.

La longitud del hogar está limitada al valor inferior necesario para terminar la combustión en el hogar, a la longitud de la flama y en general, a la longitud de la zona convectiva.

La combustión de los combustibles líquidos y gaseosos en hogares de tipo cámara de calderas medianas y grandes, aumenta la importancia del problema de ligar la emisividad de la flama radiante, la carga térmica en el hogar, la estabilidad de la flama, el dominio de temperatura de la flama y el coeficiente de exceso de aire necesario.

Un papel diferente del hogar en el proceso de combustión está implícito en su construcción para estabilizar los componentes de combustibles a temperaturas elevadas. Desde este punto de vista, debe tomarse en consideración los que no son termoestables en especial el metano y los hidrocarburos superiores.

En condiciones de fuerte calentamiento de los gases de combustible mezclados con los productos de combustión con una dosificación local insuficiente de oxígeno, se forman productos de la rama de hidrocarburos como carbón atómico e hidrógeno, apareciendo la combustión difusa del carbono y en consecuencia la repartición del flujo radiado directo de la flama está en mayor medida en función del modo como se organizó el proceso de mezcla de los gases combustibles y los gases de combustión que dependen directamente del tipo de quemador, de la presencia de estabilizadores y del grado de turbulencia realizada.

En el caso, cuando los quemadores realizan una buena mezcla de combustible con el aire y con características aerodinámicas adecuadas en el hogar, se produce un precalentamiento rápido de la mezcla, debido a la turbulencia y la recirculación de los gases de combustión, obteniéndose una elevación intensa de la flama con valores pequeños del coeficiente de emisividad de flama y de longitud corta de flama.

Cuando los quemadores no realizan una mezcla homogénea y la mezcla de aire-combustible se hace en el recinto del hogar, el tiempo de mezcla va a ser mayor y aparece la posibilidad de precalentamiento del combustible a temperaturas altas sin estar en contacto con suficiente oxígeno para la combustión; en este caso se tiene una combustión difusa del carbono con coeficientes de radiación de flama mayor y en consecuencia la temperatura máxima se desplaza hacia el centro y final del hogar obteniéndose una temperatura a la salida del hogar disminuida, debido al aumento de cambio de calor por radiación.

En el caso de una combustión con una mezcla demasiado homogénea de combustible-aire, el flujo radiante de la flama va a ser menor y va a variar mucho con la altura del hogar, pero en el caso de que la mezcla de aire y combustible se realice apenas en el hogar, el flujo térmico va a ser mayor y mucho más uniforme en la altura del hogar. Algunos gases naturales combustibles presentan el fenómeno de inestabilidad térmica debido al contenido elevado de metano, que se descompone a 600°K , y a 1200°K aparece completamente descompuesto en carbono atómico e hidrógeno; de esta forma los hogares se dimensionan para una radiación fuerte y se obtiene un grado de emisividad de la flama creando un núcleo de flama con una cantidad mayor de carbono sólido resultado de la descomposición. La combustión del carbono en este caso tiene un carácter difusivo porque las partículas siendo muy pequeñas, la velocidad relativa en el medio gaseoso, es prácticamente nula.

La duración del proceso de combustión en el hogar con radiación intensa se encuentra en el proceso que necesita tiempos más largos y en consecuencia la longitud del hogar se dimensiona para el tiempo de combustión del carbono que teniendo en cuenta la velocidad de reacción a temperaturas elevadas representan el tiempo de difusión en el oxígeno de las partes de carbono y de reabsorción de los productos de la reacción en el medio gaseoso circundante.

Para hogares en que el proceso de combustión tiene un carácter transitorio cinético-difusivo, las dimensiones deben hacerse para el tiempo del proceso difusivo con la naturaleza fluctuante de combustión, resultando un régimen de trabajo en que no aparezca un % importante de pérdidas por combustión química incompleta.

En el caso de hogares para combustibles líquidos y gaseosos, deben poder funcionar con ambos combustibles y el régimen de funcionamiento debe ser satisfactorio desde el punto de vista de la combustión. En general, el cambio de combustible líquido o gaseoso disminuye la radiación directa de 1:10 a 1:15 veces y la temperatura de los gases a la salida del hogar aumenta, en consecuencia de 20 a 30°C. El efecto del cambio del combustible puede ser anulado prácticamente, debido a que, como se ha indicado, en el caso de combustible de gas natural se puede obtener una gama más larga de emisividad de flama por el grado de descomposición de los hidrocarburos antes del proceso de combustión.

La colocación de quemadores en el hogar y la geometría de éste y el tipo cámara, son semejantes a las analizadas para combustibles sólido en suspensión y la diferencia consiste en la supresión del embudo en la parte inferior para recoger la escoria.



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

C U R S O S A B I E R T O S

.. CONTROL DE CONTAMINACION Y AHORRO DE ENERGIA EN CALDERAS

COMBUSTIBLE

ING. MARTINIANO AGUILAR R.

II.- COMBUSTIBLES

I.- CARACTERISTICAS

Combustible es una sustancia que por medio de un proceso químico y físico, arde y desarrolla calor y puede usarse como una fuente económica de energía; algunos combustibles se utilizan en estado natural (carbón y gas natural) y otro después de procesos como el combustóleo (bunker C) que es el residuo pesado producido por la destilación del petróleo. Por extensión se habla de combustibles nucleares que son fuente de energía calorífica, aunque éstos no arden.

Los combustibles están constituidos por materiales combustibles como el carbono (C), hidrógeno (H) y azufre (S) y materiales no combustibles como el nitrógeno (N), oxígeno (O), ceniza y agua; en realidad; el azufre puede ser considerado como una impureza por los problemas que ocasiona.

El término de ceniza, comprende todos los materiales minerales sólidos que se hallan en estado de combustibilidad a la temperatura de cerca de 1100°K ; el nitrógeno no interviene en la combustión manteniéndose en estado gaseoso hasta en los gases de combustión y el oxígeno del combustible participa en la combustión como sustancia comburente, contribuyendo con el oxígeno del aire para la combustión.

En términos generales los combustibles pueden dividirse en:

- gaseosos
- líquidos
- sólidos

Aunque esta clasificación solo hace referencia al estado físico del combustible, agrupa también los problemas derivados de ésta característica que se presentan en el transporte, almacenamiento y quemado del combustible.

Combustibles gaseosos.- El principal combustible gaseoso es el gas natural que es un gas sin color y sin olor y que está compuesto, principalmente por metano (CH_4) y que usualmente contiene algo de etano (C_2H_6) y un poco de nitrógeno; este gas en estado natural o gas "agrío" tiene ácido sulfhídrico y vapores orgánicos de azufre; para su utilización en la combustión de calderas se "endulza", operación que consiste en la eliminación de estos gases. El poder calorífico de este gas en México es de alrededor de 9 400 Kcal/kg y puede estar asociado o no a yacimientos petrolíferos.

Los gases manufacturados normalmente no se transmiten y sólo se usan en calderas en el punto de su fabricación; los principales gases manufacturados son el gas de alto horno obtenido de tratamiento metalúrgico, el gas de refinería, gas de tratamiento de aguas negras, gas de horno de coque producido en la fabricación de coque metalúrgico que cuando se le quitan sus impurezas contiene, aproximadamente, la mitad de hidrógeno, una tercera parte de metano, más monóxido de carbono, bióxido de carbono, nitrógeno y oxígeno; el gas de alumbrado que se obtiene como un subproducto en la fabricación de coque y el gas de gasógeno que se obtiene por la gasificación de combustibles sólidos. Un caso especial es el de los gases de petróleo licuados (GPL), que por su baja tensión de vapor a la temperatura ambiente, operando a presiones reducidas, pueden ser almacenados y transportados en estado líquido y utilizarse luego como combustibles gaseosos, distribuyéndose como propano o butano puros o bien, como mezclas.

Los componentes promedio de algunos gases combustibles son los siguientes:

a).- Gas de gasógeno

de lignito:	H ₂	-	10 a 15%
	CH ₄	-	2 a 2.5%
	C ₂ H ₄	-	0.5%
	CO	-	22 a 30%
	N ₂	-	47 a 57%
	CO ₂	-	3 al 8.3%
	O ₂	-	0.2%
	PCI	-	1150 a 1600 kcal/m ³

de hulla:	H ₂	-	8 a 12%
	CH ₄	-	1.5 a 2%
	C ₂ H ₄	-	0.2%
	CO	-	24 a 28%
	N ₂	-	53 a 59%
	CO ₂	-	4 a 7.1%
	PCI	-	1090 a 1360 kcal/m ³

b).- Gas de Alto Horno

H ₂	-	3%
CH ₄	-	27.5%
H ₂ O	-	5%
N ₂	-	54.5%
CO ₂	-	10%
PCI	-	850 a 1150 kcal/m ³

c).- Gas de Horno de Coke

H ₂	-	55%
CH ₄	-	32%
C ₂ H ₄	-	2.3%
CO	-	7%
H ₂ O	-	1%
N ₂	-	1.5%
CO ₂	-	1.2%
PCI	-	3500 a 4500 kcal/m ³

d).- Gas Natural

Compuesto principalmente por CH₄ (metano) 90% aproximadamente y con un Poder Calorífico de 9400 kcal/m³.

La mejor forma de calcular el poder calorífico de un gas es utilizando los porcentajes de los constituyentes y multiplicándolos por los valores caloríficos de cada constituyente, algunos de los cuales se dan a continuación:

GAS	m ³ /kg	Kcal/m ³	m ³ aire/m ³ gas
Hidrógeno (H)	11.11	3106	2.41
Monóxido de carbono (CO)	0.80	3088	2.39
Metano (CH ₄)	1.40	9370	9.57
Etileno (C ₂ H ₄)	0.80	14906	14.33
Etano (C ₂ H ₆)	0.75	16570	16.74
Propano (C ₃ H ₈)	0.52	22900	15.70
Butano (C ₄ H ₁₀)	0.39	30185	15.49
Acetileno (C ₂ H ₂)	0.86	13847	11.93

En la parte de cálculos se da más información sobre el poder calorífico de los combustibles.

Las principales ventajas que se tienen de utilizar combustibles gaseosos en hogares de calderas, son las siguientes:

- No contienen cenizas ni residuos
- Se mezclan fácilmente con el oxígeno y por lo tanto se requiere poco exceso de aire
- Se facilita el control automático, respondiendo rápidamente a las variaciones de carga.

Combustibles Líquidos.- Los principales combustibles líquidos son los aceites combustibles de petróleo, obtenidos ya sea por destilación, por residuos o por mezclas, alcoholes, alquitrán de hulla o brea y licor negro de las fábricas de papel.

El petróleo crudo es un combustible cuyo origen es la descomposición de materia vegetal atrapada entre capas de tierra, por la acción del tiempo, temperatura, agua y presión; se clasifican en parafínicos, asfálticos e intermedios y normalmente no se utiliza como combustible en estado natural.

De los combustibles líquidos los que más se emplean son los combustibles del petróleo que se clasifican en 5 tipos y que se designan por número; los números 1, 2 y 4 se utilizan sin precalentamiento y los números 5 y 6 requieren precalentamiento antes de quemarse, empleándose principalmente en instalaciones industriales. Las principales características de estos aceites combustibles son los que se dan en la tabla siguiente:

CARACTERISTICAS	No. 1	No. 2	No. 4	No. 5	No. 6
Obtención	destilado	destilado	residual muy ligero	residual ligero	residual
Color	claro	ambar	negro	negro	negro
Gravedad específica 15.6/15.6 °C	0.8250	0.8654	0.9279	0.9529	0.9861
Gravedad API, 15.6 °C	40	32	21	17	12
Viscosidad, en Centistokes, 37.8 °C	1.6	2.68	15.0	50.0	360.0
Viscosidad, SSU a 37.8 °C	31	35	77	232	-
Viscosidad, SSF a 50 °C	-	-	-	-	170
Temp. de fluencia, °C	bajo cero	bajo cero	bajo cero	bajo cero	18
Temp. min. de bombeo °C	bajo cero	bajo cero	bajo cero	2	38
Temp. min de atomiz en °C	bajo cero	bajo cero	bajo cero	54	94
Residuo de carbón, en %	trazas	trazas	2.5	5.0	12.0
Agua y sedimentos, en % (max)	trazas	trazas	0.5	1.0	2.0
Ceniza, en %	trazas	trazas	bajo	0.05	0.08
Kcal/l	9140	9400	9740	9870	10 000

El aceite combustibles designado con el No. 1 es el keroseno que se emplea en las turbinas de gas, el No. 2 es el aceite diesel, el No. 4 el gasóleo y los Nos. 5 y 6 son tipos residuales o combustóleo.

La industria del aceite utiliza las densidades medidas en grados API (American Petroleum Institute). La gravedad específica y la gravedad API se relacionan de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\text{Gravedad específica} = \frac{141.5}{131.5 + \text{gravedad API}}$$

El poder calorífico superior (PCS) de los aceites combustibles puede calcularse por medio de algunas de las siguientes ecuaciones:

$$\text{PCS} = 7500 C + 33830 H + 2000 S, \text{ en kcal/kg}$$

$$\text{PCS} = 9878 + 30 \times \text{gravedad API}, \text{ en kcal/kg}$$

$$\text{PCS} = 10140 + 22 (\text{grados Bé} - 10), \text{ en kcal/kg}$$

En donde

$$\text{Grados Bé} = \text{grados Baumé}$$

$$= \frac{140}{\text{gravedad específica } 15.6/15.6 \text{ } ^\circ\text{C}} - 130$$

Normalmente en México el contenido de C del combustóleo varía de 82 a 84% y el H₂ del 13 al 15%; el S puede llegar al 5%. En algunos países que carecen de petróleo y que disponen de abundantes plantas y materias vegetales utiliza al alcohol como combustible.

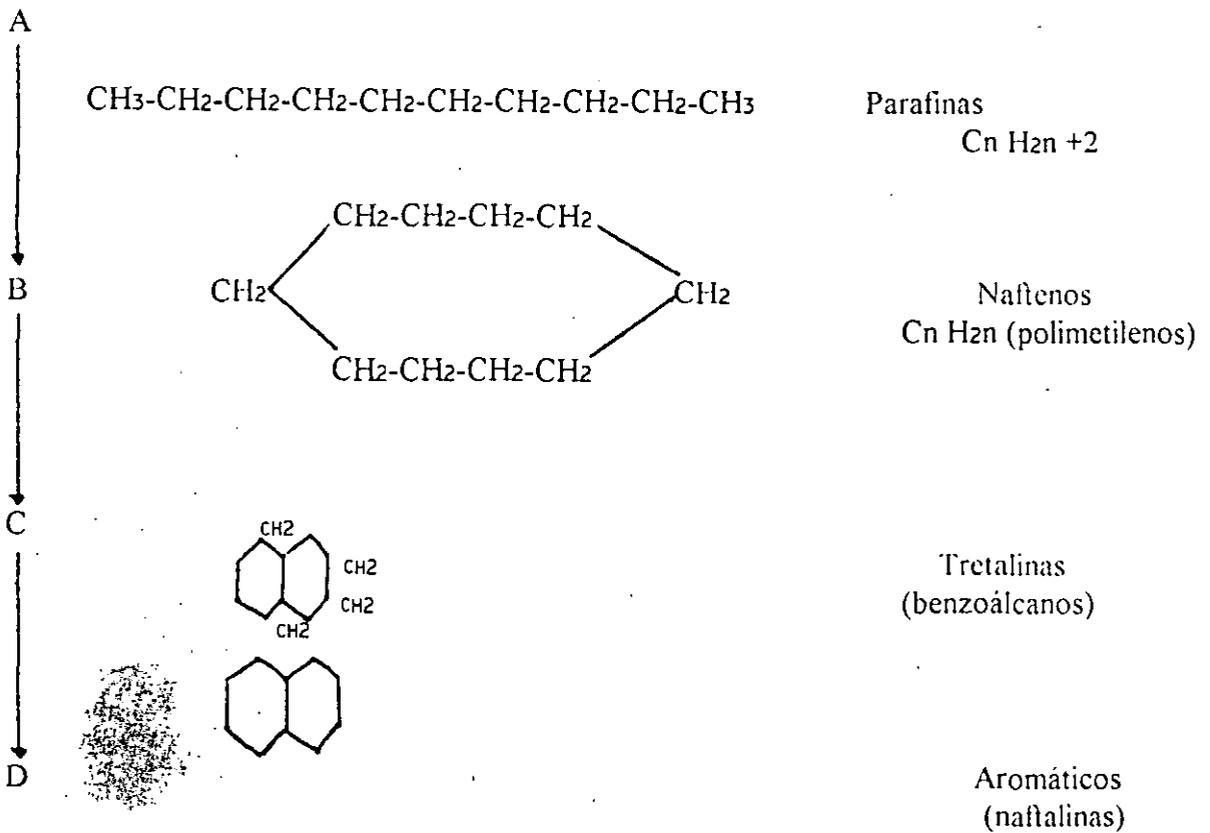
Los principales alcoholes utilizados son: el alcohol etílico (C₂H₆O), obtenido de granos; el alcohol metílico (CH₄O), obtenido de madera; el alcohol butílico (C₄H₁₀O) y el alcohol propílico (C₃H₈O).

El alquitrán de hulla o breña y el licor negro normalmente se utilizan como combustible en las fábricas en donde se producen.

En términos generales, los petróleos se han ubicado geográficamente en la siguiente forma:

- . Petróleos parafínicos en América
- . Petróleos nafténicos en Rusia
- . Petróleos mixtos en medio Oriente
- . Petróleos asfálticos y aromáticos en Oriente.

Parece que químicamente la línea de transformación de los petróleos es la siguiente:



El petróleo crudo es una mezcla de hidrocarburos que contiene impurezas Azufre (de 1% a 5% según la fuente) y un número de compuestos metálicos inorgánicos (Vanadio, Niquel, Sodio).

En una refinería, el petróleo crudo se expone a una serie de procesos físicos y químicos (destilación, craking térmico o catalítico, reformación) para obtener diferentes productos combustibles y materia prima para la industria petroquímica; con el tratamiento en las refinerías se logran diversos productos cada vez menos volátiles como:

- . Gas condensable (propano-butano)
- . Líquidos volátiles (gasolinas)
- . Líquidos poco volátiles (queroseno, gasoil)
- . Aceites de lubricación
- . Residuo pastoso o viscoso a temperatura ordinaria (combustóleo, asfalto).

La mayor parte del azufre del petróleo crudo permanece en las fracciones más pesadas.

A continuación se incluyen algunas características de los aceites combustibles.

Temperatura de Inflamación.- La temperatura de inflamación es un valor importante para la seguridad durante el transporte y almacenamiento del combustible; a ésta temperatura no se produce necesariamente una flama autosostenible, pero indica la formación de mezclas inflamables.

Viscosidad.- La viscosidad de un líquido puede definirse por la resistencia que oponen sus moléculas a la fuerza que tiende a desplazarlas. Mide el frotamiento interno, decrece con la temperatura y aumenta con la presión.

La unidad práctica de viscosidad absoluta es el POISE que es el coeficiente de viscosidad absoluta medida en C.G.S.

La unidad práctica de viscosidad cinemática es el STROKE, que es el cociente del coeficiente de viscosidad absoluta por la densidad del líquido a la temperatura de ensayo.

Unidad de Viscosidad

FRANCIA

Centistoke
° Engler

U.S.A.

° Saybolt universal
° Saybolt Furol (*)

INGLATERRA

° Redwood No. 1
° Redwood almirante (*)

* 1/10 del precedente

El ° Engler se define como la relación entre los tiempos necesarios para el paso de 200 cm³ de aceite por el orificio calibrado del viscosímetro y una cantidad igual de agua a la misma temperatura.

Aprovechando las propiedades de los aceites, cuya viscosidad desciende por calentamiento, se recurre a éste para lograr valores adecuados de aquella para el bombeo o la pulverización.

Influencia del agua.- Disminuye el poder calorífico del combustible y la temperatura en el hogar favorece el punto de rocío ácido y facilita la corrosión.

Influencia del Azufre.- Los vapores sulfurosos desprendidos en la combustión tienen efectos nocivos en las partes metálicas de las chimeneas y ductos. Dada la temperatura del hogar y los humos, estos vapores pueden dañar la caldera.

El "punto de rocío" ácido es la temperatura a la cual se puede condensar SO₄ H₂.

Con un combustible (fuel-oil) pesado, con el 4% de azufre, el punto de rocío ácido varía entre 120-160 °C.

Índice Conradson.- Es el residuo difícilmente combustible que por su naturaleza se emparenta con el carbón.

Tensión Superficial.- Esta propiedad, se relaciona con el trabajo que debe efectuarse para incrementar el área específica del aceite durante la atomización.

Poder Calorífico.- Es la cantidad de calor en kcal desprendido por la combustión de 1 Kg de aceite.

Se distinguen:

- a) "Poder calorífico superior", en el que el vapor de agua producido por la combustión se considera condensado. Es el que se obtiene directamente con la bomba calorimétrica o bien calculado de sus componentes.
- b) "Poder calorífico inferior", en el que el vapor de agua de la combustión forma parte de los humos y las calorías de condensación se estiman pérdida.

La diferencia entre los dos p.c. es del orden de 600 kcal.

Calor Específico.- De interés para elegir los calentadores eléctricos. Prácticamente se adopta la cifra: 0.5 kcal/kg/°C, aunque este coeficiente depende de la densidad y de la temperatura.

<u>Densidad del Combustible</u>	<u>Calor específico según la Temp.</u>		
	a 0 °C	a 50 °C	a 100 °C
0.950	0.375	0.403	0.438
0.900	0.396	0.425	0.462
0.850	0.423	0.452	0.488

Densidad.- Es un verdadero índice de calidad en los combustibles cuanto más denso más residual.

Administrativamente, tiene importancia porque el combustible se vende por peso.

Coeficiente de Dilatación Cúbica

<u>Temperatura</u>	<u>Densidad</u>	<u>Coeficiente de Dilatación Cúbica</u>
0 a 100°C	0,825-0,875 0,925-0,975	0,0010-0,0008 0,0007-0,0006

Sección de Tuberías.- Tanto para las bombas de trasiego como las de aspiración y retorno del quemador, conviene dar una sección que permita velocidades del aceite inferiores a 0,6 m/s.

En la gráfica de la Fig. , se muestran las curvas de viscosidades contra temperatura de varios combustóleos, incluyendo los puntos de viscosidad a 40°C de los Gasóleos Industriales de PEMEX F1 y F4.

Combustibles Sólidos.- Los principales combustibles sólidos que se utilizan en la combustión de las calderas son el carbón, bagazo de caña, madera, basura urbana y polvo de coque; de éstos el más importante es el carbón que es una mezcal de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, azufre, agua y cenizas, de origen vegetal que quedaron enterradas hace millones de años y mediante la acción combinada del tiempo, presión y temperatura se transformaron en carbón.

Los carbones se clasifican de acuerdo con el orden de la edad geológica, en la siguiente forma:

- . lignito
- . subbituminoso
- . bituminoso
- . antracita

Existen también otras clasificaciones como bituminoso de bajo, medio y alto volátil, semibituminosos y semiantracita, pero los más importantes desde el punto de vista energético, son los mencionados anteriormente.

El lignito es realmente un estado de transición entre la turba y el carbón subbituminoso, con aspecto de madera o arcilla, poder calorífico bajo y altos contenidos de humedad y cenizas; contiene alrededor de un 50% de materia volátil y la humedad es del 30 al 45%; debido al alto % de humedad arden difícil e incompletamente.

El carbón subbituminoso es de aspecto negro que ha perdido el aspecto leñoso de los lignitos; el contenido de materia volátil varía de 35 a 45% y la humedad del 17 al 20%.

Los carbones bituminosos son de mejor calidad, arden con llamas largas, amarillas y humeantes. El contenido de materia volátil es del 15 al 35% y la humedad varía del 2 al 17%. Estos son los carbones que se utilizan para la producción de coque.

La antracita es un carbón muy duro de color negro lustroso y brillante, no coquizable y arde con llamas muy cortas y azules; el contenido de materia volátil es de menos de 8%. La humedad de impregnación es la humedad de la superficie o que se le incorpora mecánicamente; la humedad higroscópica es la humedad original que depende de su naturaleza. Debido a que el carbón en estado natural no tiene una composición uniforme, es necesario efectuar análisis específicos para determinar sus características y el efecto que tendrán sobre la combustión y las calderas.

Los dos análisis que se efectúan en los carbones son: el análisis químico elemental o análisis último y el análisis próximo.

Mediante el análisis químico se determina el contenido de carbono total, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, azufre, cenizas y humedad.

El análisis próximo de un carbón proporciona los componentes físicos, y puede efectuarse sin análisis químico, mediante una balanza de laboratorio y un horno con regulación de temperatura. El análisis próximo proporciona los contenidos en porcentaje de humedad, materia volátil, ceniza y carbono fijo; éste último se determina por balance a 100% con los otros tres componentes.

La materia volátil que se encuentra en los carbones es metano y otros hidrocarburos, hidrógeno y monóxido de carbono como material combustible, además de gases incombustibles como el bióxido de carbono y nitrógeno.

El poder calorífico superior (PCS) de un carbón, conociendo el contenido de sus componentes puede obtenerse mediante la fórmula siguiente de Dulong.

$$\text{PCS} = 8111 C + 34444 \left(\frac{H - O}{8} \right) + 2250S, \text{ kcal/kg}$$

Para determinar el poder calorífico de un carbón, conociendo el análisis próximo no existen métodos satisfactorios analíticos, debiendo ser medio en un calorímetro, sin embargo, las siguientes ecuaciones dan valores aproximados de poder calorífico de acuerdo con la fracción del contenido de materia volátil (MV).

De 0 a 16% de MV:

$$\text{PCS} = 8080 + 4340 (MV)$$

De 17 a 36% de MV:

$$\text{PCS} = 8980 - 1250 (MV)$$

De mas de 36% de MV

$$\text{PCS} = 10400 - 5240 (MV)$$

2.- SISTEMAS DE ALIMENTACION DE COMBUSTIBLE

Normalmente el combustible que se quema en las calderas no se produce en el sitio, sino que llega de fuera del predio de la planta, con algunas excepciones que no es la generalidad.

Las operaciones fundamentales que se realizan para el manejo y alimentación de combustible a la caldera pueden ser agrupadas en la forma siguiente:

- . Recibo
- . Manejo (bombeo, transporte, etc.)
- . Almacenamiento
- . Preparación (calentamiento, molido, etc.)

A continuación se describirán éstas operaciones fundamentales para las tres clases de combustibles: gaseoso, líquido y sólido.

A.- GAS COMBUSTIBLE

Como se mencionó anteriormente, el gas combustible utilizado en las calderas grandes, es gas natural suministrado por PEMEX a través de una red de gasoductos a presión variable, normalmente alta; de los gasoductos parten ramales de alimentación hacia las plantas usuarias en donde se instalan estaciones reductoras de presión de uno o varios pasos hasta alcanzar una presión de unos 7 kg/cm² y en dicha instalación se efectúa la medición del flujo de gas combustible.

El transporte dentro del predio de la planta se efectúa por medio de tuberías de acero reduciéndose la presión a unos 2 kg/cm² hasta llegar a la caldera en donde nuevamente se reduce la presión a unos 0.5 kg/cm² antes de entrar a los quemadores.

Adicionalmente a la fuente normal de suministro de PEMEX, se tiene en ocasiones otra fuente de emergencia que puede ser por medio de tanques de almacenamiento, es decir, que el almacenamiento de gas es solo para casos de emergencia.

En el caso del gas natural, el bombeo es proporcionado por las mismas estaciones de compresión de PEMEX y el calentamiento del gas combustible, no existe.

La instalación de la tubería de gas puede hacerse enterrada en áreas abiertas y en donde atravesare lugares cerrados en que la acumulación de gases por fugas puedan producir una explosión o incendio, se debe hacer una instalación aérea preferentemente con ventilación adecuada; la velocidad del gas en la tubería es de unos 25 m/s.

El sistema de alimentación de gas a la caldera tiene una válvula de paro general accionada eléctricamente y enlazada al sistema de protecciones y bloqueos, que a caldera parada permanece cerrada mientras este abierta alguna de las válvulas macho a quemadores. Para el arranque, la válvula de paro general se bloquea con un relevador de tiempo enlazado con los ventiladores de aire de la caldera.

Se debe contar con procedimientos de puesta en funcionamiento, paro y precauciones de un sistema de gas a caldera, con los siguientes objetivos.

- . Definir los modos de funcionamiento de los equipos que configuran el sistema de gas a quemadores y encendido.
- . Establecer la secuencia de actividades y/o pasos necesarios para el arranque y paro del sistema.

Los permisivos de apertura de suministro de gas a pilotos o encendedores son:

- . Barrido y restablecimiento de caldera
- . Todas las válvulas de solenoide a pilotos deben estar CERRADAS.
- . No exista alta o baja presión de combustible durante más de dos segundos, estando alguna válvula de piloto abierta.
- . Presión del gas normal
- . Interruptor en posición "ABRIR" o bien que estando el interruptor en "AUTO" se produzca señal de encendido.

La válvula cerrará siempre que se produzca alguna de las siguientes condiciones:

- . Disparo de caldera.
- . Interruptor en posición "CIERRE".
- . Alta o baja presión de combustible durante más de dos segundos, estando alguna válvula de pilotos abierta.

Los permisos de apertura de la válvula de gas o quemadores son:

- . Todas las válvulas a quemadores "CERRADAS".
- . Presión de gas normal.
- . Válvula de corte de pilotos "ABIERTA".
- . No exista condición de disparo.
- . Interruptor en posición "ABRIR".

La válvula cerrará siempre que se produzca alguna de las condiciones siguientes:

- . Disparo de caldera
- . Interruptor en posición "CIERRE".
- . Algún piloto o quemador requerido, no encendido.
- . Si transcurridos 2 segundos desde la apertura de la válvula, con alguna válvula de quemador abierta, se produce alta o baja presión de gas a quemadores.

Después de la válvula de corte, el gas pasa a través de una válvula que controla el flujo de acuerdo con la señal recibida del control de combustión.

Si la presión del gas desciende hasta 0.3 kg/cm^2 , un interruptor de presión da alarma de "GAS COMBUSTIBLE A QUEMADORES PRESION BAJA", si la presión desciende hasta 0.25 kg/cm^2 , el mismo interruptor produce disparo de caldera.

Un interruptor de presión dispara la caldera por alta presión al alcanzarse 2.0 kg/cm^2 .

Antes de la puesta en servicio del sistema, han de comprobarse los siguientes requisitos:

- **Comprobar** que existe suministro de gas estando abiertas las válvulas de aislamiento.
- Alinear el sistema de forma que se permita el paso de gas hasta las válvulas de corte principales, y desde éstas hacia los quemadores y pilotos.
- Si por algún motivo se ha vaciado la tubería, antes de la puesta en servicio, será necesario expulsar el aire. Esto se hará a través de las válvulas de venteo.

Para el arranque del sistema han de cumplirse las condiciones previas del apartado anterior y los permisivos de apertura de las válvulas de corte.

Comprobaciones del Funcionamiento

Durante el funcionamiento del sistema se deberá mantener un control constante sobre la evolución de los distintos parámetros y equipos, siendo los principales los siguiente:

- La presión del gas suministrado no deberá exceder de 12 kg/cm², ni disminuir a menos de 6 kg/cm², siendo la presión normal de funcionamiento de 9 kg/cm².
- Las válvulas reductoras de presión en el cabezal de gas deberán estar sujetas para mantener una presión constante de 4.3 kg/cm² cualquiera que sea el número de quemadores en servicio.
- La válvula autoregurable de suministro de gas a pilotos deberá mantener una presión constante de 0.63 kg/cm².
- Las válvulas reductoras de presión de gas a quemadores deberán mantener una presión constante de 0.4 kg/cm².

La parada del sistema se produce por cierre de las válvulas de corte principales. Simultáneamente a éste cierre, se produce la apertura de las válvulas de venteo correspondientes.

PRECAUCIONES

- No sobrepasar los límites de presión de gas, para evitar alcanzar los puntos de disparo. Además se puede provocar al apagado de algún quemador o piloto con el consiguiente peligro.
- Siempre que se proceda al encendido de una elevación de gas deberá comprobarse visualmente el encendido de pilotos y quemadores.
- Cuando se apague algún quemador y no cierre su válvula de corte, se recomienda el disparo del sistema para evitar el riesgo de una explosión en el hogar.

B.- SISTEMA DE ACEITE LIQUIDO COMBUSTIBLE

El combustible líquido que se utiliza en las calderas grandes como se mencionó anteriormente, es un producto residual de la destilación del petróleo, conocido como combustóleo, Bunker C o aceite pesado; éste combustible se utiliza en los quemadores principales, y aceite ligero o diesel se emplea para el encendido de algunas calderas que queman combustóleo o carbón pulverizado y también en calderas pequeñas o en zonas metropolitanas.

El transporte del combustóleo hasta la planta, puede hacerse por:

- Carros tanque o pipas.- En este caso el calentamiento para el llenado de las pipas se conserva para poder hacer la descarga (40 a 45°C).
- Carros tanque de FFCC de 35 000 a 40 000 litros.- Normalmente el tiempo de transporte es mayor por lo que, es necesario que tengan serpentines de calentamiento con vapor para poderlos descargar para lo cual se debe de contar con suministro de vapor en la zona de descarga.
- Oleoductos que pueden provenir de una Refinería, un depósito de almacenamiento de PEMEX, o una descarga submarina de barcos.
- Buques tanques (volúmenes mayores de 400 000 litros).

El volumen de almacenamiento depende de factores como la distancia y confiabilidad de la fuente de abastecimiento, etc., aunque en general se considera satisfactoria una reserva para operar a plena capacidad durante 15 ó 30 días. Generalmente el almacenamiento se efectúa en tanques de acero fabricados en el sitio sobre el piso, que tienen las ventajas de bajo costo para grandes almacenamientos, minimizan los problemas de bombeo y se tiene el equipo accesible para mantenimiento; las desventajas son de que requieren grandes áreas y se localizan lejos de las zonas de uso. En la figura , se muestran dibujos de tanques de almacenamiento de combustóleo que normalmente se fabrican de acuerdo a la especificación API 650. Adicionalmente a los tanques de almacenamiento, se instalan tanques de servicio diario con un volumen de 24 horas a plena capacidad de la unidad. Cada tanque de almacenamiento debe estar equipado con un dispositivo para indicar la cantidad de combustóleo que contiene; estimación precisa del contenido de los grandes tanques es muy difícil, entre otras razones porque la gravedad específica no es homogénea por tener diferentes temperaturas. Alrededor de cada tanque se construyen muros de contención con capacidad para retener todo el aceite del tanque en caso de falla de éste.

Toda la tubería que conduce el aceite combustible o combustóleo debe ser de acero, debiendo observarse las recomendaciones siguientes:

- . Las válvulas deben ser de bronce de buena calidad del tipo apertura total.
- . No deben usarse válvulas de fundición de hierro en donde estén sujetas a esfuerzos, en válvulas de paro de tanques o en otros servicios importantes.
- . Cuando se use tubería de fundición de hierro, deberán ser con bridas y no emplear ros-cadas.
- . En combustóleo no debe emplearse tubería de menos de 2.5 cm (1") de diámetro.
- . Las líneas de aceite caliente deben formarse y enrutarse de tal forma que se conserven tan calientes como sea posible, manteniéndolas fuera de corrientes de aire.
- . Los tubos no deben enterrarse en el suelo o piso, sino que deben pasar a través de trincheras cubiertas en tapas protectoras adecuadas.
- . Todas las juntas deben mantenerse fácilmente accesibles.
- . Todas las fuentes mayores de fugas como juntas, curvas agudas, válvulas y otros accesorios deben reducirse al mínimo, además de que ofrecen mayor resistencia al flujo de aceite.
- . Se debe inspeccionar y lavar en caso necesario la tubería antes de su instalación para asegurarse que está libre de incrustaciones.
- . Debe procurarse que todas las juntas sean soldadas, pero en caso contrario debe ponerse especial atención para apretar y sellar las conexiones.
- . En el tendido de las venas de calentamiento, se debe prever la expansión del aceite durante los paros; el combustóleo incrementa su volumen cerca de 7% cuando se calienta de 40 a 150 °C y una línea aislada a la que se le dejen las venas de calentamiento en servicio durante un paro puede estallar al generar su propia presión.
- . Se deben instalar válvulas de alivio en las secciones de tubería que lo requieran.

Parada del Sistema de Combustóleo.

Para proceder el PARO de las bombas de combustóleo y de los equipos auxiliares, se provoca el cierre de la válvula de corte (disparo) con lo que se abrirá automáticamente la la recirculación.

El sistema de calentamiento deberá ser aislado, cerrando las válvulas manuales anteriores a las controladoras de vapor secundario.

Los pulsadores de las bombas de combustóleo que se encuentren en posición AUTO, deberán pasarse a la posición PARO con el fin de evitar el arranque automático por baja presión del cabezal o paro de otra bomba.

PRECAUCIONES

Las presiones y temperaturas de funcionamiento del sistema de combustóleo son los principales factores que deben ser controlados, debiendo prestar especial atención a los puntos siguientes:

- El ensuciamiento excesivo de los filtros puede provocar cavitación en las bombas de trasiego o combustóleo. La presión diferencial en los mismos no debe sobrepasar el valor de 0.2 kg/cm².
- Los arrastres de agua mezclada con el combustóleo pueden provocar cavitación y fluctuaciones de presión en el colector de alimentación, es por esto que deberán drenarse los tanques de almacenamiento periódicamente.
- Cuando se tiene vapor secundario con baja temperatura, el calentamiento del combustóleo no es suficiente para mantener la temperatura entre 120-135°C en el cabezal.

Una falla en el control de nivel de condensado en el reboiler, puede ocasionar una baja o alta temperatura del vapor secundario.

Si la temperatura del combustible llega a ser menor de 95°C , abrirá la recirculación ocasionando una caída de presión del combustible a quemadores y por lo tanto, puede ocurrir el cierre de la válvula de corte de combustible.

En caso necesario puede regularse la presión de descarga de las bombas de combustible mediante válvulas que recirculan parte del combustible bombeado al tanque de día.

Antes de la puesta en servicio del sistema, deberán ventearse las tuberías y filtros del mismo con objeto de eliminar el aire almacenado en los puntos altos.

Una temperatura excesiva en el combustible puede ser la causa de:

- a) Cavitación de las bombas
- b) Coquización del combustible en el calentador (A temperaturas superiores a 145°C).

Si al arrancar una bomba de combustible se observa que la presión de descarga permanece en valores bajos, deberá **DISPARARSE** la bomba y proceder a comprobar los puntos siguientes:

- a) Alineación de las válvulas de succión de la bomba desde el tanque de día y comprobación de nivel del tanque.
- b) Temperatura de combustible en la succión (un "TAPON" de combustible frío puede interrumpir el paso hacia la succión de las bombas).
- c) Alineación de las válvulas de recirculación y by-pass de la controladora de presión.
- d) Limpieza de filtros dúplex.

Calentamiento del aceite.- En los tanques de almacenamiento el aceite se calienta por medio de serpentines de vapor o bien con cambiadores de calor externos; en tanques pequeños se emplean calentadores de inmersión eléctricos.

El combustóleo forma una membrana estática contra las paredes frías de los tanques que da un efecto de aislamiento equivalente al 25% de un forro aislable; para temperaturas entre 27 y 43°C, las pérdidas de calor son aproximadamente a 12.2 kcal/m² °C de diferencia de temperatura con el aire ambiente exterior. En los tanques no es necesario calentar todo el volumen ya que el calentamiento local permite el bombeo del combustóleo; en la gráfica de la Fig. , se muestra el calor necesario para la elevación de cierta diferencial de temperatura del aceite en función del flujo manejado.

Venas de calentamiento.- Tienen el objetivo de mantener las líneas de tubería largas calientes, el medio de calentamiento puede ser electricidad o vapor, empleándose por economía éste último a baja presión (3.5 kg/cm²) con tubería de 2.5 cm (1") de diámetro, tendida en contacto con la tubería de aceite en toda su longitud, encapsulándose y forrándose, incluyendo los filtros y las bombas. Para las venas de vapor se debe tener un suministro de vapor independiente con una caldera auxiliar que se utiliza durante los paros y además debe contarse con trampa de vapor con las que se puede recuperar el condensado vía un eliminador de aceite y una planta de filtración; las venas de vapor pueden dificultar el mantenimiento de bombas al interferir en su desensamble.

Los calentadores de combustóleo a quemadores se montan adyacentes a las bombas; con excepción de las bombas centrífugas, con los demás tipos, los calentadores se localizan flujo abajo de la bomba y manejan el aceite a la presión final de encendido. En los sistemas de bombas centrífugas, se bombea el aceite caliente, localizándose los calentadores flujo arriba de las bombas por lo que están sometidos a más baja presión de aceite reduciendo las dificultades de fugas de aceite en los calentadores.

Nota: Las bombas de engranajes requieren una lubricación constante del fluido que bombean por lo que NUNCA deberán funcionar en vacío.

La válvula de by-pass de la retención situada en la descarga de la bomba permite la recirculación, en contraflujo, de combustóleo a través de la misma pudiendo mantenerse el equipo en condiciones de temperatura de arranque.

C.- COMBUSTIBLE SOLIDO (CARBON)

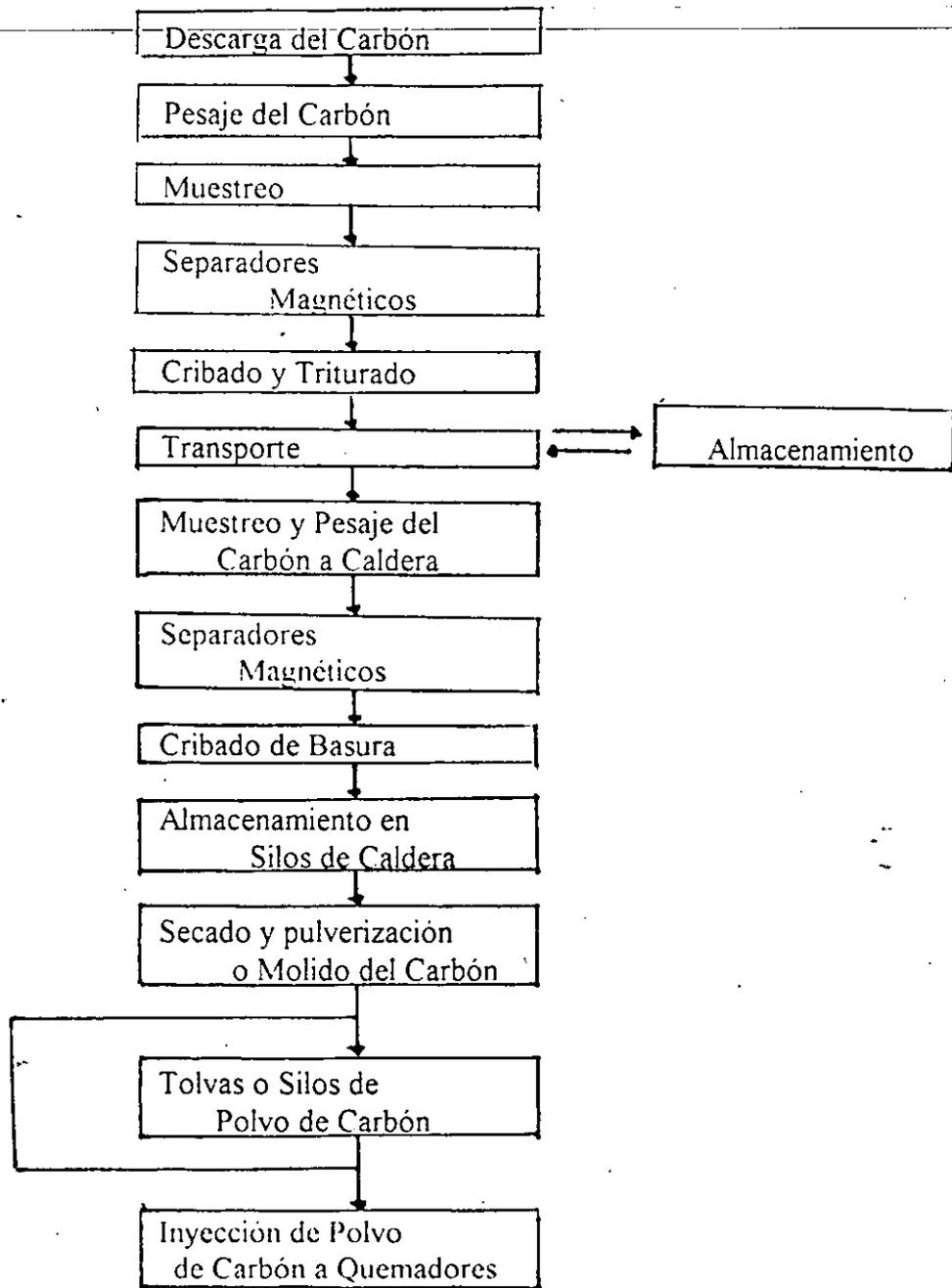
A diferencia del combustible gaseoso o líquido, cuando se utiliza carbón como combustible, tanto el manejo de éste en patios, como la preparación para el quemado presentan problemas complejos en su diseño, operación y mantenimiento.

La instalación de carbón en la planta puede ser esquematizada por una serie de operaciones que se efectúan desde el arribo del carbón hasta que se inyecta como polvo a los quemadores de la caldera, como se muestra en la Fig. .

Entre varias de éstas operaciones se tiene la transportación del carbón. Este esquema es para quemar el carbón en suspensión en quemadores; la instalación para quemar el carbón en parrillas es menos compleja, sin embargo, no puede afirmarse que a la fecha tengan mayor importancia estas instalaciones ya que, la máxima capacidad de evaporación de las calderas con hogares de parrillas para el quemado de carbón está limitada a 130,000 kg/h de vapor producido. Más allá de esta capacidad se requieren quemadores de carbón pulverizado.

El transporte del carbón hasta la planta o central puede hacerse en alguna de las siguientes formas:

- Por ferrocarril normal, en trenes unitarios de 1000 a 1500 t., con vagones autodescargables lateralmente o por el fondo de 30 a 60 t., cada uno. Esta forma de transporte es técnicamente posible para cualquier distancia y consumo; sus limitaciones son de tipo económico.
- Por vía angosta de ferrocarril minero, con trenes de 100 a 120 t., en vagones de 12 a 20 t., en este medio se emplea en plantas y desarrollos pequeños.
- Por funicular.- Se emplea para cantidades hasta 4,000 t/día y distancias menores de 5 km.
- Por camiones.- Es el medio más económico cuando la planta se encuentra a "boca de mina"; se puede asegurar un suministro hasta de 4,000 t/h en distancias de 4 a 5 km con velocidades de traslado de 4 m/s.
- Por barco o barcazas.- Se utiliza cuando se tiene éste medio de transporte, normalmente para distancias grandes.
- Por caroducto.- Se emplea como medio alternativo con ventajas económicas sobre el transporte por ferrocarril bajo ciertas condiciones.

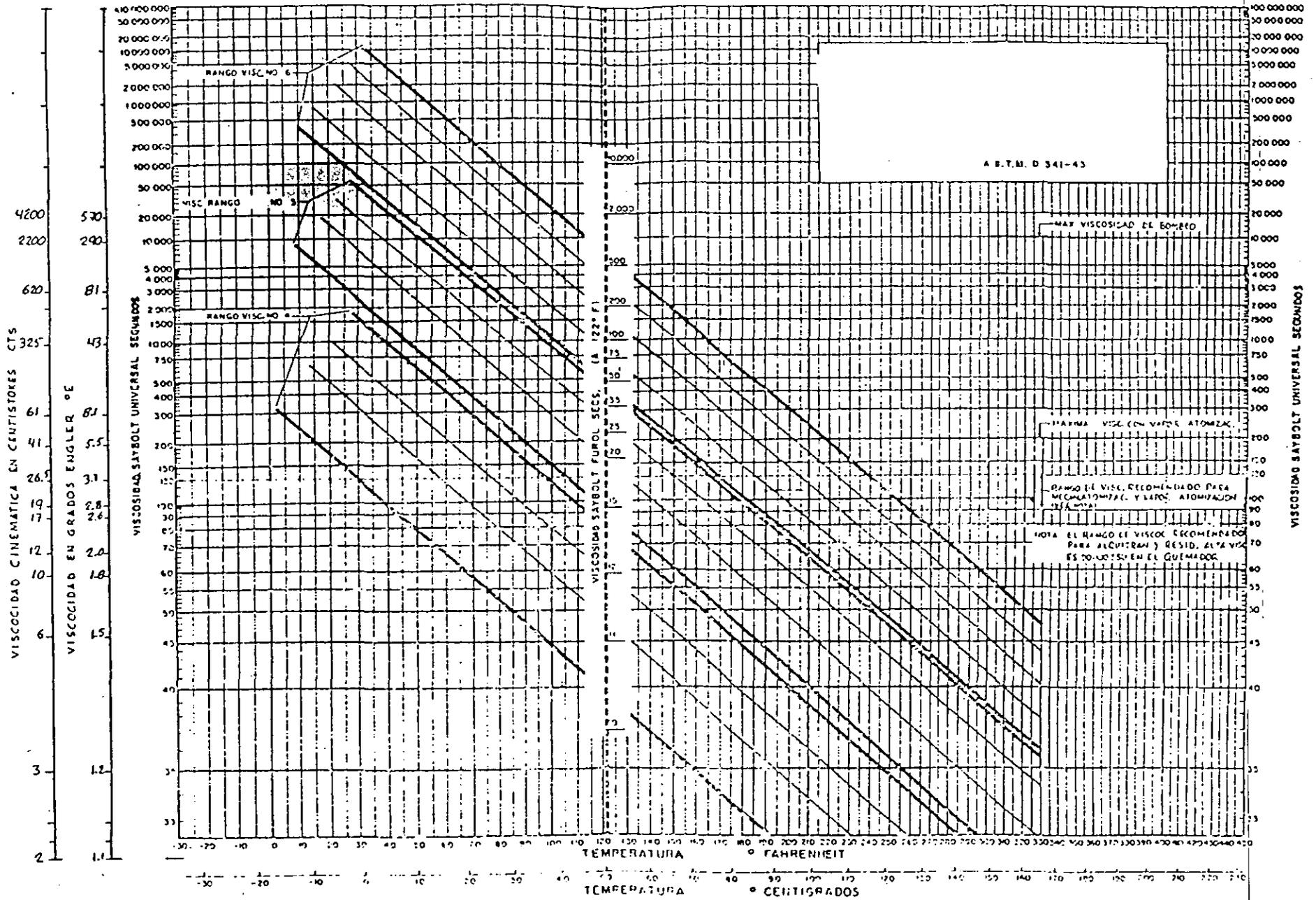


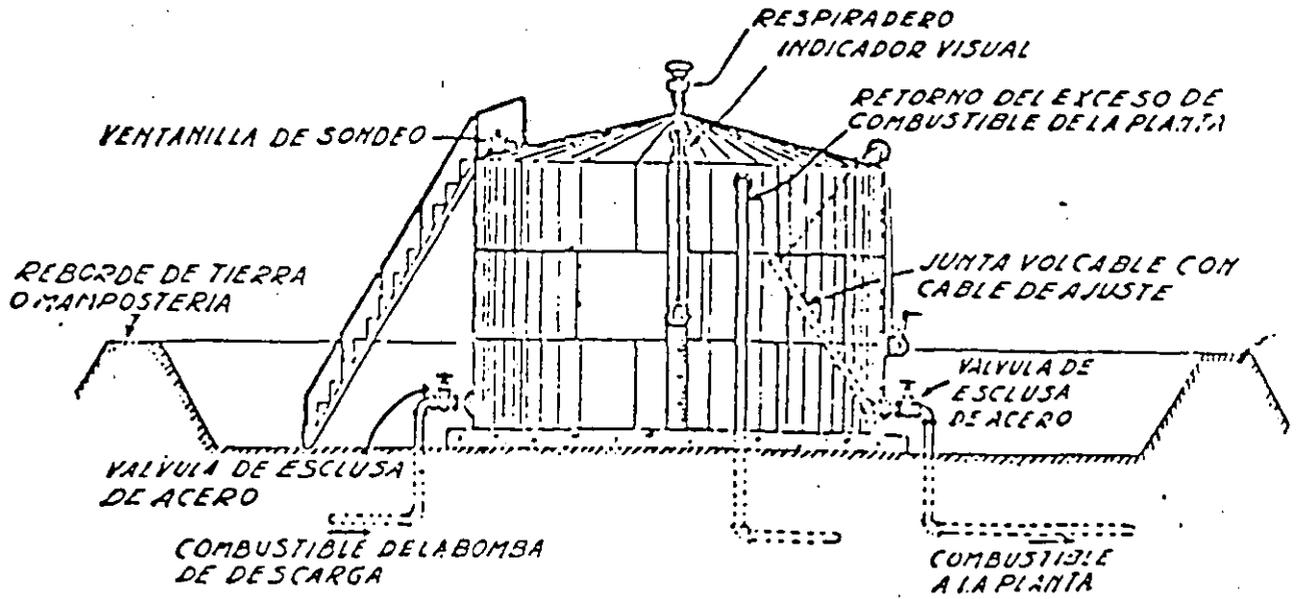
IV-24 DIAGRAMA DE FLUJO

FIG. - ESQUEMA DE MANEJO Y PREPARACION DEL CARBON

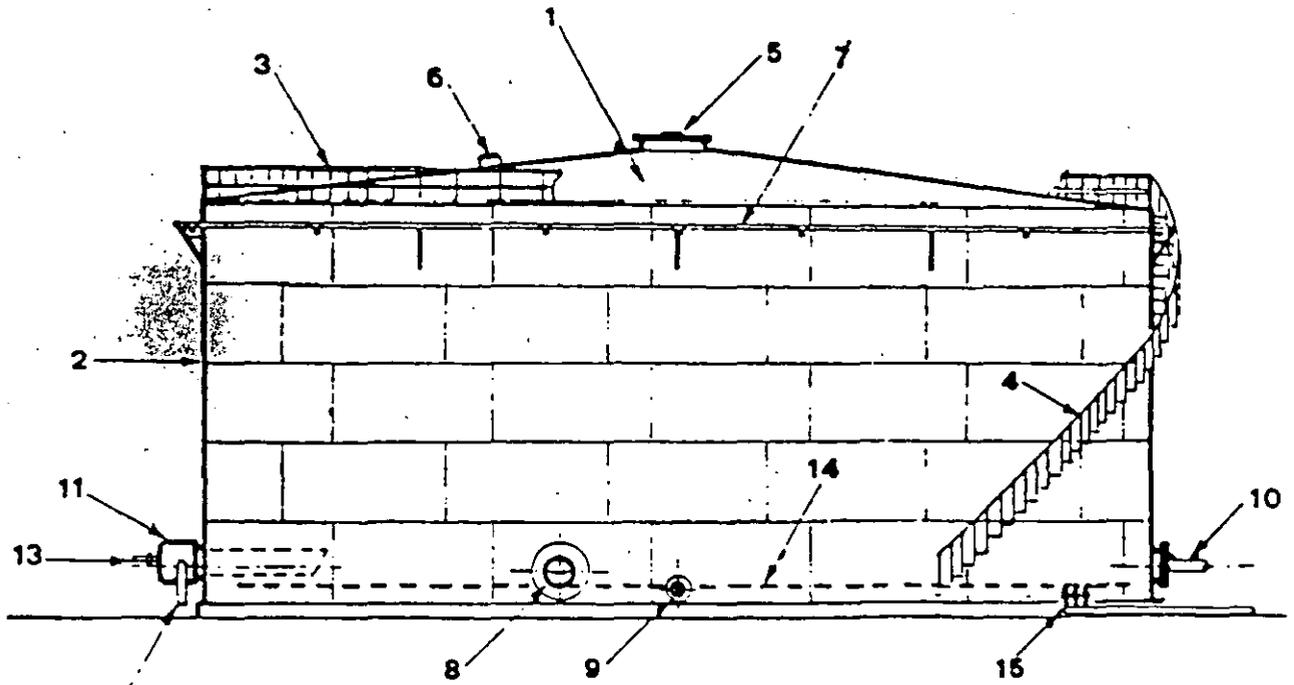
Las facilidades de recepción en la planta se ajustan al modo de transporte seleccionado; en las Fig. y , se muestran formas de descarga de carbón que llega por ferrocarril y por banco respectivamente.

El carbón que se recibe en la planta puede pesarse en los vagones de ferrocarril, camiones o en las bandas transportadores que lo conducen a la planta, utilizándose los resultados para propósitos de contabilidad. En el caso de pesarse los vagones de ferrocarril y los camiones, se hace obteniendo primero el peso bruto y posteriormente se taran, con lo cual se está en posibilidades de conocer la cantidad de carbón descargado. Las máquinas de pesar de bandas son el único equipo práctico para pesar el carbón que llega por barco o de las minas; éstas máquinas de pesar se emplean en todas las plantas para conocer cuanto del carbón entrando va hacia los silos de la caldera, cuanto va al almacenamiento abierto de carbón y cuanto se recupera de este almacenamiento.

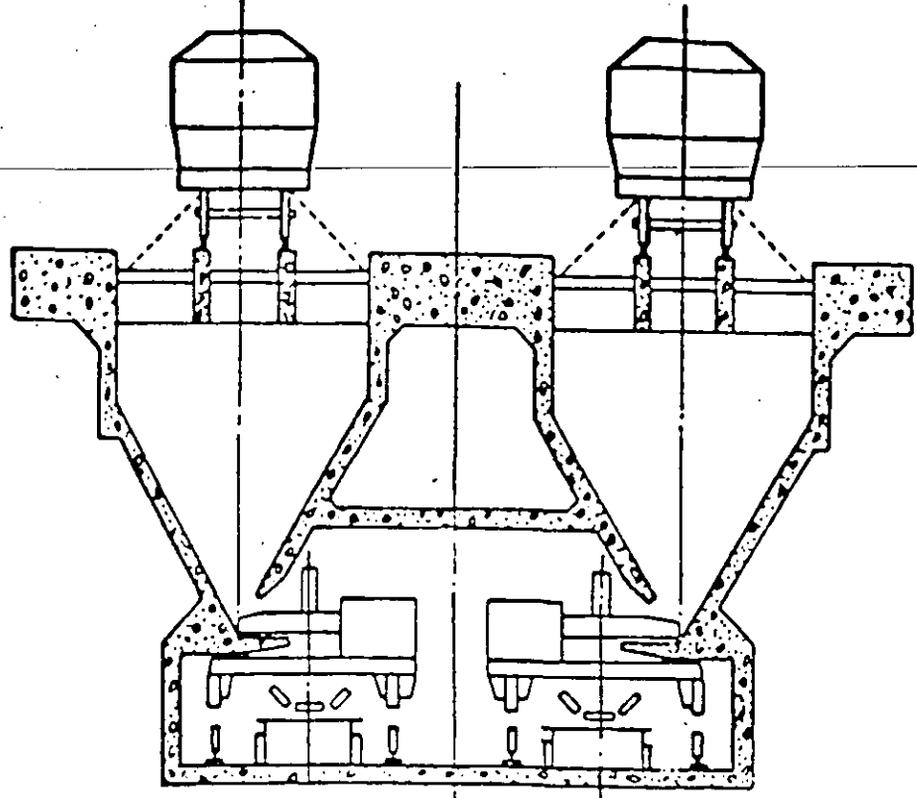




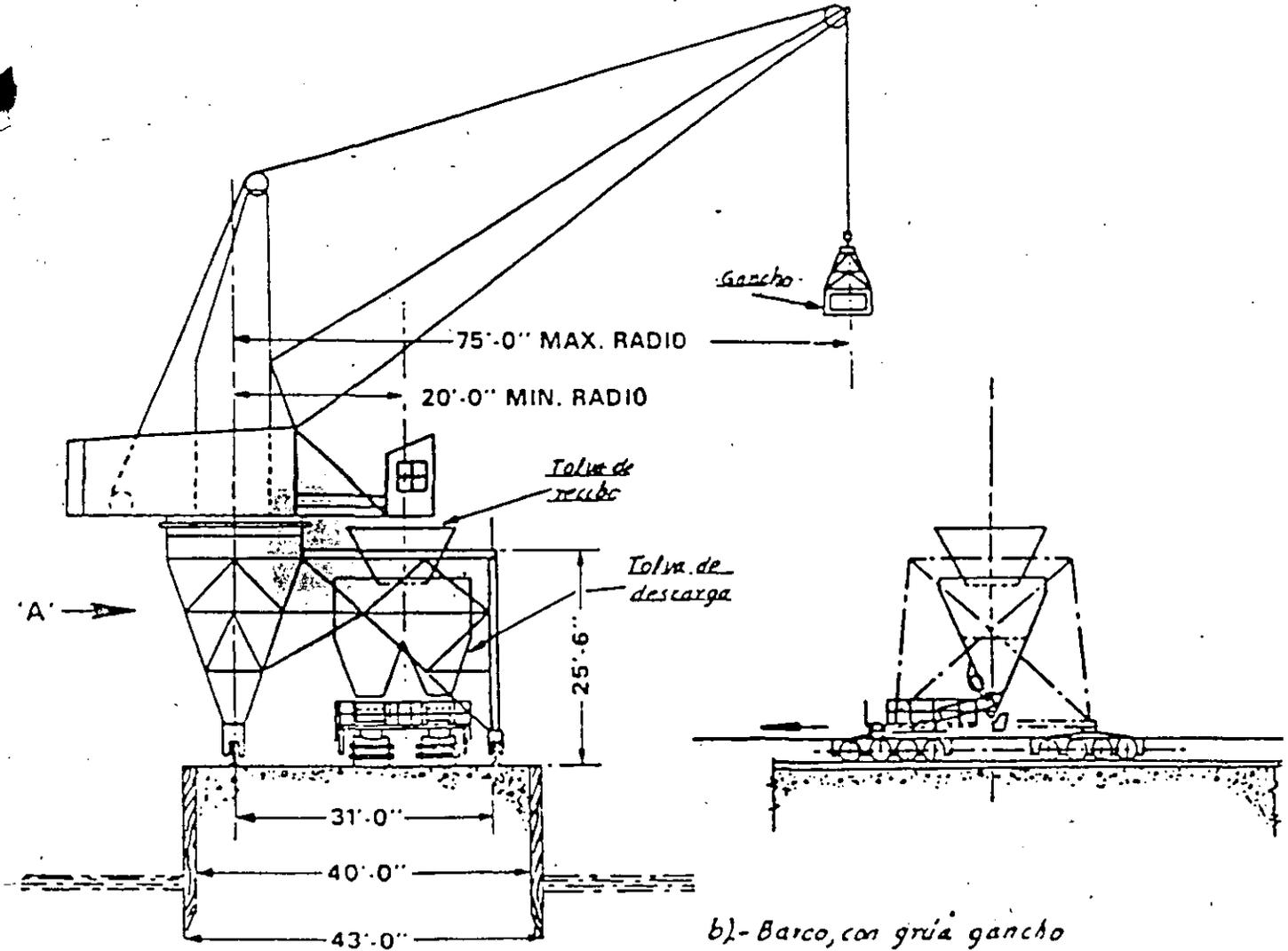
Tanque vertical de acero para almacenamiento de petróleo.



Fcg IV-7.- TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLE



a) - Vagones de FFCC



b) - Barco, con grúa gancho

Fig IV-26.- Métodos de descarga de carbón ¹³



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA
CURSOS ABIERTOS
CONTROL DE CONTAMINACION Y AHORRO DE ENERGIA EN CALDERAS**

AFINACION DE CALDERAS

ING. MARTINIAMO AGUILAR RODRIGUEZ

Palacio de Minería Calle de Tacuba 5 Primer piso Deleg. Cuauhtémoc 06000 México, D.F. APDO. Postal M-2285
Teléfonos: 512-8955 512-5121 521-7335 521-1987 Fax 510-0573 521-4020 AL 26

VI.- AFINACION DE CALDERAS.

1.- DIAGNOSTICO.

Uno de los medios mas efectivos de mejorar y mantener la eficiencia de operaci3n de las calderas es una "afinaci3n" o puesta a punto de la misma; esta actividad clasificada como mantenimiento preventivo es uno de los enfoques m1s directos de conservaci3n de combustibles, a trav3s del mejoramiento de la eficiencia.

El objetivo primario en una afinaci3n es el de lograr una eficiente combusti3n con una cantidad controlada de exceso de aire. Operando con el exceso de aire pr1ctico mas bajo se minimizan las p3rdidas de eficiencia reduciendo la cantidad innecesaria de aire que es calentado a la temperatura de la chimenea y que no es utilizado. La reducci3n asociada en la temperatura de gases de la chimenea y el consumo de potencia en los ventiladores de tiro forzado y tiro inducido, son beneficios adicionales.

El mejoramiento real en la eficiencia de la caldera con bajos excesos de aire dependen de la temperatura inicial en la chimenea y del exceso de aire a la salida de la caldera; un cambio dado en el exceso de aire tendr1 un efecto mas grande cuando la temperatura en la chimenea es alta. Por ejemplo, una reducci3n en el exceso de aire de 10% (de 20 a 10% 3 de 100 a 90% en exceso de aire) producir1 un 0.9% de mejoramiento en la eficiencia cuando la temperatura en la chimenea es del orden de 315°C, sin embargo, el mismo cambio en exceso de aire cuando la temperatura en la chimenea es de cerca de 93°C mejorar1 la eficiencia de la caldera de solo 0.2%.

Los valores anteriores no son afectados apreciablemente por el tipo de combustible (gas natural, aceite o carb3n). Se han documentado casos en que con reducciones en el exceso de aire de m1s del 10% fue posible tener mejoramiento de eficiencias de varios puntos porcentuales.

La operaci3n apropiada de los sistemas de control de combusti3n es esencial para mantener altas eficiencias de operaci3n de la caldera y niveles satisfactorios de excesos de aire; su principal prop3sito es proveer la cantidad correcta de aire y combustible en el quemador para satisfacer la demanda variable de generaci3n de vapor.

A pesar de que es importante que el exceso de aire enviado al quemador se conserve a un m1nimo sobre el rango de operaci3n de la caldera, por lo general no es pr1ctico operar precisamente en este punto de m1xima eficiencia; 3ste 3ptimo ocurre t1picamente en el "umbral" de combustible o formaci3n de humo y puede resultar en una condici3n inaceptable en la chimenea.

Para la mayoría de las calderas es necesario mantener un margen de exceso de aire arriba del mínimo o nivel de umbral para ajustar:

- . las variaciones en las propiedades del combustible;
- . las variaciones en las condiciones del ambiente;
- . la no-repetibilidad de los ajustes de control;
- . el deterioro normal de las partes del sistema de control;
- . los cambios en el régimen de (quemado) combustión;

Un ajuste y mantenimiento apropiado del equipo de combustión **son** esenciales para un buen control de combustión. Algunos parámetros que pueden afectar los requerimientos de exceso de aire son:

- . posición del registro de aire;
- . localización del difusor;
- . temperatura de aceite combustible;
- . presión de atomización de aceite combustible;
- . comportamiento del pulverizador (fineza del carbón);
- . temperatura de aire primario;
- . otros factores operativos..

Para asegurar el comportamiento confiable, seguro y eficiente de la caldera, los fabricantes de éstos equipos y de los quemadores recomiendan inspecciones y afinaciones periódicas. Por lo general se recomienda que se realice una afinación completa anualmente, pero en algunos lugares prefieren efectuar chequeos rápidos de la eficiencia de la caldera con mucha mayor frecuencia, por ejemplo semanalmente. En ésta forma, los problemas de eficiencia pueden detectarse tempranamente, antes de perder mucha cantidad de combustible o se requiera algún mantenimiento costoso

Una afinación mínima debe incluir:

- . verificación de la operación automática del control de combustible y aire; así como su rango de operación.
- . observación visual del horno
- . mediciones de exceso de O₂, CO y CO₂
- . temperatura de salida de gases.

Una afinación típica realizada en una caldera de tubos de agua de 5,000 kg/h., puede ser hecha en un día de duración de las pruebas de campo.

—Una afinación mas extensa puede también incluir:—

- . un paro de la caldera;
- . inspección completa de partes de quemadores;
- . inspección completa de compuertas;
- . inspección completa de válvulas y reguladores de combustible;
- . inspección completa de refractario;
- . inspección completa de tubos del hogar;
- . inspección completa de la instrumentación
- . mantenimiento mas critico durante el paro
- . calibración y reparación de instrumentos.

Las reparaciones mayores pueden requerir un paro mas largo posteriormente, en una fecha mas conveniente.

Para una afinación completa del control de combustión e inspección de la caldera, el personal de la afinación puede requerir un control total del régimen de combustión de la caldera para verificar los ajustes de control sobre el rango completo de cambio de carga, por lo que hay que prepararse para acomodar las fluctuaciones en el flujo de vapor y/o la presión. En algunas ocasiones puede ser necesario instalar una desviación en la chimenea de descarga de vapor, cuando las fluctuaciones no pueden ser toleradas en el sistema de suministro de vapor o en el proceso de la planta.

Cuando se hagan las mediciones en la chimenea (O_2 , CO y CO_2 y temperatura) es importante verificar la uniformidad del gas (transversalmente) para asegurar la representatividad de las lecturas. Por lo general las muestras de gas se extraen por medio de una probeta de un solo puesto y cualquier estratificación o gradiente en los ductos de gases puede llevar a mediciones erróneas.

Es importante que no se reduzca el exceso de aire a expensas de excesivo combustible (combustible no quemado, arrastre de carbón, CO , etc.), puesto que puede representar pérdidas significativas de eficiencia. Por lo general mas de 400 ppm de monóxido de carbono (CO) no es aceptable.

Finalmente, puede ser de mucho valor para referencia futura, solicitar al personal de afinación el margen de exceso de aire utilizado para acomodar los varios factores incontrolables mencionados anteriormente.

Para problemas especializados de combustión o de operación, no los rutinarios que se resuelven por el personal de planta de operación o de ingeniería, se debe considerar la asistencia de firmas de ingeniería o de consultoría. Algunas firmas tienen mucha experiencia en áreas de problemas específicos como:

- . corrosión y desgaste de tubos;
- . arrastre excesivo de carbón;
- . fuego en precipitadores y molinos;
- . control de calidad del agua;
- . mal funcionamiento de instrumentación;
- . restricciones de contaminación del aire.

LIMPIEZA DE TUBOS DE CALDERA.

Los depósitos y suciedad en la superficie externa de los tubos de una caldera de tubos de agua o condiciones similares en el lado de gases en los tubos de gases de una caldera de tubos de humo, inhiben la absorción de calor en la caldera y llevan a eficiencias mas bajas.

Esta condición se refleja en alta temperatura de salida de gases cuando se compara a las condiciones de "limpia" de un régimen de combustión y de exceso de aire similares en la caldera. La pérdida resultante en la eficiencia de la caldera puede ser estimada con aproximación sobre la base de 1% de pérdida de eficiencia por cada 22°C de incremento en la temperatura de salida de gases.

Debe mencionarse que los depósitos en el lado de agua resultante de un tratamiento inadecuado de agua podría eventualmente llevar a temperaturas mas altas de gases y a eficiencias mas bajas, sin embargo por lo general se puede producir la falla del tubo por sobrecalentamiento antes de que cualquier pérdida sustancial de eficiencia se haga evidente.

Condiciones malas de combustión en el quemador pueden ser la causa mayor de problemas de depósitos en el lado de gases de los tubos; insuficiente exceso de aire en el quemador o ajuste y mantenimiento inapropiado del quemador puede llevar a formación excesiva de carbón y hollín en el horno que se adhiere a los tubos de las paredes del horno y a los tubos de bancos convectivos.

La medición de la temperatura en la chimenea es un medio fácil y efectivo de monitorear la condición de limpieza de los tubos de la caldera. La temperatura de la chimenea debe compararse periódicamente con los valores obtenidos durante el arranque o después de un lavado de tubos de caldera para determinar cualquier desviación de temperaturas de la línea base de "limpia", para el mismo régimen de combustión y exceso de aire.

La implementación de un programa de mantenimiento relacionado con la eficiencia requiere que las desviaciones del comportamiento de las condiciones óptimas se monitoreen y corrijan ya sea con procedimientos de operación o mantenimiento; muchas calderas industriales requieren instrumentación adicional para éste propósito.

La importancia de operar calderas con mínimo exceso de aire.

La reducción del exceso de aire es una de las técnicas más efectivas para mejorar del comportamiento de calderas, que puede aplicarse sin alto costo de capital.

La reducción del exceso de aire cumple varias funciones.

Cuando los gases de combustión salen de la caldera llevan un potencial alto de desperdicio de energía que puede reducirse al disminuir el volumen de gases.

A menor volumen menor velocidad de gases y mayor estancia en la caldera mejorando la transferencia de calor en la caldera.

Se eleva la temperatura de flama y se incrementa la transferencia por radiación en la zona de combustión. Esta transferencia es muy eficiente e incrementa el régimen de intercambio de calor reduciendo la temperatura en la chimenea.

La contaminación se reduce al disminuir el combustible requerido para la misma demanda.

El incremento de eficiencia al ajustar la caldera mejora el régimen térmico y presenta, entre otros, algunos beneficios directos e interrelacionados:

- 1) Ahorra dinero en combustible.
- 2) Reduce el costo de energía en el punto en que se usa.
- 3) Incrementa la capacidad de evaporación en la caldera.

Al evaluar los proyectos de mejoramiento de régimen térmico de calderas los cálculos costo/beneficio deben basarse en la eficiencia de la caldera ajustada para prevenir estimaciones falsas de ahorros. No tiene sentido tratar de corregir un problema agregando algo nuevo a una caldera si la corrección puede hacerse mediante mantenimiento, reparación y ajuste.

2.- AJUSTES

Las mejoras que pueden obtenerse en una caldera en estado de deterioro pueden ser sustancialmente menores que aquellas que pueden conseguirse bajo condiciones apropiadas de trabajo por lo que es esencial examinar la caldera antes de proceder con pruebas y deben efectuarse también previamente los trabajos necesarios de reparaciones y mantenimiento.

Uno de los primeros interrogantes al ajustar la caldera en operación es si se requiere sacarla de servicio y abrirla para una inspección formal.

Una prueba preliminar de eficiencia y la revisión de registros anteriores proveen información valiosa acerca de las condiciones de operación de la caldera y para decidir si se requiere una inspección más detallada.

La condición del sistema de quemadores y el proceso de combustión puede juzgarse por el nivel de oxígeno libre en los gases. Los registros de arranque de caldera y ajustes previos son también un punto valioso de referencia para el programa de los trabajos de ajuste. Aún una llamada al fabricante puede dar información útil sobre las características del comportamiento esperado de la caldera.

Si esta información no se tiene disponible la información de unidades similares en cuanto a oxígeno libre en gases puede usarse como referencia. En la Fig. , se dan valores de excesos de aire (O_2) para varios combustibles siendo estas cifras de registro de un número elevado de pruebas y aplicables a alto régimen de combustión (los rangos incluyen calderas industriales).

Al disminuir el régimen, el comportamiento se deteriora y se requiere un exceso de aire mayor que varía según el combustible que se quema.

Temperatura en chimenea.

Las mediciones de temperatura en chimenea son un índice efectivo para monitorear la limpieza de tubos y de la efectividad de intercambio de calor en la caldera. Los valores actuales pueden compararse con aquellos obtenidos en el arranque o después de un mantenimiento y limpieza e identificar las desviaciones de esta línea de referencia ya que la temperatura generalmente se incrementa con regímenes de combustión y excesos de aire altos, en sus comparaciones deben considerarse condiciones similares de operación.

~~Si no se cuenta con esta información o si las temperaturas son excesivas puede usarse la Fig. , como referencia. Deben tomarse las temperaturas antes del economizador o calentador de aire pero el comportamiento se determina a partir de la temperatura después de estos auxiliares.~~

Inspección del generador de Vapor.

La inspección debe incluir el sistema de quemadores, controles de combustión y de horno.

Algunos puntos que deben observarse se muestran en forma enunciativa.

Quemadores de Petróleo.

- Compruébense que los atomizadores son apropiados para las condiciones actuales de combustión, y para el tipo de petróleo y geometría del quemador usados.
- Verifíquese que la forma de la flama es apropiada a través de las mirillas de observación localizadas lateral y posteriormente en la caldera.
- Verifíquese que los quemadores no hayan sufrido distorsiones o sobrecalentamiento y que no se tienen depósitos de coque y gomas. Limpie o reemplace las partes que lo requieran.
- Inspeccionese los conductos y orificios de las boquillas y verifíquese que no presenten desgaste, rayaduras u otras marcas.

Usense calibradores para esta prueba.

LISTA DE VERIFICACION DE EQUIPOS DE COMBUSTION

A.- Quemadores de gas, quemadores de aceite combustible y quemadores de carbón pulverizado.

- Condiciones del refractario del quemador - gargantas de quemador.
- Condiciones de operación de compuertas de aire y registros del sistema de combustión.
- Posición de todas las compuertas de distribución de aire.
- Condiciones y limpieza de conductos y orificios de gas.
- Condiciones y limpieza de los conductos en boquillas de quemadores de aceite.
- Erosión y daños por sobrecalentamiento en equipo de combustión.
- Operación del sistema de cenizas.
- Condición de difusores, lanzas, etc.
- Limpieza y operación de filtros y trampas de humedad.
- Limpieza del filtro de aceite combustible.
- Condición de tuberías de carbón.
- Temperatura de aceite.
- Presión de atomización vapor, aire o mecánica.
- Finura de carbón (malla) tamaño.
- Posición de los cañones de quemador.
- Condición y operación de molinos, alimentadores y transportadores.
- Condición de impulsores y difusores.
- Verificar temperaturas y presión correctas de combustible en quemadores. Esto puede incluir reajuste en el equipo de bombeo y calentamiento para adecuarse a la condición actual del combustible que se quema, así como calibración de equipo de medición y reajuste de presiones a los valores originales. Si se hace algún cambio deben observarse cuidadosamente los efectos producidos y prever cualquier problema que se desarrolle en consecuencia.
- Verificar la presión correcta de vapor o aire de atomización y revisar si no se tiene alguna trampa de vapor defectuosa que pueda inducir agua indeseable a la zona de combustión.
- Asegurarse que el difusor (impulsor) del quemador no este dañado y que este correctamente localizado con respecto a la boquilla del cañón del quemador.
- Verificar que el cañón del quemador está en la posición apropiada dentro de la garganta del quemador, y que el refractario de ésta se encuentra en buenas condiciones.
- Asegúrese que los filtros y trampas de humedad están instalados, limpios y operando apropiadamente para prevenir taponamiento en los orificios de gas.
- Inspeccionar los orificios de inyección de gas y verificar que no hay obstrucción en los conductos.
- Asegurarse de que no hay partes faltantes o quemadas en el quemador y confirmar la localización y orientación de todos los componentes auxiliándose de las mirillas de observación y reportes de ajustes originales.

B.- Controles de combustión.

- Limpieza y movimiento libre de válvulas de combustible.
- Repetibilidad de operación y movimiento suave de todos los elementos de control.
- Presión o tensión adecuada a todos los reguladores.
- Oscilación innecesaria del régimen de combustión.
- Operación apropiada de todo el sistema de entrelaces y circuitos de disparo.
- Asegurarse de que todos los entrelaces de seguridad y los circuitos de disparo de la caldera operan.
- Ver que todo el sistema de indicadores, sistema de control y gases están calibrados y funcionan correctamente.
- Eliminar los juegos u holguras en todos los mecanismos de control y compuertas de aire, verificando que haya buena repetibilidad en los puntos de carga contra posición desde ambos sentidos.
- Verificar la operación precisa y suave de los elementos de control y corregir las oscilaciones innecesarias causadas por ajuste inapropiado de reguladores y controles automáticos.
- Inspeccionar todas las válvulas de combustible y verificar su movimiento libre y correcto, reparar y limpiar si es necesario.

C.- Horno.

- Las superficies del lado del fuego deben estar limpias, verificar la eficiencia de los sopladores de hollín y considerar limpieza periódica con chorro de agua si no es suficiente la acción de sopladores.
- Inspeccionar y reparar las mamparas internas; el deterioro de estas establece corto circuito de gases calientes causando alta temperatura en chimenea. Pueden localizarse puntos calientes recorriendo transversalmente el horno con un lanza y detector de temperatura para corregir donde sea necesario.
- Cualquier fuga o grieta en el refractario o envolvente debe repararse.
- Deben limpiarse los puertos de observación del horno y asegurarse de que están visibles la garganta del quemador, las paredes del horno y los primeros pasos de convección permitiendo acceso para examen de las condiciones de flama, quemador, zona de refractario y horno. Esto es fundamental en la detección y corrección de problemas.
- Depósitos excesivos o suciedad de los tubos de caldera en el lado de gases.
- Operación apropiada de sopladores de hollín.
- Fugas en envolventes de ductos y equipo auxiliar.
- Puertas de observación e inspección del hogar limpias y en condiciones de operación.

Apariencia de la Flama.

La flama es el corazón del proceso de combustión si no es correcta se tendrá siempre un serio reto para lograr un buen ajuste en la caldera.

Su apariencia es una buena indicación de las condiciones de combustión. Es difícil generalizar la característica de una "buena" flama ya que varía según el diseño de quemador y otras condiciones de operación.

Operar con bajo exceso de aire es una situación ideal, sin embargo hay que familiarizarse con las condiciones que esto crea con relación al alto exceso de aire que muchos operadores prefieren. La operación a bajo exceso de aire reclama una atención más precisa del personal de planta en el proceso de combustión.

Características de la flama con bajo exceso de aire.

El tamaño de la flama es mayor y tiende a llenar el horno completamente; la tendencia es alargarse ya que toma un tiempo mayor el proceso de combustión completo del combustible.

- Presenta además lentos movimientos en las puntas a diferencia de la apariencia de alta turbulencia e intensidad de la operación con excesos de aire altos.
- El color de la flama también cambia al disminuir el O₂, las flamas de gas natural por ejemplo se hacen más visibles y luminosas y toman color amarillento con porciones de movimientos lentos, en cambio en los quemadores de petróleo y carbón se tornan a amarillo oscuro o naranja y aparecen partes brumosas (hazy).

Aunque la operación con bajo exceso de aire es importante en ocasiones no es posible por otros problemas de combustión relacionados.

La observación de flamas en petróleo da información importante del proceso de combustión; algunos problemas que frecuentemente ocurren pueden deberse a una o más de las siguientes causas:

- Alto contenido de oxígeno libre.
- Temperatura o presión inapropiadas de combustible.
- Deterioro en la boquilla del quemador.
- Ajuste inadecuado de registros de aire.
- Posición incorrecta del cañón del quemador.

Aspectos fundamentales de pruebas de combustión y ajuste.

Deben tomarse en cuenta los conceptos básicos siguientes para una buena combustión.

- Tiempo suficiente.
- Temperatura suficientemente alta.
- Turbulencia óptima para mezcla íntima.
- Aire de combustión suficiente.

Las pruebas y ajustes deben conducirse con un conocimiento completo de los objetivos de la prueba y siguiendo un plan organizado y sistemático.

Instrumentos.

Se debe acercarse a los límites mínimos de exceso de aire con precaución y ayuda de un analizador de gases que en forma continua de una medición precisa de las condiciones promedio para el quemador que se ajusta.

Debe registrarse los valores de posiciones y ajustes del quemador en el momento en que se llega al número de la máxima marca de humo para petróleo o del máximo de CO para gas natural.

La inestabilidad de la flama puede ser un factor limitante en la reducción del exceso de aire.

Seguridad durante las pruebas.

- La operación con exceso de aire demasiado bajo puede tener resultados catastróficos.
- Tomar conocimiento en todo momento del impacto en la combustión cada vez que se haga un cambio en el flujo de combustible, flujo de aire y sistema de control.

- Mantener observación constante en la instrumentación de la caldera, la chimenea y las condiciones de flama al hacer cualquier cambio.
- Consultar al personal de la planta o al fabricante de la caldera si se tienen dudas.
- Para los detalles del sistema de combustión y métodos para variar el exceso de aire consultar los manuales suministrados con la unidad para operación y mantenimiento de la caldera.

3.- OPTIMIZACION DE LA COMBUSTION.

Determinación de la marca máxima de humo y el nivel máximo de CO.

Una vez que la caldera se encuentra trabajando bajo control el siguiente paso importante para mejorar la eficiencia y reducir las emisiones contaminantes es el establecimiento del nivel más bajo de O₂ al que la unidad puede operar con seguridad y cumplir con la reglamentación existente.

Las pruebas deben correrse a varios regímenes de combustión y determinar los valores mínimos de O₂ en cada caso ya que la mayoría de las calderas operan en un rango amplio de su capacidad. Procediendo en esta forma el sistema de control de combustión habrá sido ajustado para economía óptima por concepto de combustible.

En cada una de las cargas en que se hallan realizado pruebas y ajustes debe variarse el O₂ de 0.5 a 1% arriba del punto de operación normal, y hacia abajo hasta el punto en que la caldera empiece a producir humo o hasta que las emisiones de CO presenten valores entre 150 a 250 PPM.

Debe verificarse cuál es el límite legal establecido; en muchas localidades y por las compañías de seguros es 400 PPM. A esta condición se le refiere como la "marca máxima" de humo, o simplemente como el punto de O₂ mínimo.

El término anterior se aplica generalmente a instalaciones que queman petróleo o carbón ya que en este caso la producción de humo ocurre normalmente antes de que las emisiones de CO alcancen niveles significativos. El nivel de CO corresponde a combustibles gaseosos.

La marca máxima de humo o número de punto de humo (smoke spot number, ssn) es una escala de densidad de humo que puede relacionarse con la acumulación de hollín en las paredes de una caldera.

En la tabla , se muestran los valores deseables del número de punto de humo (ssn) para varios combustibles y la relación entre este número y la velocidad a la que generalmente los depósitos se acumulan; en la Fig. , puede apreciarse que el número de punto de humo (ssn) relaciona directamente el exceso de aire con el comportamiento del quemador.

Mínimo O₂ en gases de combustión.

La determinación de exceso de aire mínimo requerido para una buena combustión ha generado la necesidad de desarrollar curvas similares a las que muestran la relación humo/O₂ y CO/O₂ en las Fig. y , que tienen como base mediciones de prueba.

Cada una de estas figuras muestra dos curvas distintas que ilustran las condiciones extremas que pueden encontrarse en el comportamiento de humo y CO. Una de ellas muestra un incremento gradual en CO o humo a medida que el exceso de aire mínimo se alcanza. La otra tiene una pendiente gradual a niveles de O₂ relativamente altos y una pendiente más pronunciada cerca del punto de O₂ máximo. Para los casos representados en esta segunda curva pueden ocurrir altos niveles de humo y CO y condiciones inestables potencialmente impredecibles con cambios muy pequeños de exceso de aire.

Debe tenerse mucho cuidado al reducir el exceso de aire a valores cercanos al número de punto de humo (ssn) y monitorear continuamente tanto la apariencia de la flama y condiciones en chimenea como los instrumentos y controles en forma simultánea.

Las variaciones en exceso de aire deben realizarse en incrementos o decrementos pequeños hasta encontrar que forma de curva se desarrolla y la tendencia que ésta tiene pudiendo encontrarse cambios pronunciados o suaves y aún zonas de inestabilidad. Hay calderas que tiene características graduales en una zona de capacidades y pronunciadas en otras.

Ajuste de control de calderas para bajo exceso de aire-paso a paso.

a.- Establecer el régimen de combustión o carga deseados y cambiar los controles de operación automática a manual. Asegurarse que todos los entrelaces de seguridad funcionen.

b.- Registrar los datos de caldera y chimenea (- presiones, temperaturas, flujos, nivel, etc.) y observar las condiciones de flama después de que la operación de las calderas se estabilice en la carga previamente seleccionada.

Si se observa que la cantidad de O₂ en los gases de combustión se encuentra en los valores bajos del rango de valores típicos y el CO y humo se encuentran en niveles aceptables, esto es indicación que la caldera está operando ya cerca del punto de relación aire/combustible óptimo. Lo anterior puede ser distinto a la condición que se presenta a otras cargas sin embargo es conveniente completar esta rutina para todo el rango de operación que interese para determinar si es práctico operar a niveles aún inferiores de O₂.

c.- Incrementar el flujo de aire al hogar hasta que las lecturas en O₂ en la chimenea se incrementen de 0.5 a 1% asegurándose de tomar estas lecturas después de la estabilización de la unidad y anotando cualesquier cambio en las condiciones de la flama.

d.- Regresar a la condición de flujo normal de aire y comenzar a reducirlo poco a poco, observando la chimenea y cualquier indicación de humo así como la flama en forma continua. Registrar los valores de O₂, el SSN, CO y la temperatura en la chimenea después de cada cambio.

No intentar reducir el flujo de aire estrangulando los registros de aire de quemador ya que eso altera las características de mezcla aire/combustible e induce complicaciones a las pruebas.

Si se corren pruebas a régimen o carga bajas, lo cual en general no es recomendable, mantener una vigilancia muy cerrada en la diferencial caja de aire/hogar, si cae a un valor muy bajo el sistema de protección podrá operar disparando la unidad.

e.- Continuar reduciendo el flujo de aire paulatinamente por el procedimiento descrito hasta alcanzar uno de los siguientes límites:

- Condiciones inaceptables o peligrosas de la flama como incidencia de las flamas en las paredes del hogar o en partes del quemador, excesivo acarreo de la flama o inestabilidad.
- Alto nivel de CO en los gases de combustión.
- Humo en la chimenea, y en este punto deben diferenciarse las emisiones de humo de las de vapor de agua, azufre o polvo las cuales normalmente presentan apariencias blanca o gris, teniendo en cuenta siempre la reglamentación aplicable normal del ambiente
- Limitaciones relacionadas con el equipo tales como baja diferencial de presión caja de aire/hogar, límites de flujo de aire, etc.

f.- Trazar las curvas características O₂/Humo - O₂/CO, en forma similar a las que se muestran en las figuras, usando el O₂ y CO o el SSN obtenido en cada ajuste aire/combustible. Fig.

g.- Encontrar el nivel mínimo de O₂ para la caldera a partir de las curvas trazadas en la Fig. , pero no ajustar los controles de quemador a este valor. Aún cuando este puede ser el punto de máxima eficiencia y el de emisión mínima de NOX normalmente es impráctico operar los controles de la caldera en este punto ya que se tendrá tendencia a producción de humo o a incrementar el contenido de CO a niveles peligrosos durante los cambios de carga.

Comparar este valor mínimo de O₂ con el valor esperado que provee el fabricante de la caldera; si el nivel mínimo encontrado es sustancialmente más alto que éste, es posible lograr mejoras de consumo de combustible y mejor mezcla con ajustes del quemador permitiendo la operación con exceso de aire menor.

h.- Establecer el margen de exceso oxígeno. (Buffer Zone) por encima del valor requerido para prever variaciones en combustible y condiciones atmosféricas y los cambios de carga. Agregar éste al valor mínimo encontrado y reajustar los controles del quemador para operar automáticamente al nivel más alto que es el ajuste práctico más bajo para ese régimen de carga.

i.- Repetir los pasos desde **a** hasta **h** para cada régimen de carga en que se realicen pruebas; en algunos sistemas de control no es posible establecer el O₂ en su valor óptimo para cada régimen por la razón de que los ajustes en una carga pueden afectar a los valores de las demás.

En estos casos seleccionar ajustes que dan el mejor comportamiento en un rango amplio de capacidades o cargas; esto muchas veces se hace por el procedimiento de prueba y error y puede requerir el repetir algunas pruebas.

En general muchos expertos coinciden en que es mejor no hacer ningún ajuste a los sistemas de control en los rangos bajos de una caldera sin tomar precauciones excesivas.

Los requerimientos de aire de combustión a cargas muy bajas normalmente están condicionados por las características de ignición de la flama y por su estabilidad, más que por la eficiencia. Las relaciones aire/combustible en bajas cargas en o cerca de las condiciones de encendido son muy sensibles y cualquier cambio puede afectar desfavorablemente las características de combustión del lado seguro. Si los requisitos de demanda condicionan la operación a bajas cargas por tiempo prolongado consultar con el fabricante de las calderas y de preferencia con su departamento de servicio o un consultor especializado en combustión antes de establecer los niveles de operación de O₂.

j.- Verificar que todos los nuevos ajustes puedan manejar los cambios súbitos de carga que puedan ocurrir en la operación normal y diaria sin que se generen efectos adversos o condiciones peligrosas. Esto podrá hacerse incrementando y reduciendo rápidamente la carga y manteniendo observación sobre la flama y chimenea durante cada cambio hasta que las condiciones se estabilicen.

Si se detectan condiciones desfavorables reajústense los controles de combustión para proveer exceso de aire ligeramente más alto en los puntos en que se hallan notado estos efectos. Verificar posteriormente estos ajustes con acciones similares hasta estar seguro de que los ajustes finales pueden manejar adecuadamente las fluctuaciones y queden debidamente registrados.

Repetir estas verificaciones a intervalos frecuentes hasta que sea obvio que la caldera no tiene problemas y que no se exceden los valores para humo y CO o que no se presentan condiciones de inseguridad.

En las calderas en que se quema un combustible alternativo deben realizarse estas mismas pruebas y ajustes para el segundo combustible, aunque no siempre es posible lograr el nivel de O₂ óptimo para cada combustible a todas las cargas.

Basándose en la información dada para el procedimiento de ajustes debe tenerse el juicio suficiente para determinar cuáles son las mejores condiciones que en forma práctica que pueden conseguirse.

Evaluación de los nuevos ajustes de bajo O₂. Para comprobar los ahorros de energía los nuevos ajustes de bajo O₂ deben ser realistas y deben dárseles permanencia. Debe ponerse especial atención al hogar y a las formas y apariencia de las flamas durante el primer o primeros dos meses siguientes a las pruebas de combustión o ajuste, e inspeccionar totalmente la caldera durante la siguiente salida de servicio.

Para asegurar una alta eficiencia en la caldera deben hacerse evaluaciones periódicas de su comportamiento y compararlo con los resultados obtenidos durante el programa de pruebas de combustión y ajuste.

Proceso de revisión de ajustes finos.

En los programas de optimización es posible algunas veces bajar los límites de humo y CO para conseguir excesos de aire aún más bajos logrando mayores ganancias por eficiencia.

Si el quemador y el sistema de combustible no funcionan apropiadamente, los mejores esfuerzos realizados para bajar el exceso de aire pueden ser un desperdicio. La manera de enfocar este procedimiento es asegurarse que todo está conforme a las recomendaciones del fabricante y conducir entonces ajustes por prueba y error, en forma organizada, de tal manera que pueden establecerse comparaciones con sentido práctico.

Los factores influyen en la reducción al nivel mínimo de O₂ son:

- Ajuste del registro de quemadores.
- Posición de la boquilla del quemador.
- Posición del difusor.
- Temperatura del aceite combustible.
- Presión de atomización del aceite combustible
- Ajustes del alimentador de carbón, o combustible sólido.
- Tamaño de las partículas o carbón pulverizado, u otro combustible sólido.

El efecto de estos ajustes en el nivel mínimo de O₂ son variables de una caldera a otra y difíciles de predecir con precisión. El método usado para mejorar la eficiencia de una caldera involucra la operación de ésta al nivel práctico más bajo de O₂ con un margen adecuado para absorber variaciones causadas por cambios en las propiedades de combustible, cambios en las condiciones ambientales, y las características de respuesta y repetibilidad del sistema de control de combustión.

PROCEDIMIENTO PASO A PASO DEL AJUSTE DE CALDERA PARA OPERACION CON BAJO EXCESO DE AIRE.

- a.- Operar el sistema de control en manual llevando la caldera al régimen de combustión o carga en que se desea probar.
- b.- Estabilizar la unidad observando la instrumentación de los parámetros principales y preferentemente de aquellos con registro para observar la tendencia en las lecturas.
- c.- Operar el sistema de control de agua de alimentación en automático. Una vez estabilizada la unidad a juicio del director de pruebas se podrá operarla en manual.
- d.- Observar las condiciones del hogar y de las flamas del quemador, y tomar un juego completo de lecturas.

e.- Incrementar el nivel de O₂ de 0.5 al 1% dando suficiente tiempo para estabilización y tomar un juego de lecturas.

f.- Reducir el nivel de O₂ con pasos o variaciones pequeñas.

Observando las condiciones de flamas en quemadores y chimenea estabilice la unidad después de cada cambio y registrar de información.

g.- Continuar reduciendo el exceso de aire hasta alcanzar el nivel mínimo de O₂.

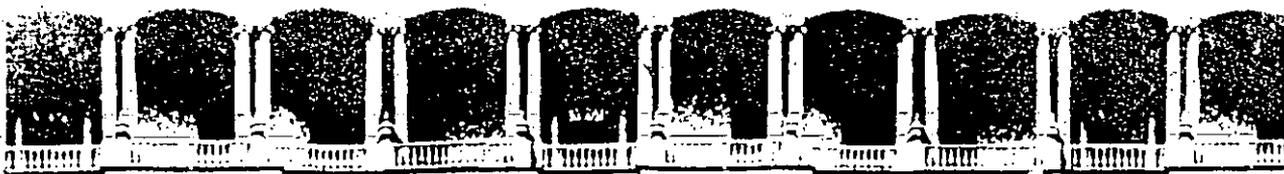
h.- Trazar la curva de CO u opacidad versus O₂.

i.- Comparar el nivel mínimo de O₂ con el valor del comportamiento esperado por el fabricante de la caldera, investigándose los niveles de alto exceso de aire.

j.- Establecer el margen de exceso de O₂ sobre el mínimo encontrado y reajustar los controles de quemador para mantener ese nivel. Este es el nivel práctico de operación basado en la estimación de la habilidad del sistema de control para repetir posiciones y las afectaciones de otros factores como temperaturas y presiones.

k.- Repetir los pasos de **a** hasta **j** para cada régimen considerando; se deben hacer consideraciones para el ajuste del O₂ óptimo ya que el ajuste en una carga puede afectar las condiciones de otro valor de carga sobre todo cuando no hay suficientes elementos de caracterización de la relación aire/combustible.

l.- Después de haber completado estos ajustes debe someterse la unidad a la operación que simule las variaciones de carga en ambos sentidos que pueden presentarse en operación normal. Si se encuentran condiciones indeseables de comportamiento durante estas variaciones se debe reajustar el sistema de control.



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

**CURSOS ABIERTOS
CONTROL DE CONTAMINACION Y AHORRO DE ENERGIA
EN CALDERAS**

**EFFECTO DE DEPOSITOS EN EL LADO DE AGUA
Y LADO DE GASES**

ING. MARTINIANO AGUILAR RODRIGUEZ

VII.- EFECTO DE DEPOSITOS EN EL LADO DE AGUA Y LADO DE GASES.

Por lo general una caldera tiene una temperatura de salida de 10°C a 55°C arriba de la temperatura de saturación del vapor, antes del economizador u otro equipo recuperador de calor, dependiendo del tipo de caldera. Por lo general una temperatura de salida más alta es un signo que indica ensuciamiento o incrustación en las superficies de transferencia de calor en la caldera; la acumulación de depósitos o incrustación actúan como un aislamiento térmico que reduce la eficiencia total de la caldera.

Condiciones de mala combustión en el quemador puede ser la principal causa de depósitos en el lado de gases de los tubos; insuficiente acceso de aire en el quemador y mantenimiento o ajuste inapropiado del quemador pueden producir excesivos depósitos en el lado de gases de los tubos de paredes de agua de la caldera.

Se deben comparar periódicamente las temperaturas de salida con los valores obtenidos después de una limpieza de tubos de caldera para determinar cualquier desviación de las temperaturas base de "limpias". Puesto que las temperaturas de salida por lo general se incrementan con el régimen de fuegos y con el exceso de aire, las comparaciones deben efectuarse en condiciones similares de operación de la caldera.

La pérdida de eficiencia en la caldera se puede estimar con buena aproximación tomando como base que puede ocurrir una pérdida de eficiencias de 1% por cada 22°C de aumento en la temperatura de salida.

Adicionalmente, una mala calidad del agua de alimentación puede causar formación de incrustación en el lado de agua de las superficies de transferencia de calor; una formación de sólo 0.8 mm (1/32") de incrustación "normal" compuesta de sales de Ca y Mg disminuirá la eficiencia de la caldera en 2%, pero si la incrustación está compuesta de hierro y sílice, la eficiencia de la caldera se reduce 7% con el mismo espesor de 0.8 mm. En la Fig. se muestra el efecto negativo de la incrustación.

Por las razones anteriores, es muy importante conservar limpias las superficies de transferencia de calor, tanto del lado de agua como del lado de gases.

Puesto que la mayoría de las calderas se inspeccionan anualmente ya sea por inspectores de autoridades o de compañías de seguros, se recomienda utilizar este tiempo de salida de servicio de la caldera para limpiar completamente las superficies de transferencia de calor. Esto no sólo aumenta la eficiencia de la caldera, sino también prolonga la vida del equipo.

La incrustación produce resistencia a la transferencia de calor entre los gases calientes de combustión y el agua de la caldera. El calor transferido a través de la incrustación puede expresarse en la siguiente forma:

$$q = k \frac{(\Delta T)}{e}, \text{ en donde:}$$

q = calor transferido

e = espesor de la incrustación

k = conductividad térmica

(ΔT) = diferencial de temperatura.

De acuerdo con lo anterior, la cantidad de energía de calor transferida es directamente proporcional a la conductividad térmica de la incrustación e inversamente proporcional al espesor de la incrustación.

Las conductividades térmicas de varias sustancias características de depósitos de incrustación de calderas se muestran en la tabla.

TABLA.- CONDUCTIVIDADES TERMICAS DE VARIAS SUSTANCIAS.

MATERIAL	CONDUCTIVIDAD TERMICA <i>Kcal/m²°Cm/h</i>
Analcita	
(Na ₂ O - Al ₂ O ₃ - 4S ₂ O ₃ - 2H ₂ O)	
Fosfato de calcio	
Sulfato de calcio	
Fosfato de magnesio	
Oxido de hierro magnético	
Incrustación de silicato, porosa	
Ladrillo refractario	
Ladrillo aislante	
Acero de caldera	

Incrustación en el lado del agua.

El material de incrustación en la forma de sólidos disueltos se deposita en el lado del agua de las superficies de los tubos durante el proceso de evaporación del agua. El vapor se forma en burbujas sobre la superficie de los tubos, y el material disuelto puede precipitarse de estas burbujas puesto que sus superficies contienen una concentración mas alta de sólidos que el cuerpo principal de agua.

La concentración máxima permisible de sólidos disueltos en el agua de la caldera se determina de acuerdo con la presión de operación como se muestra en la Fig.

TABLA .- CONCENTRACIONES MAXIMA DE IMPUREZAS RECOMENDADAS

AGUA DE ALIMENTACION			AGUA DE CALDERA			
Presión del domo, en kg/cm ²	ppm de Fe (Hierro)	ppm de Cu (cobre)	Dureza total ppm CaCO ₃	ppm de SiO ₂ (silica)	Alcalinidad total, ppm de CaCO ₃	Conductividad específica μ hos/cm
0-21						
21.1-31.1						
31.1-42.4						
42.4-52.6						
52.6-63.6						
63.6-70.4						
70.4-105.0						
105.0-141.0						

Por lo general la concentración de sólidos disueltos se controla con procedimientos, de pre-tratamiento del agua de alimentación y por medio de purgas; éstas se refieren a la extracción de una parte del agua del domo de la caldera cuando tiene exceso de la concentración de sólidos recomendada y su reposición con agua de repuesto a concentraciones más bajas. El % de purga requerida para mantener una concentración dada de sólidos disueltos se muestra en la Fig.

Como los depósitos de encrustaciones retardan la transferencia de energía calorífica al agua de la caldera, en consecuencia ocurre una reducción en la eficiencia de operación. La pérdida de energía aproximada en función del espesor de la incrustación se muestra en la Fig. , para varios materiales de incrustación.

Los depósitos de incrustación en el lado de agua también producen un incremento en la temperatura del metal del tubo, que a veces resulta en fallas de tubos antes de que se observe algún efecto en la eficiencia de la caldera.

Depósito en el Lado de Gases.

Los depósitos sólidos en las superficies de los tubos del lado de gases también producen una reducción en el calor transferido al agua de caldera; estos depósitos sólidos existen en alguna de las siguientes formas:

- partículas de hollín;
- cenizas volantes;
- partículas de escoria.

Por lo general estos problemas están relacionados con los sistemas que queman aceite combustible o carbon; los factores que tienen efecto sobre el tipo y régimen de acumulación de depósitos, son principalmente los siguientes:

- propiedades del combustible;
- características del sistema de quemado;
- distribución de temperatura resultante en la caldera.

Los depósitos de hollín se pueden formar en las paredes del hogar en calderas que queman gas combustible, debido a lo siguiente:

- niveles demasiado bajos de exceso de aire;
- contacto de la flama con las paredes de agua.

Los depósitos severos de hollín pueden disminuir la temperatura de salida de gases de operación; por lo general, un incremento gradual en la temperatura de salida es una indicación de depósitos de hollín.

Los depósitos excesivos en el lado de gases pueden generar patrones de flujo de gases anormales en la zona convectiva de la caldera, y pueden aún taponar completamente a una unidad.

~~Para remover los depósitos de escoria de las paredes de agua en~~
calderas que queman carbón se utilizan sopladores de pared, y para
remover los depósitos de cenizas volantes de los pasos convectivos
se usan los sopladores de hollín.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA
CURSOS ABIERTOS
CONTROL DE CONTAMINACION Y AHORRO DE ENERGIA
EN CALDERAS**

EL MANTENIMIENTO RELACIONADO CON LA EFICIENCIA

ING. MARTINIANO AGUILAR RODRIGUEZ

VIII.- EL MANTENIMIENTO RELACIONADO CON LA EFICIENCIA.

Esta parte puede ayudar al personal de calderas comerciales e industriales a establecer un programa de mantenimiento específicamente dirigido a mantener altos niveles de eficiencia en unidades que quemen gas, aceite o carbón, en tamaños desde 4,000 a 250,000 kg/h. de flujo de vapor.

El mantenimiento relacionado con la eficiencia de la caldera está dirigido a corregir cualquier condición (excepto el cambio de combustible) que resulta en un incremento en el consumo de energía para generar una cantidad dada de vapor, es decir, a carga constante de la caldera, se considera que cualquier condición esta relacionada con la eficiencia si el mal funcionamiento del componente o la degradación del comportamiento resulta en un incremento en:

- . temperatura de gases de escape;
- . requerimientos de exceso de aire;
- . monóxido de carbono, humos o carbón sin quemar en la ceniza;
- . pérdidas por radiación o convección desde la caldera, ductos y tubería hacia el exterior;
- . purgas por encima de lo requerido para mantener la concentración del agua de caldera en los valores permisibles;
- . consumo de potencia de auxiliares en ventiladores, bombas o pulverizadores.

Esta definición distingue los puntos del mantenimiento relacionado con la eficiencia del mantenimiento normalmente realizado por el personal o la protección del equipo.

Los procedimientos de mantenimientos que aquí se incluyen están dirigidos a mantener una operación eficiente y no intentan reemplazar cualquier procedimiento que sea requerido por razones de seguridad o recomendado por el fabricante para extender la vida útil del equipo.

De hecho, el mantenimiento relacionado con la eficiencia de la caldera puede ser visto simplemente como una aplicación mas intensiva de los procedimientos de mantenimiento preventivo en áreas donde la eficiencia está afectada, antes de que el equipo se deteriore hasta un punto en donde la confiabilidad, seguridad o capacidad estén amenazadas. Por ejemplo, los depósitos de hollín o ceniza en las superficies de calentamiento pueden reducir la transferencia de calor e incrementar la temperatura de salida de gases, pero podrían no afectar la seguridad de la planta o la capacidad para tomar carga, a menos que los depósitos restringan los pasajes de gases hasta el punto en que impidan suministrar suficiente aire a la unidad.

Puntos de verificación de la eficiencia.

Una verificación de las condiciones de combustión usando mediciones en la chimenea de O₂, CO, humos y temperaturas, así como la apariencia de la flama es una herramienta efectiva de mantenimiento; estas pruebas deben efectuarse a las condiciones de operación correspondientes a las empleadas en el establecimiento de metas.

Los datos de prueba deben registrarse para que puede ser fácilmente identificado el deterioro en la eficiencia de operación; la frecuencia de estos puntos de verificación dependerá de la complejidad de los sistemas y del personal disponible, pero al menos deben hacerse sobre una base semanal.

Establecimiento de metas de comportamiento.

El requerimiento inicial de un programa de mantenimiento relacionado con la eficiencia de la caldera es establecer el mejor comportamiento obtenible de la unidad sobre el rango de cargas de operación.

Para unidades nuevas, los datos tomados durante la puesta en servicio inicial deben compararse con el comportamiento garantizado por el fabricante, para establecer si la unidad esta operando como fue diseñada; deben hacerse todos los esfuerzos para resolver las discrepancias de comportamiento mientras el representante de servicio del fabricante está en el sitio. Se puede esperar algún incremento en la temperatura de los gases en los primeros meses de operación en las calderas que queman aceite o carbón, mientras los depósitos en el lado de gases se estabilizan.

En unidades viejas, la línea base de datos debe tomarse sobre el rango de cargas, después que la caldera ha tenido una salida prolongada para limpieza, inspección y reparación seguida por un sistema de control y una afinación del sistema de quemadores. Con una limpieza efectiva, reparación y afinación debe ser posible operar a plena carga en la siguiente forma a la salida de la caldera:

- 15% ó menos de exceso de aire quemado gas combustible;
- 20% ó menos de exceso de aire quemado aceite combustible;
- 20 a 30% de exceso de aire quemando carbón pulverizado;
- 30 a 40% de exceso de aire con stoker o parrillas.

La temperatura de salida de gases en calderas de tubos de humo o de tubos de agua, sin economizador o precalentador de aire, no debe ser mayor de 93°C (200°F) arriba de la temperatura de vapor saturado a plena carga para la mayoría de los diseños; excesos de aire o temperatura de salida de gases menos favorables pueden indicar potencial para mejoramiento adicional de la operación.

Quando se instalan precalentadores de aire y/o economizadores, las variaciones en el diseño hacen imposible establecer generalizaciones en la temperatura de salida de gases. Las caídas de presión en el lado de aire y de gases son también extremadamente dependientes del diseño y contravienen generalizaciones, por lo que, son necesarios los datos de diseño para establecer el comportamiento esperado. El fabricante de la caldera debe ser capaz de suministrar ésta información si los registros de la planta están incompletos.

Monitoreo del comportamiento (bitácora de la caldera).

El objetivo del monitoreo del comportamiento es documentar las desviaciones del comportamiento deseado, como una función del tiempo; ésta información debe ser obtenida sobre una base regular por el operador bajo condiciones de carga estable. Los datos tomados durante cambios de carga o bajo condiciones de fluctuaciones de carga serán inconsistentes y de poco valor en evaluar la eficiencia de la unidad, sin embargo, la respuesta del control debe ser observada durante las condiciones transitorias.

Si fluctuaciones amplias de carga son condiciones normales, puede ser necesario hacer arreglos especiales para lograr cargas estables de la caldera para monitoreo de la eficiencia, ya sea a través de cortes intermitentes de la demanda de vapor o bien tomando las variaciones de carga con otras calderas. Si el control maestro de la caldera esta colocado en operación manual, la relación aire/combustible debe ser como el establecido por el sistema de control.

El comportamiento registrado bajo estas condiciones indicará desviaciones de la relación aire/combustible deseada y otras desviaciones del comportamiento. Por ajuste manual de la relación aire/combustible al nivel deseado se puede obtener un segundo juego de datos los cuales representan desviaciones del comportamiento atribuibles a fuentes diferentes a la relación aire/combustible, tales como limpieza de la superficie, baffles de la caldera, etc.

Las lecturas reales que se tomen y su frecuencia, están determinados por el tamaño y complejidad del equipo, y del personal que pueda ser justificado en la recolección y análisis de datos. La práctica usual es de registrar los datos cada hora para verificar el comportamiento general; estas lecturas horarias son para asegurarse que la unidad esta operando normalmente y se incluye la verificación de dispositivos mecánicos y de seguridad.

Los puntos relacionados con la eficiencia que deben ser incluidos en la bitácora del operador de la caldera son:

1.- Datos generales para establecer la potencia de la unidad.

- . flujos y presión de vapor;
- . temperatura de vapor sobrecalentado (en su caso);
- . temperatura de agua de alimentación.

2.- Datos del sistema de quemado.

- . tipo de combustible (en calderas de combustible múltiple);
- . régimen de flujo de combustible;
- . presión de suministro de gas o aceite;
- . presión a quemadores;
- . temperatura de combustible;
- . ajuste de compuertas de quemadores;
- . presión diferencial de aire de cajas de aire a hogar;
- . otros datos de sistemas especiales únicos de la instalación particular.

3.- Indicación de flujo de aire.

- . O₂ entrada de gas al precalentador de aire;
- . O₂ en gases de chimenea;
- . opcionales - plumilla de flujo de aire, posición de compuertas de ventilador de tiro forzado, amperes del ventilador de tiro forzado.

4.- Temperaturas de aire y de gases de combustión.

- . gases salida de caldera;
- . gases salida economizador o precalentador de aire;
- . aire a precalentador de aire.

5.- Indicación de combustible no-quemado

- . medición de CO;
- . apariencia de la chimenea;
- . apariencia de la flama.

6.- Presión de aire y gases de combustión

- . descarga ventilador de tiro forzado;
- . hogar;
- . salida de caldera;
- . diferencial en economizador;
- . diferencial lado de aire y gases en precalentador de aire.

7.- Condiciones inusuales

- . fugas de vapor;
- . vibraciones o ruidos anormales;
- . mal funcionamiento de equipos;
- . excesiva agua de repuesto.

8.- Operación de purgas

9.- Operación de sopladores.

Mientras que esta lista puede parecer extensa y consumidora de tiempo el operador de una caldera de tubos de humo o una de tubos de agua de tamaño comparable (4,500 - 11,000 Kg. de vapor/hora), determinará que la lista de datos se reducirá a lo siguiente:

- . presión de vapor;
- . temperatura de agua de alimentación;
- . flujo de vapor, agua de alimentación o combustible;
- . presión de suministro de combustible;
- . temperatura de suministro de combustible;
- . temperatura de salida de gases de la caldera;
- . O₂ a la salida de la caldera;
- . temperatura de aire a la entrada del ventilador de tiro forzado;
- . apariencia de la chimenea;
- . **apariciencia** de la flama;
- . **presión en la caja de aire;**
- . **presión diferencial de aire de la caja de aire al hogar;**
- . presión de gases a la salida de la caldera;
- . presión de gases a la salida de la caldera;
- . operación de purgas;
- . condiciones inusuales o mal funcionamiento de equipos.

Si la unidad es demasiado pequeña para justificar un analizador continuo de O₂, el exceso de aire puede ser verificado con análisis de Orsat semanalmente. Si al quemador se le da servicio por una organización externa, la frecuencia debe ser cuando menos mensualmente e incluir una determinación del exceso de aire. La determinación del CO es particularmente importante en calderas que queman gas puesto que se puede desarrollar altos niveles de CO sin formación del humo, como sucede en las que queman aceite o carbón.

Si las condiciones de carga estable son difíciles de obtener, debe ponerse menos énfasis en la bitácora del operador de la caldera para los puntos de mantenimiento relacionados con la eficiencia, y programarse regularmente verificaciones de comportamiento que deben ser hechas bajo condiciones estables sobre una base mensual en unidades más pequeñas y bimensualmente para unidades más grandes. En unidades que queman carbón se deben hacer verificaciones mensuales del contenido de combustible en las cenizas; en las unidades que queman carbón pulverizado, también debe verificarse mensualmente la finesa del carbón.

Inspección Periódica del Equipo.

Los puntos incluidos en la lista de verificación de Inspección Preliminar de Caldera (Tabla 6-1) debe emplearse como base para la inspección periódica del equipo; varios de éstos puntos están incluidos en la bitácora de monitoreo de comportamiento y por lo tanto deben inspeccionarse sobre una base frecuente. También deben verificarse otras condiciones durante las salidas anuales o más frecuentemente si es posible.

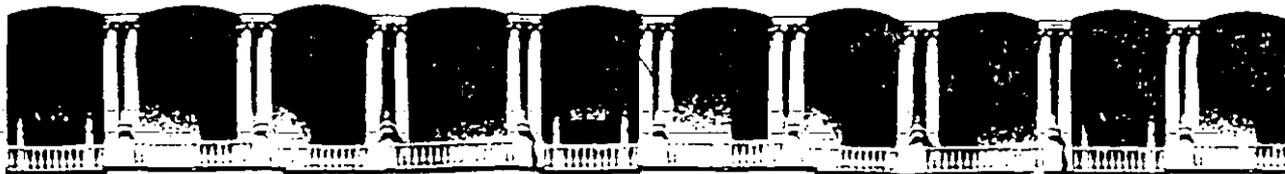
Problemas de Comportamiento.

Las desviaciones específicas del comportamiento esperado pueden ser de valor considerable en la determinación de las causas de la deficiencia del comportamiento. En la Tabla , se presenta un resumen de los problemas frecuentemente encontrados en los sistemas de la caldera y sus posibles causas.

TABLA

- PROBLEMAS DE COMPORTAMIENTO DE CALDERAS

SISTEMA	PROBLEMA	CAUSA PROBABLE
Transferencia de calor	Alta temperatura de salida de gases	<ul style="list-style-type: none"> . Depósitos en el lado de agua o gases . Procedimiento impropio de tratamiento de agua . Operación inapropiada de sopladores
Combustión	Alto exceso de aire	<ul style="list-style-type: none"> . Operación impropia del sistema de control . Baja presión de suministro de combustible . Cambio en poder calorífico de combustible . Cambio en viscosidad de aceite combustible
	Bajo exceso de aire	<ul style="list-style-type: none"> . Operación impropia del sistema de control . Limitaciones del ventilador . Aumento de temp. ambiente del aire
	Alto CO y emisiones de combustible	<ul style="list-style-type: none"> . Quemadores de gas tapados . Distribución aire/combustible desbalanceada con quemadores múltiples. . Ajuste inapropiado de registro de aire . Deterioro del refractario de garganta de quemador . Condición de rejilla del stoker . Orientación de distribución de comb. del stoker . Sistemas de aire sobrefuegos inapropiados . Sistema de pulverización de baja finura
Misceláneos	Fugas en cubierta	<ul style="list-style-type: none"> . Cubierta y aislamiento dañados
	Fugas en prec. de aire	<ul style="list-style-type: none"> . Sellos desgastados o con ajuste impropio en precalentadores rotatorios . Corrosión en tubos
	Potencia en pulverizadores de carbón.	<ul style="list-style-type: none"> . Mala reparación del pulverizador . Ajuste muy bajo de clasificador
	Purga excesiva	<ul style="list-style-type: none"> . Operación inapropiada
	Fugas de vapor	<ul style="list-style-type: none"> . Perforaciones en tubos de paredes de agua . Empaques de válvulas
	Aislamiento flojo o perdido	<ul style="list-style-type: none"> . Sobrecalentamiento . Intemperismo
	Excesiva operación de sopladores	<ul style="list-style-type: none"> . Programa arbitrario de operación en exceso a requerimientos



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

**CURSOS ABIERTOS
CONTROL DE CONTAMINACION Y AHORRO DE ENERGIA
EN CALDERAS**

PROCEDIMIENTO DE PRUEBAS DE EFICIENCIA DE CALDERAS

ING. MARTINIANO AGUILAR RODRIGUEZ

IX.- PROCEDIMIENTOS DE PRUEBAS DE EFICIENCIA DE CALDERAS.

Para conocer la eficiencia de una caldera es necesario efectuar pruebas; estas pruebas involucran un campo amplio de mediciones que pueden variar en sus requerimientos desde una sola persona llevando a cabo las verificaciones rutinarias diarias hasta pruebas de aceptación completas en donde se emplean decenas de observadores e ingenieros.

Las mediciones que se hagan y la extensión de éstas dependen de la naturaleza de las pruebas y estas a su vez dependen de la información requerida; la sola palabra "prueba" implica que las mediciones tienen que ser con un estandar alto de precisión. Las pruebas en una caldera pueden ser categorizadas como sigue:

- Pruebas de aceptación para asegurarse que se cumplen las garantías contractuales y las especificaciones.
- Pruebas de eficiencia para medir las pérdidas y determinar la eficiencia operacional.
- Pruebas operacionales para determinar las técnicas operacionales.
- Pruebas de datos de diseño para obtener datos que retroalimenten a los departamentos de diseño o investigación.
- Pruebas de diagnóstico para localizar y medir la extensión de defectos.

1.- METAS.

Existen diferentes "eficiencias" de una caldera que pueden obtenerse con las pruebas; estas eficiencias pueden definirse como sigue:

- eficiencia como se encuentra; es la eficiencia medida en el campo de calderas en el estado de reparación o mantenimiento tal como están. Esta eficiencia se usa como línea base para cualquier mejoramiento de eficiencia subsecuente;
- eficiencia afinada; es la eficiencia después de que se hacen ajustes operativos (bajo exceso de aire) y reparaciones menores;

- eficiencia máxima obtenible: es el resultado de adicionar equipo normal disponible para el mejoramiento de la eficiencia, sin importar consideraciones de costos;
- eficiencia máxima obtenible económicamente: difiere de la anterior en que esta sí toma en cuenta consideraciones realistas de costos del equipo para mejoramiento de la eficiencia que se agrega sólo si es económicamente justificable.

Eficiencia como se encuentra.

En la Fig. se muestran los rangos significantivos de las eficiencias de operación dependiendo del combustible quemado y de la existencia de equipo de recuperación de calor de los gases de escape; las eficiencias de operación también varían con la carga, y los promedios se encuentran en los siguientes rangos:

- 76 a 38% para gas combustible;
- 78 a 89% para aceite combustible;
- 85 a 88% con carbón

En la Tabla se muestra un promedio de eficiencias de operación "como se encuentra" de calderas industriales, tanto de valores medidos como calculados.

Eficiencias afinadas.

Las eficiencias afinadas se miden utilizando en la operación bajos niveles de exceso de aire; en algunas ocasiones se emplean las eficiencias de diseño de la caldera para establecer un punto de referencia de las eficiencias afinadas.

En la Tabla, se muestran las eficiencias afinadas de calderas industriales de diferentes tipos, diferente combustible y varias capacidades, incluyéndose valores medidos, calculados y de diseño.

Eficiencia máxima obtenible económicamente.

En la determinación de la justificación del costo de equipo auxiliar agregado están involucrados varios factores; cualquier esti-

modo de los beneficios económicos que determinen la factibilidad económica de instalación de equipo para mejoramiento de la eficiencia de ser altamente calificado con relación a la situación económica industrial de cada unidad.

Se ha encontrado que la adición de equipo recuperada de calor de los gases de salida es el medio más efectivo de costo para mejorar la eficiencia de una caldera.

En la Tabla se muestran los niveles de eficiencia máxima obtenible económicamente calculada, basada en la adición de recuperadores de calor en los gases de salida en unidades con potencial suficiente para justificar su adición.

Eficiencia máxima obtenible.

La eficiencia máxima obtenible puede calcularse para cada categoría de caldera sobre la base de aplicar todo el equipo auxiliar requerido para lograr los niveles mínimos de operación prácticos de exceso de aire y de temperatura en la chimenea. En la Tabla se muestran estos resultados con una tendencia de las unidades más grandes a tener las mayores eficiencias para cada combustible y grupo de quemado, debido a pérdidas de radiación más bajas; el carbón pulverizado tiene las eficiencias más altas, siguiéndole el aceite y el gas.

En la Tabla se muestra un resumen de los niveles de eficiencia y del potencial de mejoramiento a partir de las condiciones normales de operación; el combustible ahorrado en % puede calcularse en la siguiente forma:

$$\text{Ahorro de combustible} = \frac{\text{cambio de eficiencia}}{\text{eficiencia mejorada}} \times 100, \text{ en \%}$$

En términos generales, existen los siguientes ahorros potenciales:

- de 0.2 a 0.9% de potencial de mejoramiento de eficiencia entre la condición "como se encuentra" y afinada;
- de 1.5 a 3.0% de potencial de mejoramiento utilizando equipo auxiliar económicamente justificable;
- de 2.0 a 4.0% de mejoramiento con la eficiencia máxima obtenible.

Por lo general el potencial se incrementa, para todas las categorías de combustibles, con el decremento de la capacidad de la unidad, a excepción de las categorías de tamaño más pequeño; esto indica la ausencia de equipo de recuperación de calor de los gases de salida.

2.- PREPARACION.

El mejoramiento de la eficiencia obtenido bajo un estado de deterioro de la caldera puede ser sustancialmente menor que el mejoramiento logrado bajo condiciones apropiadas de trabajo; es muy importante examinar la caldera antes de la prueba y que se completen las reparaciones o mantenimientos necesarios.

En la Tabla se muestra un resumen parcial de los puntos que deben ser incluidos en la inspección preliminar de la caldera; esencialmente, se debe incluir cualquier punto que afecte el proceso de combustión y debe ser reparado antes de implementar un programa de mejoramiento de eficiencia.

Instrumentación de Salida de Gases.

Es necesario medir la concentración de O_2 o bien de CO_2 para determinar los niveles de exceso de aire de operación; se recomienda que se mida el exceso de O_2 , porque se tienen menores errores que con CO_2 . También es necesario medir el monóxido de carbono CO ; este es un indicador primario de combustión incompleta cuando se quema gas combustible; por lo general la medición de CO cuando se quema aceite o carbón no es mandatoria puesto que el humo o arrastre de carbón preceden a altos niveles de CO .

Se encuentran disponibles analizadores electrónicos portátiles para mediciones de O_2 como de CO_2 ; técnicas alternativas de medición incluyen analizador de Orsat y otros analizadores manuales tipo de absorción química. Los procedimientos de calibración y verificación son criterios importantes; en la Tabla se muestra una lista parcial de analizadores portátiles disponibles.

El humo cuando se quema aceite combustible o carbón es una indicación cierta de combustible en los gases de combustión o condiciones inaceptables de flama que deben siempre ser evitadas. La opacidad en la chimenea por lo general se usa como criterio para la determinación de niveles mínimos de exceso de aire para el quemado de aceite y carbón, mientras que emisiones excesivas de CO se emplean en el quemado de gas natural.

Las mediciones de humo pueden ser hechas usando bomba manual con probadores de filtros de papel o también por observación visual en una escala Ringleman.

Se pueden obtener mediciones precisas de temperaturas de gases de chimenea usando un medidor de temperatura tipo carátula o con termopares.

Técnicas de Muestreo de Gases.

Es muy importante que la porción de gases de chimenea analizados por temperatura y constituyentes gaseosos sea una muestra representativa del flujo de gases de chimenea. La localización de muestras debe seleccionarse en forma de minimizar los efectos de fugas de aire y estratificación de gases en el ducto de salida.

Apariencia de la Flama.

La apariencia de la flama en una caldera puede proporcionar una buena indicación de las condiciones de combustión; mientras que las características de una "buena" flama es algo subjetiva, por lo general se tienen que buscar flamas de una apariencia definida. Las características generales de las flamas son las siguientes:

- las flamas de aceite combustible y carbón pulverizado deben ser cortas, brillantes, crespas y con alta turbulencia;
- las flamas de gas combustible deben ser azules, ligeramente rásgadas o casi invisibles.

Para parrillas (stokers), una cama uniforme y una ausencia de corrientes de carbón son un criterio importante.

También es deseable estabilidad de la flama en el quemador y mínima variación del hogar.

La operación con niveles reducidos de excesos de O_2 puede resultar en una apariencia diferente de la flama:

- las flamas pueden parecer creciendo en volumen y "llenar" más completamente el hogar;
- algunas veces las flamas pueden mostrar una apariencia de rodado "perezozo";
- el color puede cambiar con fuegos de gas natural volvién-

dóse más visibles o luminosas;

- en flamas de aceite y carbón se vuelven amarillas oscuras o naranjas.

3.- PRINCIPALES FACTORES QUE CONTROLAN LA EFICIENCIA.

La eficiencia de una caldera puede resumirse en la siguiente forma: "La medida de la eficiencia con la que el calor de entrada a la caldera (principalmente el valor del poder calorífico superior del combustible) se convierte a salida útil (en la forma de vapor de proceso)".

El mejoramiento en la eficiencia de un generador de vapor se logra primariamente por lo siguiente:

- reducción de las pérdidas de energía de calor de desecho en los gases de la chimenea;
- reducción en las pérdidas de energía de calor de desecho en el agua de desecho expulsada;
- reducción en las pérdidas de calor de la superficie de transferencia de calor a la atmósfera;
- reducción de las pérdidas por combustión incompleta del combustible.

Los procedimientos que reducen el flujo de masa y contenido de energía de estas corrientes de flujo benefician directamente el comportamiento de la unidad.

El cálculo apropiado de la eficiencia de la caldera requiere una definición de la "envolvente" de la caldera que aisle los componentes considerados como parte de la caldera de aquellos que están excluidos. En la Fig. tomada del código de Pruebas de Potencia de ASME (American Society of Mechanical Engineers) se muestra el equipo incluido dentro de la frontera de la envolvente designada como la unidad generadora de vapor.

Las entradas y salidas de calor que cruzan la frontera de la envolvente, son involucradas en los cálculos de la eficiencia.

Por lo general los aparatos se consideran fuera de la frontera de la envolvente cuando requieren una fuente externa de calor o donde el calor cambiado no retorna a la unidad generadora de vapor.

El método directo para mejorar la eficiencia de la caldera consiste en:

- identificar las pérdidas;
- identificar la magnitud relativa de las pérdidas;
- concentrarse primero en las pérdidas dominantes que controlan la eficiencia degradada.

Algunas de las pérdidas más importantes se discuten a continuación incluyendo su origen.

a.- Pérdidas de energía de calor de desechos en los gases de la chimenea.- Estas pérdidas consisten de:

- pérdidas de gases de combustión secos (calor arrastrado fuera por los gases de combustión secos).
- pérdidas por humedad (calor sensible y latente en el vapor de agua). El vapor de agua resulta de:
 - i) Combustión de hidrógeno en el combustible
 - ii) Humedad en el aire para la combustión
 - iii) Contenido de agua en el combustible.

La mayoría de las calderas industriales tienen pérdidas en los gases de combustión muy grandes debido a que operan con altas temperaturas de gases en la chimenea (200°C - 300°C) como resultados de no estar equipados con dispositivos recuperadores de calor (Precalentadores de aire o economizadores).

Tradicionalmente las calderas industriales no tienen sistemas de control sofisticados, que son comunes en unidades grandes de potencia, y como resultado operan con pérdidas grandes en los gases secos de combustión debido a los niveles altos de exceso de aire (20% a 60%) que son necesarios para asegurar la completa combustión y la seguridad de operación.

El calor latente del vapor de agua por lo general comprende una fracción grande (6 a 10%) del total de pérdidas de eficiencia, que podrían ser reducidas si se desarrollaran medios prácticos para permitir al vapor condensarse antes de que los gases de combustión salgan de la caldera.

Al examinar las pérdidas de eficiencia de los gases de salida se hace evidente que cualquier reducción en la temperatura de los gases de salida y el nivel de exceso de aire ayudará a optimizar la eficiencia total de la unidad; una reducción de 55°C en la temperatura de los gases de combustión en la salida incrementará la eficiencia en 2.1% o más, dependiendo del nivel real de exceso de aire.

Las temperaturas mínimas de gases de combustión en la salida están limitadas por la corrosión por la condensación de ácido sulfúrico en los extremos fríos de la caldera, y por lo tanto del contenido de azufre en el combustible y de la humedad en los gases de salida.

Para calderas sin equipo recuperador de calor, la temperatura mínima de salida de gases está fijada por la presión de operación de la caldera puesto que ésta determina la temperatura de vapor; la práctica usual de diseño fija una temperatura de salida de gases de 80°C arriba de la temperatura de saturación.

En la Fig. se muestra que se vuelve más caro aproximarse a la temperatura de saturación de la caldera por el simple agregado de superficies convectivas; conforme la presión de operación se incrementa, la temperatura de salida de gases aumenta haciendo más deseable el equipo recuperador de calor.

El límite práctico para el mínimo exceso de aire está determinado por el sistema de control de combustión empleado para regular el suministro de aire y combustible en respuesta a la demanda.

Los economizadores permiten una reducción en la temperatura de salida de gases, ya que la temperatura del agua de alimentación es más baja que la temperatura de saturación del vapor, lográndose temperaturas de salida de gases de 150°C ; mayores reducciones se pueden lograr usando precalentadores de aire.

Los criterios de diseño actuales limitan el grado de enfriamiento usando equipo de recuperación de calor de gases de escape a un nivel en el cual se minimice la condensación en las superficies de transferencia de calor. El contenido de azufre en el combustible tiene una influencia directa en la temperatura mínima de gases de salida, porque el SO_2 se combina con el vapor condensado para formar ácido sulfúrico, y también la concentración de SO_2 en los gases de combustión determina la temperatura de condensación.

La temperatura mínima del metal de la superficie del precalentador de aire está determinada por el promedio de las temperaturas de gases de salida y de aire a la entrada; un incremento en el contenido de azufre en el combustible requiere temperaturas de salida de gases más altas.

Como se mencionó anteriormente, un incremento en la temperatura de salida de gases y en el nivel de exceso de aire resulta en un incremento en las pérdidas.

b. Pérdidas de eficiencia debidas a combustión incompleta (por operación y/o mantenimiento inapropiado).

Estas incluyen las pérdidas debido a material combustible en los gases de combustión (monóxido de carbono, hidrógeno, arrastre de carbón, hidrocarburos y humo) y las pérdidas debidas a combustible sólido no quemado y otro combustible sólido que queda atrapado en los desechos.

Como se ha mencionado anteriormente, altos niveles de exceso de aire que frecuentemente se usan tienden a minimizar las pérdidas anteriores, a excepción de los siguientes casos;

- mantenimiento inapropiado de la caldera;
- calderas muy antiguas;
- Calderas con diseños incorrectos;
- calderas que queman carbón
- calderas que queman combustible no común o de calidad inconsistente.

Se pueden encontrar altas emisiones de monóxido de carbono (CO) en combustión de gas combustible debido a que se opera la caldera a niveles muy bajos de exceso de aire, y estas condiciones no son visibles al operador.

Mientras que las pérdidas por combustible no quemado en calderas que queman gas y aceite combustible pueden ser esencialmente eliminadas con prácticas de operación adecuadas, en calderas que queman carbón esta condición es inevitable en cierto grado; en estas calderas, la magnitud de las pérdidas depende mucho del tipo de quemado (pulverización, stokers, ciclónico).

Las pérdidas por combustible no quemado en calderas que queman carbón son evidentes por el contenido de combustible en las cenizas; estas pérdidas dependen de un cierto número de variables que incluyen:

- el calor liberado en el horno;
- tipo de enfriamiento del horno;
- conexión de escoria o remoción de cenizas volantes;
- finesa y volatilidad del carbón
- exceso de aire;
- tipo de quemador;
- balance de combustión entre quemadores.

En la Tabla se muestran las pérdidas típicas por combustible en calderas que queman carbón.

En la Fig. se muestran como afectan a las varias pérdidas de eficiencia los cambios de exceso de O_2 en la caldera; aún cuando los valores reales varían con el tipo de combustible, diseño de quemadores, condiciones operativas, etc., la tendencia general es representativa para los tres combustibles: gas, aceite y carbón.

Las pérdidas por gases secos se incrementan linealmente con el aumento de exceso de O_2 debido al incremento tanto del flujo de masa como de la temperatura de chimenea.

Las pérdidas por combustible no quemado (monóxido de carbono) se incrementan dramáticamente conforme el exceso de O_2 disminuye por abajo de un punto mínimo aceptable.

Las pérdidas por humedad en los gases y por radiación permanecen sin cambio con la variación en exceso de O_2 .

Las pérdidas de eficiencia total, la suma de las cuatro fuentes mencionadas antes, disminuyen con el decremento de exceso de O_2 a un punto en el cual las pérdidas por combustible no quemado se vuelven predominantes. Las condiciones de operación óptima no son necesariamente el punto de eficiencia más alta debido a que se requiere un margen de exceso de O_2 adicional por limitaciones de seguridad en el control y por cambios de carga.

El nivel de exceso de aire óptimo para la mejor eficiencia de la caldera ocurre cuando la suma de las pérdidas por combustión incompleta y las pérdidas por calor en los gases de combustión son un mínimo; para el caso ideal de mezclado rápido completo la relación óptima de aire/combustible es la relación estequiométrica aire/combustible.

El exceso de aire se requiere en todos los casos prácticos para completar la combustión, permitir las variaciones normales en la precisión de los controles de combustión y asegurar condiciones satisfactorias en la chimenea con algunos combustibles (por ejemplo, plumas no visibles para cumplir con las regulaciones de contaminación de aire).

El nivel óptimo de exceso de aire varía con el combustible, quemador y diseño del horno.

c.- Pérdidas por radiación: son las pérdidas de calor de la superficie exterior de la caldera a través del aislamiento.

Estas pérdidas incluyen el calor radiado a la sala de calderas y el calor tomado por el aire ambiente en contacto con las superficies de la caldera; en la Fig. se muestran las pérdidas por radiación aproximadas, desarrolladas por la ABMA.

La cantidad de calor perdido en esta forma en términos de kcal/h es casi constante a diferentes regímenes de fuegos de la caldera, y en consecuencia se convierte en un % más alto del total de pérdidas de calor a bajas cargas.

Como puede observarse en la Fig. las pérdidas por radiación a cargas altas varían desde una fracción de 1% hasta 2%, dependiendo de la capacidad de la caldera; conforme se reduce la carga en la caldera, el % de pérdidas por radiación se incrementan en proporción inversa a la fracción de carga.

Hasta ahora y para propósitos prácticos estas pérdidas son inevitables, y cuando el aislamiento y el refractario del hogar están deteriorados, se incrementan en todas las cargas.

Régimen de Fuegos en la Caldera.

El régimen de fuegos en la caldera es otro parámetro operativo que afecta la eficiencia, pero que a veces se ve como un factor incontrolable, dependiendo de la demanda de vapor.

En la Fig. se muestra la importancia de la carga, en donde se observa como las varias pérdidas de eficiencia cambian con las variaciones de carga.

Como se observa en la Fig. el cambio en exceso de O_2 con la carga tiene una fuerte influencia en la eventual eficiencia contra el perfil de carga; cuando la caldera se trabaja con exceso de O_2 constante sobre el rango de cargas, la eficiencia pico real puede ocurrir algo abajo del pico de carga, pero el perfil de la eficiencia permanece casi "plano" sobre una gran porción del rango de cargas.

Por otra parte, cuando se incrementa el exceso de O_2 , cuando se reduce la carga (una condición común en muchas calderas) la eficiencia disminuye más rápidamente con la carga; en este caso, es ventajoso operar lo más cerca posible a la carga máxima para la más alta eficiencia, cuando hay una elección entre varias calderas con cargas parciales o la operación con menos calderas a altas cargas.

En lo descrito anteriormente no se ha mencionado las pérdidas de calor conocidas "no-medidas"; este término de pérdidas adicionales (que por lo general van de 0.5 a 1.5%) es algunas veces agregado para intentar contabilizar créditos y pérdidas de calor menores que no se consideran en algunas formas de cálculo.

Efectos de Parámetros Operatorios de Calderas.

Es conveniente examinar en más detalle la importancia relativa de las contribuciones de las varias pérdidas de calor y como varían con los cambios en los parámetros operativos de la caldera.

En la Fig. se muestran los resultados característicos de pruebas de eficiencia de calderas pequeñas; para establecer la condición de óptimo exceso de O_2 del quemador para máxima eficiencia, se varía el flujo de aire para combustión (manualmente) a un flujo de combustible fijo, produciendo el rango en exceso de O_2 .

La gráfica inferior muestra la dependencia de CO y temperatura de gases de salida con el exceso de O_2 , mientras que la gráfica superior muestra las pérdidas de calor mayores a los correspondientes puntos de prueba. El perfil de la pérdida total de eficiencia muestra un valor mínimo de cerca del 0.8% de exceso de O_2 que corresponde a una eficiencia pico de 78.8%.

El perfil de pérdida total de eficiencia está conformado principalmente por las pérdidas de gases de combustión secos y las pérdidas por monóxido de carbono, puesto que las pérdidas por radiación y por humedad son casi constantes.

El punto de máxima eficiencia o pérdidas mínimas ocurre en donde el régimen de cambio en pérdidas de CO y gases secos son iguales y opuestos. Como las pérdidas por gases secos continúan disminuyendo uniformemente conforme baja el exceso de O_2 , las pérdidas por CO son el factor primario en la determinación del punto de máxima eficiencia.

En el ejemplo particular de la Fig. , los niveles de CO se incrementan muy rápidamente abajo de 1% de exceso de O_2 y el punto de máxima eficiencia corresponde a niveles de emisión de CO en la región de 500 a 1000 ppm.

La importancia de las emisiones de CO en la determinación del punto de máxima eficiencia por lo general es relevante sólo cuando se quema gas natural; con aceite combustible y carbón el exceso de O₂ más bajo por lo general está limitado por una condición inaceptable en la chimenea (humos) o excesivo combustible en los desechos o cenizas volantes. Frecuentemente esta condición precede a altas emisiones de CO, pero aún así se continúan haciendo mediciones de CO, puesto que el CO puede también resultar de mal funcionamiento de quemadores, ajuste inapropiado de estos, etc.

Debe mencionarse que los datos de la Fig. no corresponden a producción (salida) totalmente constante de la caldera, puesto que el flujo de combustible (entrada o input) está fijo y el flujo real de vapor (salida u output) podría variar en proporción a la eficiencia de la caldera, sin embargo, el perfil de pérdida de eficiencia podría estar virtualmente sin cambio si se corrige a una condición de flujo de vapor constante.

Las curvas mencionadas muestran el proceso de extraer calor de una cantidad dada de combustible, opuestas a la producción de una cantidad constante de vapor.

4.- METODOS DE CALCULO.

Existen dos métodos aprobados para determinar la eficiencia de una caldera a saber:

- Método de entrada-salida de calor
- Método de pérdida de calor.

Para el primer caso se requiere instrumentos de mucha precisión para obtener resultados precisos de la eficiencia; este método consiste en medir con precisión todas las entradas y todas las salidas de energía hacia y desde la caldera, el flujo y poder calorífico del combustible, los créditos de calor y el calor ganado por el fluido de trabajo (agua/vapor).

El segundo caso, consiste en medir las pérdidas de calor en la caldera, los créditos de calor y del análisis y poder calorífico del combustible.

En el segundo caso, se pueden obtener resultados precisos de eficiencia utilizando un mínimo de instrumentación de prueba y trabajo técnico. Usado este método, un error en los datos o cálculos tiene poco error relativo en la eficiencia de la caldera, por

ejemplo, un 1% de error en la determinación de las pérdidas, resulta en un error de menos de 0.20% de error en la evaluación de la eficiencia de la caldera.

Las pérdidas en la caldera que se consideran son las siguientes:

- Pérdidas de calor en los gases secos de la chimenea. Quemando gas es mayor que quemando combustóleo y tiene un valor - aproximado de 5%.
- Pérdida de calor debido a hidrógeno en el combustible. Quemando gas es de aproximadamente 10% o quemando combustóleo es de aproximadamente 6%.
- Pérdidas de calor debido a humedad en el aire. Esta pérdida es de menos de 0.3% y el calor se pierde en sobrecalentar el vapor de agua en el aire de combustión.
- Pérdidas de calor debidas a radiación y convección normalmente es de menos de 1% y es una función del diseño y producción de la caldera.
- Pérdidas despreciables.- Las siguientes pérdidas normalmente se omiten.
 - i. Pérdidas de calor debidas al CO en los gases de la chimenea
 - ii. Pérdidas de calor debidas a humedad en el combustible
 - iii. Pérdidas de calor debidas a combustibles en las cenizas.

Propósitos de la Prueba.

Los objetivos de la prueba de eficiencia de la caldera son las siguientes:

- Comparar el comportamiento real con las predicciones del fabricante.
- Medir el cambio relativo del comportamiento resultante de un mantenimiento o de una modificación de componentes de la caldera.
- Establecer un valor de la eficiencia que pueda usarse en la medición entrada-salida total.

Las entradas se definen como el calor de combustión del combustible (poder calorífico superior) más los créditos agregados a los fluidos que cruzan la frontera de la caldera (combustible, aire, etc.).

La salida se define como el calor obtenido por el fluido de trabajo (agua/vapor).

Los "créditos de calor" se definen como aquellas cantidades de calor agregadas a través de la frontera de la caldera y que no son el calor de combustión del combustible.

Los créditos incluyen cantidades como el calor sensible (función del calor específico y la respectiva temperatura) en el combustible, en el aire, en el vapor de atomización, etc., así como calor agregado por conversión de potencia en pulverizadores y ventiladores de tiro forzado, recirculadores de gases, etc.

La eficiencia calculada por cualquiera de los métodos descritos se define como la relación entre el calor absorbido por el fluido de trabajo y el calor que entra a la caldera.

Matemáticamente:

$$\text{Eficiencia} = \eta(\%) = \frac{\text{salida}}{\text{entrada}} \times 100$$

$$\eta(\%) = \frac{\text{calor absorbido por el fluido de trabajo}}{\text{calor de combustión} + \text{créditos}} \times 100$$

como:

$$\text{salida} = \text{entrada} - \text{pérdidas}$$

$$\eta(\%) = \frac{\text{entrada} - \text{pérdidas}}{\text{entrada}} \times 100$$

$$\eta(\%) = \left(1 - \frac{\text{pérdidas}}{\text{entrada}}\right) \times 100$$

$$\eta\% = 100 - \frac{\text{pérdidas}}{\text{entrada}} \times 100$$

Si bien a primera vista el método de entradas y salidas parece el más preciso, en realidad no es así. Esto se debe a que los errores inherentes a toda medición, afectan mucho más a este método que al de las pérdidas, de modo tal que un mismo error de medición produce un error en el cálculo de la eficiencia por el método de las pérdidas diez veces menor que el que produce si el cálculo se hace por el método de entradas y salidas.

Por ejemplo, los valores que se obtienen por ambos métodos si se comete un error del 5% al medir el poder calorífico del combustible suponiendo que la eficiencia es de 85%, son los siguientes.

Método de entradas y salidas:

$$\eta = \frac{\text{Calor agregado al vapor}}{\text{calor de combustión + créditos}} \times 100 = \frac{0.85}{1.00} \times 100 = 85\%$$

Para un error de $\pm 5\%$ en el calor de combustión

$$\eta = \frac{0.85}{0.95} \times 100 = 81\% (-4.7\%)$$

$$\eta = \frac{0.85}{0.95} \times 100 = 89.5 (+5.3\%)$$

$$\text{Sensibilidad} = \frac{(0.047 + 0.053)/2}{0.05} = 1.00$$

Método de las pérdidas:

$$n = 100 - \frac{\text{pérdidas}}{\text{entrada}} \times 100$$

$$n = 100 - \frac{0.15}{1.00} \times 100$$

$$n = 85\%$$

Para el mismo error de $\pm 5\%$ en el calor de combustión.

$$n = 100 - \frac{0.15}{1.05} \times 100 = 85.7\% (+0.8\%)$$

$$n = 100 - \frac{0.15}{0.95} \times 100 = 84.2\% (-0.8\%)$$

$$\text{Sensibilidad} = \frac{0.08}{0.05} = 0.16$$

Las bases más reconocidas y aceptadas para pruebas de eficiencia a la caldera es el Código de Pruebas de Potencia (PTC) 4.1 ASME.

Existen formatos abreviados de prueba de eficiencia ASME: la llamada "forma corta ASME" que se usa para métodos de ENTRADA - SALIDA y el de PERDIDAS DE CALOR y de cálculo de eficiencia ASME correspondiente.

Este código ha venido a ser el procedimiento "estandar" en muchos países. En este código se consideran despreciables las pérdidas de eficiencia y los créditos de calor menores y se toma en cuenta solamente el poder calorífico superior del combustible alimentado.

Características de los Métodos de Prueba.

Ambos métodos son matemáticamente equivalentes y podrían dar idénticos resultados si los factores requeridos en el balance térmico (o pérdidas de calor) considerados fueran generados por mediciones en una caldera realizada sin error.

Cuando se utilizan instrumentos de alta precisión y altas técnicas de prueba se pueden obtener resultados acordes entre ambos procedimientos de cálculo. Sin embargo lo más común en la práctica es que las pruebas a calderas se realicen con limitaciones en la instrumentación y las comparaciones entre ambos métodos generalmente no es congruente.

Esta diferencia de resultados se debe principalmente a las incertidumbres de las mediciones en los flujos y contenidos de energía en las corrientes entrantes y salientes.

Los valores determinados por estos métodos son de Eficiencia Bruta en contra posición a los valores de Eficiencia Neta los cuales incluyen como entradas adicionales de calor la energía requerida para operar todos los equipos auxiliares de la caldera (por ejemplo ventiladores de aire para la combustión, bombas de combustible, calentadores de combustible, alimentadores, etc.).

Se emplean también comercialmente los terminos "sin servicios y con servicios " para estos valores de eficiencia.

Eficiencia bruta puede considerarse esencialmente como la efectividad de la caldera para extraer la energía calorífica disponible del combustible.

Es importante tomar datos complementarios cuando se usa esta forma de prueba para documentar totalmente los resultados, sin importar que procedimientos se están utilizando.

Metodo de Entradas-Salidas.

$$\text{Eficiencia (\%)} = \frac{\text{Salida}}{\text{Entrada}} \times 100$$

En este método se mide el calor absorbido por el agua y el vapor de salida y se compara con la energía total de entrada dada por el poder calorífico superior del combustible (PCS) "Entrada".

Este método requiere de una medición exacta del flujo de combustible a la entrada así como de datos precisos de la presión, temperatura, calidad y flujo de vapor, temperatura del agua de alimentación, temperatura de los gases en la chimenea y temperatura de aire, y otros parámetros más, para poder realizar los calculos completos de balance termico.

La Fig. muestra la "envolvente" del equipo y auxiliares que integran una Unidad Generadora de Vapor, que marca la frontera de entradas y salidas de energía, y la Fig. muestra la relación entre entradas, salidas, créditos y pérdidas de energía.

Debido al gran número de mediciones físicas requeridas en una caldera y al alto grado de incertidumbre por errores de medición, el método de Entradas-Salidas no es práctico en las mediciones de campo que se realizan en la mayoría de las calderas industriales y comerciales en donde generalmente la instrumentación de alta precisión no se tiene disponible. Los grandes errores en que se incurre frecuentemente son debidos a que el método se base en diferencias de grandes cantidades; por ejemplo si la medición del flujo de vapor tiene entre 2 y 3% de desviaciones y otros instrumentos tienen errores similares, el error acumulado en los resultados crece hasta valores inaceptables y que producen información falsa.

El método de prueba de Entradas-Salidas también requiere de una labor muy intensa. La instrumentación de alta precisión debe ser adecuadamente especificada e instalada. Las corridas de pruebas se llevan aproximadamente de 4 a 5 horas y pueden ser rechazadas o suspendidas por inconsistencia de datos. Normalmente se efectúan corridas previas de prueba para verificar la operación de la instrumentación, identificar posibles problemas en la caldera y es también una buena forma de entrenar al personal de prueba y observadores. Es muy frecuente que las plantas no puedan obtener eficiencia para prueba por largos períodos de tiempo y a las cargas demandadas por el programa de pruebas, por ejemplo, una planta puede no estar disponible para operar a plena carga o a algunas cargas parciales por períodos amplios de tiempo, por diversas razones, y esto puede causar prematuramente restricciones a las pruebas. Problemas como inconsistencia en el control de nivel de agua, o variaciones en la presión de vapor a la salida de la caldera pueden dificultar el equilibrio térmico y estabilidad requeridos para lograr una información precisa de la prueba.

Método de Pérdidas de Calor.

Eficiencia = 100% - Pérdidas de Calor en %.

El método de las pérdidas de calor resta las pérdidas individuales unitarias de energía, del 100% para obtener el porcentaje de eficiencia.

Esta prueba es reconocida como el estandar accesible para rutinas de eficiencia especialmente en industrias donde la instrumentación disponible es mínima.

Como se menciono anteriormente, las perdidas a medir son:

- Pérdida de calor por gases secos.
- Pérdida de calor por humedad en el combustible.
- Pérdidas de calor debidas a la formación de agua por combustión del hidrógeno.
- Pérdidas de calor debidas a los residuos combustibles.
- Pérdidas de calor por radiación .
- Pérdidas no medidas.

Este procedimiento no toma en cuenta las pérdidas menores de eficiencia y los créditos por ganancias térmicas, considerando únicamente el calor dependiendo en la reacción química (Poder Calorífico Superior) del combustible como energía de entrada. Además de ser el más preciso en campo, el método de las pérdidas de calor, identifica exactamente donde se producen, contribuyendo así a los esfuerzos de ahorro de energía.

Este método puede designarse como de análisis de productos de combustión ya que las principales pérdidas térmicas consideradas están basadas en la medición de las condiciones de los gases de combustión a la salida de la caldera y desde luego en el análisis de la composición del combustible. Este método requiere de la determinación del contenido de O_2 o Monóxido de carbono (CO), combustibles no quemados, temperaturas de los gases de combustión a la salida de la caldera, así como de la temperatura del aire para combustión. El método de las pérdidas de calor es mucho más preciso y más aceptado para la determinación de eficiencias de calderas en campo siempre y cuando las mediciones de los gases de combustión sean de manera precisa y no esté influenciado por dilución del aire, estratificación, áreas muertas en los puntos de medición.

Tablas de Pérdidas de Calor en los Gases de Combustión.

Existen tablas para pérdidas de calor de los gases en la chimenea para diferentes tipos de combustibles preparadas separadamente y están disponibles para la determinación de pérdidas por gases secos, hidrógeno y humedad.

Pérdidas de Calor por Radiación.

Las pérdidas por radiación no asociadas con las condiciones de los gases de combustión pueden ser estimadas mediante el uso de la gráfica mostrada en la Fig. 5.

Las pérdidas por radiación pueden ser medidas mediante un método directo simple utilizando un instrumento de rayos infrarrojos el cual ha sido diseñado especialmente para detectar pérdidas por radiación en las superficies de la caldera, dando sus lecturas en Cal/m²/Hr (BTU/ft²/Hr).

La técnica consiste en elaborar un dibujo a escala con las dimensiones de las superficies expuestas de la caldera y trazar unas mallas con áreas iguales con el promedio de las pérdidas de calor medidas, adicionando después las pérdidas de cada una de las rejillas parciales.

Resumen de Comparación de Métodos para Medición de la Eficiencia de Calderas.

Métodos de entradas-salidas

- a) Método más directo.
- b) Difícil y costoso lograr mediciones precisas.
- c) No localiza las pérdidas de energía.

Método de Pérdidas de Calor.

- a) Método indirecto (100% - Pérdidas de energía).
- b) Simple y preciso.
- c) Localiza y determina la magnitud de las pérdidas de energía, de elementos para su corrección.
- d) Permite valorar potenciales de mejoras de eficiencia y ahorros de energía.

Cálculo de Pérdidas de Calor en Chimenea.

Para calcular las pérdidas en chimenea usando la Forma Corta ASME es necesario realizar cálculos parciales de pérdidas de calor por gases secos, por humedad en el combustible y por humedad en los productos de combustión por hidrógeno en el combustible. La suma de los tres será la pérdida total en chimenea. En la Tabla se muestra la forma de cálculo.



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

**CURSOS ABIERTOS
CONTROL DE CONTAMINACION Y AHORRO DE ENERGIA
EN CALDERAS**

**TECNICAS Y EQUIPOS DE MEDICION DE PRODUCTOS DE
COMBUSTION Y CONTAMINANTES**

ING. MARTINIANO AGUILAR RODRIGUEZ

XI. TECNICAS Y EQUIPOS DE MEDICION DE PRODUCTOS DE COMBUSTION Y CONTAMINANTES

1.- Medición de Contaminantes

Mejorar o aún preservar la calidad del aire requiere de la medición de las concentraciones de los contaminantes en la atmósfera. Tal medición sirve para varias funciones vinculadas pero definibles.

- . La medición proporciona los datos necesarios sobre los cuales es posible determinar la relación de los efectos con los niveles de los contaminantes.
- . La medición provee un criterio cuantitativo sobre si los estándares de calidad del aire se están logrando o superando y en que grado.
- . La medición es necesaria para determinar si algunos cambios nocivos en los niveles ambientales globales de los

contaminantes están ocurriendo como resultado de las actividades del hombre.

- . La medición proporciona los datos para determinar el destino de los contaminantes en la atmósfera y junto con la información meteorológica, es un auxilio para modelar y por consiguiente para predecir la relación entre concentraciones, emisiones y condiciones climáticas.
- . Las mediciones de la fuente proveen información acerca de las emisiones y donde es aplicable, si el emisor está logrando el estándar regulador.

En cada una de estas circunstancias, serán diferentes los contaminantes por medir, la duración del programa de medición, la sensibilidad del método requerido y el período sobre el cual se promedia la concentración.

El tiempo de respuesta que se requiere para determinar los efectos sobre la salud humana es una función del tiempo de respuesta del cuerpo a los cambios en las concentraciones de contaminantes en la atmósfera. Respecto a un contaminante como el dióxido de azufre, dicha respuesta es rápida y los picos atmosféricos de corta duración de esta especie pueden ser el factor crítico en la determinación de los efectos sobre la salud; en cuanto a un contaminante acumulativo como el plomo, la respuesta es lenta y el promedio a largo plazo es todo lo que sea necesario. Estas diferencias se reflejan en los estándares de calidad del aire donde éstos son operativos, con un promedio de treinta minutos para el estándar de SO_2 y un promedio de treinta días para Pb.

En el caso de algunas fuentes industriales de contaminación del aire, el registro de gases de desecho que se emiten continuamente es una parte importante del control del proceso, y ha sido una práctica estándar en las grandes plantas procesadoras durante muchos años porque la falta de control puede resultar en una pérdida de producto valiosa. Por ejemplo las concentraciones elevadas de monóxido de carbono y partí-
3

la densidad diferencial (masa molecular relativa CO_2 - 44 comparada con O_2 - 32 y N_2 - 28), o la conductividad térmica.

La materia en forma de partículas que procede de chimeneas de hornos y calderas se puede evaluar con el diagrama Ringelman clásico. La densidad del humo se compara con el oscurecimiento fraccionado (de 20% a 80%) del papel, al representar los números Ringelman desde 1 hasta 4 (Fig. 4.1). Este método se puede automatizar mediante la medición del oscurecimiento de un haz de luz que brille a través de la chimenea sobre una celda fotoeléctrica. También es posible tomar una muestra de la materia en forma de partículas que circulan por la chimenea, y entonces determinar químicamente su composición así como también medir la concentración de partículas, su calidad y dimensiones por medios microscópios o bien de otro tipo.

Un aspecto muy importante de las técnicas de muestreo es el asunto de qué tan representativa es la muestra tomada de la fuente. El resultado final de cualquier análisis sólo corresponderá al valor verdadero si la muestra tomada es una muestra representativa. En los humeros (tubos de calderas y chimeneas), las emisiones pueden variar a través del tiempo conforme ocurren cambios durante el proceso en la planta. Las emisiones pueden variar también en el espacio dentro del humero como resultado de las interacciones con la pared y los efectos sobre el flujo por obstrucciones y recodos dentro del humero. Estos factores se deben considerar cuando se toman las muestras, y por lo general implican muestreo en varios puntos a través de dos diámetros del humero en ángulos rectos entre sí.

⁵En la bibliografía se mencionan muchos reactivos opcionales que tienen gran mérito, en particular como absorbente para monóxido de carbono; sin embargo, éstos son los más comunes y los más fáciles de preparar.

La más vasta cantidad de partículas que se transportan por aire se puede coleccionar conforme éstas caen y salen de la atmósfera; por lo general se depositan dentro de un recipiente cilíndrico de dimensiones estándar, el cual tiene un embudo sobre la parte superior y contiene agua adicional para evitar rearrastre de las partículas. Este método no proporciona resultados que sean representativos de las concentraciones de partículas en la atmósfera, debido a que solo las partículas más grandes ($> 20 \mu\text{m}$) son lo bastante pesadas - como para que se depositen de esta manera sin afectarse debido a los movimientos del viento.

Otro método que se utiliza con frecuencia para determinar los niveles de partículas consiste en arrastrar el aire contaminado a través de un filtro y medir el grado de ensuciamiento, ya sea mediante la medición de la disminución en transmitancia de la luz del filtro (coeficiente de neblina, CDN) o la disminución en reflectancia (unidades de reflectancia de sombra de suciedad, URSS).

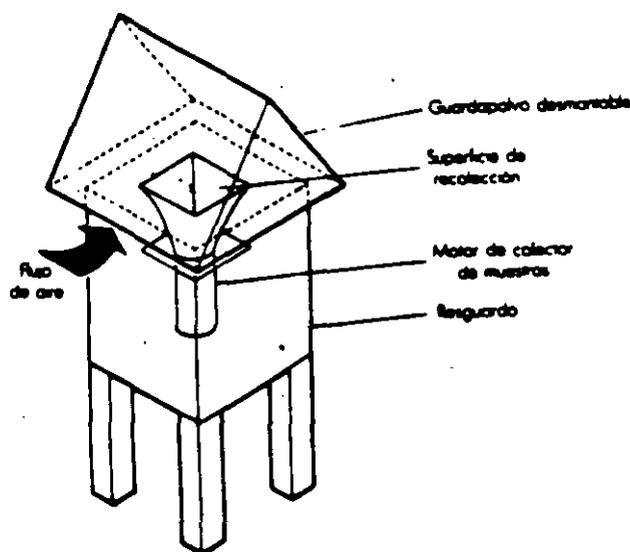


Figura. Colector de alto volumen dentro de un resguardo estándar. El resguardo sirve para reducir la recolección de partículas por encima de $50\mu\text{m}$.

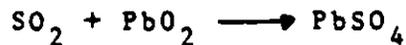
análisis. Aquí los problemas pueden ocurrir como consecuencia de concentrar contaminantes reactivos, lo cual aumenta su oportunidad de reacción antes del análisis.

- Finalmente, las concentraciones se pueden determinar en forma continua al utilizar una propiedad física del gas que se está midiendo, o una propiedad física del producto de una reacción específica controlada del gas que se está midiendo.

La aplicación de estos planteamientos generales se considera enseguida para casos específicos.

QUIMIOABSORCION

El dióxido de azufre se ha medido durante más de cuarenta años en Inglaterra mediante el método de candela de peróxido de plomo, la cual es básicamente una técnica de quimioabsorción (ansorción con reacción química) que implica la reacción del peróxido de plomo con dióxido de azufre:



Otra adaptación de la técnica de quimioabsorción es el uso de cristales químicamente impregnados, los cuales sufren un cambio de color como resultado de la reacción con el compuesto que se está midiendo. Se encuentran disponibles comercialmente tubos que contienen reactivos específicos para un amplio rango de contaminantes.

Métodos Químicos Húmedos

Los métodos no instrumentales que más comunmente se utilizan para los gases reactivos son aquellos que implican colección en solución con reacción, los cuales se denominan métodos químicos húmedos o métodos químicos manuales.

OZONO

El ozono también se monitorea mediante un método de quimioluminiscencia, y en este caso implica la reacción entre ozono y etileno, la cual resulta en una emisión a 435 nm. El límite inferior de detección para el ozono es 1 ppb, razonablemente bajo las concentraciones ambientales que por lo normal se encuentran de 10 a 70 ppb. No interfieren los óxidos de nitrógeno.

HIDROCARBUROS

Los hidrocarburos se monitorean mediante el uso de un detector de ionización de flama (DIF) que consiste en una flama de aire/hidrógeno a través de la cual se pasa un potencial eléctrico. Cuando los hidrocarburos se pirolizan en la flama su conductividad se incrementa grandemente y pasa una corriente que es proporcional al número de átomos de carbono presentes. Los instrumentos comerciales, por lo general incluyen un medio de la medición separada de metano, monóxido de carbono e hidrocarburos totales.

CALIBRACION

Todos los métodos analíticos para determinar las concentraciones pequeñas deben calibrar contra estándares necesitan ser exactos

LAS TECNICAS DE MEDICION.

Las técnicas más usuales para la medición de productos de combustión son las siguientes:

DIOXIDO DE AZUFRE	MEDICION POR FLUORESCENCIA MEDICION POR INFRARROJO NO DISPERSIVO
	CONDENSACION Y TITULACION VOLUMETRICA
TRIOXIDO DE AZUFRE	ESPECTROMETRIA VISIBLE DE FLUJO CONTINUO POR DESPLAZAMIENTO MEDIDOR DE PUNTO DE ROCIO ACIDO METODO E.P.A.3
OXIGENO	APARATO DE ORSAT METODO PARAMAGNETICO
MONOXIDO Y DIOXIDO DE CARBON	APARATO DE ORSAT MEDICION POR INFRARROJO NO DISPERSIVO
PARTICULAS	EQUIPO ISOCINETICO PARA MUESTREO DE PARTICULAS

A continuación se describen las características más importantes de cada una de ellas.

a.- Medición por Fluorecencia.

La medición por fluorescencia es aplicable a la determinación de SO₂.

El principio de operación está ilustrado en la figura. Por la cámara de medición y a través de un filtro se hacen pasar pulsaciones de luz ultravioleta; estas pulsaciones excitan a las moléculas de SO₂. Cuando las moléculas ya excitadas regresan a su estado original.

Descripción del equipo.

El equipo de medición está constituido por la sonda de muestreo y la unidad de control.

La sonda de muestreo, que se introduce en el flujo de gases, contiene el detector de punto de rocío, un termopar y un par de electrodos dentro de la superficie de detección; esta superficie de detección es enriada por la unidad de suministro de aire, la cual está regulada por una válvula desde la parte posterior de la unidad de control.

Cuando el flujo de control a través de los electrodos permanece constante (lo que se logra por medio de la válvula de regulación de aire), la razón entre condensación y evaporación del ácido es constante. La temperatura a la cual ocurre este fenómeno es, por definición, la temperatura del punto de rocío.

La temperatura se mide continuamente por medio del termopar y se envía al medidor que está localizado en la unidad de control.

1.- Método EPA 6.

En el método EPA 6, la muestra de gases pasa a través de una sonda y un filtro hasta el interior del equipo. La sonda se calienta para prevenir cualquier condensación prematura dentro del tren de muestreo.

La muestra de gases pasa a través de una solución 4:1 de isopropanol y agua, la que absorbe el SO_2 contenido en la muestra. Posteriormente pasa por una solución de peróxido de hidrógeno y agua, donde el SO_2 es oxidado hasta ácido sulfúrico. La cantidad de sulfatos presentes en ambas soluciones se determina por titulación volumétrica usando una solución valorada de bario y torino como indicador. Estas cantidades junto con el volumen de gases muestreado (medido en el medidor volumétrico) permite conocer las concentraciones de SO_2 y SO_3 en los gases de combustión.

2.- Medición de Oxígeno, Monóxido de Carbono y Dióxido de carbono con Aparato Úrsat.

Principio de operación.

La figura siguiente muestra un aparato de Úrsat típico. El principio de operación se basa en hacer burbupear un volumen conocido de muestra en una solución capaz de absorber selectivamente el componente que se desea cuantificar; por diferencia de volumen (antes y después

del burbujeo se conoce la cantidad absorbida. Para determinar el contenido de O_2 se utiliza una solución alcalina de ácido pirogálico; el contenido de dióxido de carbono se determina por medio de una solución de hipoclorito de potasio (potasa caustica) y el contenido de monóxido de carbono por medio de cloruro cuproso amoniaco.

4.- Medición por Paramagnetismo.

La medición por paramagnetismo se utiliza para la determinación continua de las concentraciones de oxígeno.

Principio de operación.

Debido a que las moléculas de oxígeno contienen un par de electrones libres en su última órbita, tienen la capacidad de ser temporalmente magnetizados cuando se ubican dentro de un campo magnético.

El principio de operación del analizador paramagnético es el siguiente: un par de esferas de vidrio llenas de nitrógeno son montadas en los extremos de una barra de aluminio-níquel, formando el cuerpo de prueba. El cuerpo de prueba va montado horizontalmente sobre una suspensión vertical de torsión. El cuerpo de prueba se coloca en un campo magnético no uniforme, por el que se hace pasar la muestra de gas. Las esferas se ven entonces sometidas a fuerzas de desplazamiento que provocan un par de torsión proporcional a la susceptibilidad magnética del volumen de gas en los alrededores del campo de prueba.

Forma de medición.

La susceptibilidad magnética del flujo de gas analizado se mide utilizando un detector magnético de la siguiente manera:

En el centro del campo de prueba hay un pequeño espejo de cuarzo, sobre el cual se enroca un haz de luz que se refleja sobre una fotocelda. La señal producida por la fotocelda se aplica a la entrada de un circuito amplificador, el cual provee la corriente restauradora a través de un alambre conductor, unido longitudinalmente alrededor de las esferas.

Adicionalmente la señal de salida del amplificador se envía al medidor y al registrador.

Descripción del equipo.

El equipo de medición está constituido por la sonda de muestreo y la unidad de control.

La sonda de muestreo, que se introduce en el flujo de gases, contiene el detector de punto de rocío, un termopar y un par de electrodos dentro de la superficie de detección: esta superficie de detección es enriada por la unidad de suministro de aire, la cual está regulada por una válvula desde la parte posterior de la unidad de control.

Cuando el flujo de control a través de los electrodos permanece constante (lo que se logra por medio de la válvula de regulación de aire), la razón entre condensación y evaporación del ácido es constante. La temperatura a la cual ocurre este fenómeno es, por definición, la temperatura del punto de rocío.

La temperatura se mide continuamente por medio del termopar y se envía al medidor que está localizado en la unidad de control.

1.- Método EPA ó.

En el método EPA ó, la muestra de gases pasa a través de una sonda y un filtro hasta el interior del equipo. La sonda se calienta para prevenir cualquier condensación prematura dentro del tren de muestreo.

La muestra de gases pasa a través de una solución 4:1 de isopropanol y agua, la que absorbe el SO_2 contenido en la muestra. Posteriormente pasa por una solución de peróxido de hidrógeno y agua, donde el SO_2 es oxidado hasta ácido sulfúrico. La cantidad de sulfatos presentes en ambas soluciones se determina por titulación volumétrica usando una solución valorada de bario y torino como indicador. Estas cantidades junto con el volumen de gases muestreado (medido en el medidor volumétrico) permite conocer las concentraciones de SO_2 y SO_3 en los gases de combustión.

2.- Medición de Oxígeno, Monóxido de Carbono y Dióxido de carbono con Aparato Úrsat.

Principio de operación.

La figura siguiente muestra un aparato de Úrsat típico. El principio de operación se basa en hacer burbujear un volumen conocido de muestra en una solución capaz de absorber selectivamente el componente que se desea cuantificar: por diferencia de volumen (antes y después

para evitar condensación en su interior; esta manguera lleva la corriente de gases de combustión de la sonda al equipo colector.

Equipo colector.

El equipo está compuesto por un soplador extractor de gases y un filtro gravimétrico que retiene partículas desde 5 micras. El extractor hace pasar la corriente gaseosa a través de la sonda, la manguera y el filtro, hasta ser expulsada al ambiente o retornada al ducto. El filtro gravimétrico está compuesto por un cartucho de filtrado de aluminio, un medio filtrante de fibra de vidrio y un contenedor de cartucho de aluminio con resistencia.

Unidad de control.

El control está integrado por dos micromanómetros para medir la presión diferencial del venturi y del Pitot y un control de velocidad del motor extractor para mantener las condiciones isocinéticas durante el muestreo.

Cuando se realiza la extracción, la concentración de partículas se calcula por medio de las siguientes expresiones:

$$\text{Partículas} = \frac{P_{\text{muestra}} - P_{\text{limpio}}}{V_0} \quad (\text{mg}/\text{m}^3)$$

V_0 se calcula con:

$$V_0 = (V_m) \left(\frac{P_1 \times T_0}{P_0 \times T_1} \right) \times f \quad (\text{m}^3\text{N})$$

donde:

P_{muestra} = Peso del filtro de la muestra tomada (mg)

P_{limpio} = Peso del filtro limpio (mg)

V_0 = Volumen de gases (m³N)

V_m = Volumen medido en el equipo isocinético (m³)

P_1 = Presión atmosférica del lugar (mm Hg)

P_0 = Presión atmosférica a nivel del mar (mm Hg)

T_0 = Temperatura de referencia cero (273 : K)

T_1 = Temperatura de los gases (:K)

f = factor de corrección del medidor de volumen de gases

del equipo nisocinético.

Ventajas y Desventajas de las Técnicas de Medición.

A continuación se presentan algunas de las ventajas y desventajas de las técnicas de medición de productos de combustión descritas.

TECNICAS	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Medición por Fluorescencia. Analizador de SO ₂ .	Respuesta rápida y continua. No presenta interferencias de otros compuestos.	Sólo maneja rangos pequeños, menores a 500 ppm
Medición por Infrarrojo, no Dispersivo. Analizadores de CO, CO ₂ y SO ₂ .	Determinación continua del componente de interés en una mezcla. No presenta interferencias. Opera en el rango de 0-10000 ppm	Requiere de un sistema de filtrado y acondicionamiento de los gases a analizar.
Medición por Condensación y Titulación Volumétrica.	Freciso y simple	Forma indirecta de determinación, se realiza en forma puntual
Medición por Espectrometría visible de flujo continuo por desplazamiento. Analizador de SO ₂ .	Determinación del componente de interés en una muestra, no presenta interferencias. alta precisión y alta sensibilidad.	Requiere de operación cuidadosa por personal calificado.

Medidor de punto de rocío ácido	Determinación continua . no presenta interferencia.	El punto de rocío detectado depende de la humedad de los gases de combustión.
Metodo E.F.A.ó	Muy preciso. Reconocido por la E.F.A.	Metodo indirecto. la determinación es puntual.
Aparato de Orsat Medición de CO. CO ₂ y O ₂ .	De fácil manejo.	Metodo indirecto. la determinación es puntual.Muy impreciso para CO.
Medición por Paramagnetismo. Analizador de O ₂	Medición continua de O ₂ contenido en la muestra no presenta interferencia	Requiere de acondicionamiento de muestra.
Bombón isocinético para muestreo de Partículas	Se toma una muestra representativa tanto de la cantidad como de la calidad de las partículas.	Medición puntual.



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

**CURSOS ABIERTOS
CONTROL DE CONTAMINACION Y AHORRO DE ENERGIA
EN CALDERAS**

MEDIDAS DE PROTECCION Y SEGURIDAD

ING. MARTINIANO AGUILAR RODRIGUEZ

XII. MEDIDAS DE PROTECCION Y SEGURIDAD

1.- PROTECCION DE LA CALDERA

Hay muchos criterios para integrar un sistema de protección, con excepción de los casos de plantas paquetes en los que un diseño se aplica a varias unidades idénticas, cada caldera es un problema particular; debido a esto y a las limitaciones impuestas para el presente trabajo, no se discutirán dichos criterios y solamente se concentrará a exponer los sistemas adoptados para calderas de fuerza.

Cualquiera que sea el arreglo del sistema de protección, la acción final de éste será impedir que abran las válvulas de suministro de combustible a la caldera durante la fase de arranque o cerrarias cuando la unidad está en operación al detectar una condición anormal tal como: secuencia inadecuada del sistema, mala relación o mezcla de aire combustible, falla de equipo auxiliar relacionado, condiciones desfavorables en el circuito combustible, aire, gases de combustión, etc.

COMPONENTES BASICOS DE UN SISTEMA DE PROTECCION.- Para efectuar lo anterior el sistema de protección incluye básicamente: Bloqueos, elementos detectoras de condiciones anormales y elementos finales.

BLOQUEOS.- (Interlocks); su función es evitar maniobras equivocadas, que pueden conducir a una condición peligrosa, y establecer una secuencia lógica de operación. Entre otros, un sistema de protección incluye los siguientes:

- a.- Interruptor de flujo de aire y relevador de tiempo para computar el flujo de aire y evitar que el encendido se inicie antes de establecer el mínimo requerido para el barrido.
- b.- Interruptores límite, que verifican la posición (abierta o cerrada) de las válvulas que manejan el combustible, las compuertas de ventiladores y registros de quemadores.
- c.- Un relevador para verificar el voltaje de corriente directa al sistema o alterna en el circuito de detección de flama.

d.- Interruptores de presión, para verificar que las presiones en el sistema de tuberías de combustible y vapor a quemadores, sea normal.

DISPOSITIVOS DETECTORES.- Que sean sensibles a condiciones anormales durante la operación. (Disparos).

a.- Interruptores de presión, en los sistemas de combustible y vapor a quemadores, suministro de aire a instrumentos, y presión en el horno de la caldera.

b.- Analizadores de oxígeno y combustible no quemado.

c.- Contactos auxiliares que nos indiquen la posición (arranque o paro) de los interruptores de los ventiladores, de tiro forzado y tiro inducido.

c.- Dispositivos que indiquen si la turbina está girando en vacío o con carga. (Si al girar en vacío la caldera no se encuentra operando a fuego mínimo, se tendrá una señal de "disparo").

e.- Celdas detectoras de flama.

f.- Una medición e interruptor de flujo de aire que operará al tenerse un valor de flujo inferior al mínimo establecido (durante el arranque o en cargas bajas).

ELEMENTOS FINALES.- Que interrumpen el suministro de combustible a quemadores para prevenir o en ciertos casos limitar las explosiones en los hornos.

a.- Válvulas de cierre rápido, individuales para cada quemador, y en los cabezales de combustible a quemadores y pilotos y como respaldo a válvulas de venteo en los mismos cabezales.

b.- Servo motores, para actuar las compuertas de ventiladores y registros de quemadores.

c.- Válvulas selenoides, individuales para cada quemador y en los cabezales de combustible a quemadores.

OTROS FACTORES A CONSIDERAR.- Es obvio que aún cuando se planea e integra correctamente un sistema de protección, no es aconsejable confiar competentemente la seguridad de una caldera a los dispositivos que lo integran, parte de esa seguridad está condicionada a los siguientes factores, necesarios en una planta:

UN MEDIO AMBIENTE ADECUADO QUE PERMITA TOMAR DECISIONES Y ACCIONES CORRECTIVAS.- Esto se refiere a que el personal tenga la suficiente comprensión acerca de los procedimientos seguros de operación. Que no esté sujeto a esfuerzos psicológicos o sobre cargas irrazonables, ocasionados por factores inherentes en la configuración del diseño de la planta. Falta de coordinación funcional de los varios componentes del sistema generador de vapor y sus auxiliares, etc.

UN ALTO NIVEL DE COMPETENCIA TECNICA Y DE OPERACION EN EL PERSONAL Y ORGANIZACION DE LA PLANTA.- Con la creciente complejidad de las unidades generadoras de vapor, no puede suponerse que equipo correctamente diseñado y con sistema de seguridad modernos, sean suficientes para garantizar la operación segura de una caldera, es necesario además un alto nivel de competencia técnica y en la operación de la planta.

SISTEMAS MODERNOS DE CONTROL DE COMBUSTION.- A los que pueda darse mantenimiento estando en servicio y efectuándose revisiones sin que disminuya su confiabilidad. Es de fundamental importancia valorar y planear adecuadamente la integración óptima de los equipos manuales o automáticos.

UN SISTEMA MODERNO DE ALARMAS.- Para dar información adelantada sobre determinadas situaciones de operación antes de que se origine una función automática de disparo.

ASEGURAR LA CONTINUIDAD DE OPERACION DE LOS SISTEMAS DE SUMINISTRO DE COMBUSTIBLE.- Puesto que las interrupciones en la alimentación de combustible, han contribuido a un buen número de explosiones, en el diseño del sistema de combustible se tendrán en consideración para evitarlas y en el sistema de protección se tomarán las provisiones necesarias para que actúe correctamente en caso de ocurrencia.

SISTEMAS DE ENCENDIDO.- Bien diseñado incluyendo pilotos de operación, capacidad y localización correctas, programador y dispositivo para limitar el tipo de prueba de encendido, etc.

En la tabla XIII-1 se muestra un resumen de las protecciones de una caldera.

CONDICION DE ALARMA O PELIGRO.	TIPO DE CALDERA.	S E N S O R	A C C I O N
Bajo suministro de agua.	Circ. Controlada Circ. forzada	Switch presión dif. Switch de alto nivel o bajo nivel del agua. Switch baja temp. sobre calentado.	Disparo sumin. comb. Disparo o alarma Disparo sumin. comb.
Alta temp. vapor	todos	Termocuplos en líneas sec-calent. y resalentado.	Alarma
Alta presión vapor	Todos	Valvs. de seguridad Switch alta presión	Relevar presión Disparo combustible
Pérdidas de aire	Tiro balanceado o forzado.	Switch aux. int. vent. Switch bajo flujo aire	Disparo sum. comb. Alarma o disparo sum. comb.
Condiciones suministro comb.	Gas Aceite Carbón	Baja o alta presión Baja presión Baja temperatura Pérdida medio de atomización. Detector flujo carbón	Disparo sum. comb. Disparo sum. comb. Alarma Disparo sum. comb. Alarma
Presión hogar	Todos	Switch de presión	Disparo sum. comb.
Pérdida estab. flama.	Gas o aceite Carbón	Detector de flama, espejos o TV caldera. Detector de flama, espejos o TV caldera.	Disparo sum. comb. Disparo sum. comb.
Combustibles muy altos.	Gas, aceite o carbón.	Combustible y/o analizador O ₂ (opcional) TV Chimenea (opcional) Detector de humos	Alarma Alarma
Pérdida sum. energía control combustión.	Gas, aceite o carbón.	Relé bajo voltaje o baja presión aire.	Alarma
Calidad agua alimentación	Todos	Conductividad	Alarma
Combinación de los anteriores.	todos	Observación del operador	Disparo sum. comb.

TABLA XIII-1.- RESUMEN DE PROTECCIONES DE LA CALDERA

2 .- MEDIDAS DE SEGURIDAD

Las instalaciones de combustión pueden dar lugar fácilmente, en caso de mala regulación, a riesgos de explosión. Para que esta se produzca deben concurrir simultáneamente dos condiciones:

- a) Existencia en el interior de la cámara de combustión de una mezcla explosiva (vapores combustibles y aire).
- b) Existencia de una fuente de encendido

Lo que sigue se refiere a las instalaciones de seguridad utilizadas en las calderas industriales; con este tipo de aplicaciones, las medidas de seguridad se han hecho ya costumbre, dado que, con el aumento de la producción, las consecuencias de una explosión podrían ser catastróficas.

Las observaciones que se dan a continuación tienen un carácter generalizado y pueden aplicarse asimismo a otros tipos de cámaras de combustión.

En el caso de gases naturales, la mezcla con el aire se hace explosiva cuando alcanza un porcentaje del 60 por 100 del aire estequiométrico; la mezcla sigue siendo explosiva hasta que tal porcentaje alcanza el 170 por 100, después del cual se supera el límite de explosión. Para una mezcla aire-aceite, los límites están comprendidos entre el 40 y el 220 por 100 del aire teórico.

El mayor peligro de explosión se alcanza con el encendido de la caldera. Condiciones de peligro pueden verificarse también durante el trabajo de la planta, si las variables que intervienen en los problemas de la seguridad no se controlan rigurosa y continuamente.

En las calderas modernas existen diversas razones que tienden a crear mayores condiciones de peligrosidad respecto a las más antiguas: la reducción del personal, el aumento de los trabajos exigidos, sobre todo por lo que respecta al campo de -

~~la regulación, la casi total desaparición del refractario en las~~
cámaras de combustión, la utilización de combustibles de composición y calidad muy diversas, etc.

Las causas de explosión en el encendido de una caldera pueden reducirse esencialmente a las siguientes:

- a) Eventual pérdida a través de los órganos de interceptación de combustible que afluye a la cámara de combustión, almacenándose en los ángulos muertos.
- b) Ventilación de la cámara de combustión con aire comburente durante un tiempo insuficiente para asegurar cierta renovación del aire. Esta renovación deberá servir para eliminar en su totalidad las pérdidas a que se refiere el punto a).
- c) Mal funcionamiento de la llama de encendido
- d) Avería en el ventilador de aire
- e) Avería en el sistema de regulación, y consiguiente relación errónea aire-combustible.
- f) Caudal de combustible inapropiado para el funcionamiento de los quemadores.
- g) Presión y temperatura del combustible no correctas.

El conjunto de dispositivos de protección contra explosiones debe tener requisitos tales que revelen de una forma segura las condiciones que preceden a la formación de la mezcla explosiva, e impidan que ésta se produzca. El conjunto de los automatismos debe ser relativamente sencillo, de modo que facilite un control periódico sin ningún refuerzo.

En las antiguas calderas se confiaba la función de la protección antiexplosiva a las llamadas compuertas antiexplosión, es decir, a una portezuelas dotadas de contrapesos de modo que se abrieran en condiciones de presión anormal en la cámara de combustión. Actualmente, sobre todo en calderas de cierta importancia, la necesidad de construir puertas de grandes dimensiones y el hecho de que fenómenos explosivos de carácter instantáneo pueden volar la

caldera antes de que actúen las compuertas, han contribuido al progresivo abandono de tales mecanismos. A esta dificultad, típica en las calderas de tiro equilibrado, se une a la imposibilidad de construir compuertas adecuadas para las calderas de presión.

Un sistema de protección completo para una caldera industrial debe comprender los siguientes elementos fundamentales:

- 1) Serie de limitadores y bloqueos de caldera, que paren al quemador al verificarse cualquier situación anormal.
- 2) Adecuada preventilación con aire de la cámara de combustión - antes del encendido del quemador
- 3) Satisfechas las condiciones de los puntos 1 y 2, control de la operación de encendido del quemador.
- 4) Control de la llama permanente del quemador.

Bloqueos de la Caldera

Las causas de peligro para una caldera son:

- a) Avería del ventilador de tiro (cuando existe)
- b) Avería del ventilador soplante
- c) Bajo nivel de agua en el cuerpo cilíndrico
- d) Falta de la corriente eléctrica necesaria para la regulación
- e) Falta del aire comprimido para el circuito de regulación en el caso de regulación neumática.
- f) Presión del combustible fuera de los límites normales de funcionamiento de los quemadores.

Al verificarse cualquiera de estas situaciones se exige el paro inmediato de los quemadores y la conservación del flujo de aire que garantice una postventilación de la cámara de combustión, hasta la total eliminación de los productos no quemados eventualmente formados.

~~El sistema de protección puede completarse, sobre todo en calde-~~
ras de cierta importancia, de forma que las otras causas que se relacionan a continuación provoquen una alarma, y la interven- -
ción inmediata del personal de vigilancia.

- g) Presión excesiva en la cámara de combustión
- h) Relación errónea aire-combustible
- i) Gran contenido de productos no quemados en los humos
- j) Presión insuficiente del aire en los quemadores

La condición de seguridad relativa al funcionamiento de los ventiladores se obtiene eléctricamente, derivando de los contactos auxiliares de los teleservomotores una línea de alimentación de corriente a los órganos de interceptación de los quemadores; al fallar la corriente, éstos se cierran, parando el quemador.

La regulación del nivel, realizada mediante los oportunos órganos de flotación unidos a un interruptor eléctrico; se efectúa - en dos etapas. Durante el funcionamiento de la caldera, el nivel del agua en el cuerpo cilíndrico oscila entre dos valores (alto y bajo), entre los que se encuentran los límites de seguridad. Cuando el nivel alcanza su valor mínimo, un interruptor eléctrico unido al flotador acciona la bomba de alimentación del agua, que continúa alimentando hasta que el nivel alcanza el máximo. En este momento, interviene de nuevo el interruptor, que se dispone a parar la bomba del agua.

Las condiciones de peligro crean, por causas accidentales, cuando el nivel alcanza una altura por debajo del mínimo. Un segundo interruptor unido a otro flotador se ocupa, en tal caso de parar los quemadores.

Por cuanto respecta a la falta accidental, ya sea de la corriente auxiliar en los circuitos de regulación, ya del aire comprimido para la regulación neumática, la instalación debe diseñarse de modo que cualquier órgano de interceptación tienda a cerrarse en - cuanto falte el fluido motor.

Las condiciones de presión anormal en la línea del combustible son señaladas por los presostatos y al mismo tiempo se cierra un contacto eléctrico que provoca la detención en el acto del quemador.

Las condiciones de alarma a que se refieren los puntos g) y l) - vienen señaladas por presostatos; puesto que cabe la posibilidad de que la verificación de tales condiciones dependa de la propia maniobra de los quemadores en una fase transitoria, como por - - ejemplo el momento del encendido, su intervención suele demorarse algunos segundos, con un dispositivo regulador, de modo que - no haya lugar a maniobras innecesarias.

La señalización de una relación errónea de aire-combustible se realiza de una forma relativamente sencilla, sobre todo en el caso de funcionamiento neumático, uniendo al oportuno instrumento que proporciona la relación (llamado relé de relación) un contacto eléctrico que interviene en condiciones anormales.

Preventilación de la Cámara de Combustión

Antes de manipular en la cámara de combustión sobre el sistema de encendido se debe estar seguro de que la cámara ha sido preventilada, por medio del mismo aire de combustión, a fin de eliminar cualquier indicio de productos no quemados.

Esta preventilación debe efectuarse después de verificadas las siguientes condiciones:

- a) No hay ninguna señal anómala en los bloques de la caldera descritos en el párrafo precedente.
- b) Verificar que todas las válvulas de intercepción del combustible a los quemadores estén cerradas.
- c) Verificar que todos los registros de aire de los quemadores - están abiertos.

d) Comprobar que llega a la caldera una corriente de aire por lo menos igual a 50 por 100 de la máxima.

Hechas estas comprobaciones, para conseguir una preventilación adecuada es necesario efectuar de cinco a ocho recambios de aire de todo el volúmen de la caldera.

Por lo general, un tiempo de prelavado de tres a cinco minutos basta para la mayoría de las calderas, incluidas las que tienen circuitos en los que se aprecian zonas muertas que pueden facilitar el almacenamiento de cierta cantidad de productos no quemados. Alguna vez se alarga el período de preventilación para controlar el funcionamiento normal de todas las válvulas interceptoras, especialmente cuando el combustible es gas; con este fin se somete a presión el tramo de tubería comprendido entre la válvula de paso principal y la válvula de paso de los quemadores, y se comprueba que, al final del prelavado, la presión en ese tramo no varía notablemente.

Control de la Secuencia de Encendido y Protección de la Llama

Una vez que las condiciones expuestas en los dos párrafos anteriores se han ido realizando y verificando, la secuencia debe permitir el encendido del quemador. Esta operación puede ejecutarse mediante un operador, que vigila el funcionamiento de las diversas fases. En las instalaciones automáticas, que son cada vez más frecuentes, esta secuencia viene establecida por un programador electrónico, que determina un cierto ciclo llamado (ciclo de encendido) cuyos pasos se van siguiendo.

Una vez llevado a cabo el ciclo de encendido, el quemador debe estar dotado de un sistema de alerta tal que en el caso de que la llama falte accidentalmente, o de inestabilidad de la misma, el flujo de combustible se corte en el acto.

En caso de que la caldera funcione con varios quemadores, como cada quemador se alimenta individualmente con aire y combustible es absolutamente necesario que el sistema de alerta opere sobre cada quemador.

Los dos tipos de operación de encendido que se realizan con más frecuencia en las calderas son:

- 1) Operación semiautomática, según la cual el operador efectúa algunas operaciones manuales de encendido y de ajuste del dispositivo de regulación intercalando algún sistema de control eléctrico.
- 2) Operación completamente automática, en la cual las operaciones de encendido y de ajuste se programan automáticamente.

Las operaciones que se efectúan pueden ser distintas en función del tipo de quemadores adoptados.

Esquematisando el funcionamiento de una caldera dotada con un solo quemador se pueden distinguir los siguientes elementos fundamentales.

- Quemador de encendido, llamado también encendedor electrogás, que es un pequeño encendedor de aire mezclado de antemano o del tipo de absorción, colocado en el interior del quemador y cuya tobera de salida se encuentra cerca de los orificios de salida del combustible del quemador principal. Este encendedor se puede alimentar con metano, con gas de ciudad o con las mezclas propano-butano que se encuentran en el mercado.
- Un transformador de alta tensión (entre 6000 y 10000 voltios), que actúa sobre un par de electrodos situados en el interior del quemador, proporciona la chispa que da lugar a la llama del encendedor.
- Una válvula electromagnética, que intercepta la llegada de aire en el encendedor.

- Una válvula automática, de tipo electromagnético, electrohidráulico o electroneumático capaz de asegurar el corte instantáneo del combustible.
- Una fotosonda (célula fotoeléctrica) capaz de revelar la presencia de la llama, cuyo impulso se transmite a un relé electrónico que pone en marcha el quemador, siempre que la fotosonda revele la presencia de la llama.
- Una serie de contactos de corto trayecto situados en el registro del aire y con válvulas manuales de interrupción del combustible, para asegurar los bloqueos previstos en los párrafos anteriores.

La operación de encendido está constituida por las siguientes operaciones fundamentales:

- 1) Una vez que el operador ha preparado adecuadamente todos los circuitos de la caldera (preparación de la bomba del agua, preparación del ventilador, de las válvulas y compuertas de encendido, etc.), y una vez que los bloques antes previstos indican que el encendido se puede realizar, se oprime un interruptor para que comience la preventilación (cuyo tiempo se mide mediante un temporizador). Durante esta, señalada mediante un piloto (que indica que se está efectuando la preventilación), el operador revisa y prepara el circuito del combustible.
- 2) Al final del período de preventilación, señalado por otro piloto (fin de la preventilación), el operador prepara el circuito del aire y el registro del quemador en la oposición necesaria para su funcionamiento. En esta fase se excluyen los bloques del caudal de agua y de la apertura total del registro del quemador. El operador oprime un interruptor, que abre, mediante una válvula electromagnética, la línea de gas que da paso al encendedor, suministrando la tensión al transformador de alta tensión.
- 3) La apertura de la válvula del gas está temporizada durante un tiempo máximo de 10 ÷ 15 segundos; si al final de este período la fotosonda no revela la presencia de la llama, la válvula del gas se cierra y se repite la secuencia de encendido a par-

tir de la preventilación. Si se revela la presencia de la llama, el relé electrónico aplicado a la fotosonda da una señal para que continúe la secuencia; el encendedor queda encendido, y el operador puede pulsar un interruptor que abre la válvula del combustible principal.

- 4) La protección de la llama sobre el combustible principal se efectúa automáticamente, ya que cinco o diez segundos después de la apertura de la válvula principal se apaga el encendedor, y la secuencia continúa mediante la señal de la llama principal suministrada por la fotosonda.

Si se produce un apagado accidental o las condiciones de la llama son anormales, la fotosonda interrumpe inmediatamente el paso del combustible accionando a la vez una alarma acústica y óptica.

En el caso de quemadores completamente automáticos, las operaciones antes mencionadas se van siguiendo automáticamente; los órganos de protección están acoplados a los órganos de regulación; cuyo funcionamiento se consigue en las diversas fases mediante servomotores eléctricos o neumáticos, bajo la acción de un programador de secuencia.

En la Fig. se muestra, a título de ejemplo, un diagrama de bloques de la secuencia de encendido y protección que tienen lugar en una caldera industrial de vapor completamente automatizada, que funciona con combustible gaseoso.

Tendencias Modernas en el Campo de la Protección Antiexplosión

Cada vez resulta más necesaria, sobre todo con el uso de los quemadores automáticos de aceite y gas, una normalización de los sistemas de protección antiexplosión, que suministre normas precisas sobre el funcionamiento de las calderas, duración del prelavado, secuencias y tiempos de encendido, calidad de los dispositivos a los cuales todos los fabricantes de quemadores, sobre todo en el caso de funcionamiento a gas, deberían atenerse.

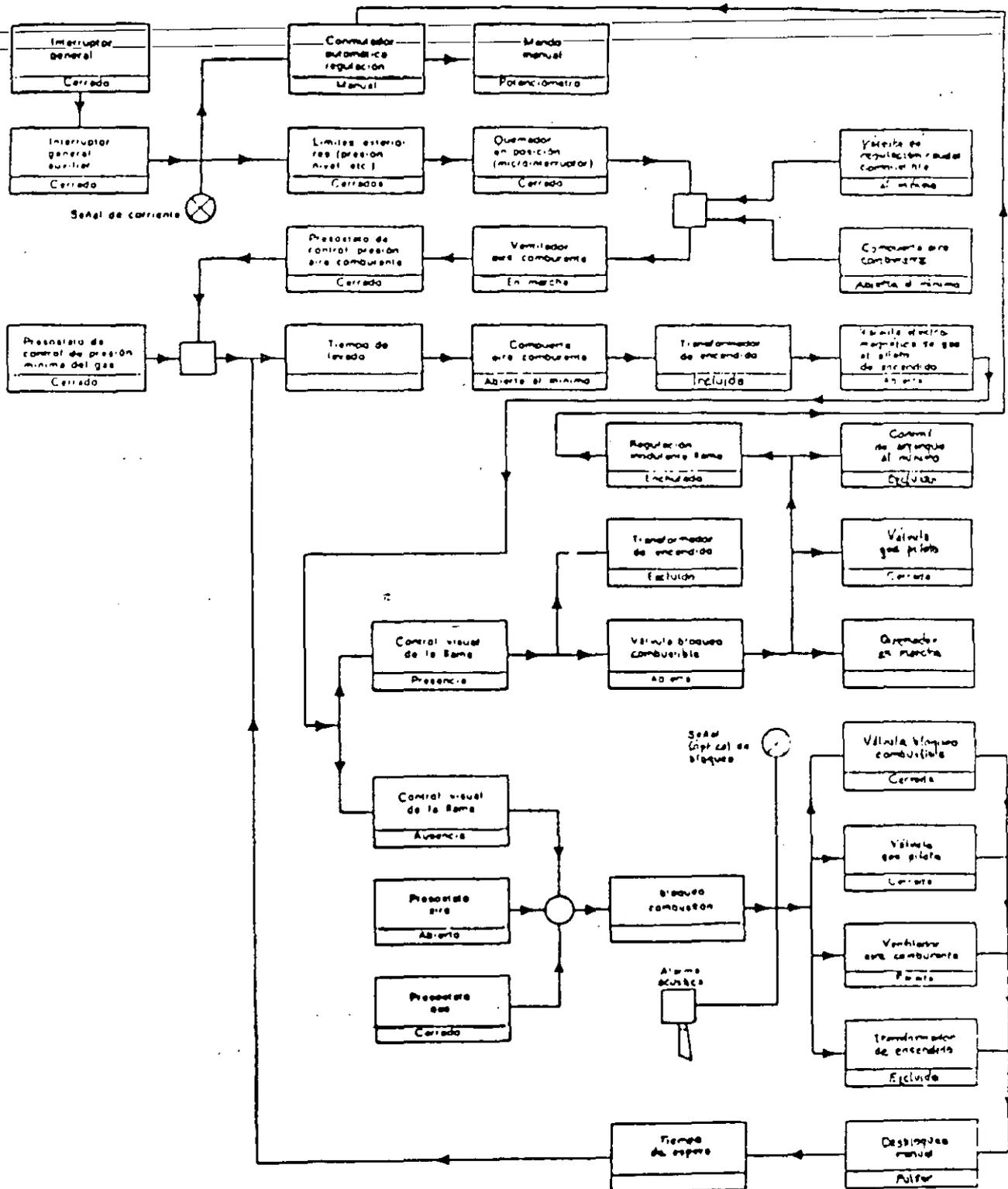


Fig. —Diagrama de bloques de las secuencias de encendido y protección de una caldera automática (Vampa Combustion).

En algunos países, como Holanda y Alemania, se ha llegado a una normalización que se plantea según todo lo mencionado, anteriormente, por lo menos para las instalaciones de cierta importancia.

Algunos constructores aconsejan, para asegurar la estabilidad y la seguridad de la conducción, que siga funcionando el encendedor después de haberse producido la llama principal, y que las medidas de seguridad se controlen a partir de la llama del encendedor, llamada también llama piloto.

Esto se basa en la hipótesis de que mientras exista llama piloto no pueden producirse explosiones. En algunos casos esta hipótesis no se ha visto confirmada, ya que en determinadas condiciones la llama principal puede extinguirse sin que se apague la llama piloto. En este caso, sobre todo en quemadores de gran potencia, una gran cantidad de combustible sigue fluyendo al quemador, y al mezclarse con el aire puede formar una mezcla explosiva que a su vez sería avivada por la llama piloto. Se tiende, sobre todo en las instalaciones de cierta importancia y con uso de combustibles gaseosos, a emplear en la línea de llegada del gas dos válvulas de bloqueo en serie, intercalando una válvula de escape abierta en contraposición a las otras y unida a una línea de descarga. Este sistema representa una seguridad casi absoluta para posibles pérdidas, durante la parada del quemador.

La llama debe revelarse de forma segura, y sobre todo selectiva, es decir, la fotosonda debe detectar sólo la irradiación de la llama y no, por ejemplo, la de posibles refractarios incandescentes. Esta selectividad debe procurarse también en instalaciones de muchos quemadores, para que la fotosonda de uno no revele la llama de los demás.

La solución técnica más usual es utilizar fotosondas UV sensibles sólo a las radiaciones emitidas por las llamas en el ultravioleta. La cantidad de radiación es proporcional al contenido de hidrógeno del combustible; las fotosondas UV que se encuentran actualmente en el mercado se adaptan muy fácilmente y dan buenos resultados con la mayoría de los combustibles comerciales.

La elección entre un quemador y otro, en las calderas de gran potencia, se efectúa dirigiendo la fotosonda a un determinado punto de la llama del quemador y regulando la sensibilidad del relé - - electrónico de forma que obtenga señal sólo si en ese punto la llama es normal; esto no debe suceder en presencia de reverberaciones procedentes de llamas adyacentes.

Dada la importancia y las consecuencias que derivan de un mal funcionamiento del sistema de protección antiexplosión, es indispensable que todos los dispositivos del sistema sean de la mejor calidad.

Algunas fotosondas llevan en sus circuitos un sistema de revisión periódica de sus componentes. Es necesario el mantenimiento y una revisión periódica de todos sus elementos, como pueden ser interruptores, presostatos y medidores de nivel, relés auxiliares, etc. Estas revisiones se hacen en función del comportamiento y de la importancia de la planta.



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

**CURSOS ABIERTOS
CONTROL DE CONTAMINACION Y AHORRO DE ENERGIA
EN CALDERAS**

CONTROL DE CONTAMINACION EN CALDERAS

ING. MARTINIANO AGUILAR RODRIGUEZ

XIII.- CONTROL DE CONTAMINACION DE CALDERAS.

1.- Origen y Efectos de Contaminantes.

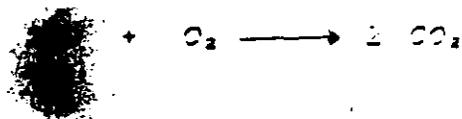
El quemado de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural) es la fuente de contaminación del aire más común que proviene de la industria. Estos combustibles se queman para producir calor, agua caliente o vapor que pueden tener diferentes usos.

Los combustibles fósiles no sólo contienen carbono, hidrógeno y oxígeno, sino también azufre y nitrógeno, además de pequeñas cantidades de impurezas minerales, que juntos son responsables de muchos de los problemas de contaminación del aire por la combustión de combustibles fósiles: cuando estos se queman en presencia de aire, se efectúa una serie de reacciones complejas que pueden resumirse en la siguiente forma:

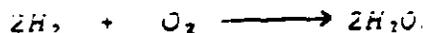
- El carbono (C) se combina con el oxígeno para formar óxidos de carbono.



- Con las condiciones adecuadas, el monóxido de carbono (CO) se oxida y se convierte en dióxido de carbono (CO₂).

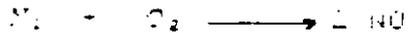


- El hidrógeno combinado con el carbono se oxida y se transforma en agua.



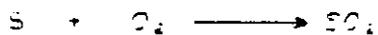
- A elevadas temperaturas, las cuales ocurren en la flama, tanto el nitrógeno del petróleo como el del aire de

combustion reaccionan con el oxigeno para dar monoxido de nitrogeno (NO).

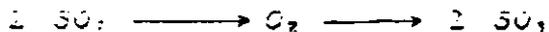


El NO se combina posteriormente con oxigeno en la atmosfera para formar NO₂.

- El azufre del petroleo se oxida y se convierte en oxidos de azufre, principalmente dióxido de azufre (SO₂).



- Cerca del 1% al 3% del dióxido de azufre formado, se oxida de nuevo a trióxido de azufre bajo condiciones de exceso de aire, requerido para quemar petroleo en forma eficiente.



- Las impurezas en el combustible son ininflamables y producen ceniza, parte de ésta, llevado como ceniza volante, se vuelve aerotransportable y se lleva fuera de la caldera por los gases de escape.

Las emisiones de una caldera que afectan el medio ambiente, además de los productos de combustión mencionados, incluyen al calor de desecho y el ruido.

Algunos de estos contaminantes tienen efecto tóxico inmediato, mientras que otros tienen riesgo para la salud por su característica de reacciones con otros contaminantes en el aire para formar componentes de riesgo ambiental.

Estos contaminantes son distintos por la forma en que se generan en el proceso de combustión: algunos están más relacionados con la composición misma del combustible, mientras que otros dependen de las características del proceso de combustión al quemarse el combustible y son sensible al diseño y a las variables operativas de los sistemas de combustión.

A continuación se describen brevemente las características de estas sustancias contaminantes incluyendo sus efectos principales sobre la salud, su formación en los sistemas de combustión de las calderas y los métodos que normalmente se usan para limitar sus emisiones.

Partículas.

El material de partículas es la porción no gaseosa de los escapes de combustión y consiste de los materiales sólidos y líquidos (exceptuando las gotas de agua) suspendidos en los gases de escape. Pueden definirse en general como cualquier material que no pase a través de un medio filtrante muy fino.

Las partículas que se originan en el proceso de combustión pueden ir en tamaño desde diámetros inferiores a 1 micra (menos de una millonésima de metro) hasta dimensiones mayores a 1 milímetro. Las partículas mayores no viajan lejos en la atmósfera y normalmente se precipitan cerca del punto de emisión.

Las partículas pequeñas que constituyen el grueso de este contaminante pueden permanecer en la atmósfera por períodos de tiempo largos y contribuyen a enturbiar u oscurecer la visibilidad a distancia. Esas "partículas finas" son potencialmente las más peligrosas para la salud ya que fácilmente se aspiran a través de los pasajes de las vías respiratorias en su funcionamiento normal.

El material de partículas puede estar compuesto de una variedad amplia de materiales que incluyen combustible, compuestos de azufre, carbón, componentes de ceniza en el combustible (incluyendo muchos metales tóxicos) y aún polvo no combustible que es arrastrado al sistema de combustión con el aire.

Muchos de esos materiales están identificados como riesgos a la salud y al inhalarse subsecuentemente son absorbidos por el organismo.

Las altas concentraciones de partículas en el aire que se inhalan pueden tener efectos más directos sobre la salud al irritar o bloquear las superficies de las vías respiratorias causando deterioros temporales o permanentes de la respiración y por lo tanto daños físicos. La ingestión oral de estos materiales también es posible ya que se depositan en la vegetación y alimentos provenientes de cosechas.

La cantidad y composición de partículas generadas en las calderas tiene la influencia de varios factores incluyendo el tipo de combustible que se quema, el modo de operación de la caldera, las características de los quemadores y del horno.

Los diseños de quemadores y los modos de operación que promueven la combustión completa y eficiente reducen generalmente la fracción de material combustible en las partículas. Desde el punto de vista de operación de las calderas es deseable reducir estos materiales derivados de combustible ya que representan un desperdicio de energía disponible y pueden a su vez producir condiciones problemáticas en las superficies de intercambio de calor del horno o bien humo no aceptable en la chimenea. El quemador y la relación aire-combustible representa uno de los parámetros importantes de la operación y tiene influencia en la cantidad de partículas de combustible que se generen.

El gas natural y la mayoría de los aceites combustibles son identificados como de "combustión limpia" debido a que tienen baja tendencia a la formación de partículas sólidas (humo, hollín, carbón, etc.) y además queda un contenido bajo de cenizas.

Comparativamente algunos de los aceites pesados y la mayoría de los carbones combustibles contienen cantidades substanciales de ceniza que forman subsecuentemente nódulos de partículas no combustibles que se generan en el horno.

En el caso del carbón por ejemplo, las cenizas pueden representar valores tan altos como 40% y en algunos casos más del peso total del combustible que se quema. La prevención de su acumulación en las superficies internas de las calderas es una de las consideraciones principales en el diseño de una caldera.

Actualmente se emplean técnicas para remover estas partículas de los gases de escape, tales como filtración, separación mecánica y precipitación electrostática. Muchos diseños han comprobado su capacidad para retirar más del 99% de esas partículas y se aplican también en las calderas que queman petróleo, combustible en donde el control de este contaminante es mandatorio.

Bióxido de Azufre.

El SO_2 es un gas incoloro no inflamable que puede inclusive "probarse" sentirse en concentraciones menores a 1 ppm en el aire; concentraciones mayores presenta olor picante e irritante. El bióxido de azufre se forma durante el proceso de combustión cuando el azufre (S) contenido en el combustible se combina con el oxígeno (O_2) del aire de combustión.

El trióxido de azufre (SO_3) es otro óxido de azufre que puede formarse de la misma manera. El bióxido junto con el trióxido de azufre forman el total de óxidos de azufre presentes, esto se identifica generalmente como " SO_x ". El trióxido de azufre generalmente no excede del 3 al 5% de este total.

Con excepción de los compuestos de azufre presentes como partículas, todo el azufre contenido inicialmente en el combustible se convierte a SO_2 y SO_3 ; éste último antes de abandonar la chimenea puede combinarse con la humedad en los gases de escape para formar ácido sulfúrico que se condensará para formar partículas o permanecerá suspendido en los gases a la chimenea en forma de niebla ácida, además de dañar las partes frías de la caldera.

Ya en la atmósfera una porción del SO_2 se convierte a SO_3 , que en forma similar resultará en ácido sulfúrico, y el SO_3 podrá formar también otros componentes tales como sulfatos al contacto con otros medios.

Los sulfatos y la niebla ácida contribuyen en forma significativa a reducir la visibilidad en la atmósfera. Otros efectos al ambiente son la corrosión de materiales expuestos al aire y daños a la flora. Los efectos sobre la salud de los óxidos de azufre, ácido sulfúrico y algunos sulfatos están relacionados principalmente con irritación de las vías respiratorias que podrán generar problemas a las vías y superficies del sistema pulmonar.

La cantidad de SO_2 generada en una caldera depende principalmente de la cantidad de azufre en el combustible y no está afectada significativamente por las condiciones de operación o diseño de la caldera. La regulación de la cantidad de azufre permitida en el combustible es un método primario para controlar las emisiones de SO_2 , esto sin embargo, no se realiza actualmente en nuestro país.

Las lavadoras (scrubbers) que separan el SO_2 de los gases de combustión en las chimeneas pueden también ser efectivos cuando se usan combustibles de "alto azufre".

Oxidos de Nitrógeno.

El óxido nítrico (NO) y el bióxido de nitrógeno (NO_2) son las dos formas de óxido de nitrógeno generadas en el proceso de combustión, juntos estos componentes son referidos en la terminología como óxidos totales de nitrógeno o simplemente " NO_x ". El NO es un gas incoloro y sin olor y no está considerado como peligroso a la salud en las concentraciones que normalmente se encuentran en la atmósfera sin embargo el NO_2 se considera una sustancia dañina y aunque el NO_2 comprende alrededor de 5% o menos de NO_x emitido a través de las chimeneas de calderas una porción importante del NO se convierte a NO_2 en la atmósfera.

El NO_2 es un gas de un color amarillento que puede afectar la visibilidad atmosférica y tiene un olor picante (como a sudor) que es fácilmente detectable en las concentraciones que se alcanzan en el aire contaminado. En concentraciones más altas (100

ppm) el NO_2 puede ser fatal al inhalarse y la exposición prolongada aún en concentraciones bajas puede causar daños acumulativos y epidemias respiratorias.

El NO_x se forma espontáneamente durante el proceso de combustión cuando el oxígeno y nitrógeno están presentes a altas temperaturas. Los tres ingredientes, oxígeno, nitrógeno y alta temperatura, son elementos esenciales para el proceso de combustión por lo que es muy difícil prevenir la formación de NO_x . El nitrógeno está presente en el aire de combustión y en el combustible mismo.

Se ha comprobado que la reducción en el contenido de nitrógeno en el combustible reduce el NO_x , pero esto no es una forma práctica para controlarlo, las técnicas que se aplican normalmente y en la mayoría de los casos para reducir el NO_x y que han sido efectivas son resultado de abatir las temperaturas de flama en el horno, reducir la disponibilidad de oxígeno en la flama o de lograr una combinación de ambas.

Estas técnicas incluyen la operación con bajo exceso de aire, la combustión "rica en combustible" (staged) y la recirculación de gases al horno. Aún cuando estas son las técnicas actuales para limitar la formación de NO_x en el horno es posible que en el futuro se desarrollen otras para "separarlo" de los gases de escape antes de que entren a la chimenea. La desulfurización y otros tratamientos de "limpieza" de combustible pueden asociar otros beneficios en los combustibles con contenido reducido de nitrógeno.

El NO_x se produce en grandes cantidades solamente a muy altas temperaturas.

Otros factores afectan que la producción de NO_x en la combustión son la temperatura y presión de aire para combustión y la duración del proceso de combustión.

Las relaciones con muy bajo exceso de aire son benéficas desde el punto de vista de la formación de NO_x , pero representan un detrimento importante en la eficiencia y pueden generar cantidades importantes de CO y de hidrocarburos no quemados.

Monóxido de Carbono.

Monóxido de carbono (CO) es un producto de la combustión incompleta y su concentración en los gases de escape de la caldera generalmente se debe a las condiciones de operación, por ejemplo, ajustes inapropiados de quemadores, partes deterioradas en quemadores e insuficiente aire para combustión pueden conducir a altas emisiones de CO; las mediciones de éste en la chimenea frecuentemente se usan como un indicador de condición ineficiente de combustión.

El CO es un gas sin sabor, sin color y sin olor; la exposición a gases de escape que contienen CO producen el "envenenamiento con CO", bien conocido y cuyos efectos pueden ser fatales. La emisión de CO de las chimeneas de calderas es dispersada a la atmósfera y aun junto con el CO proveniente de otras fuentes no representan una concentración suficientemente alta para producir efectos inmediatos sobre la salud (con la excepción que puede representar la exposición en áreas de alta densidad de tráfico de automóviles). Hay sin embargo una preocupación sobre la exposición prolongada a estas concentraciones que pudiera causar eventualmente problemas de salud.

Hidrocarburos.

En forma análoga al monóxido de carbono, los hidrocarburos son una indicación de combustión incompleta o ineficiente y pueden eliminarse esencialmente de los productos de combustión de las calderas por operación apropiada del sistema de combustión, sin embargo esto podría mal entenderse ya que estrictamente hablando los hidrocarburos no pueden eliminarse completamente y siempre se encontrarán trazas de ellos independientemente de como se opere la caldera.

Debido a la gran variedad de compuestos involucrados y de los efectos no conocidos sobre la salud de algunos de éstos es difícil precisar su impacto sobre el ambiente. Algunos de estos hidrocarburos son muy parecidos a los componentes en el combustible y con toda razón son llamados "combustible no quemado"; hay en cambio otros que tienen formas totalmente distintas generadas a través de reacciones químicas durante el proceso de combustión.

Es bien conocido que los contaminantes a través de hidrocarburos en el aire son ingredientes importantes en la fotoquímica del smog; bajo ciertas condiciones atmosféricas pueden transformarse en otros derivados potencialmente más peligrosos y algunas manifestaciones del smog como la irritación de los ojos y las dificultades respiratorias son en parte asociadas con los hidrocarburos y sus derivados.

Oxidantes.

El término "oxidante" se aplica generalmente a las sustancias que contienen oxígeno y que toman parte en las complejas reacciones químicas en atmósferas contaminadas; estas reacciones llamadas fotoquímicas que se intensifican frecuentemente en presencia de la luz solar incluyen óxidos de nitrógeno y sustancias orgánicas reactivas (incluyendo hidrocarburos y sus derivados) como uno de sus principales ingredientes químicos. Esos reaccionan para formar nuevos componentes incluyendo el ozono conside-

rado como uno de los principales oxidantes en la contaminación fotoquímica del aire (smog). El término oxidante también se usa algunas veces para los reactivos químicos originales, NO_x , hidrocarburos y otros.

Aunque el ozono no se genera directamente en la caldera los principales ingredientes especialmente el SO_2 están presentes en los gases de escape de la caldera y la reducción de sus emisiones y la de otras fuentes en el aire (automoviles, aviones hornos industriales, etc.) reduce los efectos de los subproductos oxidantes generados.

Los oxidantes fotoquímicos producen efectos adversos en las materias vegetales que pueden afectar su crecimiento y la cantidad y calidad de los productos agrícolas. El deterioro de varios materiales, especialmente el hule, es también un efecto ya conocido de una atmosfera contaminada y que puede atribuirse principalmente a la presencia de ozono. El efecto mayor en los humanos es la irritación en los ojos y en cantidades mayores a las que típicamente se encuentran en atmósferas contaminadas los oxidantes tienen un efecto irritante en las vías respiratorias y también en padecimientos como dolores de cabeza y fatiga severa. En concentraciones bajas los efectos no están bien definidos sin embargo se atribuye también a los oxidantes el agravamiento de padecimientos respiratorios tales como el asma.

Ruido.

Otro podcuto final como contaminación al ambiente de instalaciones de calderas es el ruido generado por la caldera propiamente o por sus equipos auxiliares.

La solución de estos problemas generalmente es aceptable con la aplicación de materiales acústicos de los que hay una variedad amplia disponible. Los costos de éstos son aproximadamente los mismos independientemente de el tipo de instalaciones sobre la base de materiales y condiciones similares.

2.- Control de la Contaminación del Aire.

Por lo general los contaminantes del aire, aún en su fuente, se encuentran presentes a concentraciones muy bajas en los volúmenes grandes de un gas acarreador inerte. Después de su dispersión en la atmósfera los contaminantes del aire experimentan una dilución ulterior, de tal manera que su control es esencial antes de la emisión en la fuente o tan cerca de ésta como sea posible. Esto significa realizar el tratamiento en la planta más bien que en algún depósito central, como puede ocurrir con los desechos líquidos.

Un método para controlar la contaminación del aire que siempre se debería considerar es cambiar el método de operación de la planta, o sustituir los materiales no elaborados que se utilizan durante el proceso, para eliminar o reducir la contaminación, por ejemplo: mediante la utilización de gas como combustible en lugar de carbón o destilado, o mediante la modificación del proceso de combustión para producir menos CO o NO. Una opción diferente en el cambio de combustible es la tentativa de purificar ese combustible para eliminar su constituyente precursor del contaminante antes de introducirlo a la caldera industrial. La desulfuración y la eliminación de ceniza del carbón es un ejemplo importante de esta propuesta, sobre todo porque el uso del carbón como una fuente de energía en el futuro se va a incrementar conforme declinen los aprovisionamientos de gas y productos líquidos del petróleo.

Si las medidas de control económicamente asequibles son insuficientes para reducir las concentraciones atmosféricas a niveles "seguros", entonces puede ser necesario detener la producción en su totalidad. En ciertas circunstancias, la carga adicional de la industria en áreas urbanas causa concentraciones de contaminantes que exceden los límites aceptables; en estas circunstancias, la reubicación puede ser la respuesta. Así, la electricidad, la cual alguna vez se generó en las ciudades principalmente, ahora se produce con más frecuencia en estaciones de energía que se ubican cerca del suministro de combustible.

Así, el control de la contaminación del aire no es sólo un asunto de control técnico de los procesos que generan contaminantes de aire, sino que implica un patrón complejo de factores económicos, planificación urbana y controles legislativos.

Las fuentes de contaminación del aire producen mezclas gaseosas, partículas finas o ambas. La forma clásica de contaminación del aire es el humo, partículas finas de material carbonoso de combustión incompleta y la ceniza, las cuales con frecuencia proceden del equipo de combustión pobre y sobrecargado. En parte esto se puede, y generalmente de manera adecuada, controlar mediante un mejor diseño del equipo de combustión, ajuste cuidadoso de quemadores y prevención de condiciones de sobrecarga causadas, por ejemplo, por cambios repentinos en la demanda. Otras posibilidades son cambiar de combustible o tipo de sistema de combustión.

⁶En Zurich, Suiza, miles de calderas domésticas que funcionan con petróleo se han ajustado o modificado por orden de las autoridades municipales en su campaña para reducir la contaminación.

Control de Gases.

Para que los gases se puedan controlar es necesario remover los

de su ambiente gaseoso ya sea hacia una superficie sólida o líquida, donde se retienen en forma preferencial, o donde reaccionan para sintetizar una especie no contaminante original. Los procesos que se utilizan son variaciones de los métodos que se emplean para colectar gases con concentración, es decir, absorción dentro de un líquido (fricción) y absorción sobre una superficie sólida ya sea con o sin reacción.

Control de Partículas.

La primera forma ampliamente reconocida de contaminación del aire fue el humo, partículas finas de carbono que se originan de la ignición incompleta de combustibles, y ceniza inorgánica que procede de la materia no combustible que se encuentra dentro del combustible. Aún las plumas muy espesas de humo pueden representar concentraciones relativamente bajas de 2 ó 3 gm^3 , lo cual corresponde al orden de partes por millón por volumen para el rango de densidades que se encuentran en las emisiones. Los reglamentos para el aire limpio en la mayoría de los países requieren una reducción en la concentración de humo a 0.1 gm^3 o aún menos, del orden de partes por diez millones. En el caso de humo, tales concentraciones son aún perceptibles a simple vista.

En términos más generales, el control de partículas contaminantes del aire implica pasar la corriente de gas que contiene las partículas a través de una cámara y permitir que una fuerza actúe sobre las partículas para sacarlas de la corriente de gas. El método elegido depende de varios factores incluso naturaleza de la operación de la planta, si la emisión es cíclica o continua, y si es probable que varíe a diferentes horas del día. Esto es importante ya que algunos colectores de polvo son más adecuados para operación discontinua que otros y algunos colectores son inadecuados para su uso con emisiones variables. También se requiere información acerca de la naturaleza de las partículas, sus dimensiones, forma, densidad, estado (si es líquido o sólido), composición química y conductividad eléctrica. Para finalizar es necesario conocer las propiedades del gas en el cual las partículas se encuentran suspendidas, en particular su temperatura y composición química. Por ejemplo, las emisiones de temperatura elevada pueden acarrear cantidades grandes de vapores condensables en fase de gas. Los más importantes de estos son agua y vapores ácidos (por ejemplo ácido clorhídrico, ácido sulfúrico y ácido nítrico); su presencia dicta la temperatura a la cual se debe operar el aparato de limpieza de gas y en algunos casos, la resistencia a la corrosión de los materiales con los cuales se fabrica.

Se debiera comprender que cuanto mayor sea la eficiencia de recolección, superior será el costo tanto del colector como de su operación. En general esta relación es exponencial, el costo

aumenta al doble para un incremento en eficiencia desde el 90% hasta el 99% se cuadruplica para un incremento del 99.9% al 99.99%.

Los contaminantes residuales se liberan hacia la atmósfera, idealmente a niveles que se consideran inofensivos por completo. Esta liberación con frecuencia se realiza mediante dilución al utilizar chimeneas elevadas, las cuales emiten a los contaminantes hacia la atmósfera a una altitud suficiente para asegurar alguna dilución antes de que ocurra un contacto a nivel de la tierra. Los gases efluentes tienen cierta velocidad, y por lo general, son más calientes que la atmósfera. Esta energía cinética y la flotabilidad adicional elevan la emisión sobre la parte más alta de la chimenea, donde la turbulencia y la difusión la mezclan con la atmósfera. Esto diluye al efluente y disminuye la concentración máxima probable a nivel de tierra por medio de una cantidad que es aproximadamente proporcional al cuadrado de la altura efectiva de la chimenea (donde la altura efectiva es la suma de la altura real, la velocidad de ascensión y la flotabilidad de ascenso de la pluma). La forma exacta que tomará la pluma y con qué efectividad se diluye antes de ponerse en contacto con la tierra es una función de la estabilidad de la atmósfera. En la Fig. se muestran las plumas características que corresponden a las condiciones de las tasas de declinación que se observan comúnmente.

Cuando el terreno no es uniforme, como rara vez sucede, interfieren otros factores. Respecto a las chimeneas, el factor más común es el incremento en difusión hacia abajo que ocurre sobre el lado de sotavento de los edificios. Esto puede afectar las capas de aire, hasta dos veces la altura del edificio (Fig.).

En consecuencia, las chimeneas cortas comunes sobre edificios comerciales y residenciales, las cuales son adecuadas para conseguir que se "arrastre" aire a través del fuego en la caldera o sistema de incineración, no son suficientes para proveer una dispersión buena de los gases de desecho. La regla para una dispersión buena es construir la chimenea al menos dos y media veces la altura de los edificios adjuntos o vecinos.

RECUPERACION DE CALOR

ING. MARTINIANO AGUILAR RODRIGUEZ

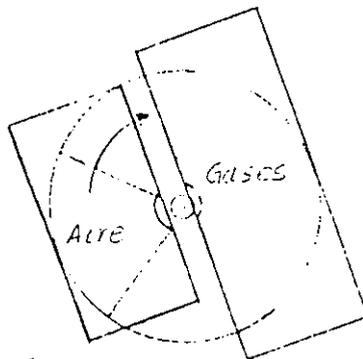
X. LA RECUPERACION DE CALOR

PRECALENTADORES DE AIRE

Los precalentadores de aire son equipos de calentamiento en donde se calienta al aire para la combustión. De acuerdo con el medio de calentamiento, existen dos tipos básicos de precalentadores de aire:

- . Precalentadores de aire con gas (regenerativo y tubular o recuperativo), mostrados en la Fig.
- . Precalentadores de aire con vapor.

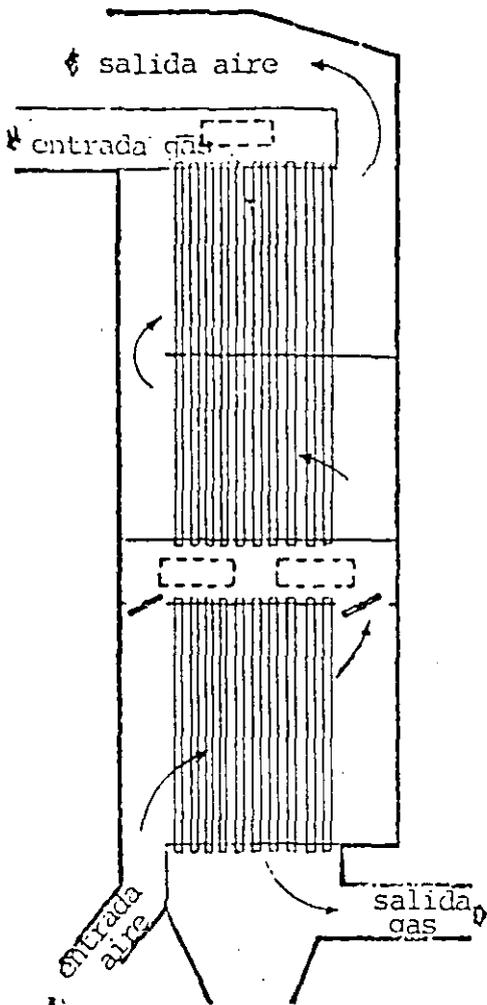
Los precalentadores de aire regenerativos se emplean en casi todas las calderas modernas, de los cuales el más conocido es el Ljungstrom, mostrado en la Fig. , que consiste de un rotor con elementos de calentamiento (canastas), que gira de 2 a 6 rpm; el interior del rotor se divide en 8 ó 12 sectores, de los cuales cerca del 25% se usan para el paso del aire y más o menos el 40% para el paso de gases, como se muestra en la Fig. siguiente.



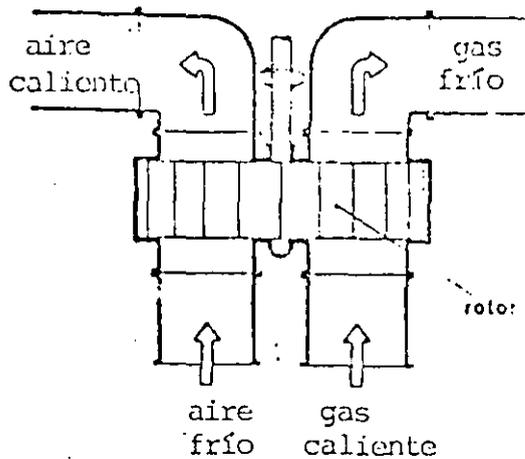
De los precalentadores regenerativos, además del Ljungstrom, se emplea también el Rothemuhle mostrado en la Fig. en donde las placas son estacionarias.

Los elementos de calentamiento (canastas) se calientan por los gases de combustión cuando pasan a través del flujo de gases y ceden el calor al aire cuando pasan a través del flujo de aire.

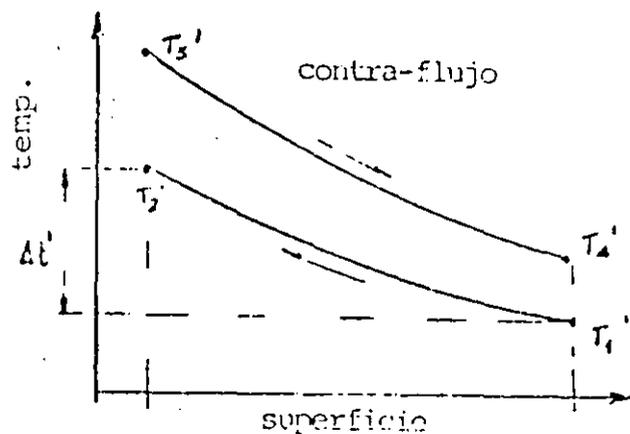
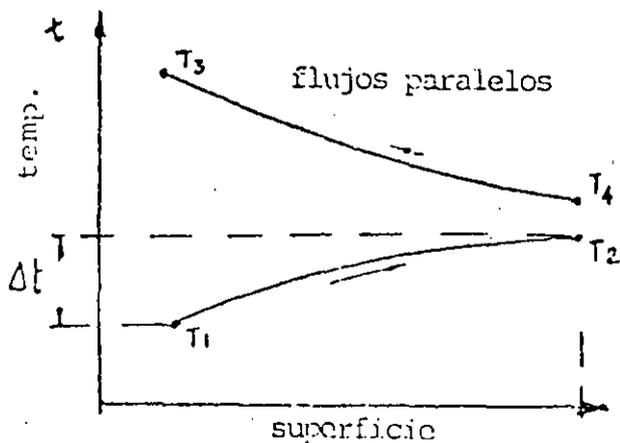
El eje del rotor puede ser horizontal o vertical, aunque se prefiere el segundo por facilidad de limpieza.



PRECALENTADOR DE AIRE RECUPERATIVO, TUBULAR O DE SUPERFICIE



PRECALENTADOR DE AIRE REGENERATIVO O ROTATORIO



-DIAGRAMAS DE TEMPERATURAS DE FLUIDOS EN PRECALENTADORES DE AIRE DE SUPERFICIE ($\Delta t' > \Delta t$)

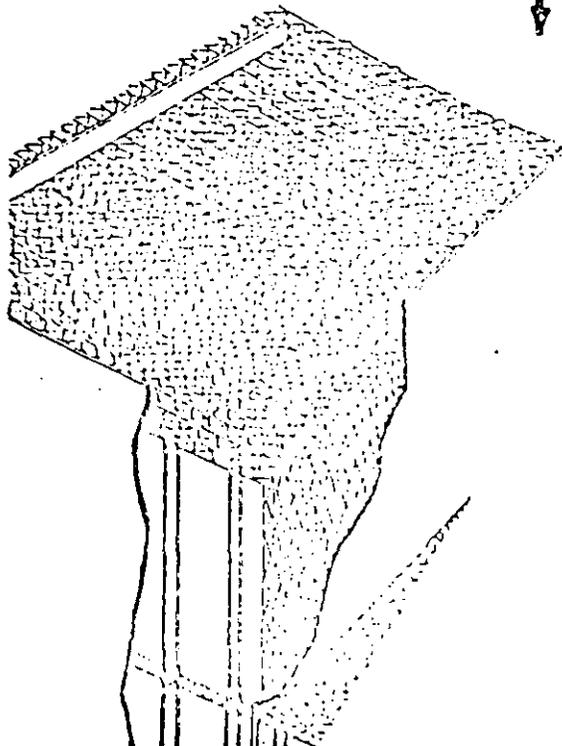
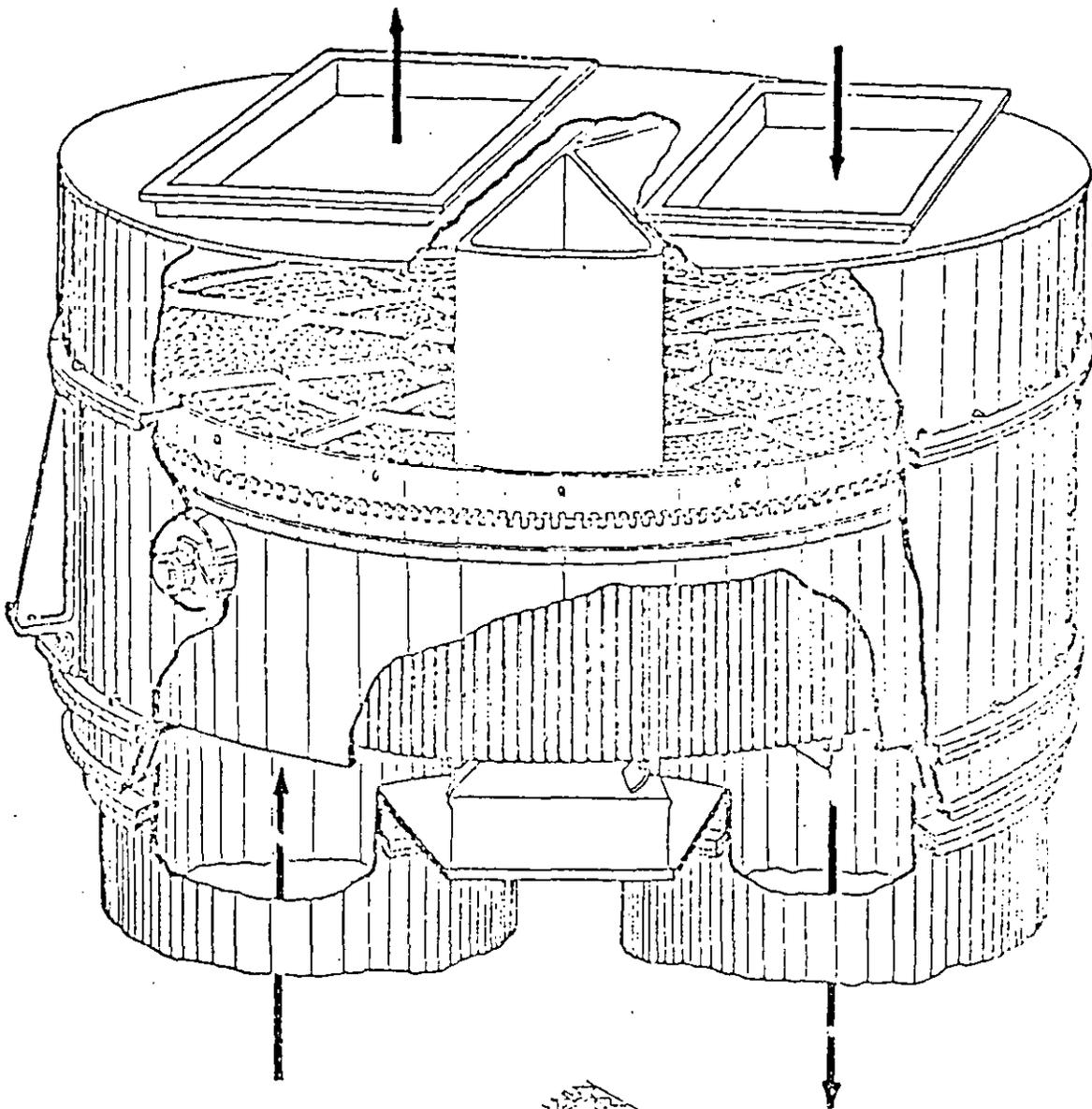
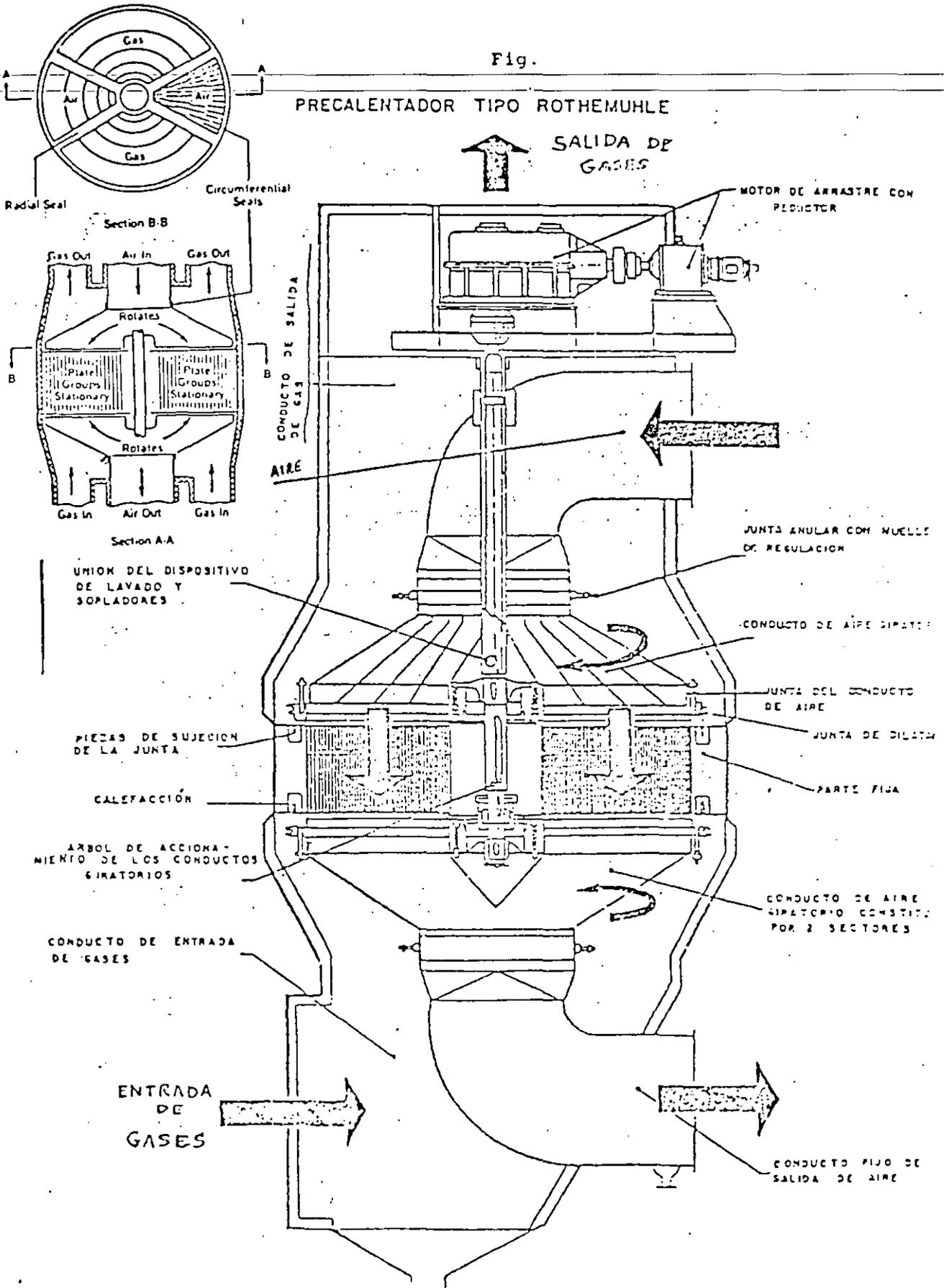


FIG. 1
PRECALENTADOR DE AIRE
TIPO LJUNGSTROM

Fig.

PRECALENTADOR TIPO ROTHEMUHLE



Las temperaturas de aire y gases normalmente empleadas en los precalentadores de aire regenerativos son las siguientes:

- . Temperatura de aire a la salida - 250 a 320°C
- . Temperatura de gases a la salida - 130 a 160°C

Los precalentadores de aire son considerados, al igual que los economizadores, superficies auxiliares de la caldera, cuyo objetivo funcional es el de precalentar en forma integral o parcialmente el flujo de aire necesario para la combustión. El efecto económico de los precalentadores incluye, por una parte, la utilización de una parte del calor contenido en los gases de combustión antes de evacuarlos por la caldera, y por otra parte, elevando la temperatura de combustión lo que produce una elevación del nivel de temperatura en todo el trayecto de los gases de combustión.

El enfriamiento de los gases de combustión en el precalentado de aire se limita al nivel en que las paredes del precalentador t_p en la zona más fría es todavía algunos grados más alta que la temperatura de rocío t_r de los gases de combustión en la siguiente forma:

$$t_r < t_p \cong \frac{t_g \alpha_1 + t_a \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2}$$

En donde:

t_g = temperatura de los gases a la salida de la caldera

t_a = temperatura del aire a la entrada del precalentador

α_1 = Coeficiente de convección en la parte de gases.

α_2 = Coeficiente de convección en la parte de aire.

Una disminución en la temperatura de los gases en el precalentador de aire de 15 a 25°C produce un aumento en el rendimiento de la caldera de aproximadamente 1%. El límite superior de calentamiento del aire depende del tipo de combustible utilizado para la combustión, alcanzándose cerca de 720° K en el caso de la combustión de carbón con alta humedad.

Los tipos de fabricación de precalentadores de aire son variables pero los más importantes son los que se fabrican de tubos lisos y los de tipo rotativo.

En el caso de los precalentadores de tubos lisos o tubulares, los fascículos de tubos están bañados en el interior longitudinalmente por los gases de combustión y en el exterior por el aire que se precalienta, ya sea en forma sencilla transversal o de un sistema mixto transversal-contracorriente. Los gases de combustión son siempre dirigidos por el interior de los tubos para facilitar la eliminación de los depósitos. Los fascículos se fabrican de tubos con diámetros de lo más pequeño admisibles, tomando en cuenta el peligro de obturación por depósitos; así en el caso de combustible gaseoso o líquido se admiten diámetros de 20 a 50 mm. con espesores de pared de 1 mm y en el caso de combustibles sólidos, tubos de 50 a 100 mm con espesores de pared de 1 a 3 mm. El material de los tubos puede ser de acero o latón. Cuando la longitud de los tubos es mayor de 3 a 4 m el fascículo se fracciona en 2 ó más partes llamadas paquetes.

En calderas grandes, para disminuir el volumen ocupado por el precalentador de aire, se emplea el tipo de fabricación rotativo de los cuales el más conocido es el Ljungstrom; éste precalentador forma parte del grupo de intercambiadores de calor regenerativos que utilizan un material intermedio de acumulación de calor, en este caso de placas. El precalentador está formado por una carcasa exterior de placa o fundida, que se coloca a la entrada y salida de aire y gases de combustión; en el interior de la carcasa se haya un rotor formado de múltiples paquetes (canastas) de placas delgadas de 0.3 mm a una distancia pequeña una de otra y el rotor gira de 1 a 6 rpm.

Las ventajas

res de radiación teniendo en cuenta la variación relativa reducida de la temperatura del hogar con el flujo de la caldera, la temperatura del vapor sobrecalentado disminuirá con la carga de la caldera.

Para mantener constante la temperatura de vapor sobrecalentado se usa el enfriamiento del vapor (normalmente en forma automática) - por la inyección dentro del vapor sobrecalentado de un cierto flujo de agua o vapor saturado para mantener el nivel fijado de temperatura final. Otra posibilidad de regulación de la temperatura es la combinación en cierta proporción de sobrecalentadores convectivos con sobrecalentadores radiantes en la misma caldera con lo que la temperatura final puede mantenerse constante dentro de una variación de unos 10°C. En las Figs. VIII-9 y VIII-10 se muestran - otros tipos de soportes o apoyos de sobrecalentadores y recalentadores.

2.- ECONOMIZADORES

Los economizadores son equipos de calentamiento en donde se calienta el agua de alimentación que se suministra a la caldera; en las subcríticas, el calentamiento del agua se hace antes de entrar al domo.

Normalmente la temperatura del agua a la salida del economizador - está abajo del punto de ebullición, excepto en algunos casos de - economizadores-evaporadores en donde se calienta el agua hasta evaporarla.

El economizador es un elemento de la caldera destinado a precalentar el agua de alimentación antes de introducir ésta en el domo y sistema hervidor; la denominación de economizador proviene del hecho de que colocado en la zona de gases de combustión después del fascículo hervidor, esta superficie puede utilizar una parte de la entalpia de los gases de combustión elevando en esta forma el rendimiento de la caldera y economizando un flujo importante de combustible. En instalaciones de calderas grandes a veces los economizadores toman una pequeña parte de carga de vaporización (de 10 a 15%)

convirtiéndose así en economizador vaporizador, disminuyendo los fascículos hervidores convectivos necesarios.

Los economizadores se fabrican de tubo de acero colocados en serpentines rectos formando fascículos en línea o alternados; la cabeza de los tubos se une en colectores que son sostenidos con la ayuda de placas planas. Para evitar el remanso o calma de la circulación interior, los economizadores se diseñan con una velocidad mínima de circulación de agua de .2 a .3 m/s. Cuando el número de serpentines ligados en paralelo es grande, se puede fraccionar en el colector por la pared interior ligando el paso entre partes de colectores superior e inferior por el lado exterior, pero manteniendo la circulación en todos los serpentines de abajo hacia arriba. Los tubos utilizados en la fabricación de serpentines son normalmente de diámetro pequeño (aproximadamente 38 mm), para disminuir las dimensiones del fascículo y para intensificar el cambio de calor.

En algunas ocasiones se emplean tubos con aletas para el economizador para aumentar el área de la superficie de calentamiento, - que de acuerdo con el tipo de aletas que se usen, se les denomina en la siguiente forma:

- . Economizadores con tubos de aletas rectas (Fig. VIII-11).
- . Economizadores con tubos de aletas en espiral circunferencialmente (Fig. VIII-11).

Actualmente, el tamaño relativo de los economizadores ha disminuido con relación a las calderas antiguas debido a lo siguiente:

- . Uso de temperaturas más altas de vapor sobrecalentado y recalentado que reducen la temperatura de los gases a la entrada del economizador.
- . Aumento de la temperatura del agua de alimentación.
- . Necesidades de aire a temperatura más caliente para el secado y combustión eficiente del carbón.

Los requerimientos de diseño de los economizadores se establecen para satisfacer las condiciones siguientes:

- . Reducir la temperatura de una cantidad conocida de gas a un valor específico.
- . Representar la superficie mínima para un tipo particular de economizador.
- . Ajustar dimensionalmente con los componentes de la unidad que le precedan, que usualmente son el sobrecalentador y/o recalentador primario.
- . Ser de una altura total mínima y contruidos en bancos, cada uno de los cuales limitado a la altura a la cual pueda ser limpiado eficientemente bajo carga.
- . Tener espacio adecuado entre los bancos para la instalación del equipo de limpieza bajo carga.
- . Tener una pérdida de tiro mínima en el lado de gases
- . Ofrecer la menor resistencia al flujo de agua y una distribución de flujo de agua uniforme a través de lo ancho de la unidad; el flujo no-uniforme puede resultar en la formación local de vapor que causa restricciones al flujo con fallas debido a sobrecalentamiento del tubo.
- . Estar soportado en tal forma que haya tolerancias amplias para expansión bajo todas las condiciones de operación sin causar esfuerzos excesivos en cualquier componente.
- . Tener soportes y espaciadores adecuados de tubos para mantener el paso de los tubos razonablemente cerca de los valores de diseño para prevenir que los tubos se pandeen o deflexionen indebidamente.
- . Tener una conexión de recirculación de agua del domo de vapor y agua al cabezal de entrada del economizador, para permitir libre circulación de agua a través del economizador y prevenir sobrecalentamientos y evaporación en seco durante los períodos cuando no hay alimentación de flujo a la caldera, por ejemplo, en las etapas al principio de elevación de presión en los arranques.

CONTROL DE CONTAMINACION Y USO DE ENERGIA EN CALDERAS.

SISTEMAS DE CONTROL DE COMBUSTION

ING. MARTINIANO AGUILAR RODRIGUEZ

1.- FUNDAMENTOS PARA CONTROLAR DE COMBUSTION

En una instalación de combustión es necesario que se efectúe un control del proceso de combustión, tomando en cuenta dos dimensiones importantes:

- medida en que la combustión está completa
- exceso de aire

Según se ha visto, una combustión completa esta caracterizada por la existencia en los gases de combustión de las sustancias finales de la reacción:

CO₂
SO₂
H₂O

Si el proceso de combustión no se ha terminado, aparecen los siguientes productos de combustión incompleta:

CO
H₂
CH₄, etc.

La presencia de estos productos en los gases de combustión constituyen una perdida debido a que no se ha desarrollado y no se ha utilizado el calor de oxidación; en consecuencia, la primera etapa en el control de combustión consiste en determinar la existencia en los gases de combustión de los componentes CO y H₂.

El análisis de gases de combustión se hace con la ayuda de analizadores químicos; el análisis mencionado se efectúa sobre gases de combustión secos. En la extracción de gases hasta el analizador, el agua (vapor) se condensa y se separa de los gases de combustión. La cantidad de gases secos es la siguiente:

$$V_{g \text{ sec}} = V_g - V_{H_2O}$$

En consecuencia, los gases de combustión analizados en una combustión completa se componen de:

CO₂
SO₂
N₂
O₂

y en una combustión incompleta se producen:

CO₂
CO
SO₂
H₂
CH₄
N₂
O₂

En todos los casos, la suma de los componentes es 100%; la participación de cada componente representa la presión parcial del gas con respecto a la mezcla.

La condición de una combustión completa es:



Condición que constituye la primera verificación en el control de combustión.

Si los componentes de combustión incompleta no son nulos, entonces existen dos posibilidades.

- 1a.- Que $O_2 = 0$; esto muestra que no existe oxígeno sobrante en los gases de combustión y que la combustión incompleta se debe a falta de aire suficiente en el quemador. La solución en este caso es inyectar aire suficiente para la combustión completa.
- 2a.- Que $O_2 \neq 0$; esto muestra que a pesar de la existencia de un exceso de aire la combustión se mantiene incompleta. La solución en este caso es una investigación detallada en el quemador y en el hogar para determinar las causas que no permiten una combustión completa.

Una segunda verificación que se hace en el control de combustión es la determinación del exceso de aire con que se hace la combustión; el efecto negativo de un exceso de aire incorrecto se analiza por separado.

El exceso de aire α , se determina por la relación:

$$\alpha = \frac{CO_2 \text{ max}}{CO_2}$$

en donde:

CO_2 = concentración obtenida en la medición efectuada

$CO_2 \text{ max}$ = concentración de CO_2 que se obtendría en una combustión perfecta, con el aire mínimo necesario para la combustión es decir, $\alpha = 1$.

El valor de CO_2 máximo se puede determinar por cálculo, para combustibles cuya composición no varía en límites grandes, siendo conocidos y tabulados; así se tienen los siguientes valores:

$CO_2 \text{ max} = 15.8\%$ para aceites combustibles derivados del petróleo (combustóleo, gasóleo, diesel, nafta, diáfono).

$CO_2 \text{ max} = 11.5\%$ para gas natural.

La justificación teórica de la relación $\alpha = CO_2 \text{ max}/CO_2$, es la siguiente: la proporción máxima de CO_2 en los gases de combustión secos es:

$$CO_2 \text{ max} = \frac{V_{CO_2}}{V_{go \text{ sec}}}$$

en donde:

$$V_{go \text{ sec}} = V_{CO_2} + V_{N_2}$$

Para un exceso de aire $\alpha = 1$, la proporción de CO_2 en los gases secos de combustión va a ser más pequeña, según:

$$CO_2 = \frac{V_{CO_2}}{V_{go \text{ sec}} + (\alpha - 1) V_0}$$

Sustituyendo la relación $CO_2 \text{ max}/CO_2$, resulta:

$$\frac{CO_2 \text{ max}}{CO_2} = \frac{V_{go \text{ sec}} + (\alpha - 1) V_0}{V_{go \text{ sec}}}$$

Debido a que prácticamente siempre $V_{g \text{ sec}} = V_o$ (la cantidad de nitrógeno no cambia y de la combustión de un mol de O_2 resulta en total un mol de CO_2), se verifica la relación $E = CO_2 \text{ max}/CO_2$.

Entre los componentes de los gases de combustión y el exceso de aire existe una relación bien definida; para aplicaciones prácticas es interesante estudiar la interrelación entre los elementos CO_2 , O_2 , CO y . . .

De estos, dos de ellos (CO_2 y O_2) se determinan por análisis y los otros dos (CO y . . .) pueden obtenerse de la interrelación que existe; de esta forma, dicha interrelación puede usarse para determinar el exceso de aire en caso de combustión incompleta.

La interrelación se establece gráficamente en la forma de un monograma denominado triángulo de combustión o diagrama de Ostwald; entre CO_2 y O_2 se establece la interrelación lineal siguiente:

$$CO_2 = \frac{V_{CO_2}}{V_{go \text{ sec}} + \frac{100}{21} V_{O_2}}$$

$$O_2 = \frac{VO_2}{V_{go \text{ sec}} + \frac{100}{21} VO_2}$$

en donde en término $100 V_{O_2}/21$, representa la cantidad de aire en exceso. Dividiendo éstas interrelaciones se obtiene:

$$\frac{O_2}{CO_2} = \frac{VO_2}{V_{CO_2}}$$

$$VO_2 = \frac{O_2}{CO_2} V_{CO_2}$$

Sustituyendo este valor de VO_2 en la interrelación de CO_2 resulta:

$$CO_2 = \frac{V_{CO_2}}{V_{go \text{ sec}} + \frac{100}{21} \frac{O_2}{CO_2} V_{CO_2}}$$

$$CO_2 V_{go \text{ sec}} + \frac{100}{21} O_2 V_{CO_2} = V_{CO_2}$$

debido a que $V_{CO_2}/V_{g \cdot sec} = CO_2 \max$, se obtiene:

$$CO_2 + \frac{100}{21} O_2 \cdot CO_2 \max = CO_2 \max$$

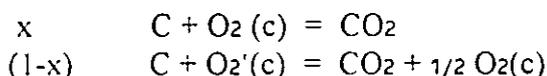
Esta ecuación es una recta con coordenadas $CO_2 - O_2$, con los siguientes puntos característicos:

$$\begin{array}{ll} CO_2 = 0 & O_2 = 21\% \\ CO_2 = CO_2 \max & O_2 = 0\% \end{array}$$

En forma similar se demuestra que $\dots = 1$, es una recta con ecuación:

$$x CO_2 + (1-x) CO + 1/2 (1-x) O_2 + (N_2 + SO_2) = 1$$

en donde se ha considerado que la combustión se produce completa en la proporción x , e incompleta en la proporción $(1-x)$:



y la cantidad de gases que resulta es:

$$x V_{CO_2} + (1-x) V_{CO} + 1/2 (1-x) V_{O_2 (c)} + V_{(N_2 + SO_2)} = V_{g \cdot sec}$$

Los puntos característicos de la recta descrita en la ecuación de $\dots = 1$, son:

$$CO_2 = 0 \quad \underline{x=0} \quad O_2 = (O_2)_{co}$$

$$CO_2 = CO_2 \max \quad \underline{x=1} \quad O_2 = 0\%$$

en donde $(O_2)_{co}$ representa la concentración de oxígeno en los gases de combustión cuando la combustión se hace solo hasta CO y existe oxígeno disponible para la combustión completa estequiométrica.

2.- CONTROL O REGULACION DE LA CALDERA

Con objeto de efectuar un control y seguridad en el funcionamiento del Generador de Vapor o Caldera, así como asegurar los parámetros del agente térmico (vapor o agua caliente) al usuario, se requiere incorporar a la caldera varios equipos o sistemas para apoyar al operador o efectuar por si mismos, control, disparos o ajustes automáticos de operación.

El equipo que comprende los sistemas anteriores puede ser clasificado en los siguientes grupos principales.

- . Indicadores, registradores (presión, temperatura, nivel flujo, amperaje).
- . Controladores (flujo, presión, temperatura, nivel, etc.).
- . Sensores (temperatura, ambiente, calidad de gas, etc.).
- . Actuadores (varios tipos).
- . Alarmas (alta prioridad-emergencia, información).
- . Interbloqueos (permisivos)
- . Dispositivos de medición de flujo (combustóleo, agua, vapor, aire, gases de combustión).
- . Dispositivos de medición de calidad (gases de combustión, agua, vapor).

Los equipos anteriores, pueden tener en donde es aplicable, algunos auxiliares como switch límite, switches de flujo, elementos primarios, contactos múltiples, etc.

CONTROL O REGULACION (AUTOMATIZACION)

La instalación de automatización, tiene el objeto de efectuar la regulación sobre un cierto número de medidas regulables de la caldera:

- . Flujo de combustible
- . Flujo de aire
- . Flujo de gases de combustión evacuados
- . Flujo de agua
- . Temperatura de vapor sobrecalentado (y recalentado en su caso)

De éstas medidas regulables, tienen una correlación directa las siguientes:

- . Flujo de combustible
- . Flujo de aire
- . Flujo de gases de combustión.

Las medidas regulables independientes son:

- . Flujo de agua (con relación al nivel de agua establecido en el domo)
- . Temperatura de vapor sobrecalentado (y recalentado).

REGULACION DE COMBUSTION

La regulación de combustión comprende la regulación de alimentación de combustible, alimentación de aire y la evacuación de gases de combustión (en calderas de tiro balanceado) para mantener una depresión normal en el hogar; éstas tres medidas regulables se correlacionan entre ellas y en forma conjunta determinan la carga de funcionamiento de la caldera. La regulación de éstas tres medidas se hace con un bloque de automatización, que en cada sistema de regulación (hidráulico, neumático, eléctrico o electrónico), está formado por los siguientes elementos principales:

- . Un captador o sensor que es un transductor del impulso sobre la dimensión medida.
- . Un relevador que recibe el comando del sensor y produce una variación de cierto sentido de energía de accionamiento.
- . Un servomotor que recibe energía dentro de un cierto sentido del relevador, transformándolo en energía mecánica (trabajo mecánico de comando).
- . Un órgano o elemento de comando que acciona directamente sobre el flujo de alimentación.

En ciertos bloques de automatización, puede ser necesario un órgano suplementario llamado relevador de correlación; éste relevador es comandado simultáneamente por dos medidas, de dos captadores o sensores, asegurando la correlación entre ellos. Los relevadores de correlación se emplean cuando entre dos medidas regulables debe existir una cierta relación permanente, éste es el caso del flujo de aire y el flujo de combustible, que deben estar siempre dentro de una relación fija para mantener el exceso de aire prescrito.

Otro órgano que puede intervenir en los componentes del bloque de automatización es el relevador de reajuste; este relevador es necesario cuando el tiempo de respuesta al equipo frente al impulso recibido tiene un cierto valor relativamente grande. En éste caso, la acción hecha se percibe en la variación del parámetro regulable con un retraso relativamente grande, y en consecuencia es necesario efectuar una primera acción con un relevador de reajuste en posición inicial de relevador de comando, antes de que se produzca la respuesta con retraso del parámetro regulable.

En la Fig. , se muestra un esquema de automatización de combustión de una caldera, observándose los tres bloques de regulación de combustión:

- . Combustible
- . Aire
- . Tiro.

Debido a que entre todos estos elementos debe existir una cierta proporcionalidad, el impulso principal es recibido del regulador principal de la caldera; el regulador principal, es un transductor de presión montado en el conducto que conduce el vapor al usuario. Siendo el flujo de vapor suministrado al usuario el elemento final regulado, es evidente que la presión del vapor debe mantenerse constante; por lo demás la presión del vapor suministrado es un parámetro que responde primero en el caso de la existencia de una no-concordancia entre el flujo de la caldera y el flujo suministrado al usuario.

El regulador principal transmite un impulso al bloque de combustible; este impulso es recibido por el sensor o captador y transmitido al relevador que acciona el servomotor. El servomotor acciona directamente, por un sistema mecánico, sobre el dispositivo de alimentación.

La modificación de la alimentación de combustible no puede percibirse inmediatamente en la forma de aumento de presión en la tubería de vapor, sin embargo para que el comando de aumento a la alimentación no pueda tener una duración larga y en consecuencia el sistema de automatización entre en penduleo no-amortiguado, un relevador de reajuste da el comando de paro a una acción del relevador cuando el flujo de combustible aumenta. El relevador de reajuste está comandado por el mismo valor del flujo de combustible por medio de un captador o sensor en el medidor de flujo.

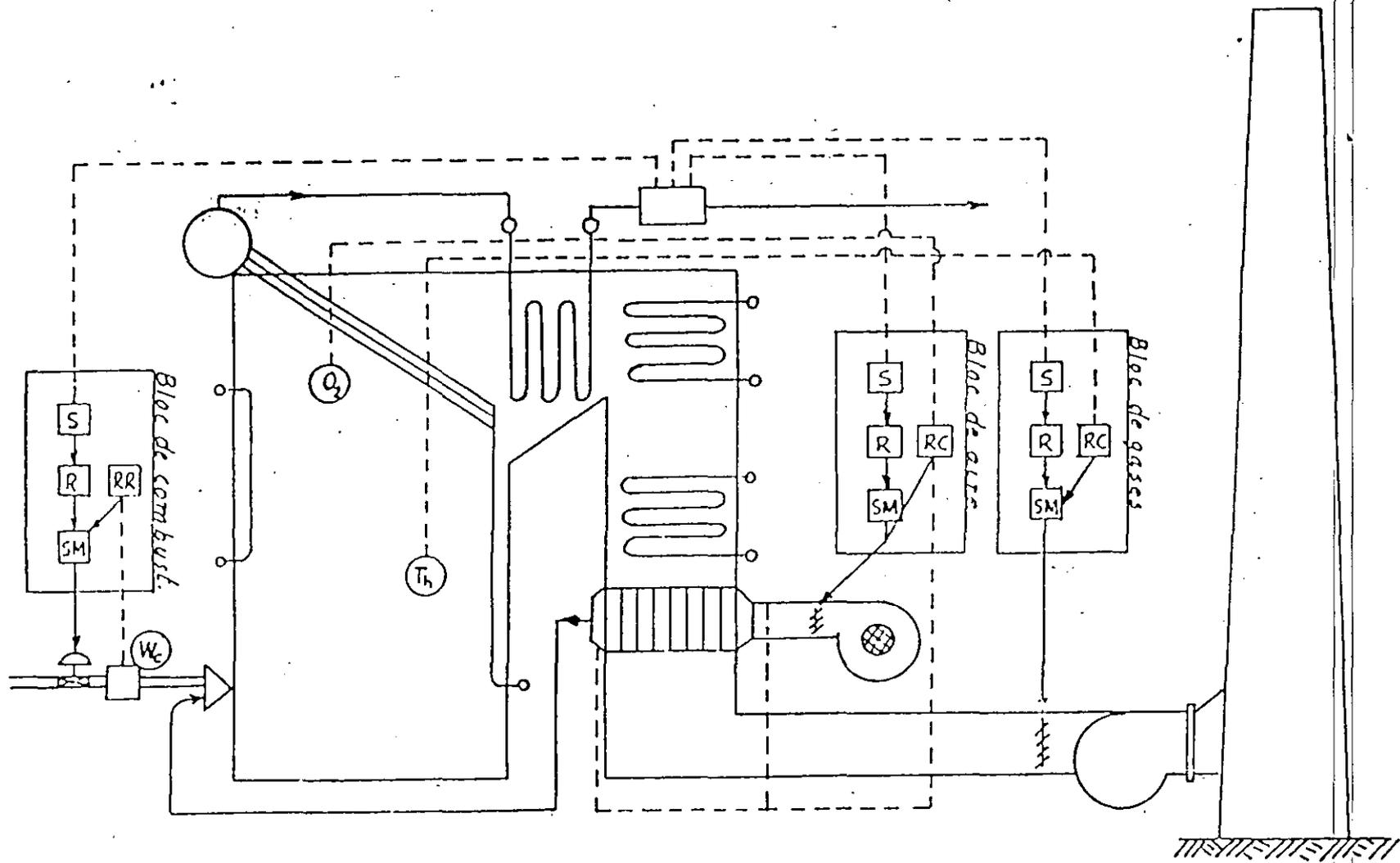


FIG. 1. - ESQUEMA DE AUTOMATIZACION DE COMBUSTION DE UNA CALDERA

Al mismo tiempo, el regulador principal comanda al bloque de alimentación de aire; el bloque de aire recibe el impulso en el sensor o captador y los transmite al relevador que acciona el servomotor. El servomotor cierra o abre las persianas o compuertas de entrada de aire, modificando la cantidad de flujo de aire inyectado, pero como en esta automatización se tiene un retraso en la respuesta relativamente grande, se necesita un relevador de reajuste; este relevador está comandado por una medición de flujo de aire suministrado por el ventilador, acostumbrándose medir el flujo de aire por la caída de presión a través del precalentador de aire (p_{pa}). Una vez que por la variación del flujo de aire el relevador de reajuste para la acción del servomotor, se suspende de este modo el impulso.

Existe la posibilidad que entre el bloque de combustible y el bloque de aire se tenga un enlace directo por medio de un relevador de correlación; este es un tercer impulso utilizado para mantener la proporcionalidad entre el flujo de combustible y aire. Este impulso suplementario de correlación puede obtenerse por la medición automática de un parámetro de composición de los gases de combustión (CO_2 o más bien O_2); éste parámetro puede dar el comando suplementario al bloque de aire para realizar la proporcionalidad aire-combustible.

El regulador principal acciona un tercer bloque; el bloque de regulación de depresión en el hogar. Por medio de un sensor, un relevador y un servomotor, se comanda a las persianas o compuertas de regulación instaladas en la sección del ventilador de tiro inducido; ésta variable, es la depresión en el hogar debida a la variación del flujo de gases evacuados de la instalación. El bloque de tiro, tiene una respuesta rápida y en consecuencia no es necesario un impulso de corrección que se tome del elemento regulado, la medición de la depresión en el hogar, de ésta medida, un sensor o captador introduce el impulso tomado. Cada desajuste en la depresión normal en el hogar, comanda al flujo de gases evacuados de la instalación aunque el regulador principal no entre en acción.

3.- TIPOS DE SISTEMAS DE CONTROL AUTOMATICO DE COMBUSTION PARA CALDERAS.

La operación satisfactoria de una planta de calderas, de cualquier tamaño o número de unidades, requiere que la mas alta eficiencia posible en el uso de combustible se mantenga constantemente.

Para efectuar la economía de combustible se deben hacer todos los ajustes necesarios de compuertas, válvulas y otro equipo ajustable, cuando sea necesario y en la cantidad requerida.

El empleo de equipo automático para cumplir estos propósitos, asegura un monitoreo constantes de la operación y una coordinación de los ajustes; los dispositivos automáticos proveen una solución satisfactoria en todo el rango de tamaño de calderas y para cualquier combinación de quemado de combustible y de equipo auxiliar.

OBJETIVOS

Un sistema de control automático de combustión debe proveerse para el cumplimiento de las siguientes funciones.

- . Ajustar el suministro de combustible para asegurar la liberación de calor necesario para mantener la condición "maestra"; ésta es por lo general la presión de vapor, pero puede ser flujo de vapor o alguna otra medida de salida de la caldera.
- . Ajustar el suministro de aire de combustión en una relación apropiada al suministro de combustible y mantener la eficiencia óptima en el proceso de combustión.
- . Ajustar el equipo para mantener el régimen de remoción de productos de combustión al paso con el régimen al cual estos productos se crean en el proceso de combustión.
- . Proteger al personal y al equipo.
- . Minimizar la contaminación.

Algunos diseños de calderas requieren control automático para otras funciones, como por ejemplo:

- . Temperatura de vapor
- . Presión de aire de tiro forzado
- . Presión de succión (hogar) de tiro inducido
- . Temperatura de mezcla aire-carbón
- . Nivel de agua.

Aunque estos controles son separados, se deben coordinar con el control de los objetivos mencionados anteriormente.

SISTEMAS BASICOS DE CONTROL DE COMBUSTION.

El método seleccionado para controlar las entradas de combustible y aire está basado en las siguientes consideraciones:

- . Combustible o combustibles a ser quemados
- . Equipo físico a ser operado
- . Prácticas de ingeniería del fabricante de equipo de control de combustión.

Desde el punto de vista de control de aire y combustible, todos los sistemas de control de combustión puede clasificarse como:

- . Serie
- . Paralelo
- . Serie/Paralelo

La práctica de ingeniería de varios fabricantes resulta en muchas modificaciones de cada uno de estos tipos. Los diagramas funcionales de estos tipos se muestran en la Fig.

En el control serie, se monitorea ya sea el combustible o el aire y el otro se ajusta consecuentemente.

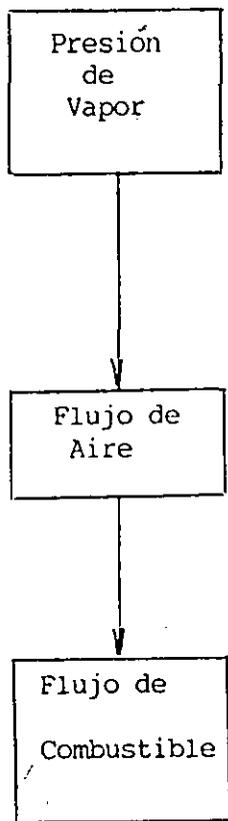
En los sistemas de control paralelos, los cambios en las condiciones de vapor resultan en cambios tanto en el flujo de aire como en el de combustible.

En los sistemas serie/paralelo, las variaciones en la presión del vapor afectan el régimen de entrada de combustible y simultáneamente el flujo de aire para la combustión es controlado por el flujo de vapor.

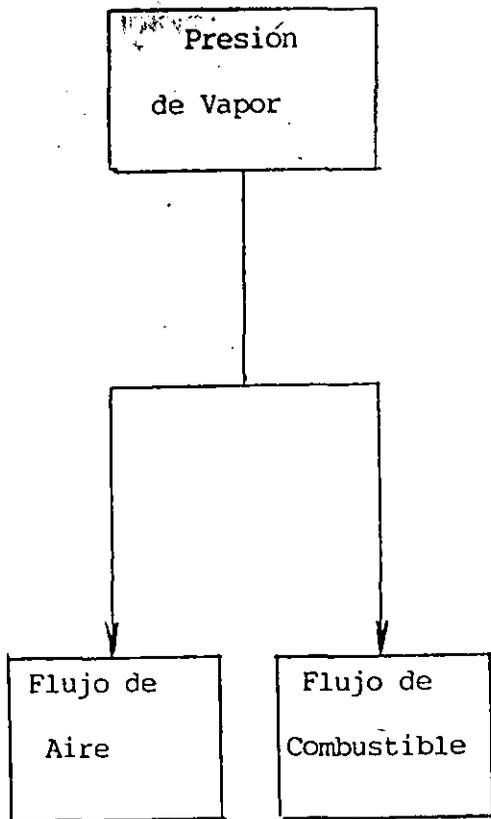
Los sistemas de control de combustión también pueden clasificarse como:

- . controles posicionadores;
- . controles de medición.

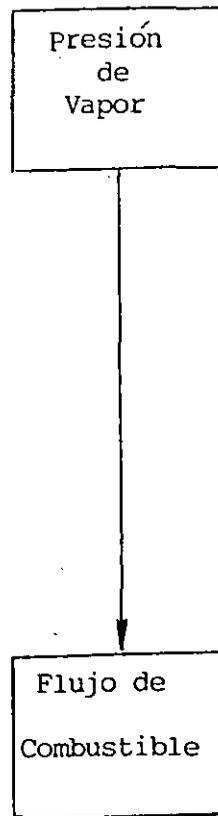
Los controles posicionadores responden a las demandas del sistema moviéndose a una posición pre-ajustada.



Serie



Paralelo



Serie/Paralelo

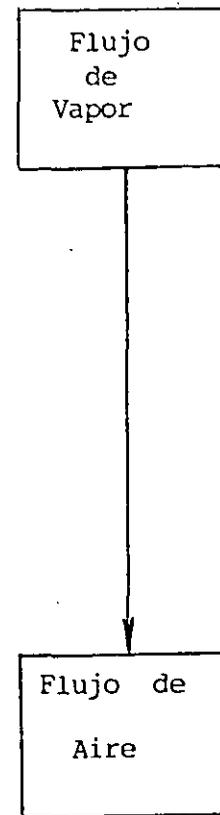


FIG. -- SISTEMAS BASICOS DE CONTROL DE COMBUSTION

En los sistemas de control por medición, la respuesta es controlada por la medición real de los flujos combustible y/o aire.

La aplicación y grado de control de combustión varía con el tamaño de la caldera y está influenciada por los costos.

Existe un rango de óptimo exceso de aire para cada combinación de combustible, modo de quemado y condiciones del horno.

Demasiado poco flujo de aire resulta en emisiones de combustible que son peligrosas, contaminantes y pueden contener cantidades considerables de energía sin usar. El nivel mínimo seguro de exceso de aire para quemadores convencionales por lo general se toman como 10% para gas combustible y 15% para aceite combustible, sin embargo, algunas aplicaciones específicas pueden requerir otros niveles.

Demasiado exceso de aire resulta en altos niveles de emisión de NO_x e incrementa el flujo de masa y pérdidas de energía en la chimenea. Con altos niveles de exceso de aire también se reduce la transferencia de calor dentro de la caldera, culminando en temperaturas más altas en la chimenea, perdiéndose combustible y pérdidas de comportamiento.

Todas las calderas tienen algún tipo de arreglo de control de combustión desde el simple control manual hasta los altamente sofisticados computarizados; la elección del tipo de sistema de control se hace bajo las siguientes bases:

- . capacidad de la caldera y respuesta dinámica requerida;
- . demandas de vapor y fluctuaciones esperadas en el flujo de vapor;
- . niveles de comportamiento esperado que requieran sistemas más sofisticados para eficiencias de operación más altas;
- . regulaciones de contaminación que requieran operación a bajos excesos para minimizar las emisiones de NO_x;
- . interbloques de seguridad.

La instrumentación en contraste con los controles de combustión, son elementos pasivos que presentan las condiciones de la caldera como existen pero es incapaz de detectar desviaciones de la operación deseada y tomar acciones correctivas sin el involucramiento de los sistemas de control o del operador, sin embargo, sin esta información es imposible determinar si el equipo está operando en las mejores condiciones o que acción correctiva es necesaria para restaurar el comportamiento.

Tipos de sistemas de control de combustión.

Existen seis tipos básicos de sistemas de control de combustión que son los siguientes:

- . posicionamiento fijo;
- . posicionamiento paralelo con atención del operador;
- . relación de presiones;
- . mediciones de combustible y aire;
- . mediciones cruzadas limitadas;
- . mediciones cruzadas limitadas con corrección por O₂.

El más común utiliza la presión de vapor para generar la señal maestra de control que se utiliza por cualquiera de los dos métodos de control: posicionador paralelo o posicionador serie.

A continuación se describen los seis tipos básicos de sistemas de control de combustión:

Posicionamiento fijo. - Un sistema de control de posicionamiento fijo simplificado se ha aplicado extensivamente a calderas industriales basado en el mínimo costo del sistema de control. Un solo actuador mueve a ambos dispositivos de control de combustible y aire a través de articulaciones mecánicas a una posición pre-ajustada en respuesta a un cambio en la presión de vapor, (Fig.).

El sistema se calibra ajustando las articulaciones para la carrera apropiada de las compuertas del ventilador y el perfil de la leva sobre la válvula de combustible para producir la relación aire/combustible deseada sobre el rango de la carga; por lo general se provee un control manual para supeditar al actuador principal.

Puesto que éste sistema solamente posiciona la válvula de control y la apertura de las compuertas de aire, no puede compensar por:

- . cambios en el combustible;
- . densidad del aire;
- . presión de suministro de combustible o válvula de calentamiento;
- . desgaste en el orificio de la válvula de combustible;
- . desgaste en las fichas de quemadores;
- . desgaste en las compuertas de ventiladores.

Una forma común de sistema de medición cruzada limitada es un sistema paralelo eléctrico o neumático usando la presión de vapor como controlador maestro; se provee un anulador (override) manual de la relación aire/combustible para acondicionar (trim) los niveles de exceso de aire.

Estos sistemas se emplean para prevenir una mezcla rica en combustible durante los cambios de carga, y se requieren porque en estas condiciones, la respuesta del combustible es mucho más rápida que la del sistema de aire. El retraso en la respuesta de suministro de aire se debe a: la naturaleza compresible del aire, la lentitud de respuesta de los posicionadores de compuesta y al cambio de velocidad en algunos ventiladores.

Los rangos de retraso se seleccionan para ajustarse de forma que se tenga en cualquier momento la disposición de aire suficiente para combustión evitando así la producción de humo durante los cambios de carga; por ejemplo, un selector de alta recibe la señal de demanda de combustible y la señal real de flujo de combustible. Este selector enviará el valor más alto de las dos a la compuesta de aire y lo tomará como el punto de ajuste para el flujo de aire requerido.

Por otra parte, un selector de baja compara las señales de demanda y el flujo de combustible que puede quemarse con el aire disponible, y envía la señal más baja de las dos a la válvula de combustible.

Medición cruzada limitada con corrección por O₂. Los efectos sobre el exceso de aire de las variaciones en el poder calorífico de combustible y las condiciones del aire para la combustión pueden ser eliminados empleando un monitoreo continuo en los gases de combustión de los niveles de O₂ para adaptar la relación aire/combustible; la caldera puede ser operada a un nivel de O₂ ajustado; resultando en un mínimo consumo de combustible.

Una alternativa de corrección es por la medición de CO, que opera también sobre el exceso de aire y presenta en algunos casos ventajas sobre la corrección por O₂.

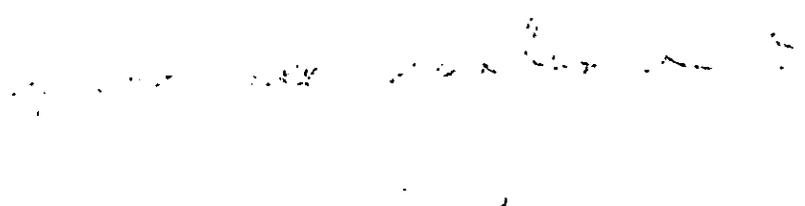
Al medir el CO en los gases de combustión se obtiene la cantidad de combustible no quemado; se ajusta la relación aire/combustible en el control para condiciones reales de combustión en lugar de los niveles de O₂ preestablecidos. En esta forma, el sistema de corrección por CO verifica continuamente la eficiencia máxima.

Una ventaja del sistema de corrección por CO es su independencia del tipo de combustible, y prácticamente no es afectado por las infiltraciones de aire que se presentan en calderas que operan con presión negativa en el horno y conductos de gases.

Se deben tener algunas precauciones con el uso de los sistemas de corrección por CO, ya que la presencia de éste en los gases de combustión no siempre es una indicación del nivel de exceso de aire. Un alto nivel de CO puede ser causado por:

- . atomización deficiente;
- . enfriamientos en la flama;
- . contactos de la flama o incidencia sobre los tubos de la caldera;
- . suciedad en quemadores;
- . mezcla deficiente aire-combustible.

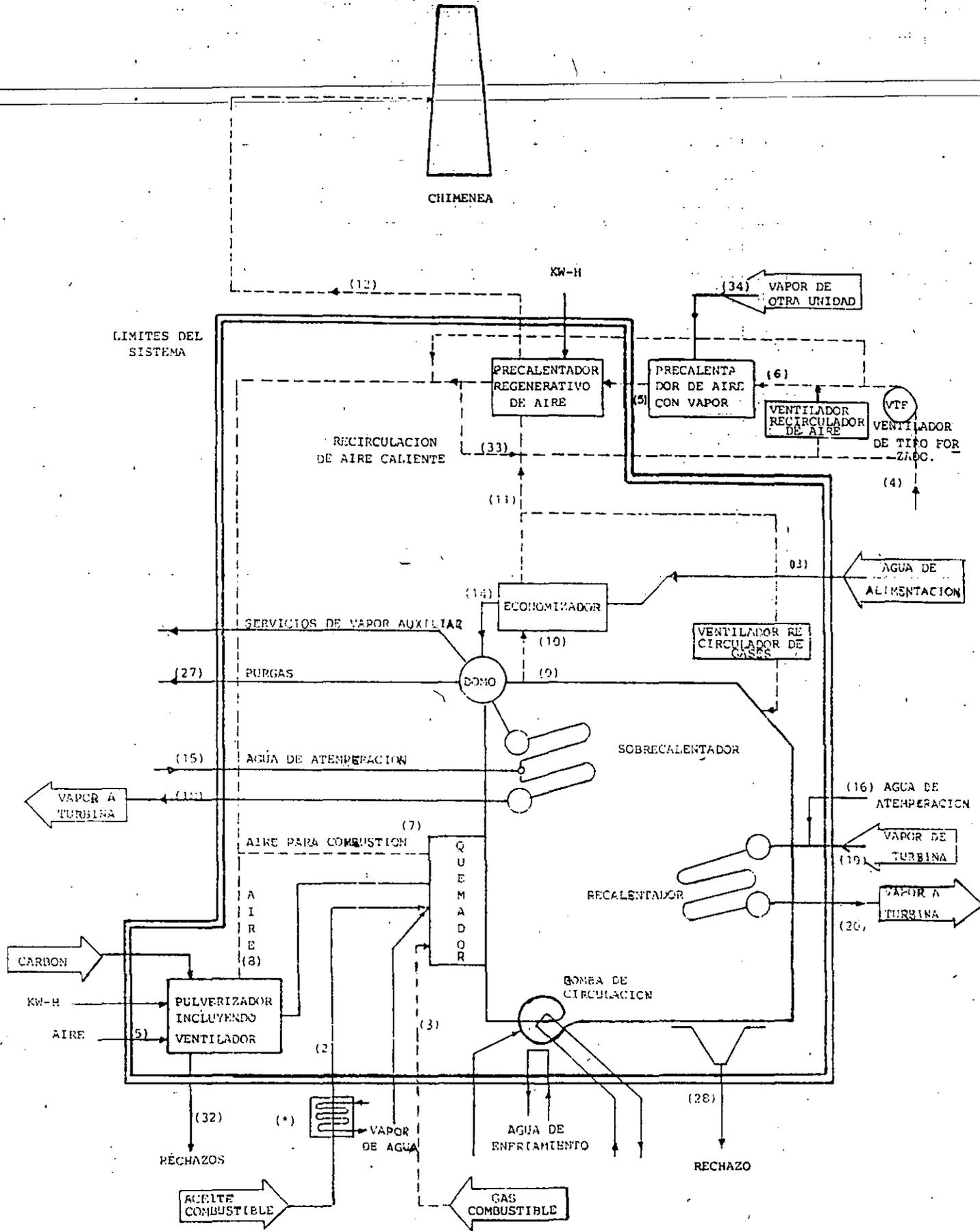
DIAGRAMAS TEMA 9



ING. MARTINIANO AGUILAR RODRIGUEZ

Tabla 7.4 Descripción de algunos procesos para la remoción del dióxido de azufre

<i>Origen del proceso</i>	<i>Operaciones del proceso</i>	<i>Material activo</i>	<i>Producto principal de azufre</i>
A. Procesos de depuración desechable			
1. Cal o caliza	Depuración con lechada	CaO, CaCO ₃	CaSO ₃ /CaSO ₄
2. Sodio	Solución de Na ₂ SO ₃	Na ₂ CO ₃	Na ₂ SO ₄
3. Doble álcali	Solución de Na ₂ SO ₃ , regenerada con CaO o CaCO ₃	CaCO ₃ /Na ₂ SO ₃ ó CaO/NaOH	CaSO ₃ /CaSO ₄
4. Cal/caliza, promovida con magnesio	Solución de MgSO ₃ , regenerada por CaO o CaCO ₃	MgO/MgSO ₄	CaSO ₃ /CaSO ₄
B. Procesos de depuración con regeneración			
1. Óxido de magnesio	Lechada de Mg(OH) ₂	MgO	15% SO ₂
2. Sodio	Solución de Na ₂ SO ₃	Na ₂ SO ₃	90% SO ₂
3. Citrato	Solución de citrato de sodio	H ₂ S	Azufre
4. Amoníaco	Solución de amoníaco, conversión a SO ₂	NH ₄ OH	Azufre (99.9%)
C. Procesos en seco			
1. Adsorción por carbón	Adsorción a 400°K, reacción con H ₂ S a S, reacción con H ₂ a H ₂ S	Carbón activado/H ₂	Azufre
2. Secador por aspersión	Absorción con soluciones de carbonato o de cal apagada	Na ₂ CO ₃ /Ca(OH) ₂	Na ₂ SO ₃ /Na ₂ SO ₄ ó CaSO ₃ /CaSO ₄



(*) Ver figura en párrafo No.

FIG. 1

DIAGRAMA DE FLUJO UNIDAD DE GENERACION DE VAPOR DE AGUA

CONDICION DE ALARMA O PELIGRO.	TIPO DE CALDERA.	S E N S O R	A C C I O N
Bajo suministro de agua.	Circ. Controlada Circ. forzada	Switch presión dif. Switch de alto nivel/bajo nivel del domo. Switch baja temp. sobre calentado.	Disparo sumin. comb. Disparo o alarma Disparo sumin. comb.
Alta temp. vapor	todos	Termocopios en líneas so-calent. y recalentado.	Alarma
Alta presión vapor	Todos	Valvs. de seguridad Switch alta presión	Relevar presión Disparo combustible
Pérdidas de aire	Tiro balanceado o forzado.	Switch aux. int. vent. Switch bajo flujo aire	Disparo sum. comb. Alarma o disparo sum. comb.
Condiciones suministro comb.	Gas Aceite Carbón	Baja o alta presión Baja presión Baja temperatura Pérdida medio de atomización. Detector flujo carbón	Disparo sum. comb. Disparo sum. comb. Alarma Disparo sum. comb. Alarma
Presión hogar	Todos	Switch de presión	Disparo sum. comb.
Pérdida estabil. flama.	Gas o aceite Carbón	Detector de flama, espejos o TV caldera. Detector de flama, espejos o TV caldera.	Disparo sum. comb. Disparo sum. comb.
Combustibles muy altos.	Gas, aceite o carbón.	Combustible y/o analizador O ₂ (opcional) TV Chimenea (opcional) Detector de humos	Alarma Alarma
Pérdida sum. energía control combustión.	Gas, aceite o carbón.	Relé bajo voltaje o baja presión aire.	Alarma
Calidad agua alimentación	Todos	Conductividad	Alarma
Combinación de los anteriores.	todos	Observación del operador	Disparo sum. comb.

TABLA XIII-1.- RESUMEN DE PROTECCIONES DE LA CALDERA

SISTEMA	PROBLEMA	CAUSA PROBABLE
Transferencia de calor	Alta temperatura de salida de gases	<ul style="list-style-type: none"> . Depósitos en el lado de agua o gases . Procedimiento impropio de tratamiento de agua . Operación inapropiada de sopladores
Combustión	Alto exceso de aire	<ul style="list-style-type: none"> . Operación impropia del sistema de control . Baja presión de suministro de combustible . Cambio en poder calorífico de combustible . Cambio en viscosidad de aceite combustible
	Bajo exceso de aire	<ul style="list-style-type: none"> . Operación impropia del sistema de control . Limitaciones del ventilador . Aumento de temp. ambiente del aire
	Alto CO y emisiones de combustible	<ul style="list-style-type: none"> . Quemadores de gas tapados . Distribución aire/combustible desbalanceada con quemadores múltiples. . Ajuste inapropiado de registro de aire . Deterioro del refractario de garganta de quemador . Condición de rejilla del stoker . Orientación de distribución de comb. del stoker . Sistemas de aire sobrefuegos inapropiados . Sistema de pulverización de baja finura
Misceláneos	Fugas en cubierta	<ul style="list-style-type: none"> . Cubierta y aislamiento dañados
	Fugas en prec. de aire	<ul style="list-style-type: none"> . Sellos desgastados o con ajuste impropio en precalentadores rotatorios . Corrosión en tubos
	Potencia en pulverizadores de carbón.	<ul style="list-style-type: none"> . Mala reparación del pulverizador . Ajuste muy bajo de clasificador
	Purga excesiva	<ul style="list-style-type: none"> . Operación inapropiada
	Fugas de vapor	<ul style="list-style-type: none"> . Perforaciones en tubos de paredes de agua . Empaques de válvulas
	Aislamiento flojo o perdido	<ul style="list-style-type: none"> . Sobrecalentamiento . Intemperismo
	Excesiva operación de sopladores	<ul style="list-style-type: none"> . Programa arbitrario de operación en exceso a requerimientos

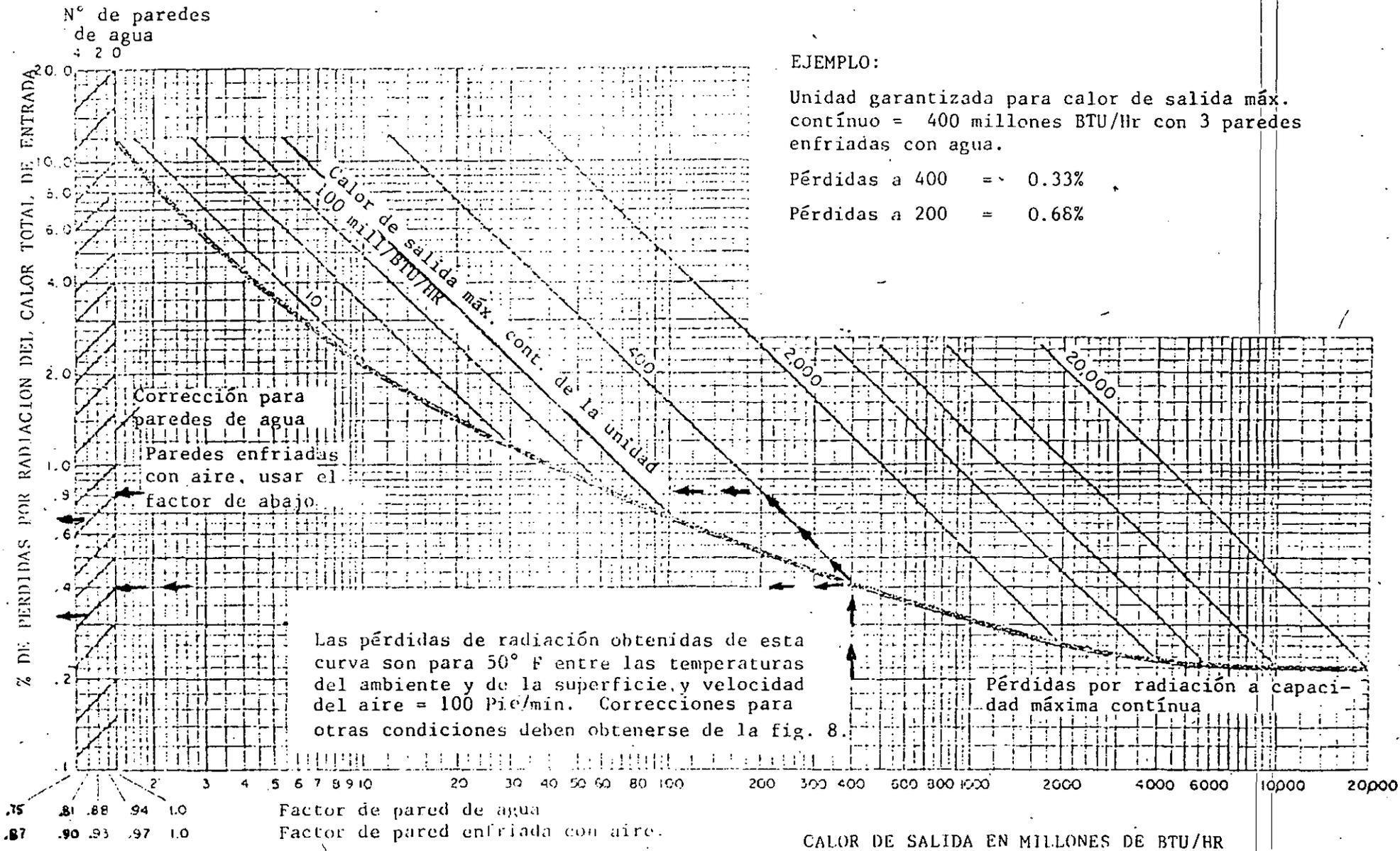
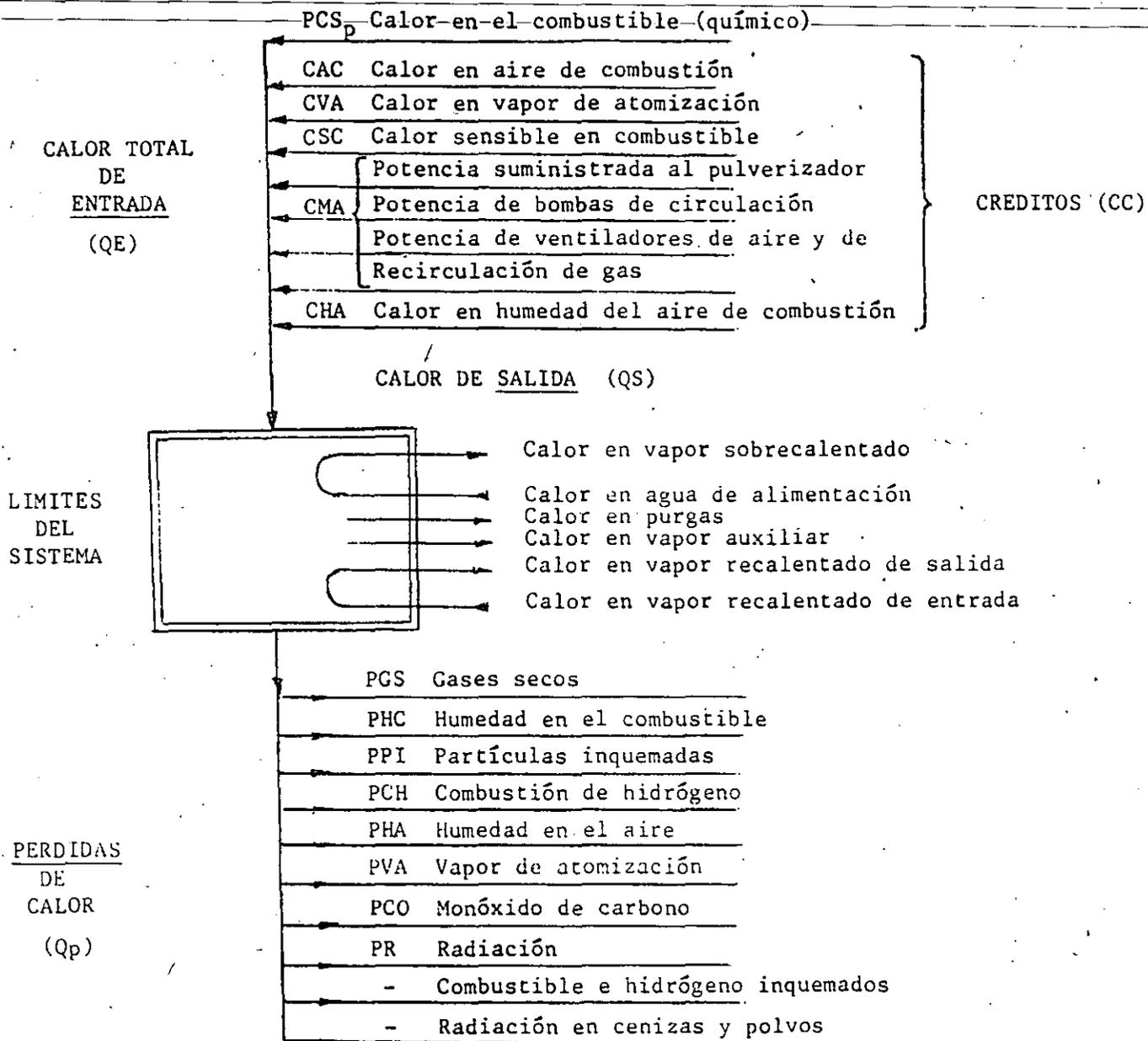


FIGURA 7. CARTA DE PERDIDAS POR RADIACION (ABMA)



Calor de salida = Calor total de entrada - Pérdidas de calor:

$$QS = QE - Qp$$

Definición de eficiencia (por ciento): $\eta_G (\%) =$

$$\frac{\text{Calor de Salida}}{\text{Calor total de entrada}} \times 100 = \frac{QE - Qp}{PCSp+CC} \times 100$$

Balance de calor: $PCSp + CC = Q_{\text{Salida}} + Q_p$ ó $\eta_G (\%) = \left| 1 - \frac{Q_p}{PCSp+CC} \right| \times 100$

FIGURA 2. - BALANCE DE CALOR DEL GENERADOR DE VAPOR.