



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

Las autoridades de la Facultad de Ingeniería, por conducto del jefe de la División de Educación Continua, otorgan una constancia de asistencia a quienes cumplan con los requisitos establecidos para cada curso.

El control de asistencia se llevará a cabo a través de la persona que le entregó las notas. Las inasistencias serán computadas por las autoridades de la División, con el fin de entregarle constancia solamente a los alumnos que tengan un mínimo de 80% de asistencias.

Pedimos a los asistentes recoger su constancia el día de la clausura. Estas se retendrán por el periodo de un año, pasado este tiempo la DECFI no se hará responsable de este documento.

Se recomienda a los asistentes participar activamente con sus ideas y experiencias, pues los cursos que ofrece la División están planeados para que los profesores expongan una tesis, pero sobre todo, para que coordinen las opiniones de todos los interesados, constituyendo verdaderos seminarios.

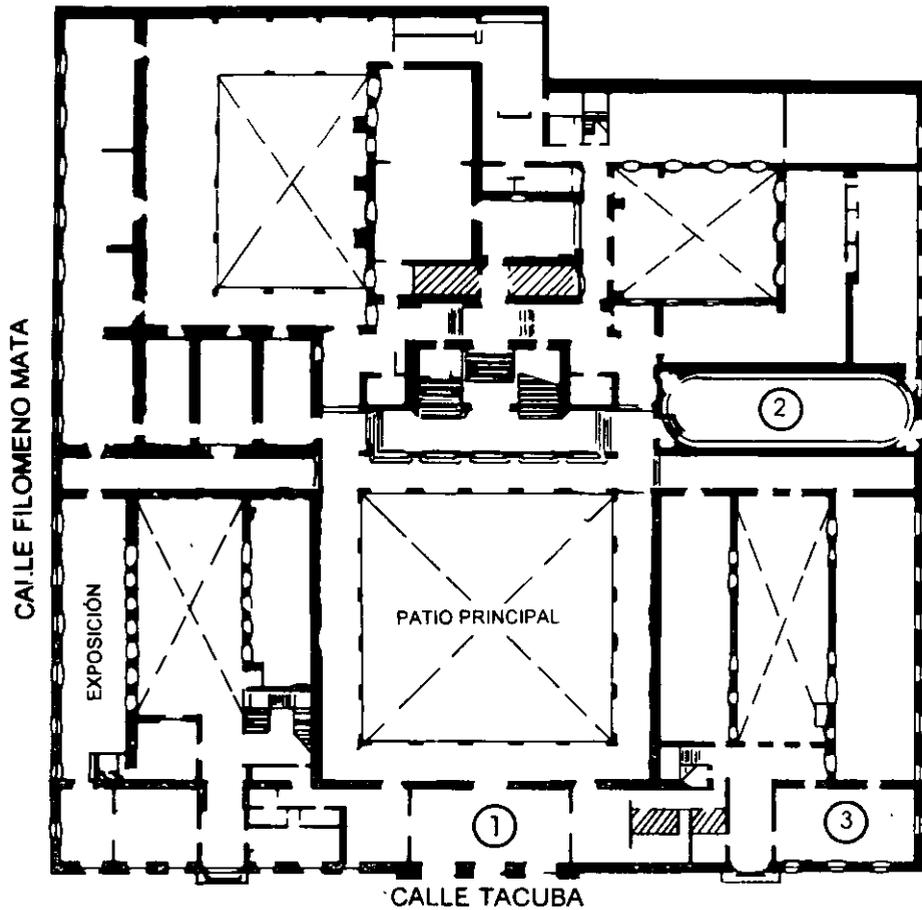
Es muy importante que todos los asistentes llenen y entreguen su hoja de inscripción al inicio del curso, información que servirá para integrar un directorio de asistentes, que se entregará oportunamente.

Con el objeto de mejorar los servicios que la División de Educación Continua ofrece, al final del curso deberán entregar la evaluación a través de un cuestionario diseñado para emitir juicios anónimos.

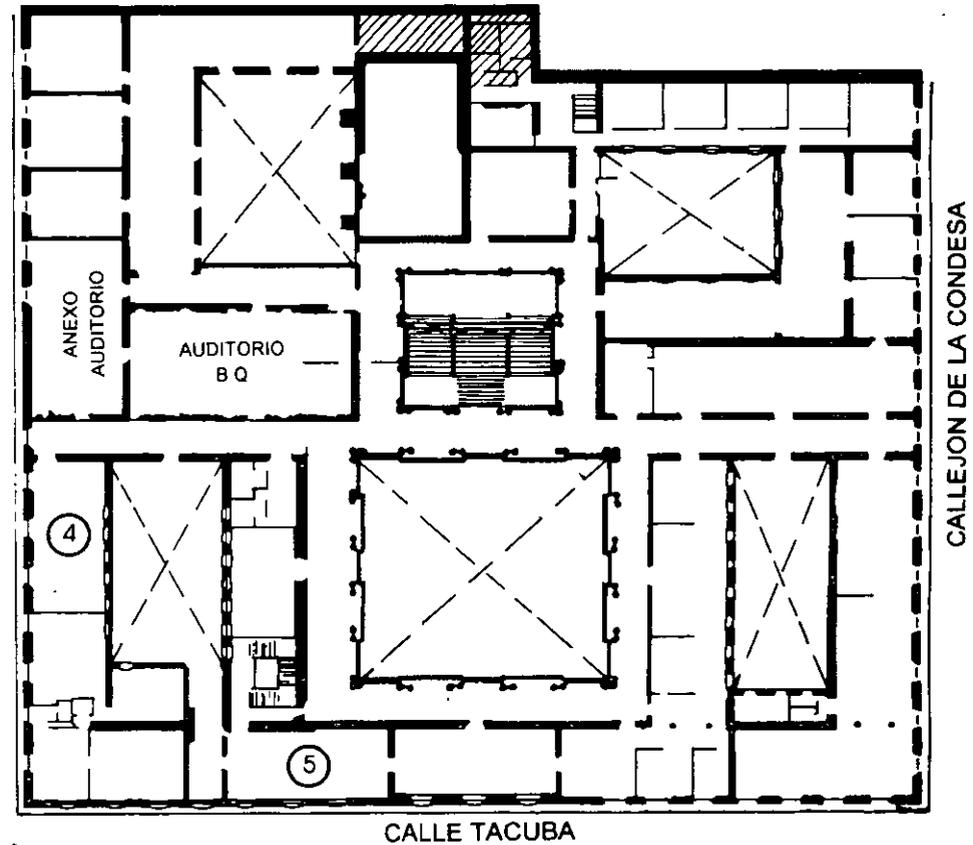
Se recomienda llenar dicha evaluación conforme los profesores impartan sus clases, a efecto de no llenar en la última sesión las evaluaciones y con esto sean más fehacientes sus apreciaciones.

**Atentamente
División de Educación Continua.**

PALACIO DE MINERIA

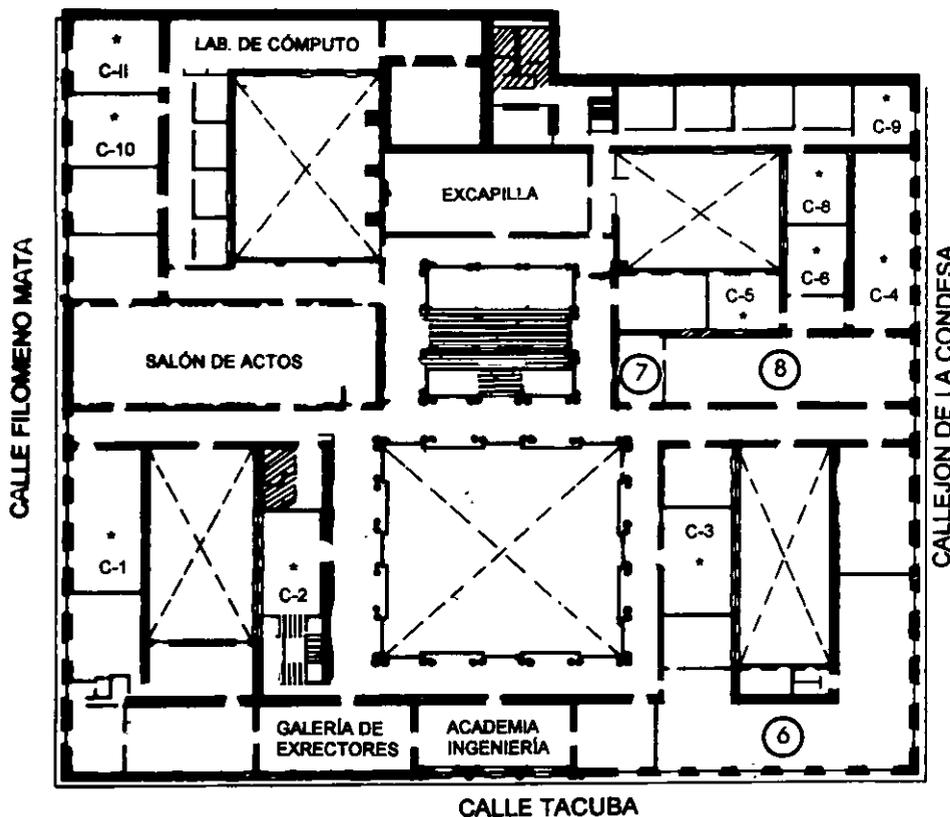


PLANTA BAJA



MEZZANINNE

PALACIO DE MINERIA



GUÍA DE LOCALIZACIÓN

1. ACCESO
2. BIBLIOTECA HISTÓRICA
3. LIBRERÍA UNAM
4. CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN "ING. BRUNO MASCANZONI"
5. PROGRAMA DE APOYO A LA TITULACIÓN
6. OFICINAS GENERALES
7. ENTREGA DE MATERIAL Y CONTROL DE ASISTENCIA
8. SALA DE DESCANSO

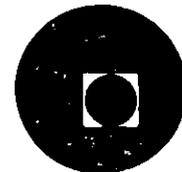
SANITARIOS

* AULAS

1er. PISO



DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA
FACULTAD DE INGENIERÍA U.N.A.M.
CURSOS ABIERTOS





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

CURSOS ABIERTOS

**“ CONTROL DE CONTAMINACIÓN Y
AHORRO DE ENERGÍA
EN CALDERAS ”**

TEMA:

CONFIGURACIONES Y COMPONENTES

**EXPOSITOR: ING. MARTINIANO AGUILAR RODRÍGUEZ
1997**

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.

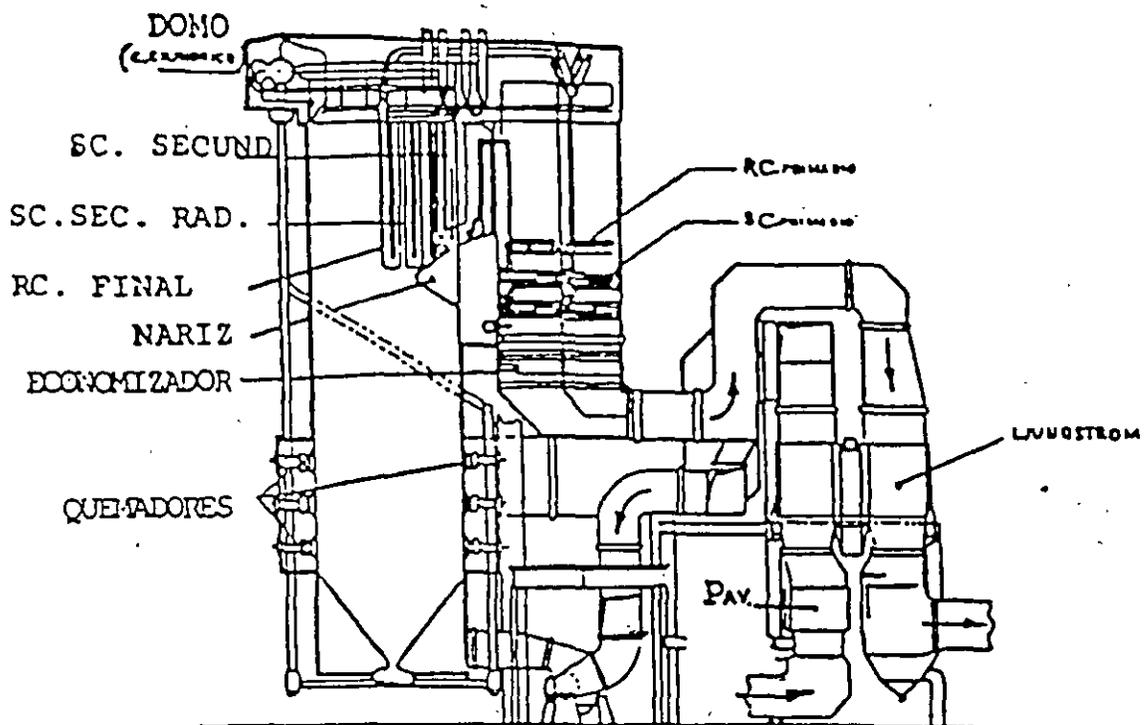
Estrictamente el término de caldera se aplica únicamente al recipiente contenedor de agua y a las superficies de convección sin embargo, en este trabajo se utilizarán indistintamente los términos de generador de vapor o caldera.

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.



2

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 pirotubulares.

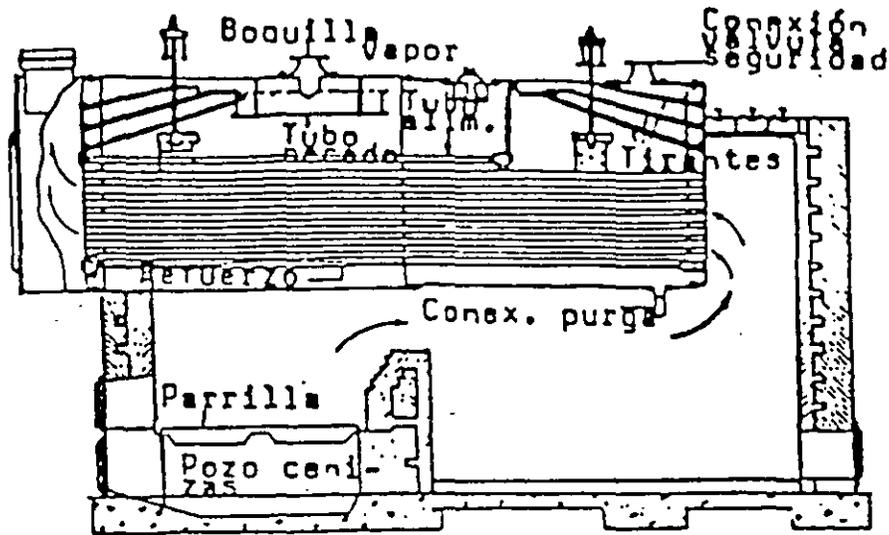


FIG. Sección de Caldera de Retorno Horizontal Tubular (HRT)

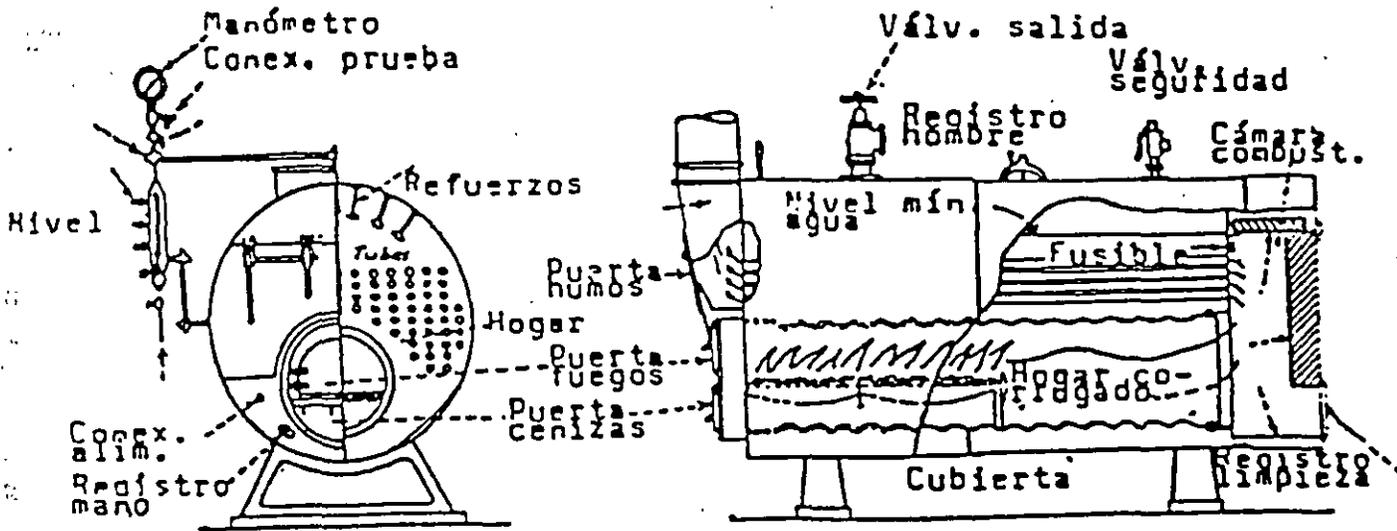


FIG. Caldera Escocesa Marina, de Fondo Seco, dos pasos

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.

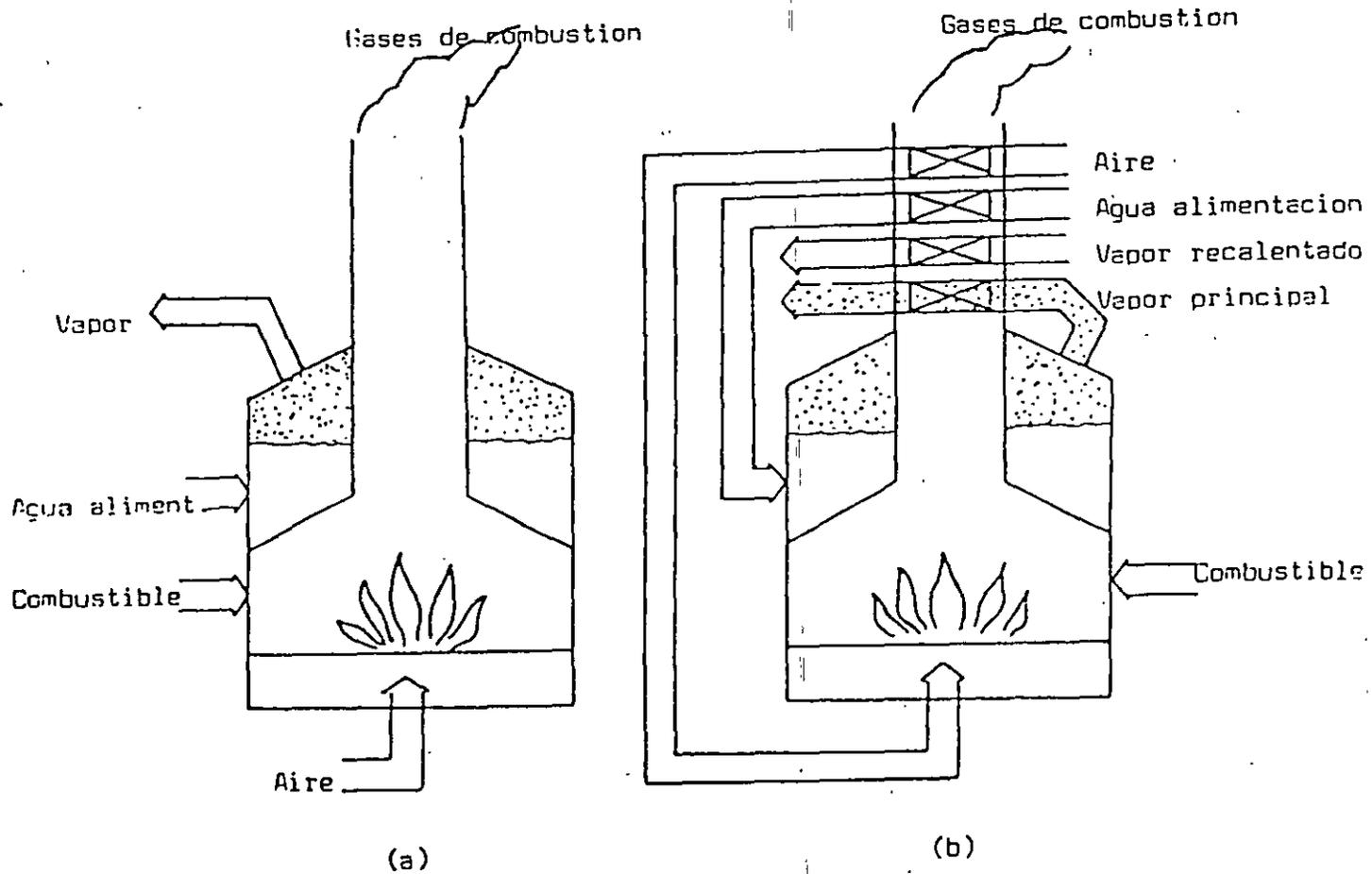


FIG. - ESQUEMA DE LA EVOLUCION DE LAS CALDERAS

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.

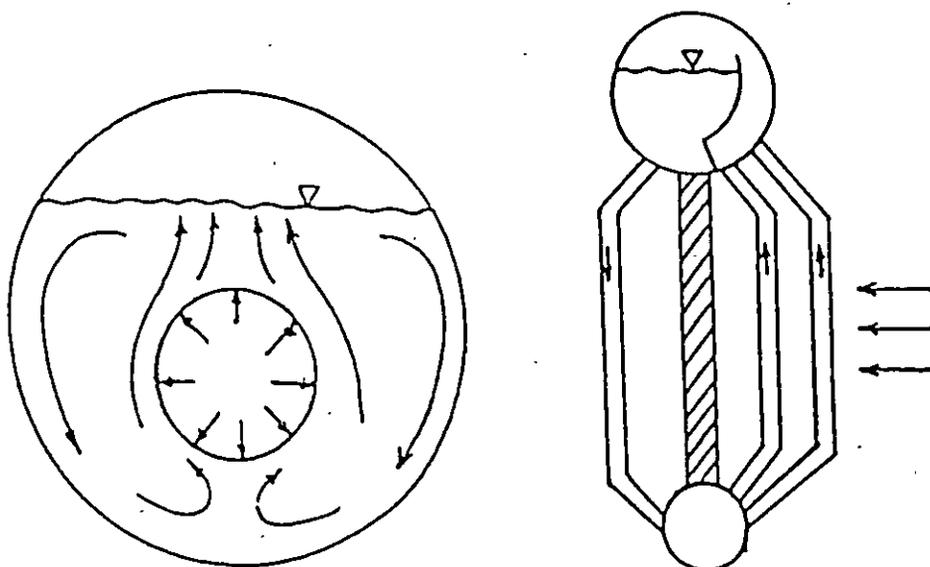
Desde el punto de vista funcional las calderas se destinan, de acuerdo con su finalidad, en calderas pequeñas de calentamiento que suministran agua caliente, agua hirviendo o vapor de baja presión, en calderas para centrales térmicas menores que suministran como agente térmico, vapor de baja y media 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 y 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**

CURSOS ABIERTOS

**“ CONTROL DE CONTAMINACIÓN Y
AHORRO DE ENERGÍA
EN CALDERAS ”**

TEMA:

COMBUSTIBLES

**EXPOSITOR: ING. MIGUEL A: CASTILLO HOIL
1997**

II.- COMBUSTIBLES

1.- 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 otros 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 esta 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 "agrio" 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 combustible 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	<u>m³ / kg</u>	<u>Kcal/m³</u>	<u>m³ aire/m³ gas</u>
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.

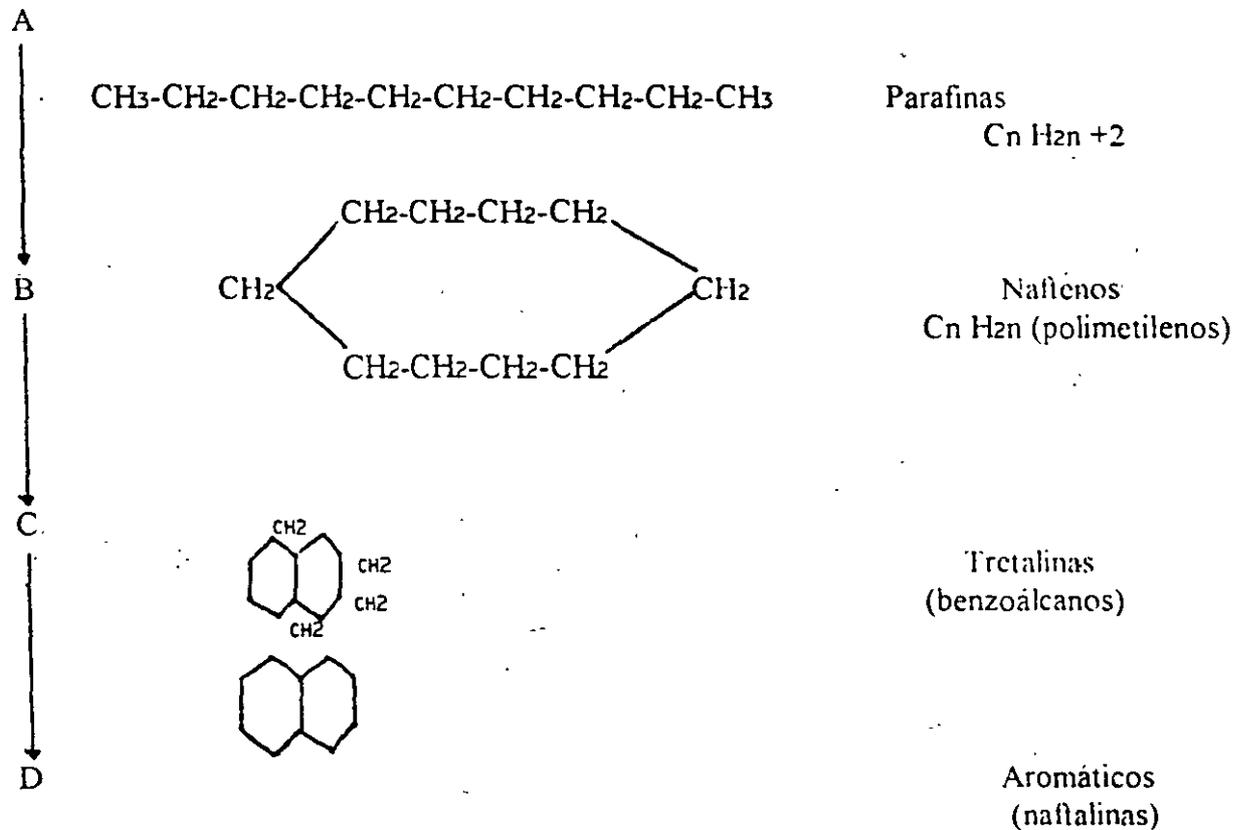
Los principales alcoholes utilizados son: el alcohol etílico (C₂H₆O), obtenido de granos; el alcohol metílico (CH₄O), obtenido de madera; el alcohol butílico (C₄H₁₀O) y el alcohol propílico (C₃H₈O).

El alquitrán de hulla o brea 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, cracking 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 esta 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

U.S.A.

INGLATERRA

Centistoke

° Saybolt universal

° Redwood No. 1

° Engler

° Saybolt Furol (*)

° 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.

Densidad del Combustible

Calor específico según la Temp.

	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.

Coefficiente de Dilatación Cúbica

<u>Temperatura</u>	<u>Densidad</u>	<u>Coefficiente de Dilatación Cúbica</u>
0 a 100°C	0,825-0,875	0,0010-0,0008
	0,925-0,975	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 combustibles, 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 mezcla 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 por ciento 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.

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

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:

$$PCS = 8080 + 4340 (MV)$$

De 17 a 36% de MV:

$$PCS = 8980 - 1250 (MV)$$

De mas de 36% de MV

$$PCS = 10400 - 5240 (MV)$$

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 estas 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 atraviere 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 esta 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 permisivos 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 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.

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 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)

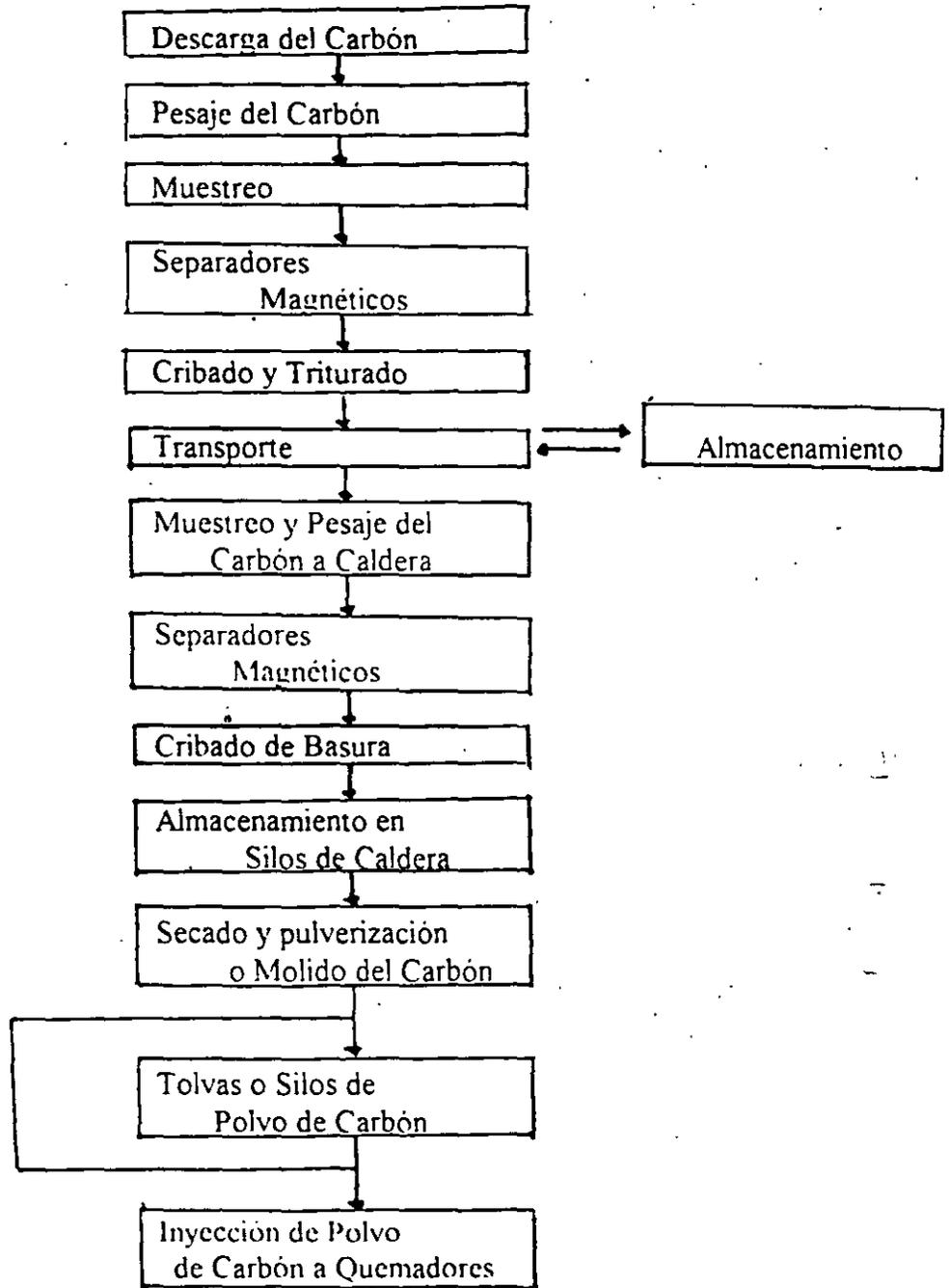
A diferencia del combustible gaseoso o líquido, cuando se utiliza carbón como combustible, tanto el manejo de éste en patios, como la preparación para el quemado presentan problemas complejos en su diseño, operación y mantenimiento.

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 carbo ducto.- Se emplea como medio alternativo con ventajas económicas sobre el transporte por ferrocarril bajo ciertas condiciones.

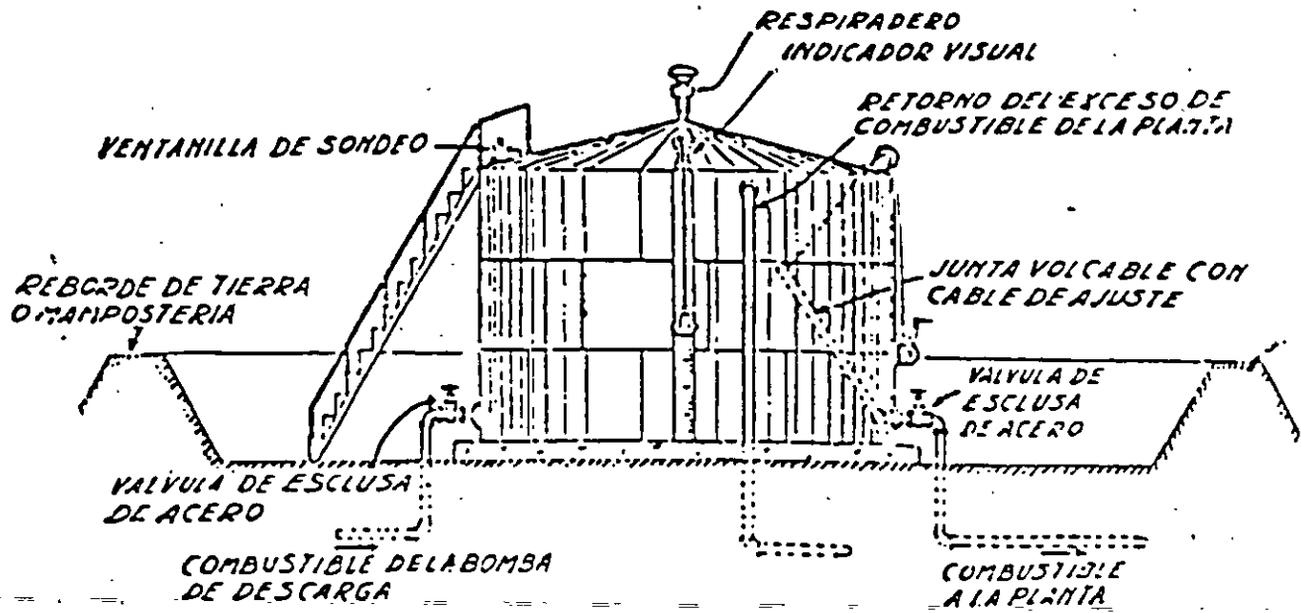


IV-24 DIAGRAMA DE FLUJO

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 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.

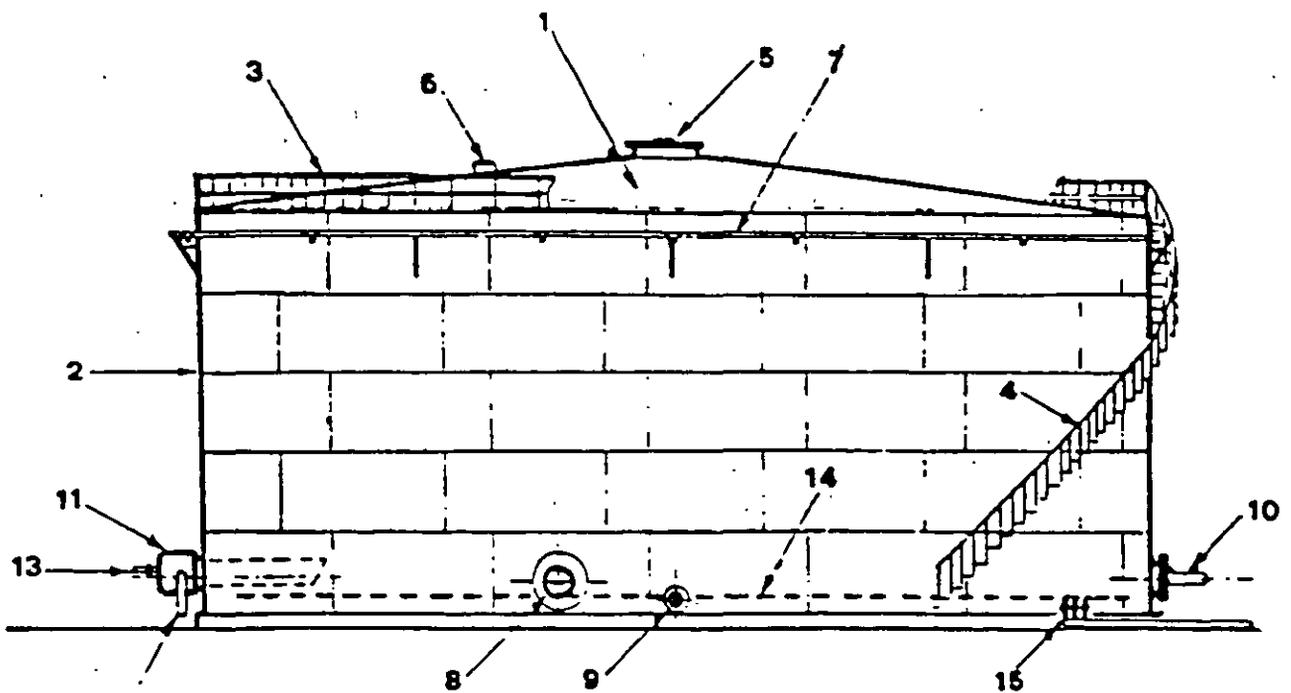
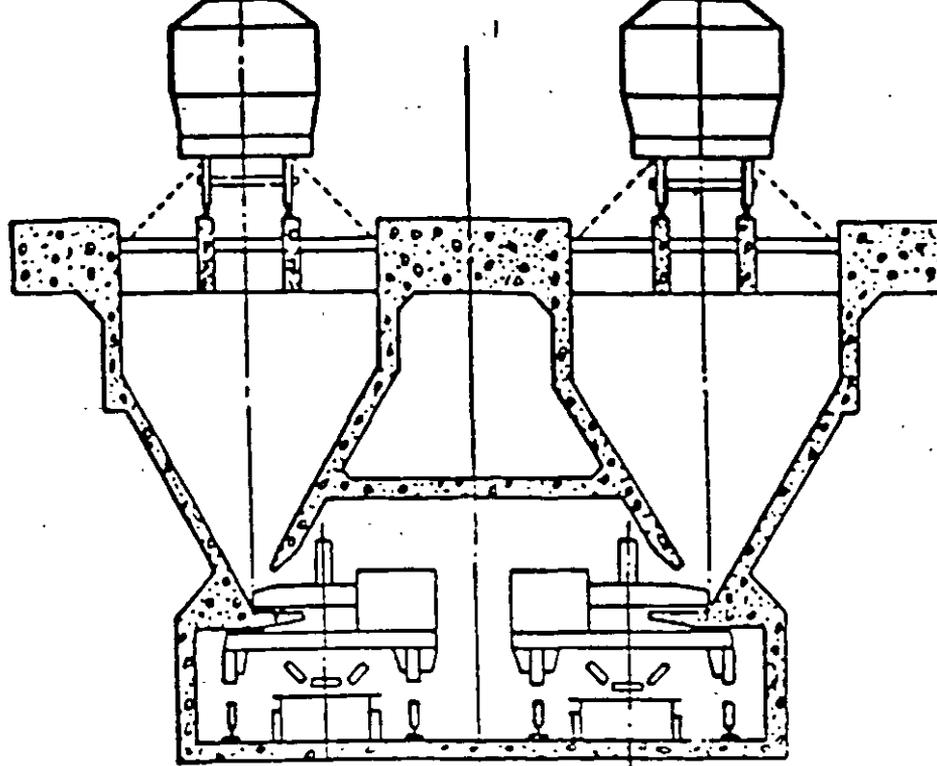
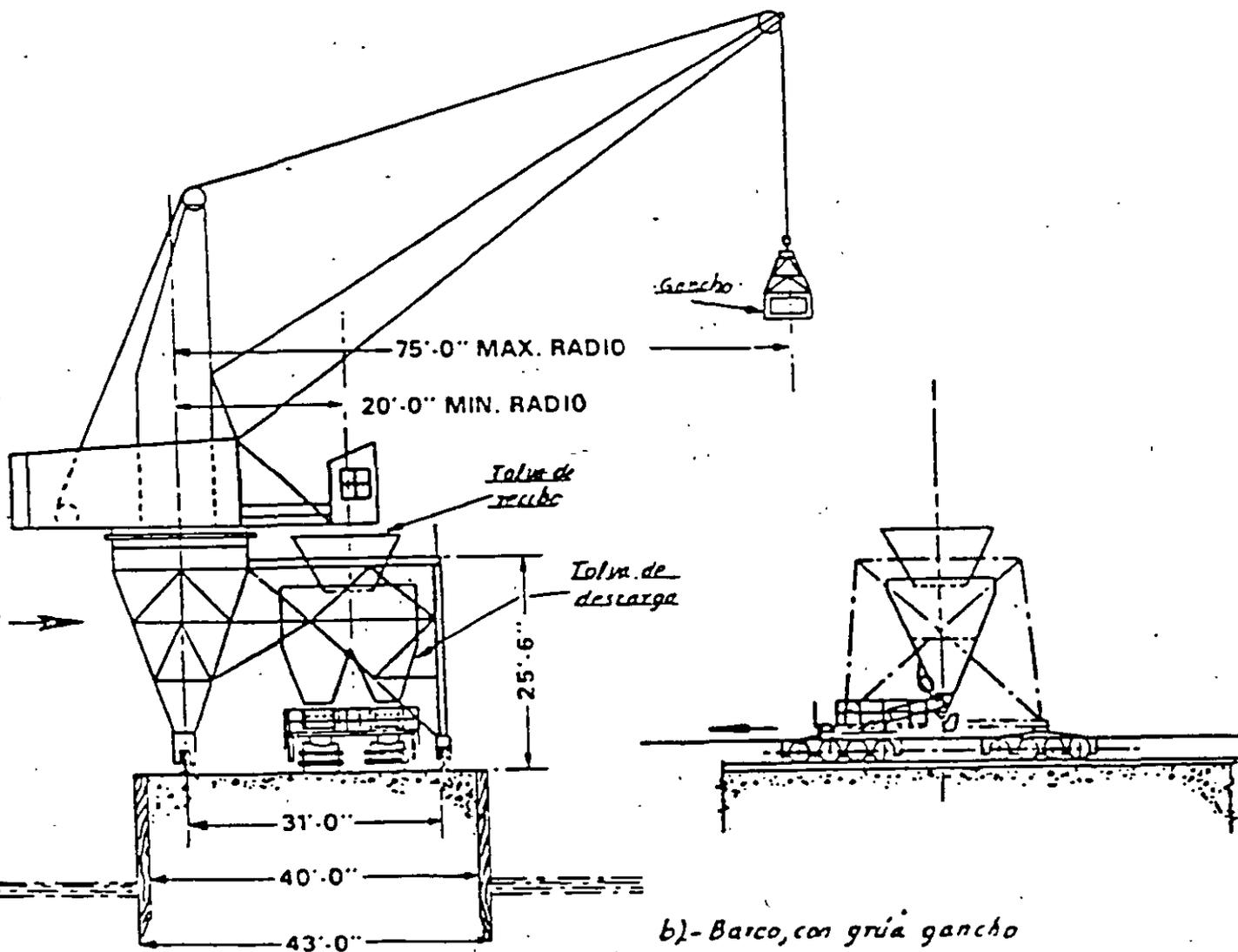


Fig IV-7.- TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLE



a) - Vagones de FFCC



b) - Barco, con grúa gancho

FIG IV-26.- Métodos de descarga de carbón



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

CURSOS ABIERTOS

**“ CONTROL DE CONTAMINACIÓN Y
AHORRO DE ENERGÍA
EN CALDERAS ”**

TEMA:

QUEMADORES Y HORNOS

**EXPOSITOR: ING. MARTINIANO AGUILAR RODRÍGUEZ
1997**

III.- QUEMADORES Y HORNOS

1.- 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 gaseosos 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 mezclarse 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 más 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 quema 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:

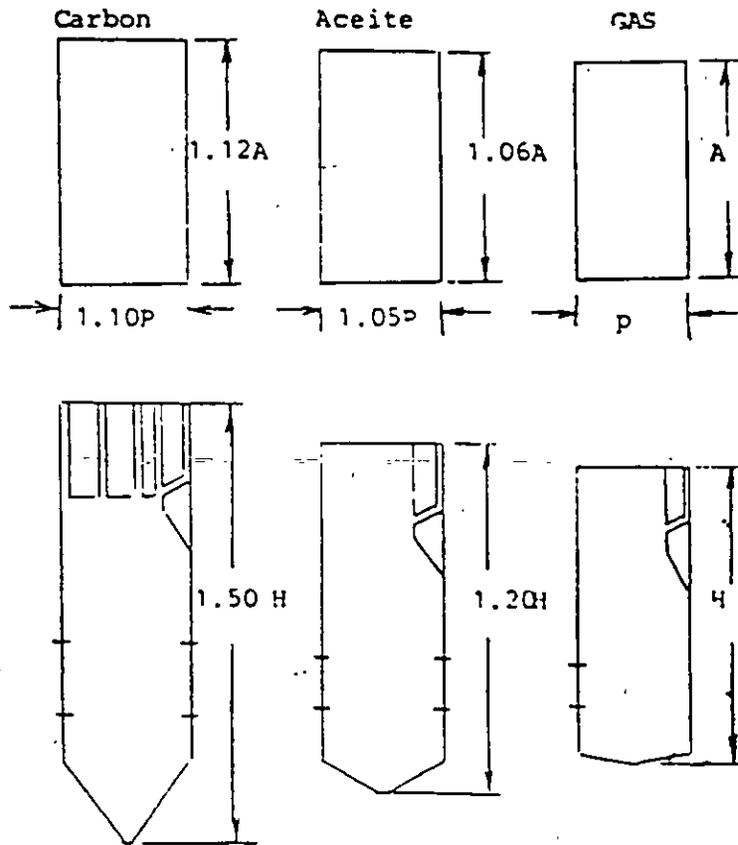
- . tipo de combustible
- . características de las cenizas del combustible
- . régimen de variación de carga
- . régimen de liberación de calor, % de recuperación de calor en forma económica.
- . paredes (material, fabricación, etc.)
- . otros como temperatura máxima, exceso de aire, longitud de la flama,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



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

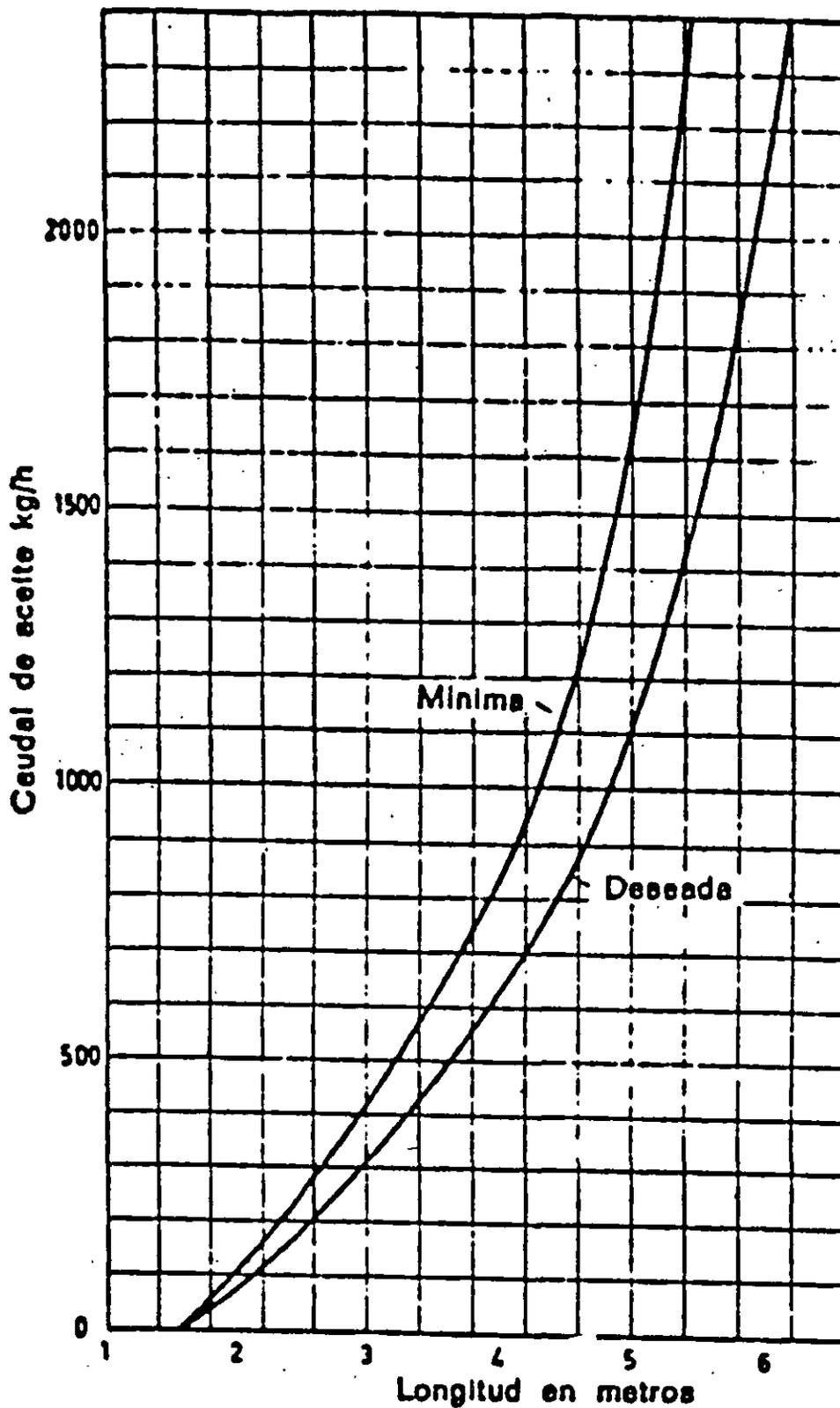


Fig. —Longitud de la cámara de combustión según el caudal del quemador (Peabody).
 (Nota: por longitud "deseada" se entiende la que aconseja el constructor del quemador).

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 varia 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 obscuridad	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.

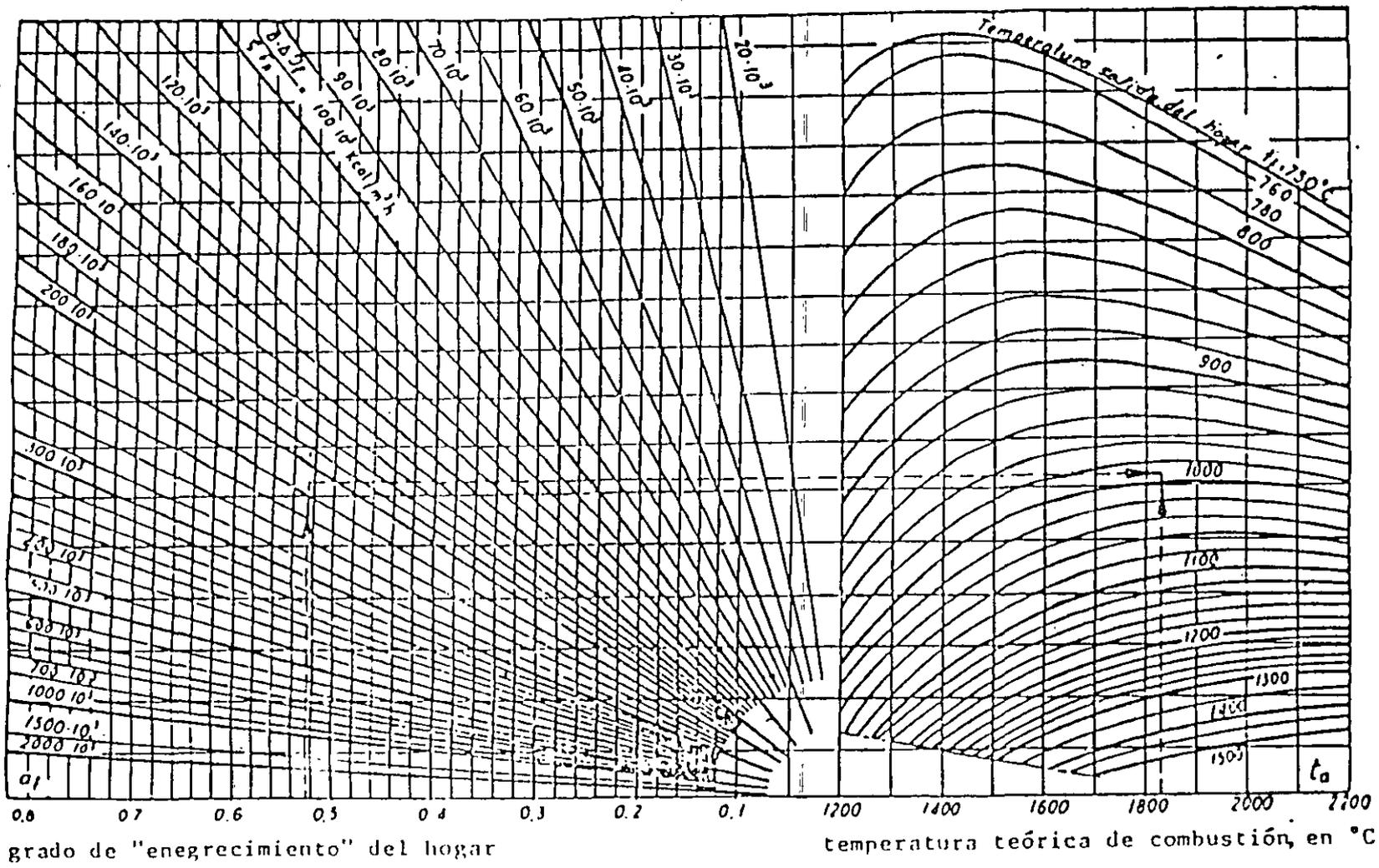


FIG. .-CALCULO DE LA TRANSMISION DE CALOR EN EL HOGAR

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 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**

CURSOS ABIERTOS

**“ CONTROL DE CONTAMINACIÓN Y
AHORRO DE ENERGÍA
EN CALDERAS ”**

TEMA:

LA COMBUSTIÓN

**EXPOSITOR: ING. MIGUEL A. CASTILLO HOIL
1997**

IV.- LA COMBUSTIÓN

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 parrillas 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 marcan 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 C_2 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: CO_2 , H_2O , O_2 y N_2 (H_2O en forma de vapor); con los combustibles que contienen azufre aparecen también SO_2 y SO_3 .

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 CO_2 en los gases quemados; y puesto que el exceso de aire hace aumentar la cantidad de gases producidos, el porcentaje de CO_2 es siempre inferior al valor estequiométrico.

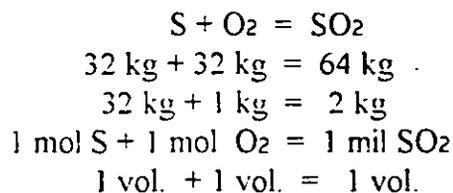
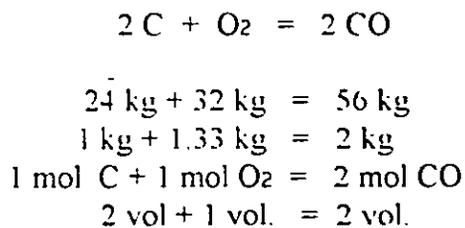
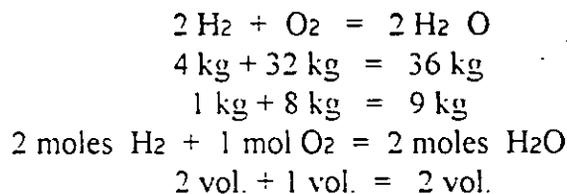
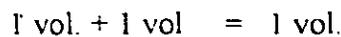
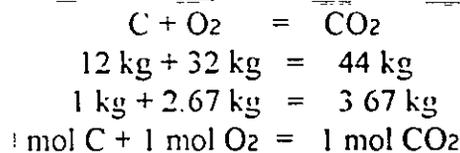
Si, por ejemplo, se emplea 1 m³ de O_2 para la combustión de un carbón, se obtiene como producto de la combustión 1 m³ (m³ normal) de CO_2 . Como el comburente suele estar constituido por aire (21 por 100 de O_2 y 79 por 100 de N_2) un combustible sin nitrógeno e hidrógeno, debería dar lugar a un gas de combustión de la siguiente composición: 21 por 100 de CO_2 y 79 por 100 de N_2 . Pero como en realidad el combustible contiene siempre cierta cantidad de nitrógeno, hidrógeno y vapor de agua, resulta que el valor máximo del CO_2 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 N_2 y H_2O del combustible (utilizando aire estequiométrico).

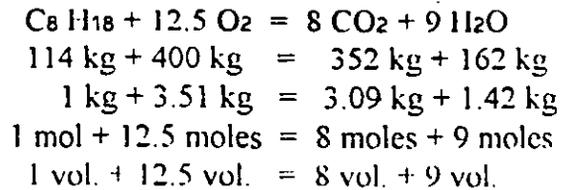
Para una combustión con exceso de aire y con un combustible prácticamente sin hidrógeno, la suma de $CO_2 + O_2$ se acerca al 21% en volumen; los % de CO_2 y O_2 son complementarios, y función del exceso de aire empleado.

Reacciones Químicas.- Las reacciones de combustible-comburente son la base del proceso de combustión que involucra fenómenos muy complejos porque las reacciones son confluídas 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 limitada 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 llama.
- Ondas de detonación directamente o por transición de una onda precedente de deflagración.

Factores Físicos de la Combustión.- En condiciones de llama 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.

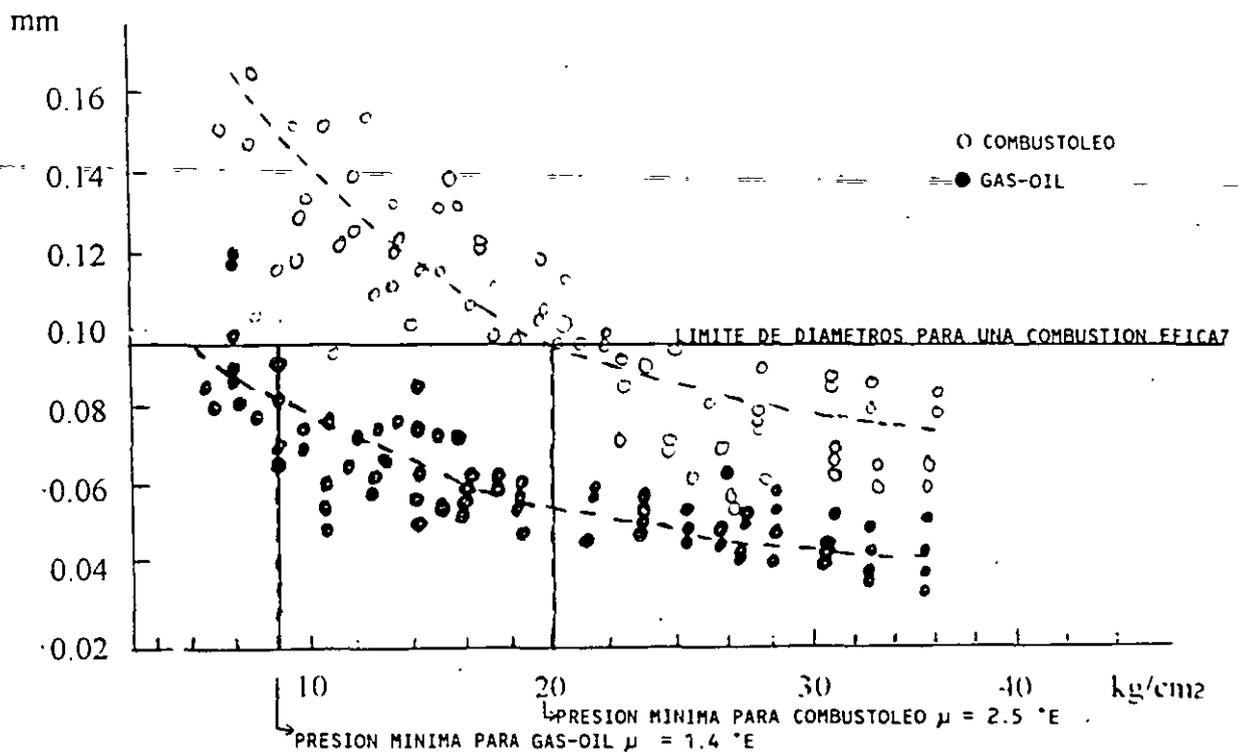
Los combustibles, gasóleos y diesel tienen temperaturas medias de ebullición elevadas y estabilidades térmicas reducidas, por lo que para quemarlos no se puede proceder mediante evaporación, requiriéndose para una buena combustión, realizar una subdivisión forzada de líquido para producir pequeñas gotas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

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 combustóleo 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 si

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 l 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.

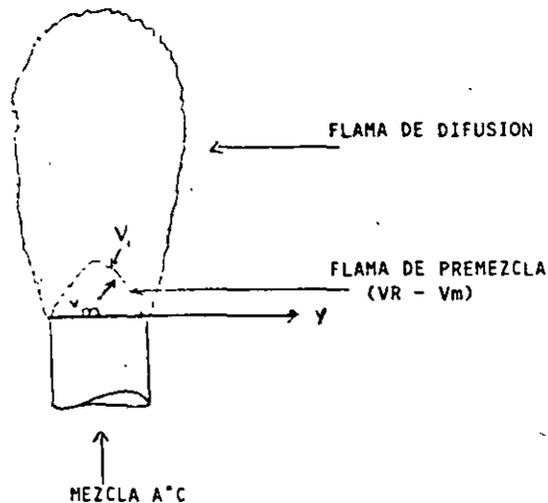
Flamas de Premezcla.

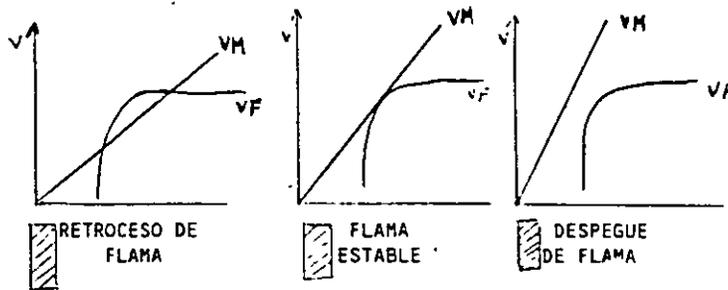
Este tipo de flamas tiene lugar cuando el combustible y el aire se mezclan antes de que comience la reacción química. El ejemplo más típico es el de un mechero de Bunsen cuando opera con su registro de aire abierto o bien la flama piloto de una caldera pequeña (aunque esta última suele ser mixta).

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

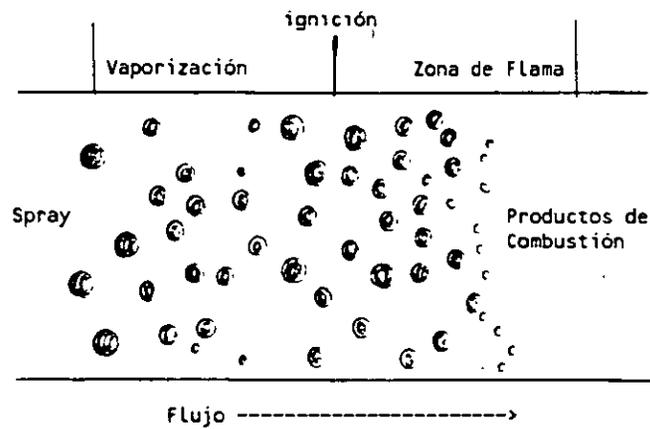
Flamas de Difusión.

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.

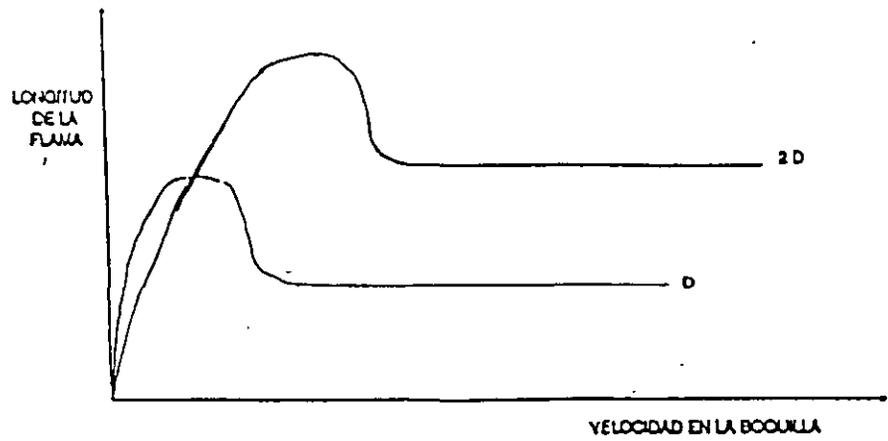
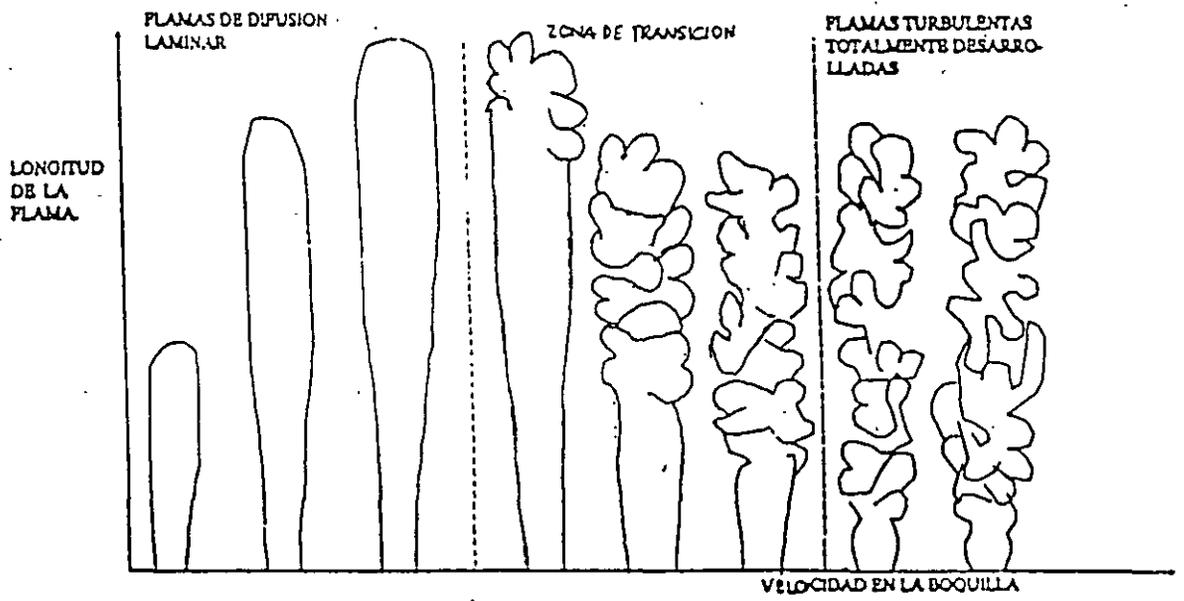


Flamas Laminares y Turbulentas.

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

En las flamas de tipo laminar, la propagación de la misma tiene lugar en una 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.

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

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

El valor $26.48 \left(H - \frac{O}{8} \right)$ ó bien $21.1 \left(H - \frac{O}{8} \right)$ 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.

Combustible (peso)	Formula de combustión (peso)	Productos de Combustión (peso)	Productos de combustión.				Oxígeno y Nitrógeno del aire de combustión.							
			Por Kg de comb.		Por m ³ de comb.		Por Kg de combustible.				Por m ³ de combustible.			
			kg	m ³	kg	m ³	kg O ₂	kg N ₂	m ³ O ₂	m ³ N ₂	kg O ₂	kg N ₂	m ³ O ₂	m ³ N ₂
C (12)	C + O ₂ (12 + 32)	CO ₂ (44)	3.667	1.867	-	-	2.667	8.8	1.867	7.02	-	-	-	-
S (32)	S + O ₂ (32 + 32)	SO ₂ (64)	2.0	0.7	-	-	1.0	3.31	0.7	2.63	-	-	-	-
H ₂ (2)	2 H ₂ + O ₂ (4 + 32)	2 H ₂ O (36)	9.0	11.19	0.804	1.0	8.0	26.48	5.6	21.1	0.713	2.36	0.5	1.88
CO (28)	2 CO + O ₂ (56 + 32)	2 CO ₂ (88)	1.57	0.8	1.97	1.0	0.572	1.9	0.4	1.504	0.714	2.36	0.5	1.88
CH ₄ (16)	CH ₄ + 2O ₂ 16 + 64 subdividido: C + O ₂ 2H ₂ + O ₂	CO ₂ + 2 H ₂ O (80) CO ₂ 2 H ₂ O	5.0	4.2	3.571	3.0	4.0	13.24	2.8	10.52	2.86	9.5	2.0	7.52
			2.75	1.4	1.964	1.0	2.0	6.62	1.4	5.26	1.43	4.75	1.0	3.76
			2.25	2.8	1.607	2.0	2.0	6.62	1.4	5.26	1.43	4.75	1.0	3.76
C ₂ H ₄ (28)	C ₂ H ₄ + 3O ₂ 28 + 96 subdividido: 2C + 2O ₂ 2H + O ₂	2CO ₂ + 2H ₂ O (124) 2 CO ₂ 2 H ₂ O	4.43	3.2	5.548	4.0	3.43	11.35	2.4	9.02	4.3	14.2	3.0	11.28
			3.14	1.6	3.94	2.0	2.29	7.6	1.6	6.01	2.87	9.47	2.0	7.52
			1.29	1.6	1.608	2.0	1.14	3.75	0.8	3.01	1.43	4.73	1.0	3.76

TABLA III-2.- VALORES DE COMBUSTION

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:

$$G_3 = G_2 + G_1$$

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

$$G_3 = 8.89 C + 32.29 H - 21 - \frac{1 O}{8} + 3.33 S + 0.796 N + 1.244 E, \text{ en m}^3$$

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

$$A_r = A_1 (1 + u)$$

Y la cantidad de gases reales G_r , será:

$$G_r = G_3 + (A_r - A_1)$$

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

$$P = 1.34$$

Calor Especifico.- 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 ó 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'.

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

TABLA

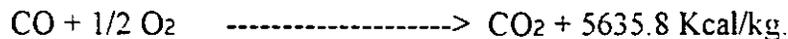
.- CALORES ESPECIFICOS MEDIOS DE GASES, AI
RE Y VAPOR DE AGUA EN KCAL/M³ (A PRESION CTE)

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, básicamente de dos tipos: el hollin (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.

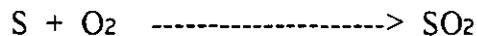
Productos de Combustión del Hidrógeno.

La combustión de hidrógeno forma agua siguiendo la reacción:

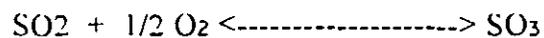


Productos de Combustión del Azufre.

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, el 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.

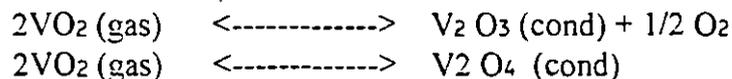
El aire contiene 79% en volumen de nitrógeno, parte del cual reacciona con el oxígeno junto con el nitrógeno que posee el combustible, a temperaturas superiores a 1500°C, formando diversos óxidos (NO_x) que se incorporan a los productos de combustión. La combustión de estos productos, depende del combustible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

Productos Provenientes del Vanadio.

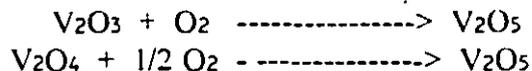
Los productos iniciales en que se transforma el vanadio durante el proceso de combustión son probablemente VO y VO₂ (monóxido y dióxido de vanadio respectivamente). La proporción relativa de los mismos queda determinada por la temperatura y la concentración de oxígeno en los gases.



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 aislantes 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 Sulfitoso) 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 $28750 / 32.29 = 885$ 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.

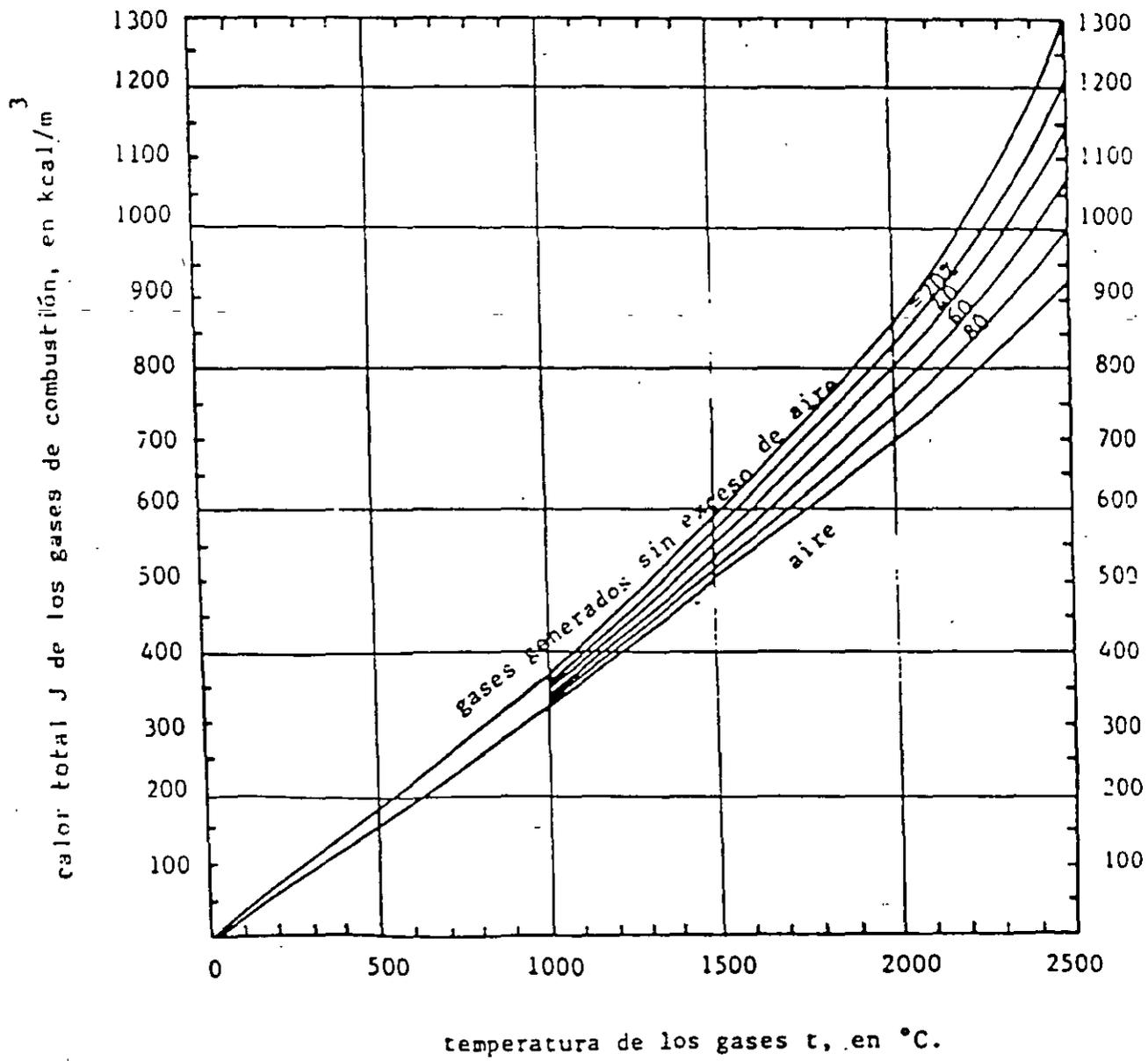


FIG. .- DIAGRAMA CALOR TOTAL-TEMPERATURA (J-t) DE GASES DE COMBUSTION.

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

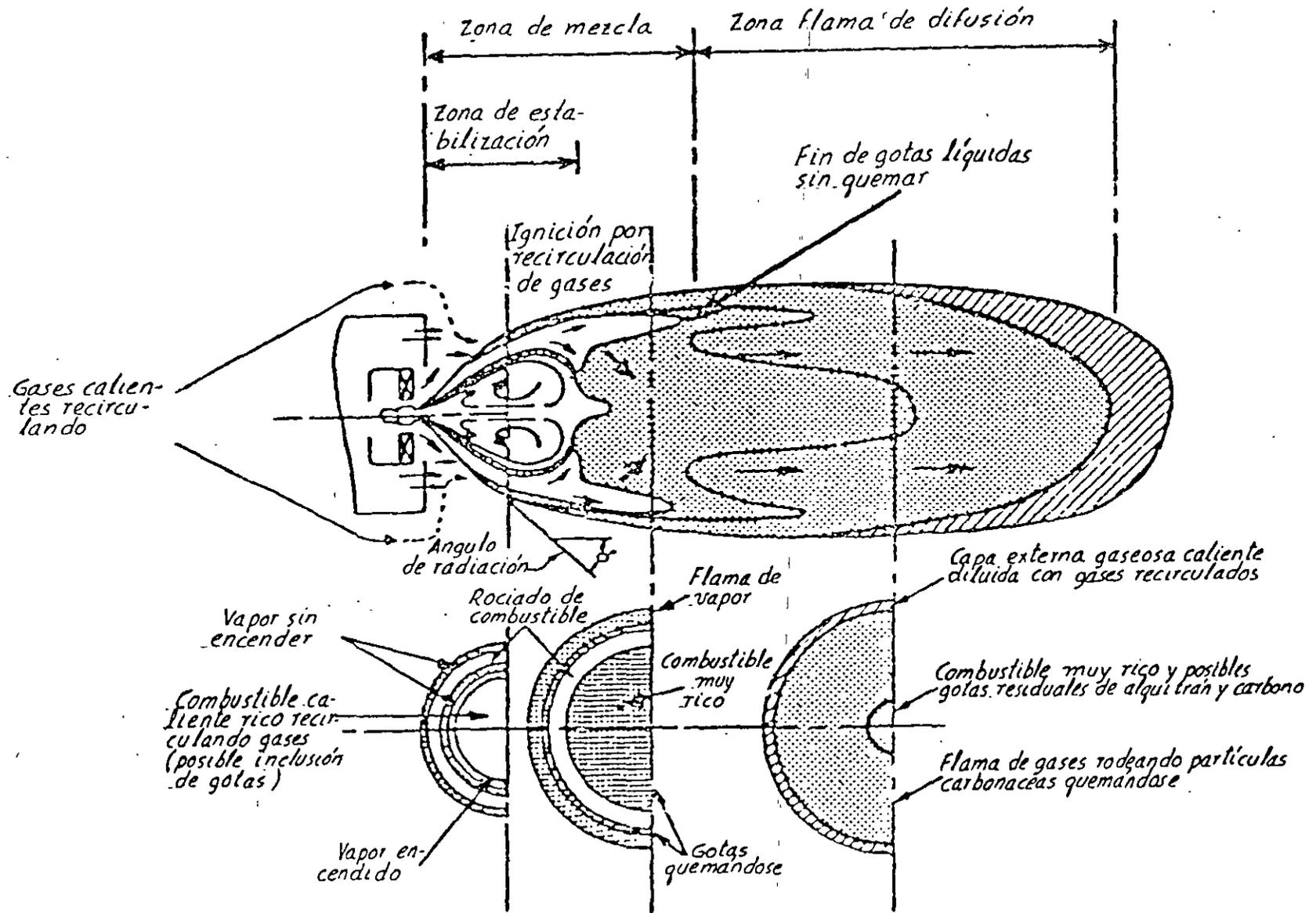
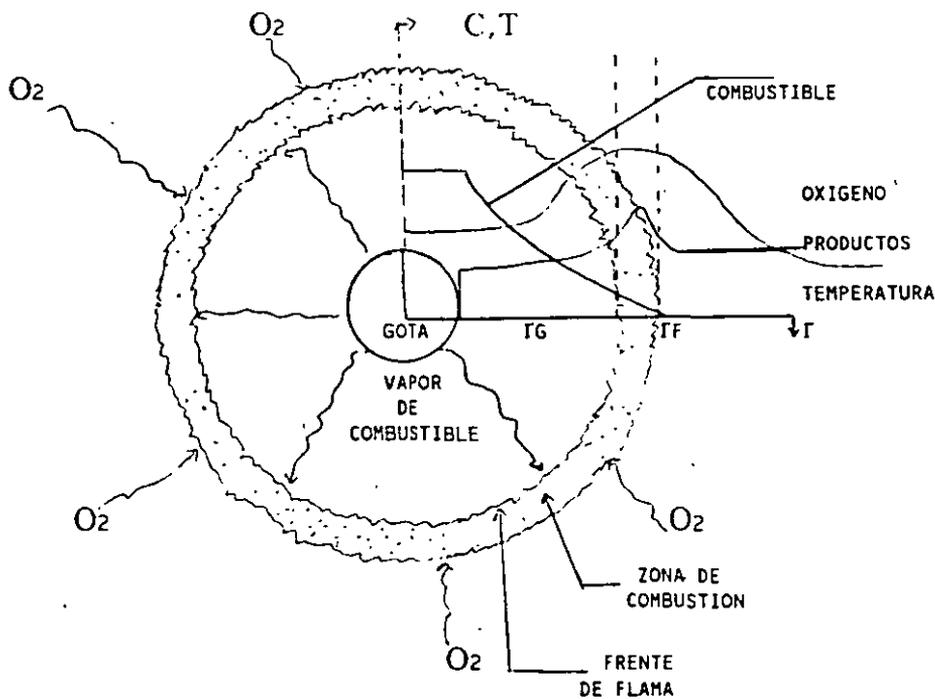


FIG COMPOSICION ESPECULATIVA DE LAS FLAMAS DE ACEITES COMBUSTIBLES.

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 presión 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

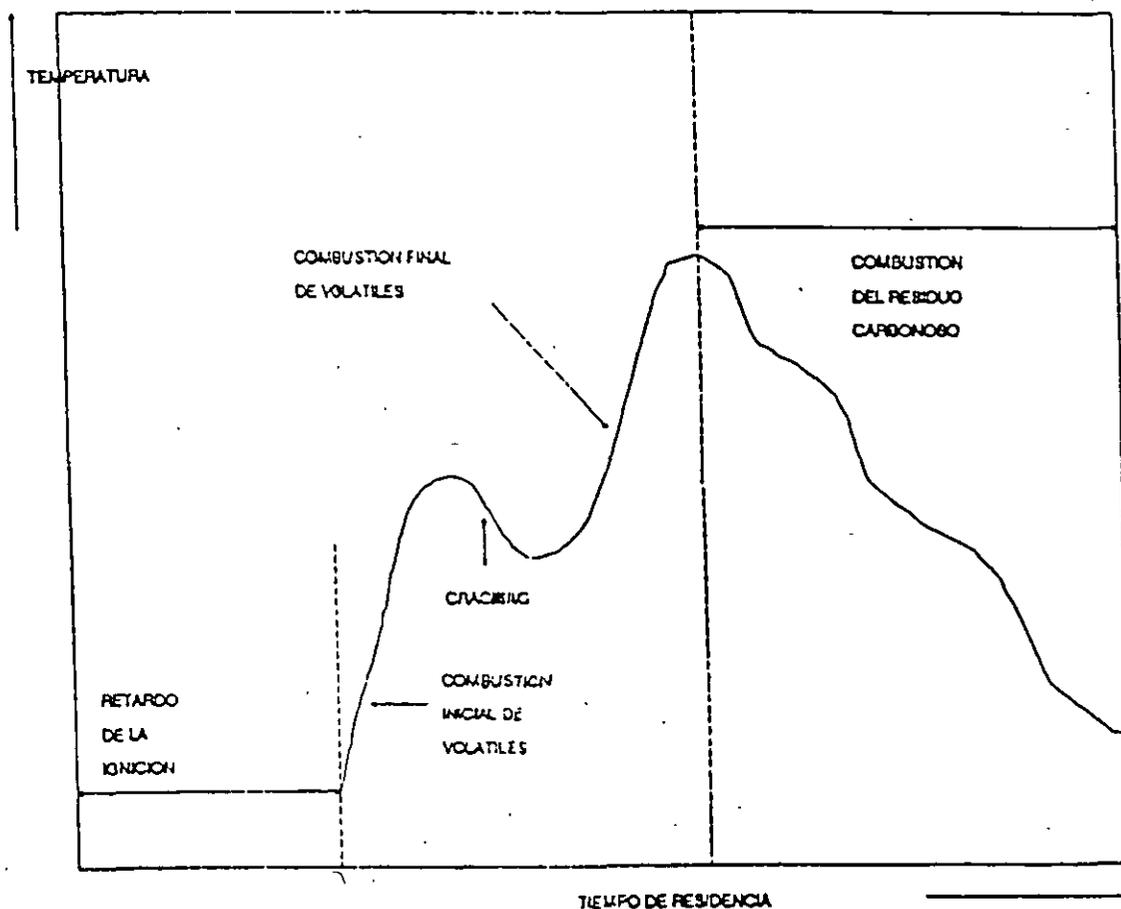
La radiación emitida por la flama continua calentando la gota y haciendo aumentar su temperatura.

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

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 $10\text{-}20\mu$ 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 GOTTA 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 problemas 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.

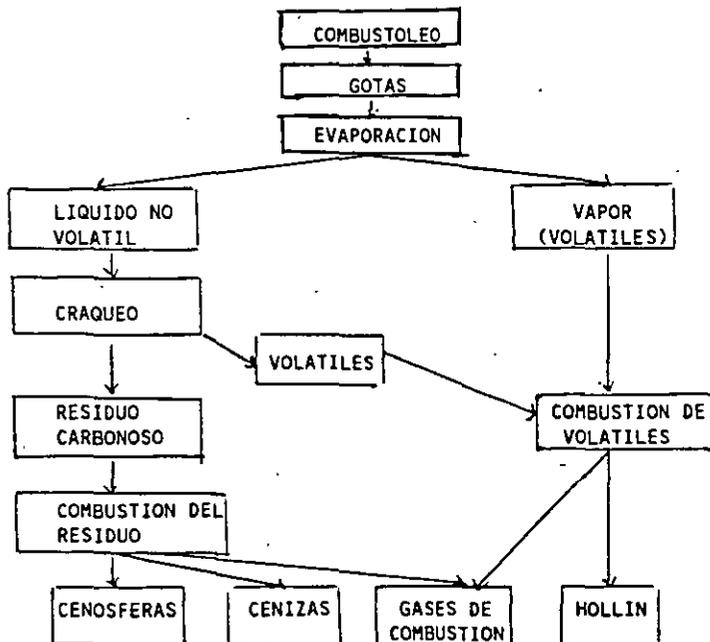
En combustión de estela (igual que en flama envolvente) una vez completada la combustión de la fase vapor, comienza la combustión del residuo carbonoso. Si el diámetro de éste excede las 10-20 μ m la combustión cerca de la superficie de la partícula ocurrirá en la estela turbulenta detrás de la partícula. 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).

V.- SISTEMAS DE CONTROL DE COMBUSTION

I.- 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 ϵ , se determina por la relación:

$$\epsilon = \frac{\text{CO}_2 \text{ max}}{\text{CO}_2}$$

en donde:

CO_2 = concentración obtenida en la medición efectuada

$\text{CO}_2 \text{ max}$ = concentración de CO_2 que se obtendría en una combustión perfecta, con el aire mínimo necesario para la combustión es decir, $\epsilon = 1$.

El valor de CO_2 máximo se puede determinar por cálculo; para combustibles cuya composición no varia en límites grandes, siendo conocidos y tabulados, se tienen los siguientes valores:

$\text{CO}_2 \text{ max} = 15.8\%$ para aceites combustibles derivados del petróleo (combustóleo, gasóleo, diesel, nafta, diáfano).

$\text{CO}_2 \text{ max} = 11.5\%$ para gas natural.



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

CURSOS ABIERTOS

**“ CONTROL DE CONTAMINACIÓN Y
AHORRO DE ENERGÍA
EN CALDERAS ”**

TEMA:

SISTEMA DE CONTROL DE COMBUSTIÓN

**EXPOSITOR: ING. MARTINIANO AGUILAR RODRÍGUEZ
1997**

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.

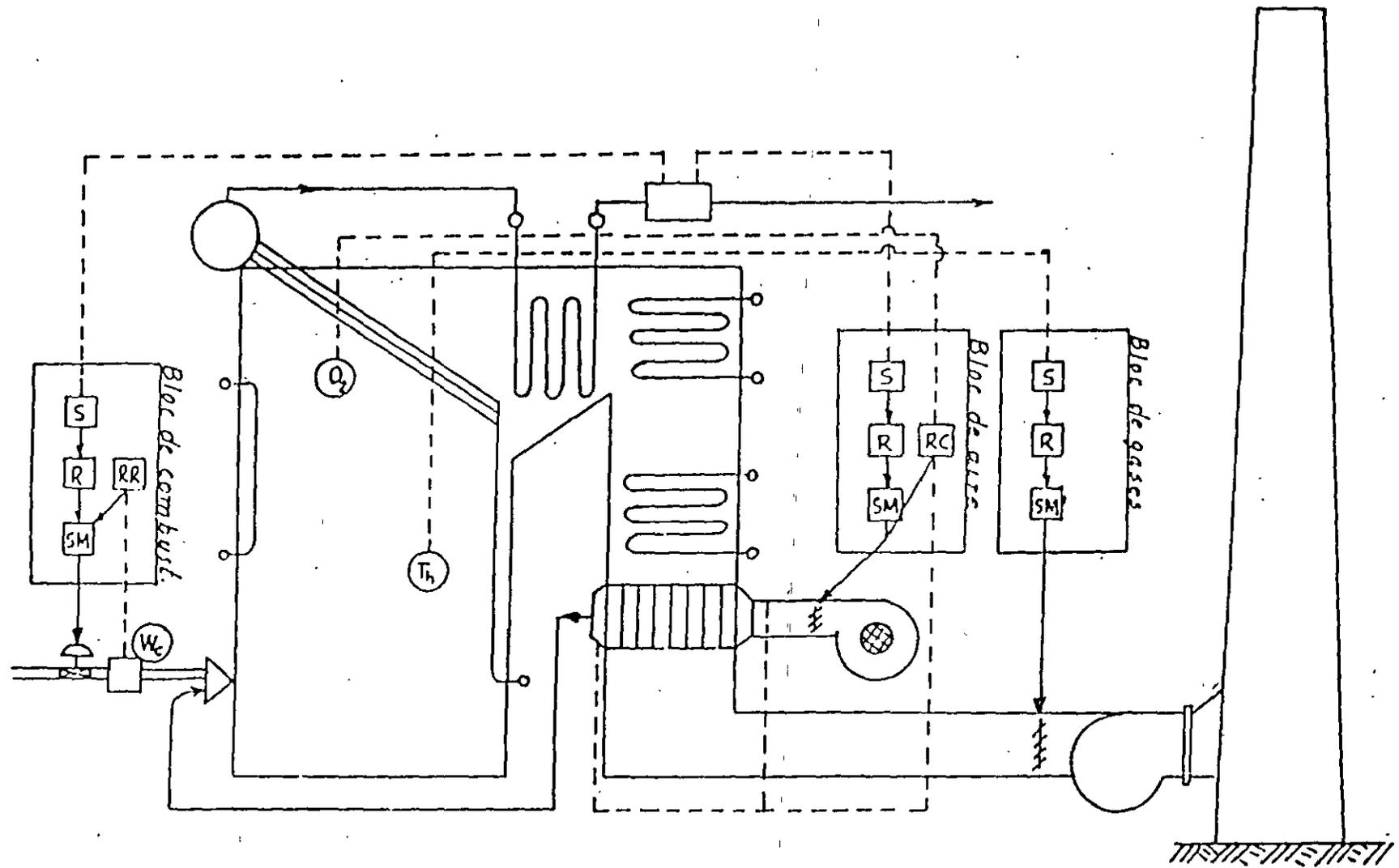


FIG. .- ESQUEMA DE AUTOMATIZACION DE COMBUSTION DE UNA CALDERA

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 (ppa). 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.

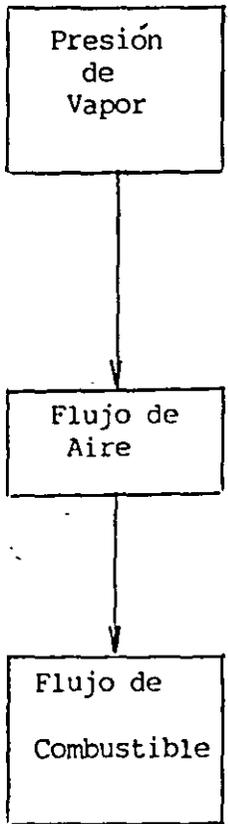
En los sistemas de control paralelos, los cambios en las condiciones de vapor resultan en cambios tanto en el flujo de aire como en el de combustible.

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.

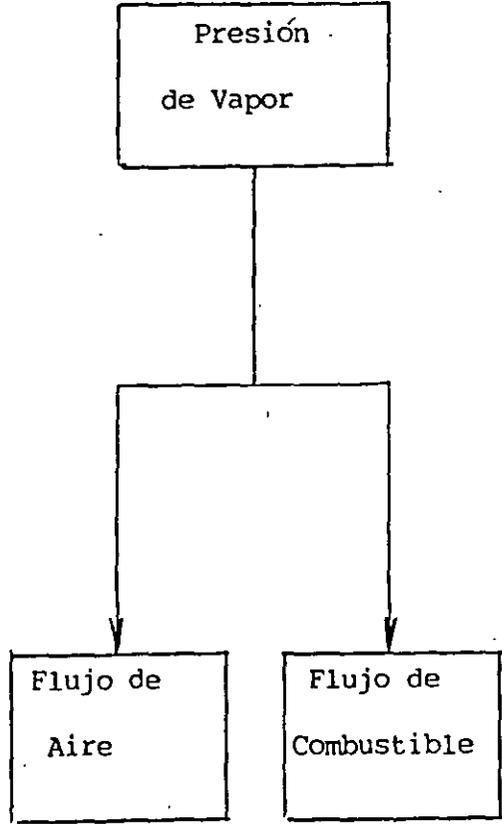
Los sistemas de control de combustión también pueden clasificarse como:

- . controles posicionadores;
- . controles de medición.

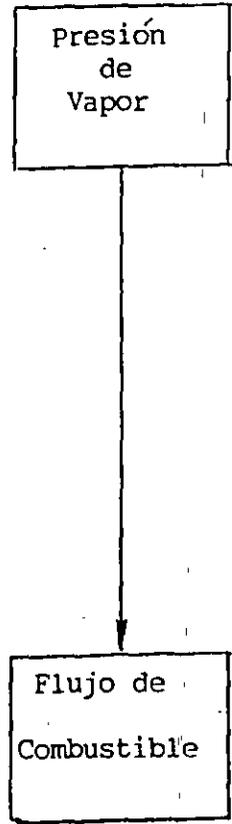
Los controles posicionadores responden a las demandas del sistema moviéndose a una posición pre-ajustada.



Serie



Paralelo



Serie/Paralelo

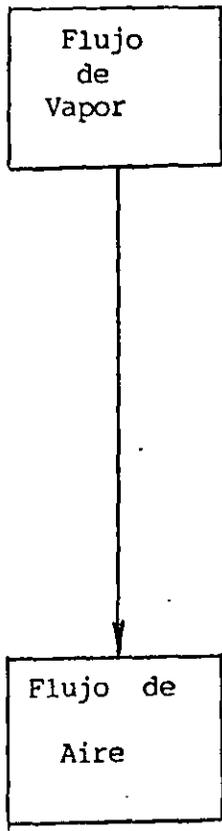


FIG. .- SISTEMAS BASICOS DE CONTROL DE COMBUSTION

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 varia 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 mas 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 mas sofisticados para eficiencias de operación mas altas,
- . regulaciones de contaminación que requieran operación a bajos excesos para minimizar las emisiones de NO_x;
- . interbloqueos 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 esta 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.

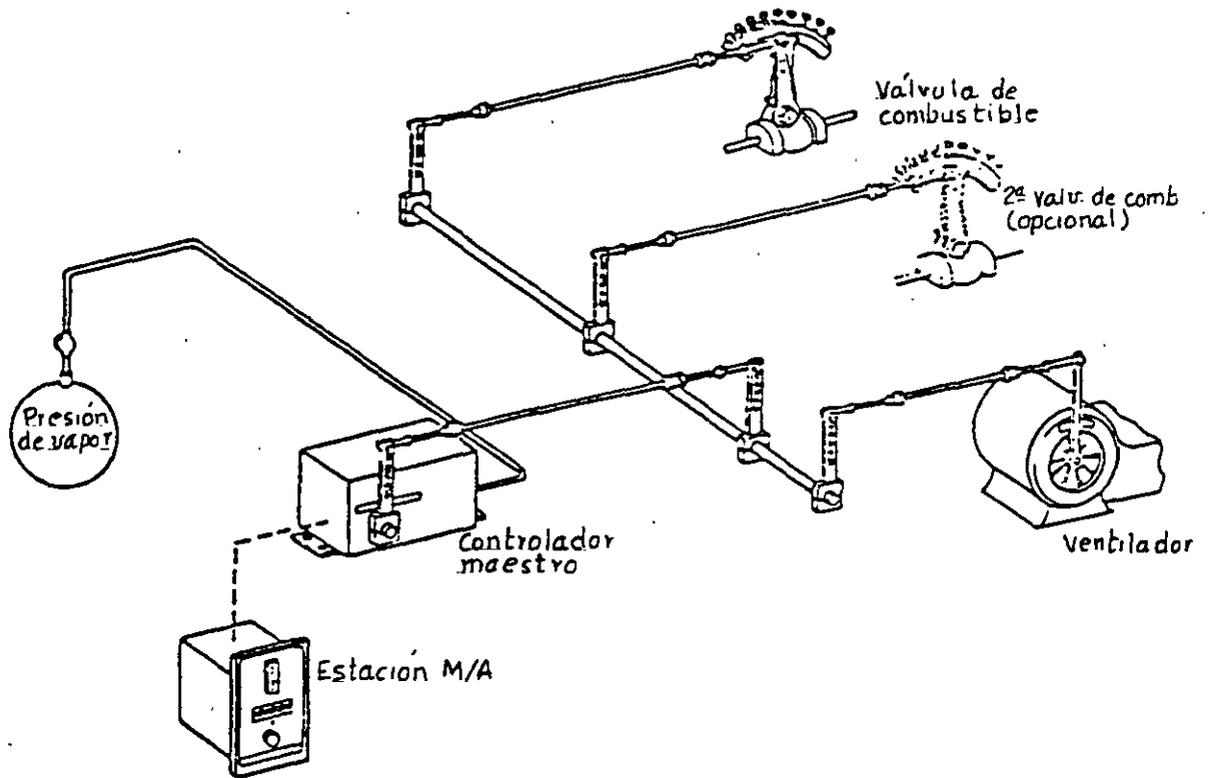


FIG . SISTEMA DE CONTROL DE COMBUSTION TIPO POSICIONAMIENTO

Este tipo de sistema de control resulta en variaciones considerables de exceso de aire dependiendo de las condiciones particulares existentes en determinado momento.

Por lo general se deben pre-ajustar altos niveles de aire para evitar irse abajo de los requerimientos mínimos de exceso de aire; en la operación real el exceso de aire varía sobre un rango considerable.

Estos sistemas de control tienen la ventaja de simplificar la operación, tienen respuesta rápida y confiabilidad aceptable. Los componentes individuales pueden ajustarse independientemente de forma que se facilita la calibración del sistema.

Algunos inconvenientes que tienen éstos sistemas son los siguientes:

- la señal maestra opera retroalimentada de la presión real del vapor;
- los reguladores individuales de aire y combustible no tienen circuito de retroalimentación que asegure que las relaciones aire-combustible estén en el rango correcto

Posicionamiento paralelo con operador adaptado.- Se puede lograr un bajo margen de exceso de aire sustituyendo las articulaciones mecánicas por sistemas de posicionamiento neumático o electrónico que reducen las variaciones causadas por las articulaciones mecánicas.

Se pueden agregar actuadores separados para la válvula de combustible y compuertas del ventilador actuando en paralelo desde un solo controlador de presión de vapor, adicionalmente, puede usarse control individual manual preferente (bias) de entradas de combustible o aire para ajustar la relación aire/combustible. Este sistema requiere una guía de combustión en la forma de un analizador de oxígeno o de flujo de vapor/flujo de aire para auxiliar al operador en el posicionamiento del exceso de aire.

El control de posicionamiento paralelo es el sistema de control de combustión más ampliamente usado en calderas de menos de 45,000 kg de vapor/hora. Ajustando la relación aire/combustible se pueden hacer compensaciones por variaciones en las características del combustible, condiciones de combustión o equipo del sistema de control.

Relación de presión - El uso de la presión de combustible en el quemador y la diferencial de presión de la caja de aire al hogar como una indicación de los flujos de combustible y aire respectivamente son los más elementales de los sistemas de tipos de medición.

Un sistema neumático o electrónico paralelo básico se usa con la relación de presión de caja de aire al hogar/quemador empleado para acondicionar los flujos de aire y combustible. Normalmente se provee un control manual de preferencia (bias) para cambiar la relación de presión y flujo de exceso de aire, incorporándole una guía de combustión.

Este sistema elimina imprecisiones debidas a variaciones en la presión del combustible y descarga del ventilador, pero requiere que las relaciones para el combustible y el aire tengan características similares; con frecuencia existen problemas de alineamiento, causando imprecisiones. Las variaciones en el combustible y su valor calorífico, o en las densidades del aire no pueden ser reconciliadas.

Medición de combustible y aire - Si se refina más el sistema de control incluyendo mediciones reales de combustible y aire, se pueden eliminar adicionales fuentes de error, reduciendo más los niveles de exceso de aire. Existen varios tipos disponibles de dispositivos de medición de flujo, sin embargo, tienen algunas limitaciones, así como también los tipos de combustibles que pueden ser medidos con precisión.

Se pueden emplear algunas combinaciones de componentes en un sistema de control por medición. Se emplean lazos de retroalimentación para permitir que el aire y el combustible autocorrijan los flujos para satisfacer las demandas del sistema. Normalmente se requiere aire adicional para compensar la diferencia en la velocidad de respuesta entre los lazos de flujo de aire y combustible.

Con éste sistema de control se superan algunos de los inconvenientes de los controles paralelo y serie del tipo posicionamiento, sin embargo, la complejidad y mayor costo de este sistema de control por medición limita su uso a calderas de capacidades grandes.

En el sistema de control por medición, los reguladores de aire y combustible operan en circuitos cerrados; la presión de vapor se mide y retroalimenta a través de un control maestro que ajusta los flujos de combustible y aire. Estos flujos se miden y su señal es retroalimentada a los dispositivos de control para asegurar su coordinación con el controlador maestro.

Medición cruzada limitada - Un refinamiento adicional al sistema por medición, es el sistema por medición cruzada limitada, que limita el cambio en el flujo de combustible, a través de un control lógico, al flujo de aire disponible todo el tiempo. La cantidad de flujo de aire también está "amarrada" al flujo de combustible existente y debe ser igual o más grande que el flujo de combustible

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 compuerta 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 compuerta 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.



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

CURSOS ABIERTOS

**“ CONTROL DE CONTAMINACIÓN Y
AHORRO DE ENERGÍA
EN CALDERAS ”**

TEMA:

**AFINACIÓN O CARBURACIÓN
DE CALDERAS**

**EXPOSITOR: ING. MARTINIANO AGUILAR RODRÍGUEZ
1997**

VI.- AFINACION DE CALDERAS.

1.- DIAGNOSTICO.

Uno de los medios mas efectivos de mejorar y mantener la eficiencia de operación de las calderas es una "afinación" o puesta a punto de la misma; esta actividad clasificada como mantenimiento preventivo es uno de los enfoques más directos de conservación de combustibles, a través del mejoramiento de la eficiencia.

El objetivo primario en una afinación es el de lograr una eficiente combustión con una cantidad controlada de exceso de aire. Operando con el exceso de aire práctico mas bajo se minimizan las pérdidas de eficiencia reduciendo la cantidad innecesaria de aire que es calentado a la temperatura de la chimenea y que no es utilizado. La reducción 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 tendrá un efecto mas grande cuando la temperatura en la chimenea es alta. Por ejemplo, una reducción en el exceso de aire de 10% (de 20 a 10% ó de 100 a 90% en exceso de aire) producirá 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 mejorará 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 carbón). Se han documentado casos en que con reducciones en el exceso de aire de más del 10% fue posible tener mejoramiento de eficiencias de varios puntos porcentuales.

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

A pesar de que es importante que el exceso de aire enviado al quemador se conserve a un mínimo sobre el rango de operación de la caldera, por lo general no es práctico operar precisamente en este punto de máxima eficiencia; éste óptimo ocurre típicamente en el "umbral" de combustible o formación de humo y puede resultar en una condición 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, 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 crítico 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 puerto 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 más 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 más altas de gases y a eficiencias más 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 el 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:

- Ahorra dinero en combustible.
- Reduce el costo de energía en el punto en que se usa.
- 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.

TABLA . - EXCESO DE AIRE OPTIMO			
COMBUSTIBLE	METODO DE QUEMADO	EXCESO DE AIRE OPTIMO (%)	O ₂ EQUIVALENTE POR VOLUMEN
GAS NATURAL	-----	5 - 10	1 - 2
PROPANO	-----	5 - 10	1 - 2
GAS DE COKE	-----	5 - 10	1 - 2
ACEITE No. 2	ATOMIZACION C/VAP	10 - 15	2 - 3
ACEITE No. 6	ATOMIZACION C/VAP	10 - 15	2 - 3
CARBON	PULVERIZADO	15 - 20	3 - 3.5
CARBON	ALIMENTADOR	20 - 30	3.5 - 5

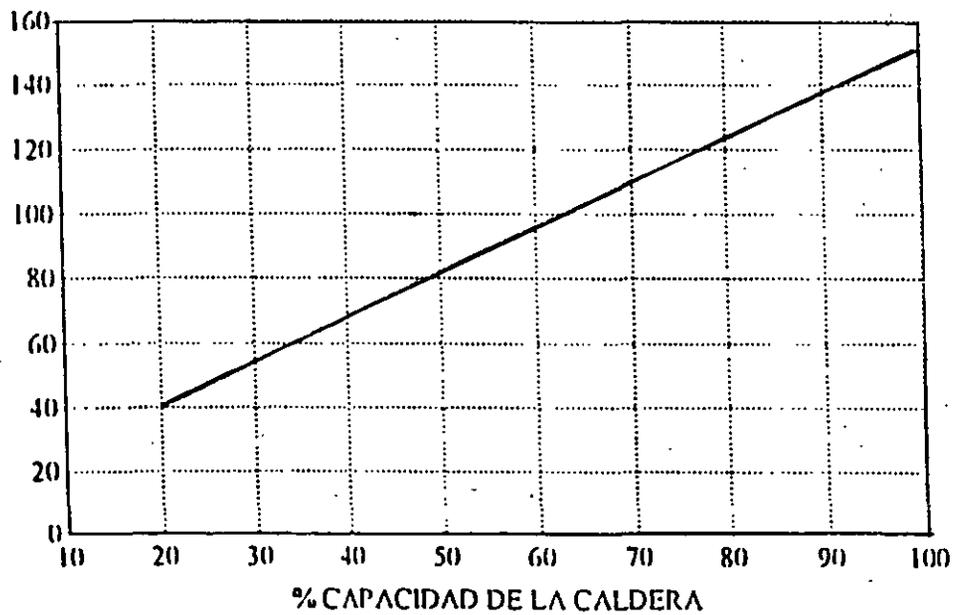


Fig. .- Temperatura de los gases de salida de caldera por encima de la temperatura del vapor saturado

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, ^{aunque} 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 brifios 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 prevenir 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 hollin 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 envoltente 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 hollin.
- Fugas en envoltentes 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 regimenes 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 limite 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; 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.

SSN MAXIMO DESEABLE		EFFECTO DEL HUMO EN FORMACION DE HOLLIN	
PARA COMBUSTIBLE	MARCA MAXIMA DE HUMO	CLASIFICACION	HOLLIN PRODUCIDO
NO. 2	1	EXCELENTE	SI SE FORMA, MUY LIGERO
NO. 4	2	BUENO	DEPOSITO LIGERO NO INCREMENTA APRECIABLEMENTE LA TEMPERATURA DE LA CHIMENEA
NO. 5	3	REGULAR	PUEDE HABER ALGO DE HOLLIN, PERO OCASIONALMENTE REQUERIRA LIMPIEZA MAS DE UNA VEZ AL AÑO
NO. 6	4	POBRE	CONDICION DE FRONTERA, ALGUNAS UNIDADES REQUERIRAN LIMPIEZA MAS DE UNA VEZ AL AÑO
	5	MUY POBRE	LOS DEPOSITOS DE HOLLIN PROGRESAN RAPIDAMENTE Y SON CONSIDERABLES

Fig.

. - EFECTO DEL SSN EN LA FORMACION DE HOLLIN.

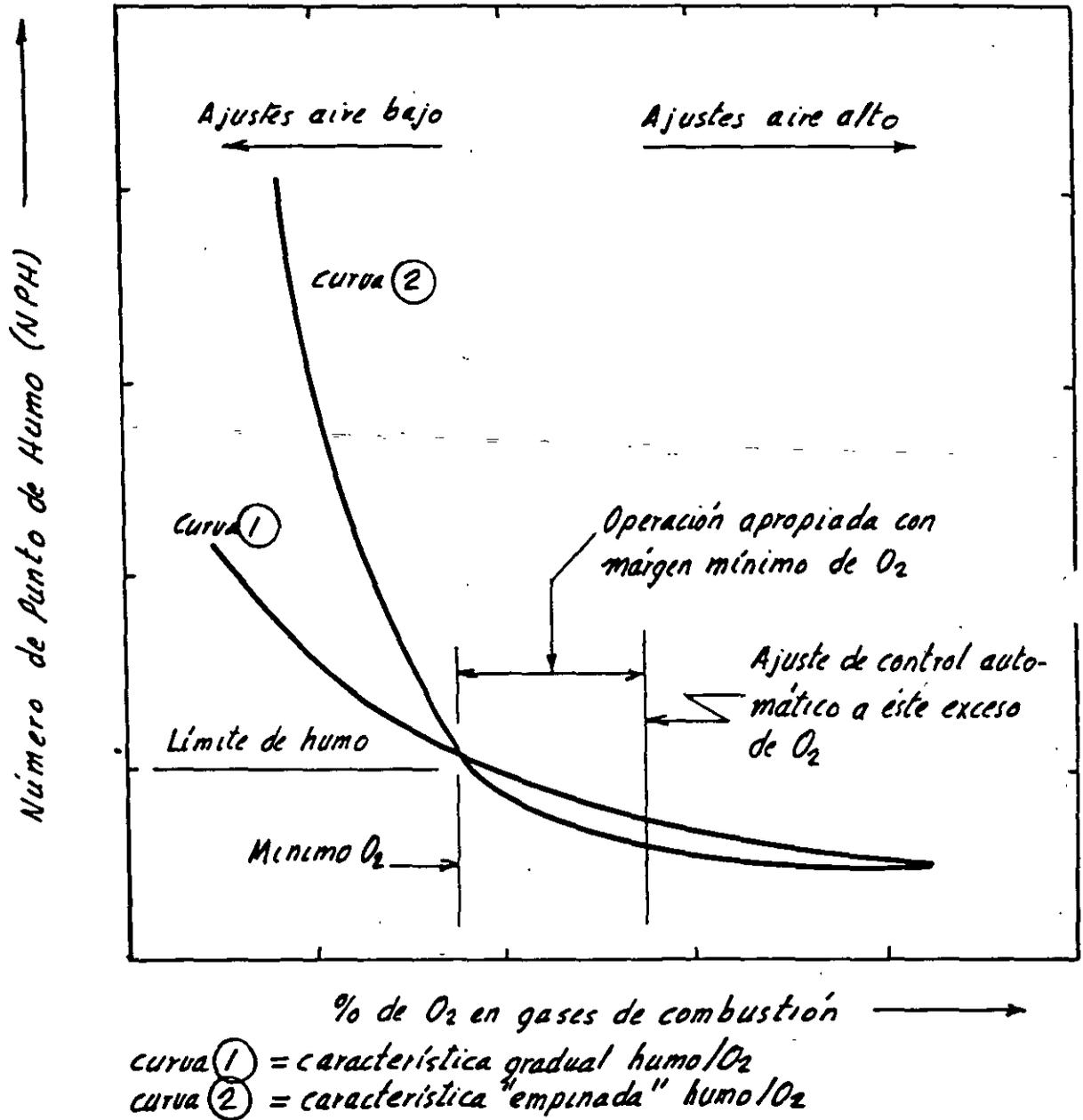


FIG CURVAS CARACTERISTICAS TÍPICAS HUMO- O_2 PARA CALDERAS CON COMBUSTIBLES LÍQUIDOS Y SÓLIDOS

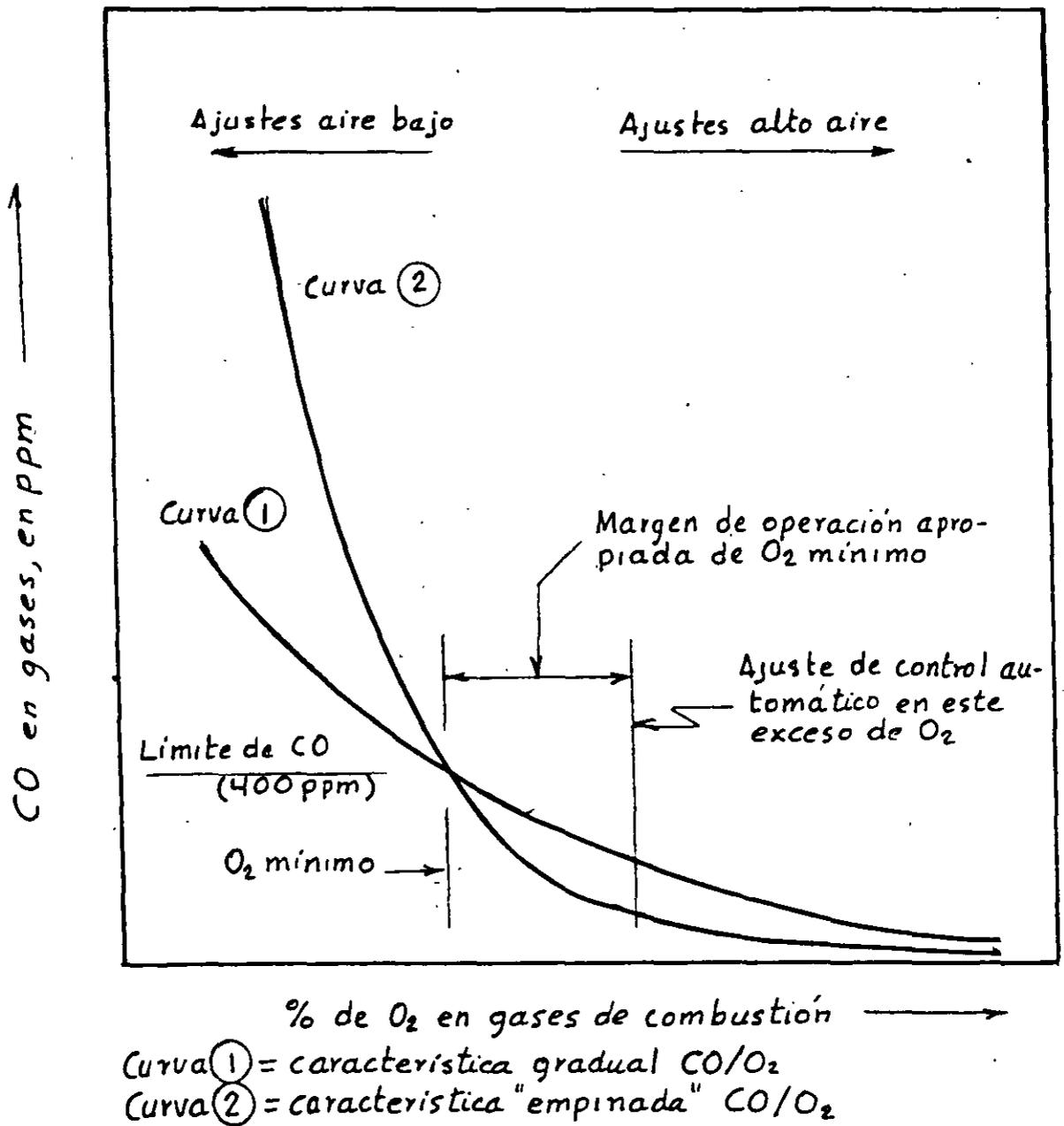


FIG. . CURVAS CARACTERISTICAS TYPICAS CO- O_2 PARA CALDERAS INDUSTRIALES DE GAS COMBUSTIBLE

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 O_2 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 O_2 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 O_2 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 den 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 O_2 .

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 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 puedan establecerse comparaciones con sentido práctico.

Los factores^{que} 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 la 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 CONTAMINACIÓN Y
AHORRO DE ENERGÍA
EN CALDERAS ”**

TEMA:

**MANTENIMIENTO EFICIENTE
Y CONTAMINACIÓN**

**EXPOSITOR: ING. MARTINIANO AGUILAR RODRÍGUEZ
1997**

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 aqui 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 podrian 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 e 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 las 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.

Cuando 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 esta 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; esta 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;
- . apariencia 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 quemen 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 mas pequeñas y bimensalmente para unidades mas 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 mas 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

QUEMADORES				CONTROLES DE COMBUSTION	HOGAR
GAS	ACEITE	CARBON PULVERIZADO	STOKER		
<ul style="list-style-type: none"> . Limpieza y condiciones de orificios de inyección. . Limpieza y operación de filtros de trampa de humedad. . Limpieza y orientación de difusores. . Condición de refractario de quemadores. . Operación y condiciones de compuertas de aire. 	<ul style="list-style-type: none"> . Limpieza y condiciones de pasajes de aceite de la ficha. . Temperatura de aceite quemandose. . Presión de vapor de atomización. . Orientación y condición de difusores de quemadores. . Posición del cañón del quemador. . Limpieza de filtros de aceite. . Condición del refractario de la garganta del quemador. . Operación y condición de las compuertas de aire. 	<ul style="list-style-type: none"> . Operación y condición de pulverizadores, alimentadores y transportadores. . Finesa del carbón. . Condición de tuberías de carbón. . Buscar cualquier signo de erosión o quemado. . Operación y condición de compuertas de aire. 	<ul style="list-style-type: none"> . Desgaste en rejillas . Operación y condición de stokers. . Posicionamiento de todas las compuertas proporcionadores de aire. . Tamaño del carbón. . Operación del sistema de reinyección de brasas. 	<ul style="list-style-type: none"> . Limpieza y movimiento apropiado de válvulas de combustibles. . Excesivo "juego" en eslabones de control y compuertas de aire. . Presión adecuada en todos los reguladores de presión. . Ciclos incesarios de régimen de combustión (quemado). . OPERACION APROPIADA DE TODOS LOS INTERLOCKS DE SEGURIDAD Y CIRCUITOS DE DISPARO DE LA CALDERA. 	<ul style="list-style-type: none"> . Depositos excesivos o suciedad en el lado de gases de tubos. . Operación apropiada de sopladores. . Fugas en cubierta y ductos. . Operables y limpios los registros de inspección.

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	· 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	· 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"> · Sobre calentamiento · Intemperismo
	Excesiva operación de sopladores	· Programa arbitrario de operación en exceso a requerimientos



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

CURSOS ABIERTOS

**“ CONTROL DE CONTAMINACIÓN Y
AHORRO DE ENERGÍA
EN CALDERAS ”**

TEMA:

PRUEBAS DE CALDERAS

**EXPOSITOR: ING. MARTINIANO AGUILAR RODRÍGUEZ
1997**

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 ésta 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.

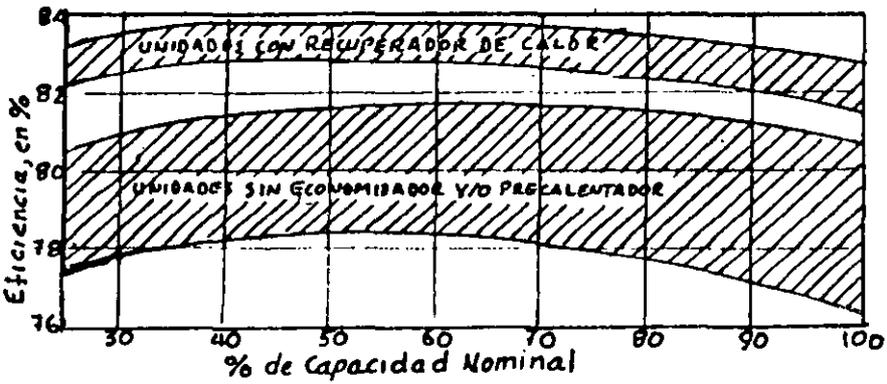
Eficiencias afinadas.

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.

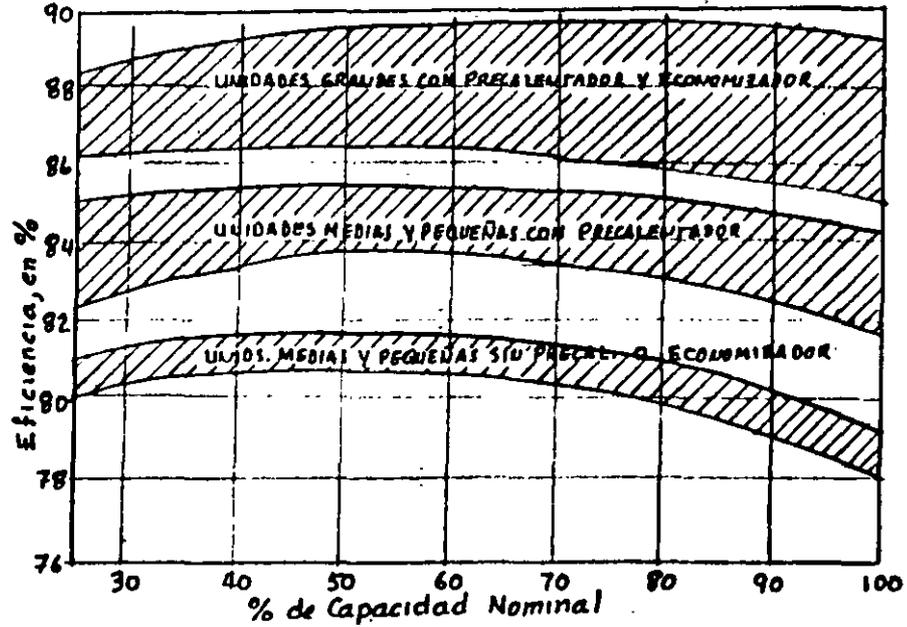
En la Tabla , se muestran las eficiencias afinadas de calderas industriales de diferentes tipos, diferente combustible y varias capacidades, incluyéndose valores medidos, calculados y de diseño.

Eficiencia máxima obtenible económicamente.

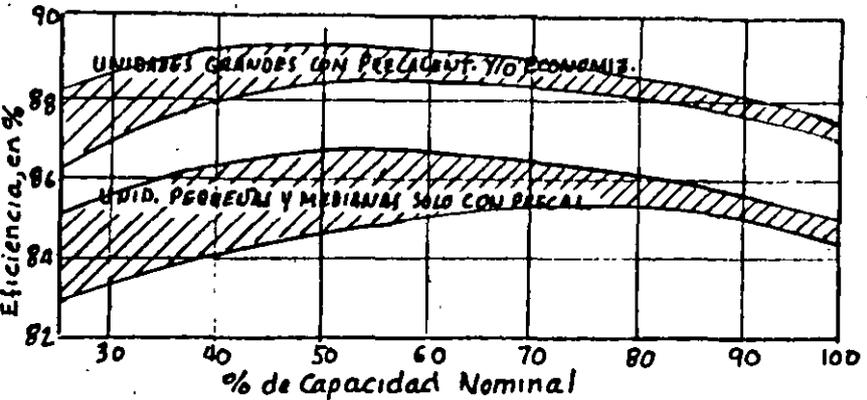
En la determinación de la justificación del costo de quipo auxiliar agregado están involucrados varios factores; cualquier esti-



Comportamiento típico de Calderas de tubos de agua, de Gas comb.



Comportamiento típico de Calderas de tubos de agua de Aceite combustible



Comportamiento típico de Calderas de Carbon pulverizado de tubos de agua

FIG. . RANGOS DE EFICIENCIAS DE OPERACION DE CALDERAS

Categoria/Comb.	Capacidad (MBtu/hr)							
	10-16		16-100		100-250		250-500	
	Medi- da	Calcu- lada	Medi- da	Calcu- lada	Medi- da	Calcu- lada	Medi- da	Calcu- lada
Tubos de agua								
Gas	(78.0)	79.9	79.5	79.9	81.2	80.9	(82.8)	81.2
Acete	(81.5)	83.7	82.8	83.7	(83.4)	84.6	(82.7)	85.3
Carbon-Stoker	*	81.0	76.6	81.2	82.2	81.8	*	82.5
Pulverizado	*	83.2	*	83.3	(86.6)	86.1	(85.3)	86.3
Tubos de humo								
Gas	(81.0)	79.9	79.5	79.9	NA		NA	
Acete	(86.3)	83.7	(85.8)	83.7	NA		NA	

TABLA . PROMEDIO DE EFICIENCIA DE CALDERAS "COMO SE ENCUENTRAN", EN %

Categoria/Comb.	Capacidad (10 ⁶ Btu/hr)											
	10-16			16-100			100-250			250-500		
	Medi- da	Diseño	Calcu- lada	Medi- da	Diseño	Calcu- lada	Medi- da	Diseño	Calcu- lada	Medi- da	Diseño	Calcu- lada
Tubos de agua												
Gas	(78.4)	*	80.1	81.2	80.2	80.2	81.2	82.0	81.7	(83.7)	(83.4)	82.0
Acete	*	*	84.1	83.7	82.5	84.2	82.8	85.1	85.5	(81.5)	*	86.2
Carbon - Stoker	*	*	81.3	80.9	(86.6)	81.0	83.6	(82.9)	82.0	*	*	82.7
Pulverizado	*	*	83.8	*	*	83.9	(86.1)	(86.3)	86.5	(85.4)	(88.0)	86.7
Tubos de humo												
Gas	(81.2)	(82.0)	80.1	(81.9)	(83.0)	80.2	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Acete	(86.2)	(85.0)	84.1	(87.4)	(85.0)	84.2	NA	NA	NA	NA	NA	NA

TABLA . PROMEDIO DE EFICIENCIA DE CALDERAS AFINADAS, EN %

Categoría/Comb.	Capacidad (10 ⁶ Btu/hr)			
	10-16	16-100	100-250	250-500
Gas	80.1	81.7	84.0	85.2
Aceite	84.1	86.7	88.3	88.7
Carbon				
Stoker	81.0	83.9	85.5	85.8
Pulverizado	83.3	86.8	88.8	89.1

TABLA . NIVELES DE EFICIENCIA MAXIMA ECONOMICAMENTE OBTENIBLE, EN %

	10-16	16-100	100-250	250-500
	Klb/hr	Klb/hr	Klb/hr	Klb/hr
Gas	85.6	86.2	86.5	86.6
Aceite	88.8	89.4	89.7	89.8
Carbon				
Stoker	86.4	87.0	87.3	87.4
Pulverizado	89.5	90.1	90.4	90.5

TABLA . NIVELES DE EFICIENCIA MAXIMA OBTENIBLE, EN %

Fuel	10-16 k lb/hr											10-100 k lb/hr												
	Base η	Afinada				Max. Econ. Abtenible			Maxima Abtenible				Base η	Afinada				Max. Econ. Abtenible			Maxima Abtenible			
		η	$\Delta\eta$	%Fuel	η	$\Delta\eta$	%Fuel	η	$\Delta\eta$	%Fuel	η	$\Delta\eta$		%Fuel	η	$\Delta\eta$	%Fuel	η	$\Delta\eta$	%Fuel				
Gas	79.9	80.1	0.2	0.25	80.1	0.2	0.25	85.6	5.7	6.66	79.9	80.2	0.3	0.37	81.7	1.8	2.20	86.2	6.3	7.31				
Aceite	83.7	84.1	0.4	0.48	84.1	0.4	0.48	88.8	5.1	5.74	83.7	84.2	0.5	0.59	86.7	3.0	3.46	89.4	5.7	6.38				
Carb.- Stoker	81.0	81.3	0.3	0.37	81.3	0.3	0.37	86.4	5.3	6.13	81.2	81.9	0.7	0.86	83.9	2.7	3.22	87.0	5.8	6.67				
Pulverizado	83.2	83.8	0.6	0.72	83.8	0.6	0.72	89.5	6.3	7.04	83.3	83.9	0.6	0.72	86.8	2.5	2.88	90.1	6.8	7.55				
Fuel	100-250 k lb/hr											250-500 k lb/hr												
	Base η	Afinada				Max. Econ. Abtenible			Maxima Abtenible				Base η	Afinada				Max. Econ. Abtenible			Maxima Abtenible			
		η	$\Delta\eta$	%Fuel	η	$\Delta\eta$	%Fuel	η	$\Delta\eta$	%Fuel	η	$\Delta\eta$		%Fuel	η	$\Delta\eta$	%Fuel	η	$\Delta\eta$	%Fuel				
Gas	80.9	81.7	0.8	0.98	84.0	3.1	3.69	86.5	5.6	6.47	81.2	82.0	0.8	0.98	85.2	4.0	4.70	86.6	5.4	6.24				
Aceite	84.6	85.3	0.9	1.05	88.3	3.7	4.19	89.7	5.1	5.69	85.3	86.2	0.9	1.06	88.7	3.4	3.83	89.8	4.5	5.01				
Carb.- Stoker	81.8	82.0	0.2	0.24	85.5	3.7	4.33	87.3	5.5	6.30	82.5	82.7	0.2	0.24	85.8	3.3	3.85	87.4	4.9	5.61				
Pulverizado	86.1	86.5	0.4	0.46	88.8	2.7	3.04	90.4	4.3	4.76	86.3	86.7	0.4	0.46	89.1	2.8	3.14	90.5	4.2	4.64				

TABLA . POTENCIAL DE CONSERVACION DE ENERGIA EN CALDERAS INDUSTRIALES, EN %

mado 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 recuperador 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 y 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

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 Ringelman.

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 rasgadas 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 vibración 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 "perezoso";
- el color puede cambiar con fuegos de gas natural volvién-

dose 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:

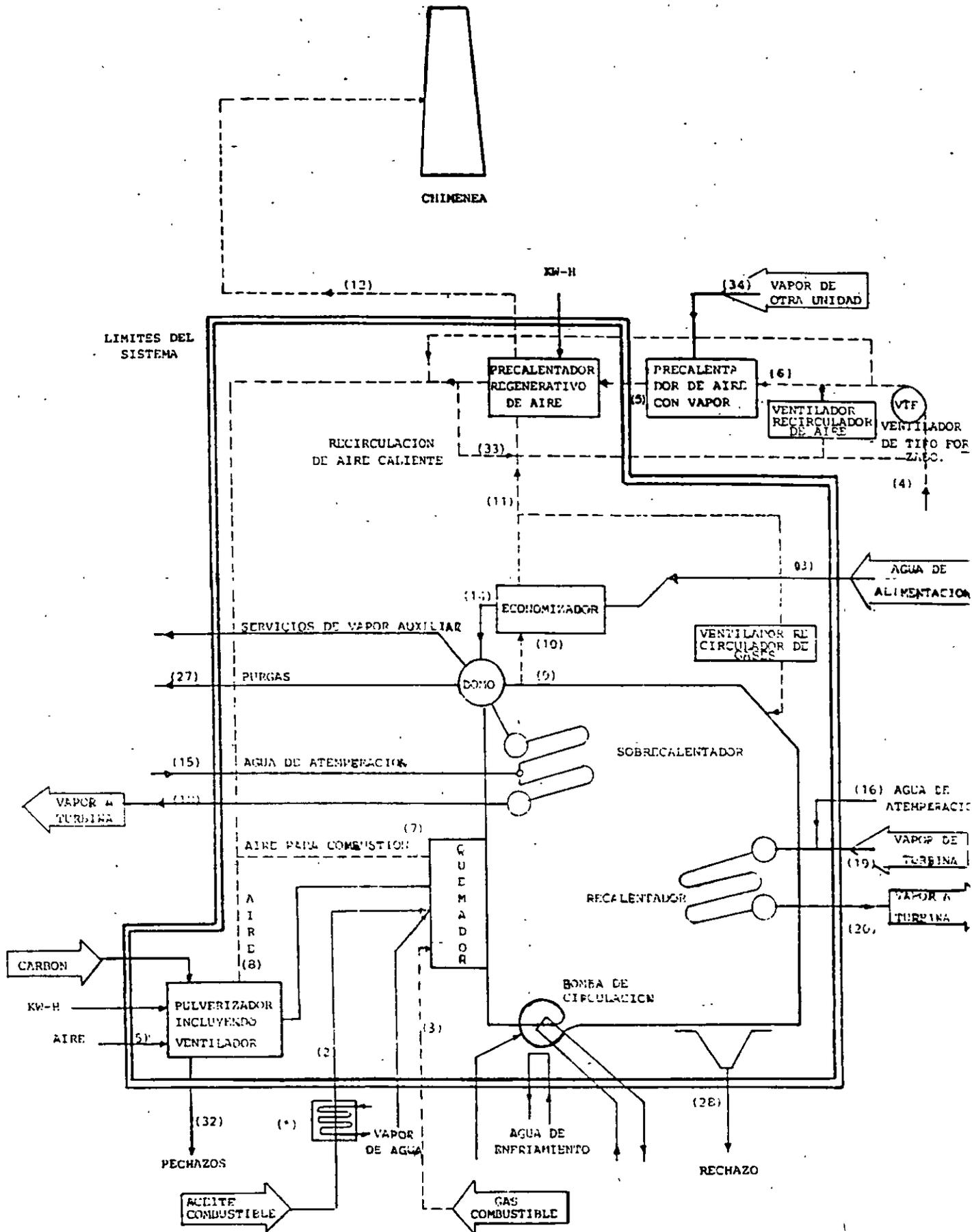
- reducción de las pérdidas de energía de calor de desecho en los gases de la chimenea;
- reducción en las pérdidas de energía de calor de desecho en el agua de desecho expulsada;
- reducción en las pérdidas de calor de la superficie de transferencia de calor a la atmósfera;
- reducción de las pérdidas 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 designándose 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.



(*) Ver figura en párrafo No.

FIG. 1

DIAGRAMA DE FLUJO UNIDAD DE GENERACION DE VAPOR DE AGUA

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 resultado de no estar equipadas 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.

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.

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.

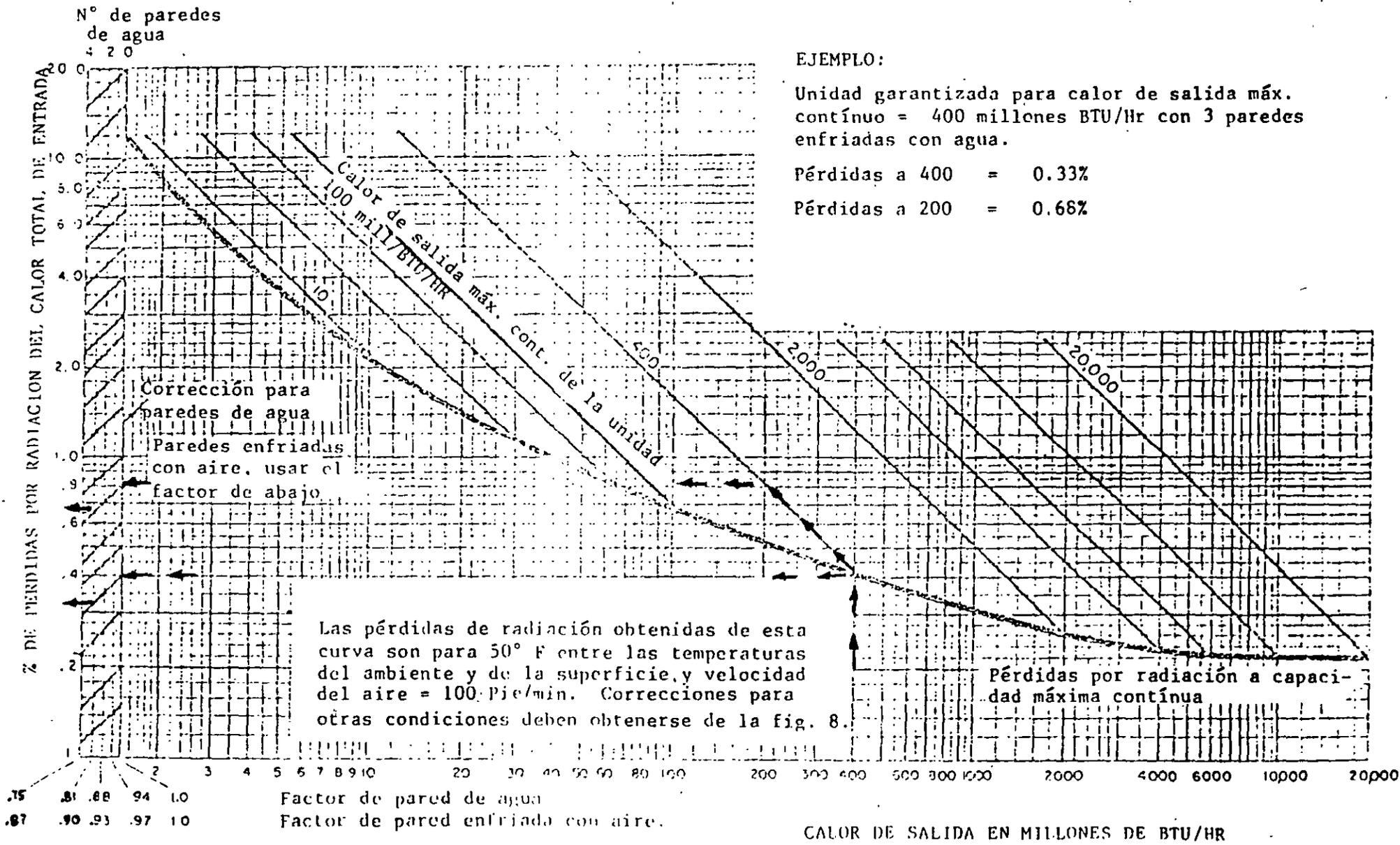


FIGURA . CARTA DE PERDIDAS POR RADIACION (ABMA)

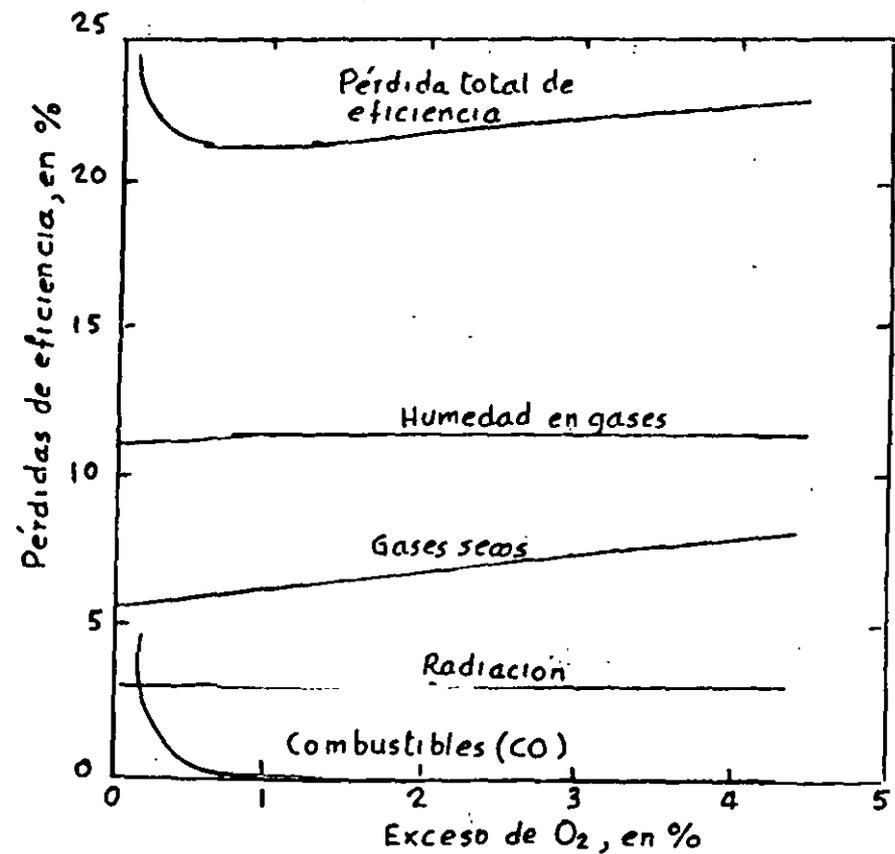


FIG . VARIACION DE PERDIDA DE EFICIENCIA EN CALDERAS, CON CAMBIOS EN EL EXCESO DE O₂

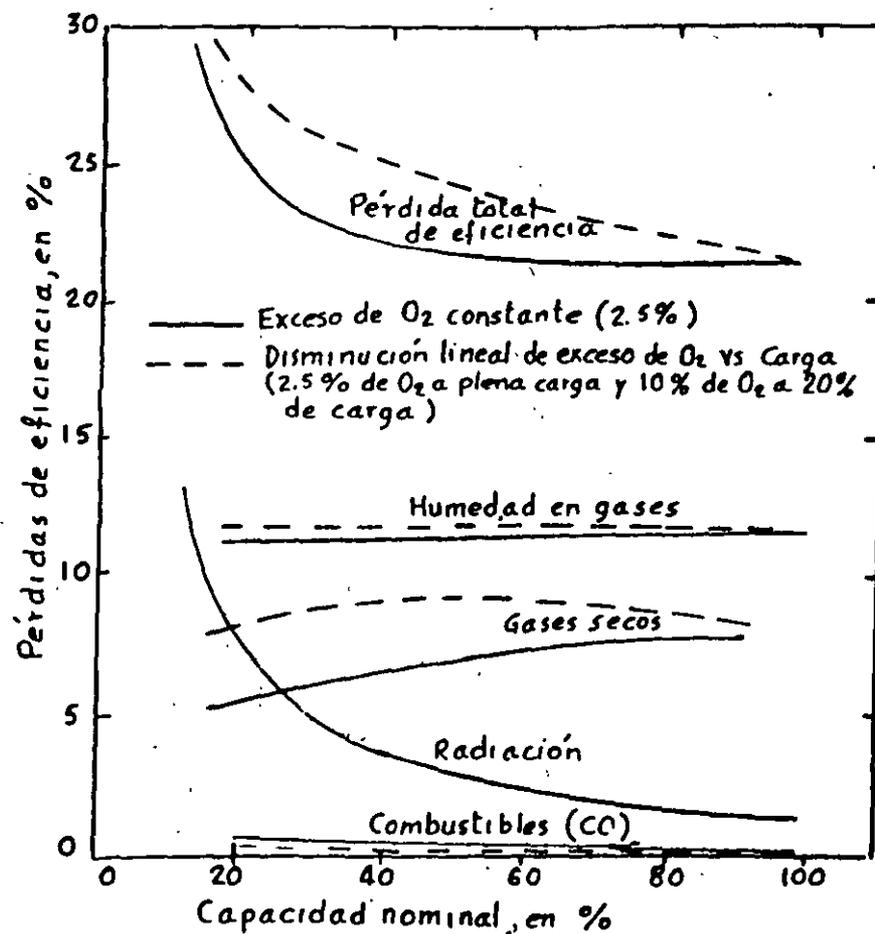


FIG . VARIACION DE PERDIDA DE EFICIENCIA EN CALDERAS CON CAMBIOS EN REGIMENES DE FUEGOS

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.

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%, y quemando combustóleo es de aproximadamente 6%.
- Pérdidas de calor debidas 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:

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

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

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:

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

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

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

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

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

Método de las pérdidas:

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

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

$$\eta = 85\%$$

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

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

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

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

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.



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

CURSOS ABIERTOS

**“ CONTROL DE CONTAMINACIÓN Y
AHORRO DE ENERGÍA
EN CALDERAS ”**

TEMA:

**RECUPERACIÓN DE CALOR
Y CONTAMINACIÓN**

EXPOSITOR: ING. MARTINIANO AGUILAR RODRÍGUEZ

1997

IX.- LA RECUPERACION DE CALOR

En esta parte se revisan los tipos mas importantes de equipos auxiliares y dispositivos disponibles para recuperar calor de la caldera y mejorar la eficiencia de ésta.-

Los equipos auxiliares y dispositivos recuperadores de calor mas importantes son los siguientes:

- . precalentadores de aire
- . economizadores
- . turbuladores
- . suministro de combustible y quemadores
- . lado de agua
- . sopladores de hollin
- . aislamiento

La mayoría de éstos equipos ^{pueden} montarse en unidades existentes pero en muchos casos es economicamente mas práctico comprar estos equipos con una nueva unidad.-

1.- PRECALENTADORES DE AIRE

Los precalentadores de aire se emplean para transferir la ^energía calorífica de los gases de escape al entrante suministro de aire para la combustión, con lo cual se obtienen las ventajas principales siguientes:

- . mejoramiento de la eficiencia de la caldera en todas las cargas como resultado de la reducción de la temperatura de los gases de salida;
- . mejoramiento de las condiciones de combustión en el quemador, permitiendo la operación con bajos excesos de aire.

Los precalentadores de aire pueden utilizarse economicamente en unidades de tan baja capacidad como de 1 000 kg/h. de vapor.-

En unidades grandes, la elección ^{de} un precalentador y un economizador se hace sobre las siguientes bases:

- . temperatura de gases de escape;
- . costos de instalación y operación;
- . pérdidas de tiro;
- . tipo y arreglo de la caldera;
- . presión de temperatura de vapor, que puede limitar la temperatura máxima de agua de alimentación y la aplicación de un economizador;
- . propiedades corrosivas de los gases ^{que} pueden determinar la temperatura práctica mas baja de los gases de escape;
- . necesidades de mantenimiento.-

Por lo general en unidades grandes con presiones de vapor de mas de 30 kg/cm² se utilizan tanto precalentadores de aire como economizadores

COMPORTAMIENTO

Considerando solo los beneficios de utilizar la energía calorífica en los gases de combustión para calentar el aire para la combustión, la eficiencia total del generador vapor se incrementa aproximadamente 2.5 % por cada 55°C de disminución en la temperatura de los gases de escape, o bien 2 % por cada 55°C de aumento en la temperatura del aire.

Cualquier mejoramiento acompañado el exceso de aire del quemador con el precalentamiento de aire para la combustión capacitará para ganar eficiencia adicional; por ejemplo, un precalentador de aire que provea aire de combustión de 150°C puede resultar en un ahorro de combustible hasta de 5 %.-

El mejoramiento de eficiencia para una disminución dada de temperatura de los gases de escape puede estimarse por medio de la Fig. ; utilizando estos valores, se puede estimar el ahorro anual bruto de combustible aproximado utilizando el nomograma de la fig .- El flujo de vapor utilizando en este nomograma corresponde a un promedio de carga basada en 6,000 horas/año de operación; restando los cargos fijos y sumando los costos de operación se obtiene el ahorro anual neto aproximado.

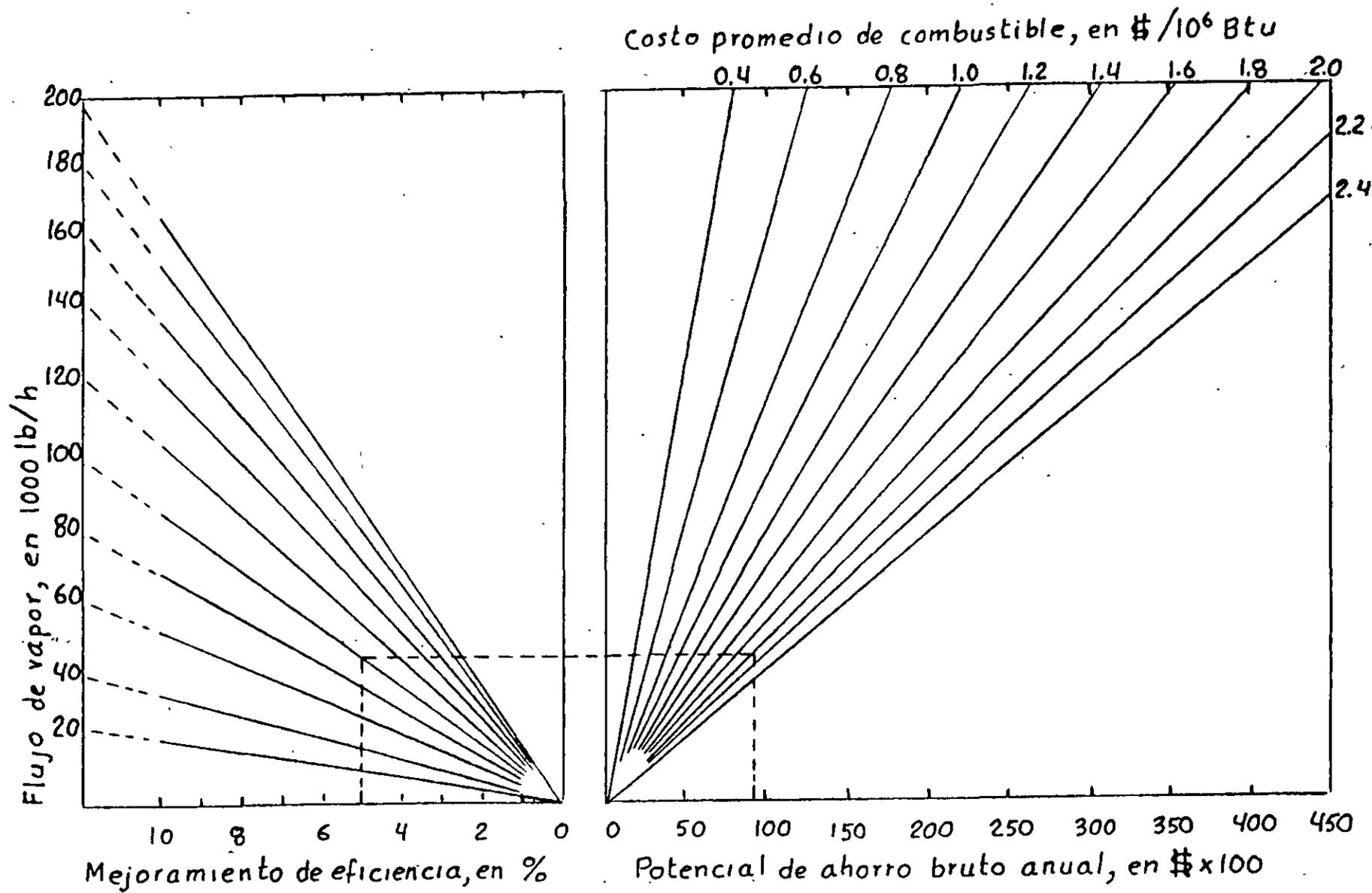


FIG. . POTENCIAL DE AHORRO, CON MEJORA DE EFICIENCIA, BASADO EN 6000 HORAS ANUALES DE OPEARACION

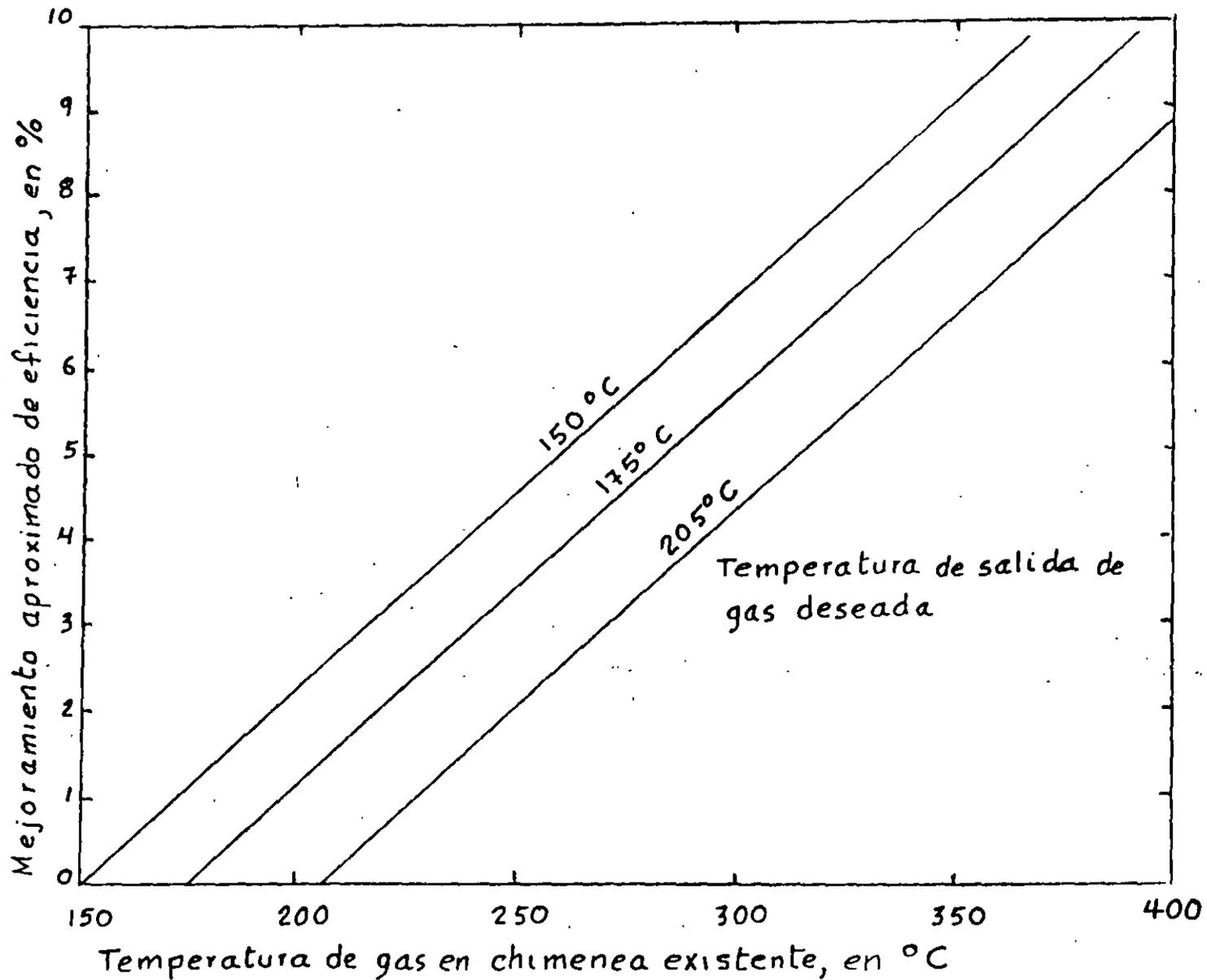


FIG. . MEJORAMIENTO APROXIMADO DE EFICIENCIA CON DECREMENTO DE TEMPERATURA DE SALIDA DE GASES

COSTOS

El costo total de instalación de un precalentador de aire varia de una caldera a otra, dependiendo de:

- . la caída de presión tolerada;
- . diseño del precalentador de aire;
- . materiales;
- . comportamiento deseado;

Los costos de instalación pueden ser tan grandes como de 3 a 5 veces los costos de capital y están afectados por:

- . el espacio disponible
- . el reposicionamiento requerido de equipos;
- . modificaciones de ductos;
- . cambios en el ventilador de aire si es necesario para vencer el aumento de caída de presión;
- . cambios en tubería y alambrado o cableado;
- . requerimientos adicionales de sopladores de hollín.-

Se deben considerar también costos anuales significativos incluyendo costos fijos y costos de operación y mantenimiento requeridos.-

Los costos fijos y de operación pueden ser del 10 al 20 % de los costos instalación; un reemplazo de superficie de calentamiento de extremo frío puede costar otro 10 % del equipo

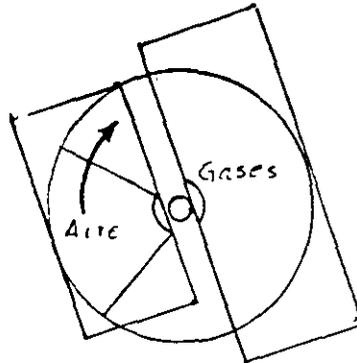
Tipos de Precalentadores de Aire

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 Ljungström 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.



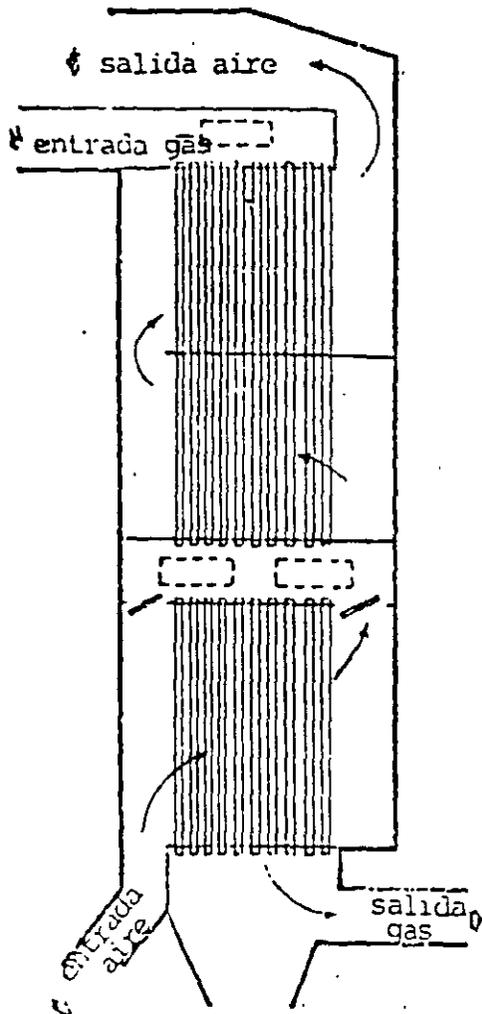
De los precalentadores regenerativos, además del Ljungström, se emplea también el Rothemühle en donde las placas son estacionarias.

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.

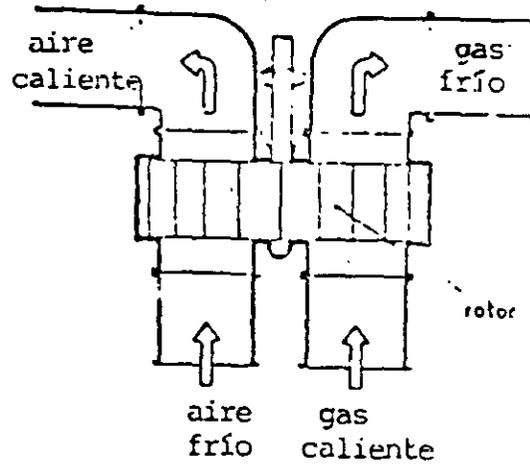
El eje rotor puede ser horizontal o vertical, aunque se prefiere el segundo por facilidad de limpieza.

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



PRECALENTADOR DE AIRE RECUPERATIVO, TUBULAR O DE SUPERFICIE



PRECALENTADOR DE AIRE REGENERATIVO O ROTATORIO

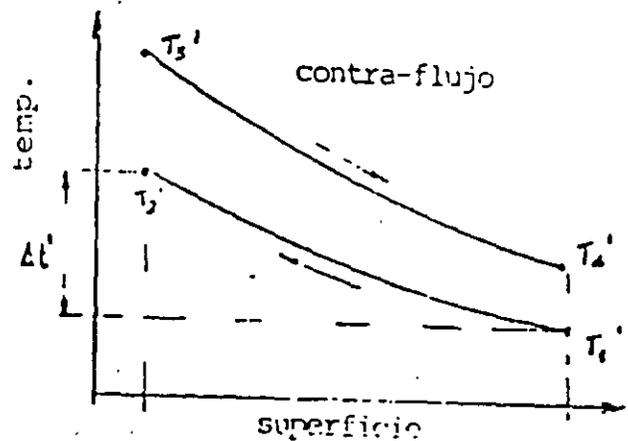
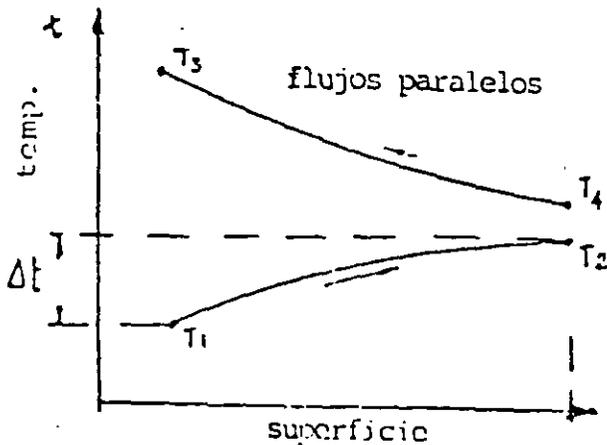


FIG. -DIAGRAMAS DE TEMPERATURAS DE FLUIDOS EN PRECALENTADORES DE AIRE DE SUPERFICIE ($\Delta t' > \Delta t$)

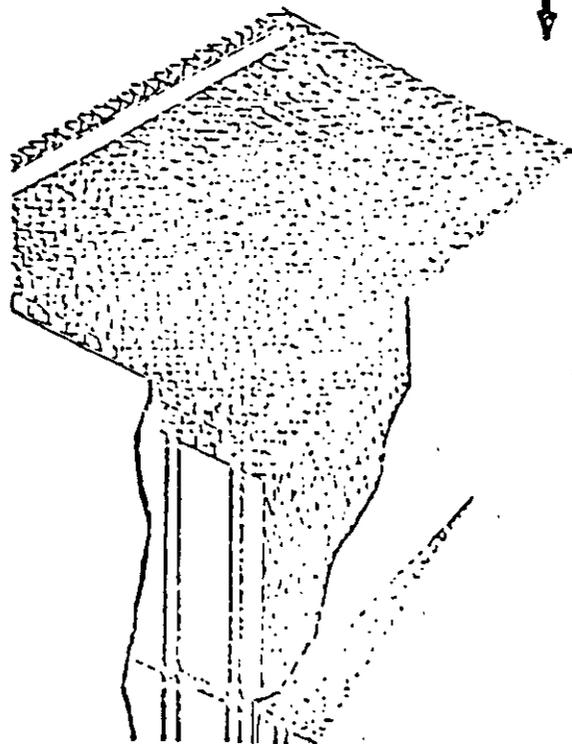
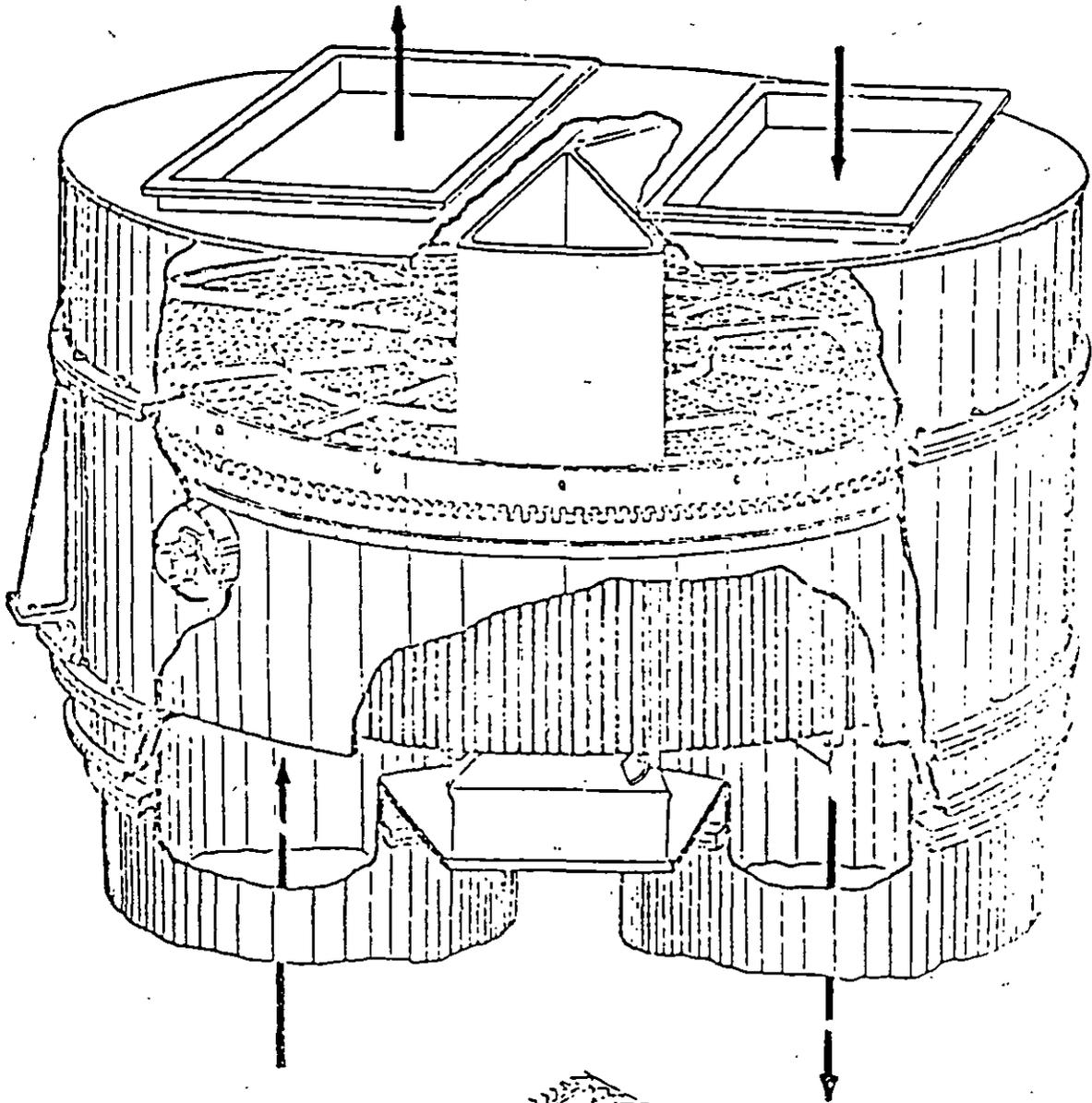


FIG.
PRECALENTADOR DE AIRE
TIPO LJUNGSTRON

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 precalentador de aire se limita al nivel en que las paredes del precalentador t_r 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:

$$t_r < t_p \approx \frac{t_g \alpha_1 + t_a \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2}$$

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 diámetro de los más pequeño admisibles, tomando en cuenta el peligro de obturación por depósitos; así en el caso de combustible gaseoso y líquido se admiten diámetro 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 de los precalentadores recuperativos incluyen:

- . adaptables a una amplia variedad de arreglos físicos;
- . contaminación cruzada entre las corrientes de flujo;
- . no se requiere potencia externa;
- . no hay partes en movimiento.-

Una desventaja es el efecto adverso de depósitos de hollín sobre la eficiencia en la transferencia de calor; el uso del tipo placas ha disminuido debido a las dificultades de limpieza.-

Las ventajas de los precalentadores regenerativos incluyen:

- . adaptable a varios arreglos de ductos;
- . compacto y ligero comparado con las unidades recuperativas;
- . pasajes cortos de flujo que reducen el ensuciamiento;
- . características de transferencia de calor no afectadas por los depósitos de hollín;
- . pueden operar a temperaturas de salida de gases mas bajas que las unidades recuperativas.

Las desventajas son:

- . contaminación cruzada alrededor de los sellos;
- . se requiere postencia externa

Por lo general se usan precalentadores regenerativos en instalaciones de adaptación.-

Un tercer tipo de precalentador de aire de usos no común en unidades generadores de vapor es un cambiador de calor que emplea tubos de calor como se muestra la Fig. ; los tubos de calor son un desarrollo tecnológico relativamente nuevo y ofrece una buena alternativa de dispositivos convencionales de transferencia de calor.- Este tipo puede ser muy adaptable a calderas industriales y ofrece las siguientes ventajas:

- . sin contaminación cruzada;
- . sin potencia externa o partes en movimiento;
- . mantenimiento mínimo

La desventaja primaria es la temperatura máxima de operación de 315°C que puede limitar su aplicación; se recomiendan derivaciones (by-pass) de gases de combustión para protección de posible corrosión a bajas cargas, sobrecalentamiento a altas cargas de los elementos de tubos de calor.-

IMPACTO SOBRE EMISIONES

Es conocido que ^{un} aumento en la temperatura del aire para combustión - tiene un efecto adverso sobre las emisiones de oxidos de nitrógeno - (NO_x), particularmente cuando se quema gas natural.-

En el diseño de calderas industriales, el NO_x se incrementa de 20 a 100 ppm por cada 55°C de incremento en la temperatura del aire para la combustión; éste factor debe ser tomado en cuenta en donde regulaciones de contaminación ambiental existentes o propuestas puedan ser aplicadas.-

Las condiciones mejoradas de combustión en el hogar que resultan de requerimientos de excesos de aire mas bajos tienden a compensar algo del incremento en los niveles de NO_x puesto que éste por lo general disminuyendo con excesos de aire mas bajos

El uso de aire para combustión precalentado que también afecta a otros contaminantes del aire:

- . se han reportado emisiones mas bajas de SO_2 , aunque esto no ha sido completamente comprobado;
- . La combustión mas completa en el hogar puede también reducir los niveles de emisiones de partículas y CO .-

CORROSION

Las temperaturas mas bajas aceptables de gases de combustión a la salida del precalentador de aire están limitadas para prevenir la condensación de humedad en las superficies de transferencia de calor que podran llevar a corrosión por acido sulfúrico y reparaciones costosas: los factores que afectan esta minima temperatura incluyen:

- . contenido de azufre del combustible;
- . contenido de humedad en los gases de combustión;
- . tipo de combustible;
- . temperatura del aire ambiente.-

La temperatura mínima de la superficie del metal está determinada por el promedio de temperaturas de salida de gases y de aire de entrada; la temperatura promedio de extremo frío puede ser controlada por uno o más de los siguientes medios:

- . derivando (by - pass) una parte del aire de entrada de las superficie de calentamiento;
- . recirculando una parte del aire caliente de la salida del precalentador hacia el aire entrando al precalentador;
- . uso de un precalentador regenerativo de serpentines de vapor en el ducto de aire antes del precalentador principal.-

También se puede reducir más la corrosión utilizando materiales resistentes a la corrosión como hierro colado, aceros inoxidable o reabrimientos especiales.-

Los depósitos de ceniza en las superficies de transferencia también contribuyen a la corrosión: la ceniza porosa reduce la temperatura de metal bajo la capa y permite que la humedad de los gases se condense en la superficie del metal.- Esta humedad se combina con el ácido en la ceniza y produce una rápida corrosión; el empleo de sopladores de hollín remueve los depósitos de ceniza.-

La vida útil de las superficies de transferencia de calor en los precalentadores de aire depende mucho de:

- . la prevención de la corrosión en el lado frío;
- . el combustible utilizado.-

La vida esperada varía de 4 a 5 años con combustibles de alto contenido de azufre, hasta 20 años con gas natural.-

Temperatura máxima de aire para combustión

La temperatura a la cual el aire para combustión puede ser precalentado está limitada por:

- . la temperatura de entrada de los gases;
- . el equipo de quemado;
- . tipo de ductos;
- . construcción del horno y cajas de aire.-

Para unidades con emparrilados (stokers) la temperatura máxima de aire de combustión por lo general es de 120 a 175°C; con carbon pulverizado se puede requerir aire hasta 370°C.-

En las aplicaciones de acondicionamiento se deben considerar las limitaciones anteriores junto con los requerimientos de aislamiento para los ductos de aire para combustión.-

Tamaño del Precalentador de Aire

Las dimensiones físicas de un precalentador de aire están determinadas por:

- . ángulo y dimensiones de los pasajes de aire y gases;
- . espacio disponible para el precalentador de aire;
- . tipo de combustible quemado;
- . temperatura finales deseados de aire y gases de combustión;
- . requerimientos de flujos de aire y gases;
- . requerimientos de caída de presión.-

Modificaciones a Ventiladores de Tiro Forzado y Tiro Inducido

En la evaluación del uso de un precalentador de aire en unidades existentes se debe considerar el costo adicional de readaptar los ventiladores de tiro inducido y tiro forzado, la resistencia adicional de los flujos de aire y de gases; también la presión estática se incrementa debido a los cambios en las temperaturas de aire y gases a través de la unidad.-

Adicionalmente se requiere mas potencia en el ventilador por las fugas en los sellos en los precalentadores tipo rotatorios; en estos tipos, las fugas típicas de diseño pueden ser del orden de 10 a 15 % del flujo de salida de gases, mientras que en los tipo recuperativo las fugas se pueden eliminar completamente reemplazando o reparando los elementos con fugas.-

Una evaluación completa de ingeniería requiere determinar la factibilidad de usar el equipo existente o nuevo y agregar los costos de operación.-

Ventajas y Desventajas Adicionales

En adición al mejoramiento en la eficiencia de toda la caldera y el subsecuente ahorro de combustible, los precalentadores de aire ofrecen también las siguientes características deseables:

- . mejora la eficiencia de combustión resultando requerimientos de exceso de aire menores para la combustión completa y menor flujo de gases a través de la caldera;
- . ayuda en la estabilización del encendido del combustible que permite mayor flexibilidad de cargas incluyendo la mejora de operación a bajas cargas;
- . incremento de la temperatura del horno y del régimen de absorción de calor resultando en mayor capacidad de producción de vapor, solo limitada por la capacidad de separación de vapor del domo;
- . quemado más completo del combustible produciendo gases más limpios pasando a través de la caldera, menor ensuciamiento y menos salidas para limpieza.-

Las desventajas de los precalentadores de aire incluyen las siguientes:

- . incremento de los costos de mantenimiento de hornos y stokers;
- . acumulación de depósitos en los pasajes de gases del precalentador que puede restringir el flujo de gases y en casos extremos incendiarse, causando serios daños, en caso de mantenimiento inadecuado.-

Los gases de combustión calientan continuamente las placas de la mitad respectiva de rotor y en otra parte de la rotación, las placas ceden el calor al aire que se precalienta. La altura del rotor varía de 500 a 1500 mm, el diámetro de 1500 a 6500 mm y el motor de accionamiento necesita una potencia de .5 a 5 kw.

Debido a la superficie mayor de las placas comprendidas en el volumen del rotor, la eficiencia en este tipo de precalentador es mayor, pero presenta la desventaja de estanqueidad entre los compartimientos de gases de combustión y aire que es difícil de efectuar por lo que, el escape de aire alcanza a veces de 10 a 15% cuando se toman medidas especiales para la estanqueidad y control de funcionamiento. En la Fig. VIII - 18 se muestran los sellos de estos precalentadores de aire.

Los precalentadores de aire con vapor se emplean como un medio para controlar la corrosión del lado frío de la caldera; las otras formas empleadas para este control son la instalación de dispositivos de lavado para remover los depósitos de los elementos de calentamiento y el empleo de materiales resistentes a la corrosión (acero corten):

El precalentador de aire con vapor se instala en el ducto de entrada de aire del precalentador de aire con gas antes de que entre a éste (el aire), de esta forma, con el aire calentado previamente, los elementos de calentamiento del precalentador de aire con gas pueden mantenerse arriba de cierta temperatura para prevenir la formación de gotas de H_2SO_4 sobre los elementos de calentamiento. Como su nombre lo indica, en éste caso se emplea vapor para calentar el aire en este precalentador.

ECONOMIZADORES

Un economizador es un arreglo de tubos de agua de alimentación localizado en el ducto de salida, que absorbe una parte de la energía del calor, que de otra forma se perdería.

La energía recuperada proporciona calentamiento adicional al agua de alimentación con lo cual se reduce el régimen de fuegos necesario en la caldera para generar vapor, mejorando la eficiencia total de la caldera.

Los economizadores pueden también emplearse para calentar agua de calentamiento de espacios o requerimientos de procesos, diferentes al ciclo de agua de la caldera.

Por lo general se prefieren los economizadores a los precalentadores de aire en adiciones de adaptaciones en unidades de tamaño industrial, por las siguientes razones:

- . costo inicial de capital mas bajo;
- . sin impacto en las emisiones de NO_x ;
- . pérdidas de tiro menores;
- . requerimientos mínimos de potencia de auxiliares, con solo un ligero incremento en el bombeo de agua de alimentación y requerimientos de aire para combustión.

En calderas pequeñas de baja presión con capacidades abajo de 23,000kg de vapor/hora, un economizador es mas económico que un precalentador de aire.

Los precalentadores de aire se vuelven competitivos con relación a los economizadores en unidades grandes, y su elección se hace en base a los mismos factores relacionados anteriormente.

TURBULADORES

Los turbuladores de tubos de humo son pequeñas mamparas o deflectores instalados en tubos individuales de humo en los pasos superiores de calderas de tubos de humo para inducir turbulencia en la corriente de gases calientes e incrementar la transferencia de calor convectivo en la superficie de los tubos.

Tambien se ha reportado que estos dispositivos son capaces de establecer un balance del flujo de gases a traves de los tubos de humo para lograr una utilización mas efectiva de la transferencia de calor superficial existente.

El correspondiente mejoramiento de la eficiencia a una determinada carga y nivel de exceso de aire se refleja en una temperatura de chimenea mas baja e incremento en la generación de vapor.

Una reducción de 55° C en la temperatura de los gases en la chimenea resulta en un mejoramiento de la eficiencia de 2.5%; se estima que se puede obtener una mejora en la eficiencia de 10% correspondiente a una reducción en la temperatura de 222°C.- Este mejoramiento tan alto, probablemente sea el efecto combinado de:

- . una reducción del nivel de exceso de aire;
- . una temperatura de gas en la chimenea mas baja;
- . limpieza de los tubos, que puede lograrse durante la instalación de los turbuladores.

Los turbuladores pueden consistir en tiras metálicas de fierro ángulo instaladas en el segundo o segundo y tercer paso de gases de combustión, o bien aletas espirales metálicas y deflectores instalados a la entrada de los tubos.- En la Fig se muestra una instalación típica del primer tipo, que por lo general son de 0.61 a 2.44 m de longitud, dimensionados y ajustados al diámetro interior de los tubos.

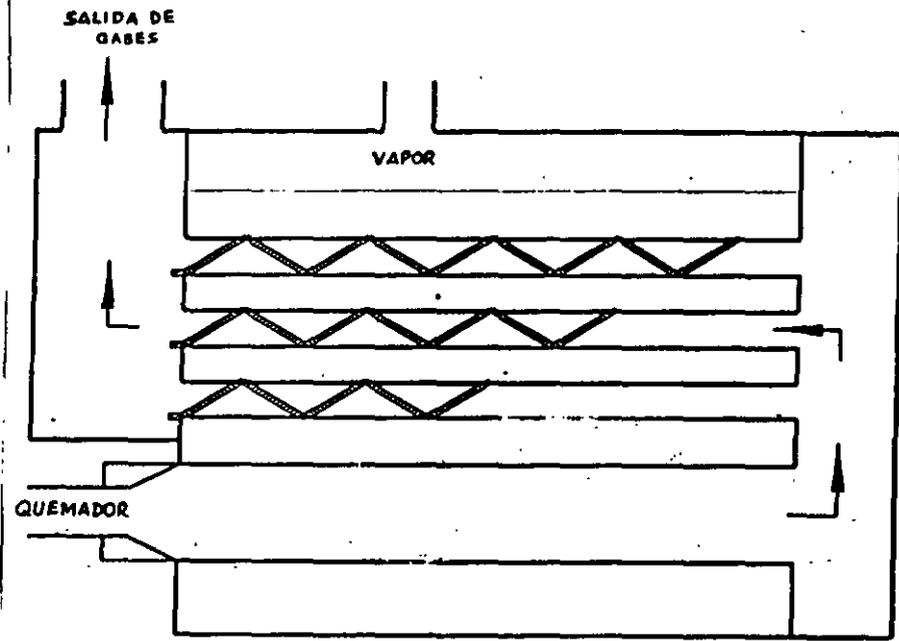
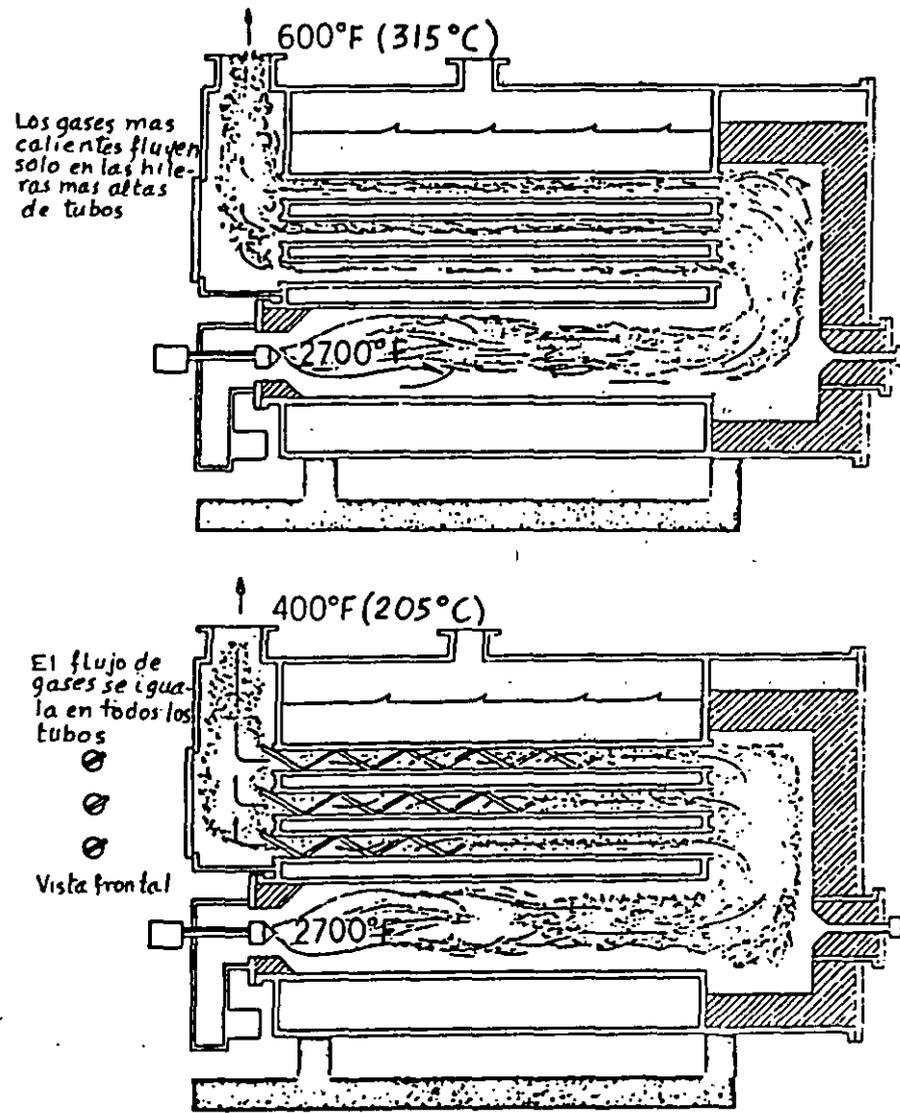


FIG . ESQUEMA DE TURBULADORES EN CALDERAS DE TUBOS DE HUMO DE DOS PASOS

QUEMADORES Y SISTEMAS DE SUMINISTRO DE ACEITE Y GAS COMBUSTIBLE

En esta parte se incluye el equipo auxiliar disponible que puede emplearse para mejorar el comportamiento de quemadores y sistemas de gas y aceite combustible.

Los niveles de exceso de aire tienen un impacto grande en la eficiencia de una caldera; demasiado exceso de aire significa:

- . niveles de emisión de NO_x mas altos;
- . incremento del flujo de masa o másico;
- . mayores pérdidas de energía por la chimenea.

El aire adicional resulta primariamente del exceso de aire requerido en el quemador para obtener la combustión completa del combustible.

La tendencia de diseños normales han empleado patrones modificados de mezclado de aire/combustible y de flujo para minimizar los requerimientos de exceso de aire; la reducción asociada de emisiones de NO_x y partículas también ha sido comprobada.

Los quemadores de bajo exceso de aire (BEA), emplean atomización de aceite combustible mejorado y mezclado de aire-combustible controlado para lograr niveles de exceso de aire de operación extremadamente bajos (3 a 5%).

Inicialmente muchos de estos sistemas se desarrollaron para reducir los niveles de contaminación del aire, y por lo tanto ofrecen este beneficio adicional, sin embargo, se han encontrado algunas restricciones en la aplicación de los quemadores de BEA en calderas industriales, especialmente en los casos de adaptaciones de adiciones.

Los problemas anteriores han sido asociados primariamente con la compatibilidad de las nuevas formas de flama y los regímenes de liberación de calor con el volumen y diseño del horno existente.

Se requiere un sistema de control de combustión sofisticado con los quemadores de BEA para utilizar completamente la capacidad de bajo exceso de aire y prevenir pequeñas excursiones de exceso de aire que puedan llevar a alto combustible y condiciones potencialmente inseguras.

RECUPERACION DE CALOR DE DESECHO EN EL LADO DE AGUA

Las pérdidas de energía calorífica de una unidad generadora de vapor pueden representar una cantidad significativa de desecho en:

- . purgas
- . condensado.

Mientras estas pérdidas no contribuyen directamente a la eficiencia de la caldera (no se afecta la extracción de energía calorífica del combustible), la recuperación de esta energía perdida puede resultar en un sustancial ahorro de combustible.

Las purgas son el procedimiento acostumbrado para remover las impurezas en el agua de la caldera que pueden afectar la calidad del vapor y resulten en depósitos de incrustación en los tubos.

La cantidad de agua caliente drenada descargada durante la purga, depende de la caldera y calidad de agua de repuesto, puede ser hasta de 5 a 10% del flujo total de vapor de la caldera; una parte importante de la energía calorífica de la purga puede recuperarse con la extracción de purga continua.

Con la técnica de purga continua, el vapor "flasheado" del agua purgada se recicla al agua de alimentación de la caldera y a cambiadores de calor.

La reducción de requerimientos de purga también minimiza las pérdidas por purgas, por medio de pre-tratamientos del agua de alimentación a la caldera como es la desmineralización.

Para coleccionar y retornar el condensado a la caldera, están disponibles varios sistemas; el ahorro de combustible se realiza reciclando tanto condensado como sea posible, a la temperatura y presión de operación de la caldera.- Las pérdidas de calor en el sistema de condensado se encuentran en:

- . el condensado descartado;
- . caída de presión a través del sistema en trampas y recipientes;
- . necesidades de enfriamiento para las bombas de condensado.

La contaminación y pérdidas limitan la cantidad de condensado que puede ser reciclado.

El ahorro típico de energía que puede recuperarse en calor del agua de purga puede estimarse a partir de las Figs y

; el % de purga se fija por la concentración máxima en el agua de caldera.

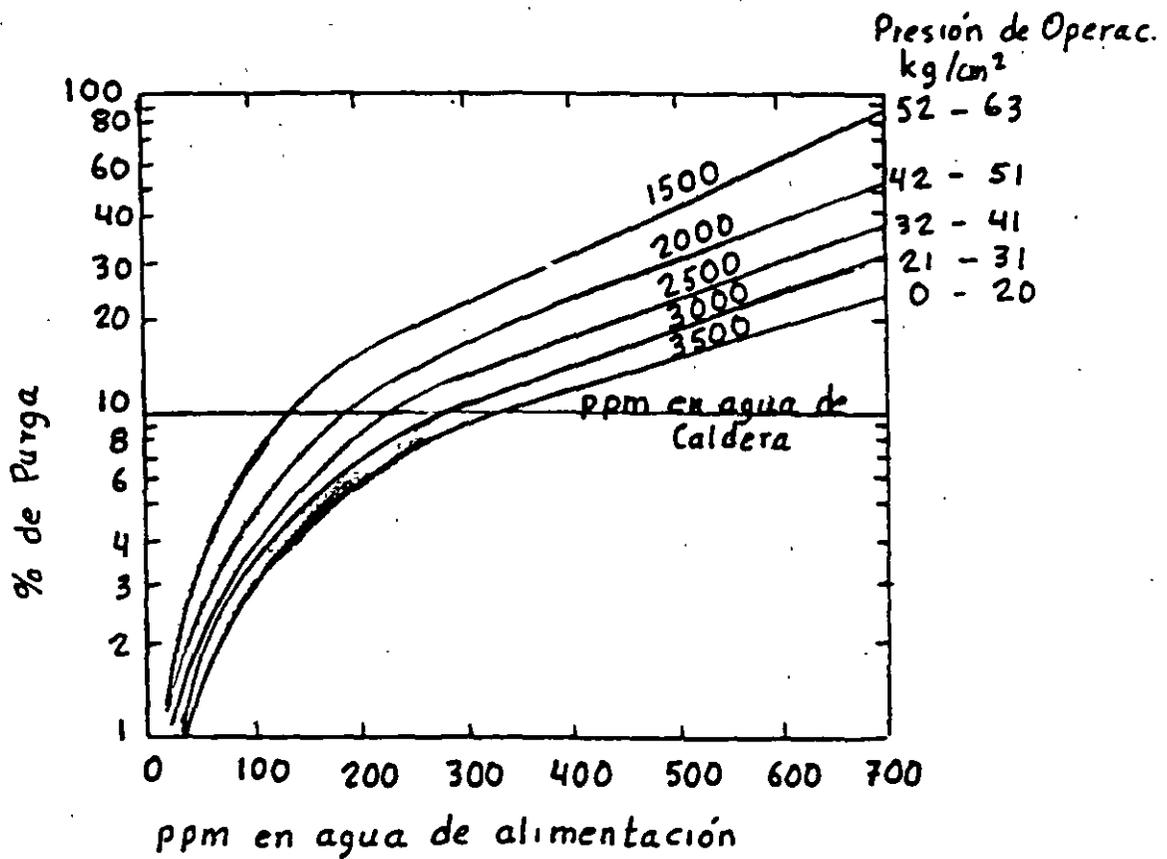


FIG. . % DE PURGA PARA SOSTENIMIENTO DE SOLIDOS DISUELTOS EN AGUA DE CALDERA

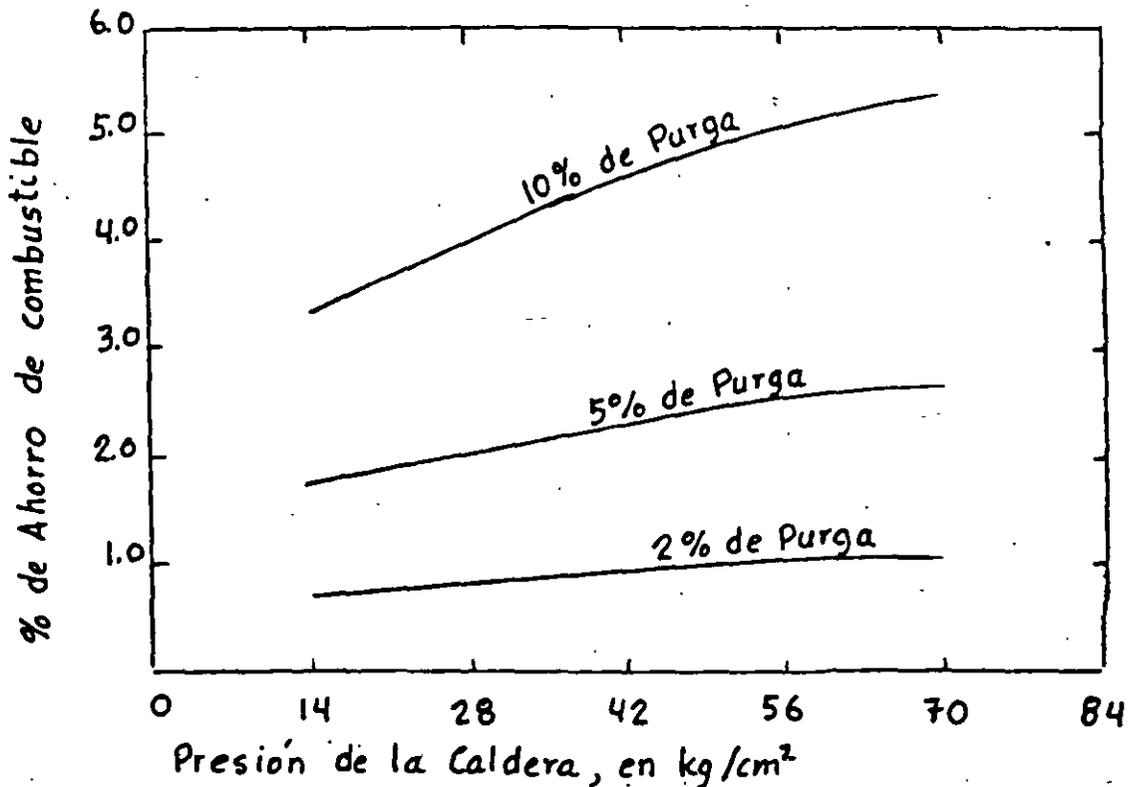


FIG. . POTENCIAL DE RECUPERACION DE ENERGIA, CON PURGA CONTINUA, RECUPERACION DE VAPOR FLASHEADO Y CAMBIADORES DE CALOR

SOPLADORES DE HOLLIN

Los sopladores de hollin se emplean para remover depósitos de las superficies de transferencia de calor en la caldera; si se permite que estos depósitos se acumulen pueden retardar la transferencia de calor y eventualmente resultar en taponamientos de la caldera.- La aplicación de los sopladores puede ser para:

- . remoción de depósitos de escoria de las paredes del hogar en calderas que queman carbón;
- . remoción de depósitos de cenizas volantes y hollin de los pasos convectivos de la caldera.

Estos problemas están relacionados con las calderas que queman aceite y carbón combustible.- El tipo y régimen de acumulación de los depósitos están afectados por:

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

Estos factores deben analizarse antes de seleccionar e instalar un sistema de sopladores de hollin.- En aplicaciones de adaptaciones, con frecuencia se requieren junto con un cambio en el sistema de suministro de combustible, o cuando se juzga que el equipo existente es inadecuado, debido a excesiva temperatura de gases en la chimenea o fallas de tubos.

Se estima que un sistema de sopladores de hollin apropiado puede incrementar la eficiencia de la caldera hasta un 1%.

Los sopladores de hollin pueden ser fijos o retráctiles, y pueden usar como medio de soplado aire o vapor.

Los sistemas de posición fija se emplean en regiones de baja temperatura, mientras que los retráctiles, conocidos como lanzas, por lo general se usan en regiones de alta temperatura.

Se emplean boquillas y arreglos especiales, incluyendo lanzas rotatorias de soplado.- Los sopladores de pared, por lo general son lanzas cortas retráctiles que penetran la pared del horno de la caldera y giran 360°.

La selección del medio de limpieza depende de los siguientes factores:

- . disponibilidad de vapor o aire comprimido;

- . costo de instalación y mantenimiento del sistema de suministro;
- . características de los depósitos.

La escoria en el extremo frío de su rango de temperatura plástica (mezcla líquida y sólida) puede ser enfriada (solidificada) y removida con sopladores de vapor o de aire.- Los depósitos que permanecen plásticos sobre un amplio rango de temperatura (mas de 28°C) pueden requerir un spray de agua para solidificar los depósitos y facilitar su remoción.

Durante las operaciones de soplado se incrementan temporalmente las emisiones de partículas.

AISLAMIENTO

Aislamiento es cualquier material que se emplea para restringir la transferencia de energía calorífica.- Dependiendo si el propósito es reducir la transmisión de calor de conducción o de radiación, el aislamiento puede categorizarse como de masa (masivo) o reflectivo, respectivamente.

La resistencia térmica total de un aislamiento tipo masivo depende tanto de su composición como de su estructura física.- Los materiales mas efectivos son los que tienen baja conductividad térmica, pero mas importante es el contenido de numerosos pequeños huecos llenos con aire o gas; estos huecos proveen la resistencia primaria a conducir la transferencia de calor.

La efectividad del aislamiento masivo también esta determinado por el espesor o cantidad de material empleado.

El aislamiento tipo reflectivo por lo general consiste de superficies metálicas lisas, que reducen las pérdidas de energía calorífica por radiación; con frecuencia este tipo de aislamiento se emplea para cubrir uno de tipo masivo y también puede emplearse en capas separadas por bolsas de aire para sustituir un aislamiento tipo masivo.- Esta aplicación ofrece varias ventajas, sin embargo, deben considerarse las pérdidas de calor por convección y conducción a través y entre las superficies metálicas.

Además de la reducción de las pérdidas de calor, el aislamiento proporciona otros beneficios como:

- . control de la temperatura de la superficie para seguridad y confort;
- . resistencia estructural;
- . reducción de ruido;
- . protección contra incendio.

El aislamiento propiamente aplicado puede resultar en importantes ahorros de pérdida de energía, dependiendo de:

- . el tipo;
- . espesor (solo en tipo masivo);
- . condiciones del aislamiento existente.

En la Fig se muestra el régimen total aproximado de pérdidas de energía calorífica por radiación y convección de una superficie plana desnuda basadas en una diferencia de temperatura entre la superficie y aire quieto.

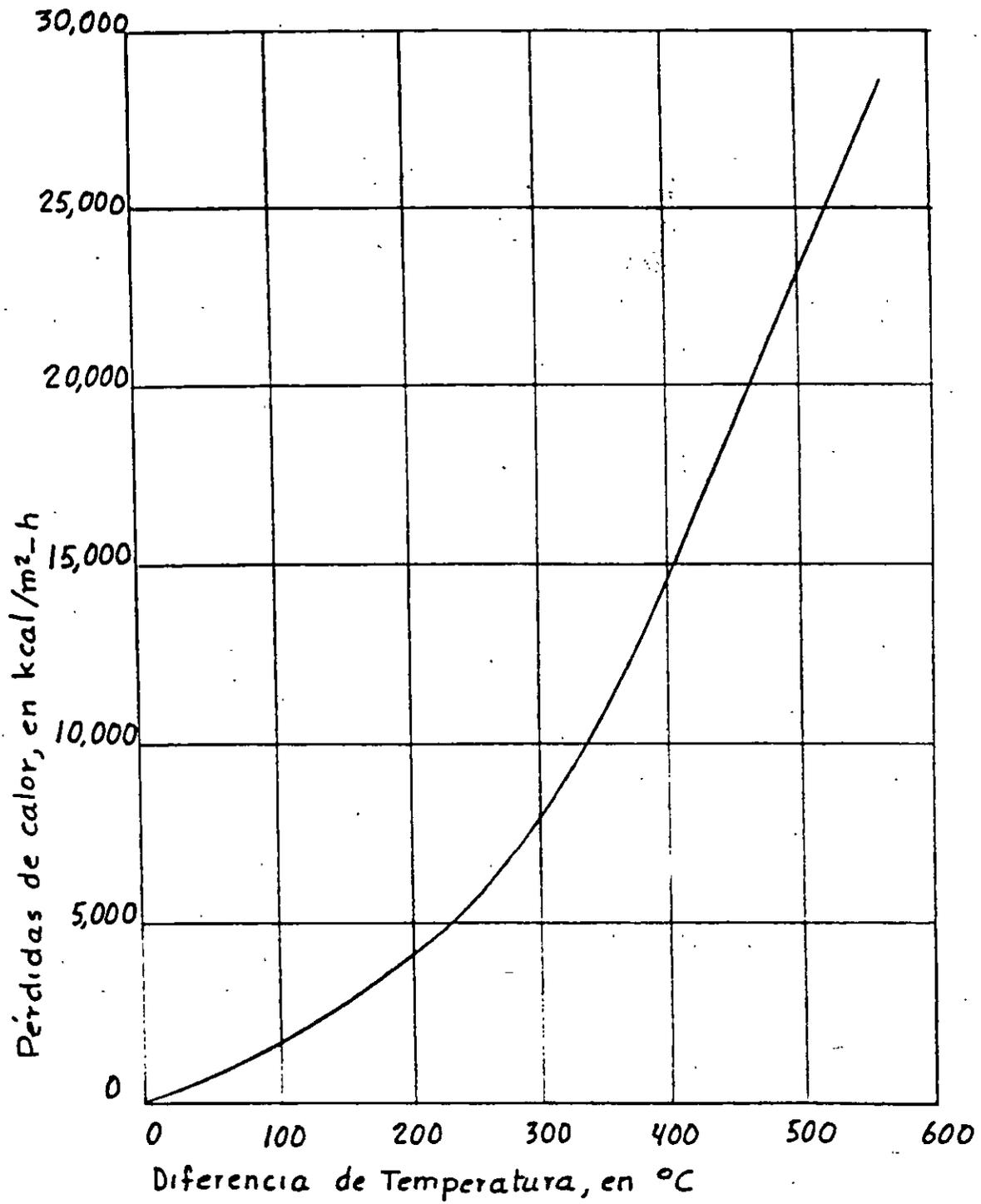


FIG. . PERDIDAS DE ENERGIA CALORIFICA EN SUPERFICIES DESNUDAS



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

CURSOS ABIERTOS

**“ CONTROL DE CONTAMINACIÓN Y
AHORRO DE ENERGÍA
EN CALDERAS ”**

TEMA:

MEDICIÓN DE CONTAMINANTES

**EXPOSITOR: ING. MIGUEL ALONSO CASTILLO HOIL
1997**

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 d i no 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-

culas de carbono no quemado que se encuentran en los gases procedentes de las calderas representa una pérdida apreciable de calor, mientras que las concentraciones elevadas de dióxido de azufre que se hallan en los gases de desecho de una planta de ácido representa una pérdida del ácido del producto.

Los métodos ideales de medición son los que dan resultado casi instantáneos, los cuales se pueden utilizar entonces para el control del proceso así como también para determinar las emisiones de contaminantes; de manera invariable, éstos son los métodos físicos, pues los métodos químicos, aún cuando estén automatizados por completo, requieren varios minutos. Por supuesto, los controles complejos no son comunes en las calderas pequeñas; el hecho de ajustar éstas para combustión óptima requiere de dispositivos de calibración portátiles, los cuales poseen sistemas de absorción química y son de bajo costo. Sin embargo, se requiere cierto conocimiento y destreza considerable para la operación de dichos dispositivos.

En el método químico simple para análisis de gases de combustión (representado por el método Orsat), se obtiene una muestra de gas de la caldera o la chimenea, se pasa a través de un filtro para remover las partículas, y entonces se transfiere a través de una solución de hidróxido de sodio (para absorber el oxígeno) y finalmente una solución pirogalol alcalina⁵ (para absorber al monóxido de carbono). El dióxido de azufre se absorbe junto con el dióxido de carbono. Para determinar el dióxido de azufre en los gases de una caldera, se tiene que tomar una muestra por separado y utilizar un método de análisis independiente del dióxido de carbono, tal como la titulación yodométrica. Los métodos físicos que se utilizan para estos gases son espectroscopia infrarroja para dióxido de carbono, monóxido de carbono y dióxido de azufre; y espectroscopia ultravioleta para dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno y otros. Un método sencillo para dióxido de carbono utiliza

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 microscópicos 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 los más fáciles de preparar.

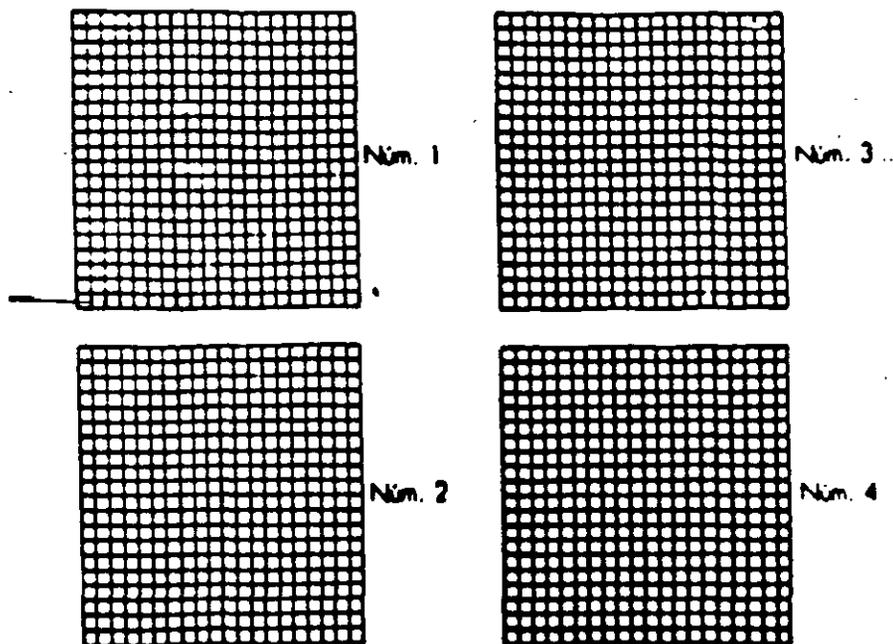


FIG. 4.1.- DIAGRAMA RINGLEMAN ESTANDAR (DE PARKER, A. DIR. INDUSTRIAL AIR POLLUTION, MCGRAW-HILL, REINO - UNIDO, 1978).

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 budo 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).

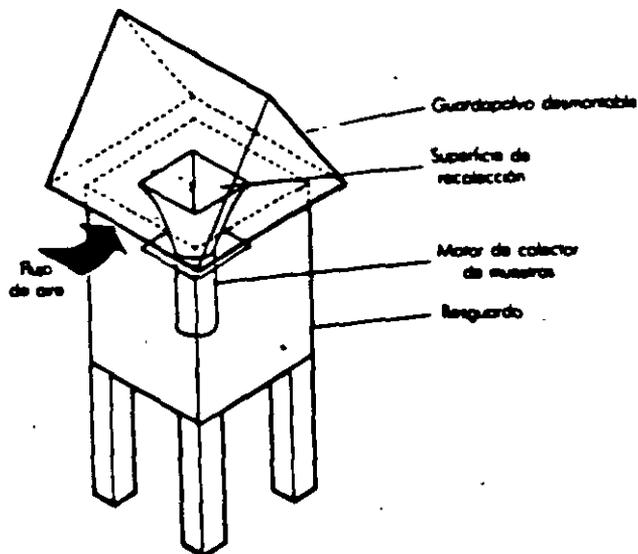


Figura Colector de alto volumen dentro de un resguardo estándar. El resguardo sirve para reducir la recolección de partículas por encima de $50\mu\text{m}$.

Una variedad de técnicas analíticas se encuentran asequibles para determinar la concentración de los componentes de interés en las partículas colectadas. Los iones metálicos, tal como plomo, cadmio, mercurio y cinc son los que más comúnmente se determinan mediante absorción atómica después de digestión ácida para extraer los metales de interés.

Los componentes orgánicos de los aerosoles se determinan, primero al obtener la muestra en solución mediante el uso de técnicas de extracción por solventes los cuales no descomponen los compuestos de interés; en seguida, mediante técnicas analíticas estándares para concentraciones raras, por lo general una separación cromatográfica de alguna clase - cromatográfica de capa fina, cromatografía líquida o cromatografía de gases.

CONTAMINANTES GASEOSOS

Los contaminantes gaseosos se pueden cuantificar en la atmosfera de tres maneras principales:

- . Una muestra se puede coleccionar dentro de un recipiente vacío o una bolsa de plástico y transportar de regreso hacia el laboratorio para su análisis (muestreo de captura). Este método indica la concentración del contaminante en la atmósfera al instante en que la muestra se toma, siempre y cuando la muestra sea representativa. El retardo entre tomar la muestra de colecta y hacer la medición real puede resultar en pérdidas de la muestra debido a la absorción preferencial sobre la superficie del contenedor, o por la difusión preferencial hacia afuera del contenedor en el caso de bolsas de plástico.
- . Las muestras se pueden coleccionar y concentrar al mismo tiempo por medio de absorción preferencial sobre sólidos absorbentes, absorción en solución, eliminación de componentes a temperaturas selectas, o alguna combinación de estas tres. Luego las muestras se retornan al laboratorio para -

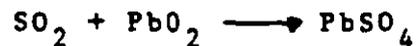
análisis. Aquí los problemas pueden ocurrir como consecuencia de concentrar contaminantes reactivos, lo cual aumenta su oportunidad de reacción antes del análisis.

- 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.

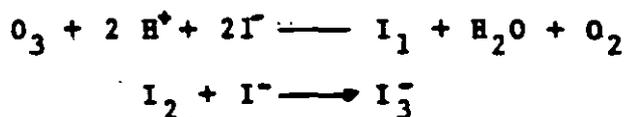
Métodos Químicos Húmedos

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.

Cuando se trata de dióxido de azufre, los métodos húmedos que se usan con más frecuencia son los métodos de peróxido de hidrógeno y de West Gaeke.

Por lo general los métodos húmedos que se utilizan para óxidos de nitrógeno son modificaciones del método Griess-Saltzman; éste implica la recolección en una solución absorbente que contiene ácido sulfanílico y una naftalina, lo cual da una compleja tintura azo rosa con dióxido de nitrógeno - hidrolizado, NO_2 . Entonces el NO_2 se puede determinar mediante la técnica del espectrofotómetro como la tintura azo. El monóxido de nitrógeno, NO , se puede determinar al pasar una corriente paralela de aire a través de un tubo de oxidación que contiene óxido crómico como soporte para convertir el NO en NO_2 previo a la recolección y conversión a la tintura azo. Así la concentración de monóxido de nitrógeno se puede obtener por diferencia.

Los oxidantes totales se determinan en forma manual mediante el uso de yoduro de potasio amortiguado como medio de recolección. El aire, después de filtrarse, se pasa a través de una solución de yoduro de potasio neutral (KI) en un amortiguador de fosfatos, donde se efectúa la siguiente reacción de reducción:



El ion triyoduro (I_3^-) se mide, entonces de manera colorimétrica.

MÉTODOS DE MONITOREO

Los primeros instrumentos automáticos de monitoreo se adoptaron a partir de los métodos químicos húmedos ya descritos. Se colecta una muestra durante un período presente, se realizó una medición, y los reactivos en forma automática se

renovaron para la toma de otra muestra. Uno de los problemas principales con los métodos húmedos para funcionamiento automático es el problema inherente que se relaciona con el almacenamiento de grandes volúmenes de solución, la cual puede ser inestable o se puede evaporar y con ello ocasionar un cambio en la concentración y, por supuesto, se tiene que renovar con frecuencia.

Hasta la actualidad el éxito más grande con métodos de monitoreo continuo ha sido con instrumentación que mide alguna propiedad física del gas de interés, o una propiedad física de un producto de una reacción en fase gaseosa; además, también tiene ventaja adicional sobre los métodos húmedos en cuanto a sensibilidad, seguridad de funcionamiento y requerimientos de mano de obra bajos. Algunos de los instrumentos más comunes de uso casual se esbozan en las siguientes secciones.

Monóxido de Carbono

El monóxido de carbono es un fuerte absorbente de la porción infrarroja (IR) del espectro y se hace uso de esta propiedad en los instrumentos IR no dispersivos (Fig. 4.3). Este instrumento consta de una fuente de calor infrarrojo, una celda para muestra a través de la cual se bombea la muestra y una celda de referencia que contiene un gas no absorbente. El detector es un recipiente de dos cámaras que están separadas por un diafragma sensible a la presión y contienen concentraciones iguales de monóxido de carbono. Todas las especies absorbentes de infrarrojo que estén dentro de la muestra de aire interferirán en cierta medida, en particular CO_2 hidrocarburos y agua. En concentraciones atmosféricas normales, el CO_2 y los hidrocarburos no son un problema y se pueden considerar en forma adecuada en el gas de la celda de referencia. El agua causa más problemas, pues es un fuerte absorbente de IR muy variable. A fin de petrarar el aire que entra a un contenido de agua constante, o como opción para traslucir todas las bandas de absorción de monóxido de carbono

no que están sujetos a interferencia por agua, se emplea una solución.

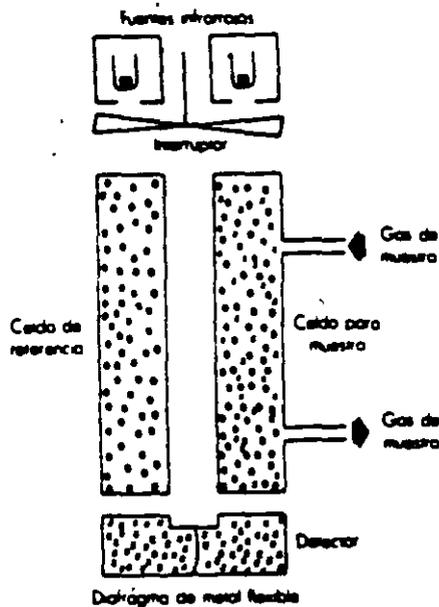


Figura Analizador infrarrojo no dispersivo de gas para análisis de dióxido de carbono. (De Butler, J. D., *Air Pollution Chemistry*, Academic Press, 1979.)

DIOXIDO DE AZUFRE

Los compuestos de azufre, cuando se introducen en una flama rica en hidrógeno, se reducen y convierten en azufre diatómico, S_2 , el cual se excita en la flama caliente. El azufre diatómico excitado emite luz a una longitud de onda específica (375 nm) cuando retorna al estado basal. La longitud de onda es específica para el azufre y la intensidad de la emisión corresponde a la concentración de azufre. La sensibilidad es elevada y el SO_2 se puede cuantificar hacia abajo a un mínimo de 5 ppb con un tiempo de respuesta de dos a

tres segundos. El método no diferencia entre varios compuestos de azufre en el aire.

Otro método que está probando ser muy satisfactorio para dióxido de azufre consiste en excitar el SO_2 del aire de la muestra mediante el uso de una fuente ultravioleta de alta densidad filtrada para permitir el paso tan sólo de longitudes de onda entre 230 y 190 nm (Fig.).

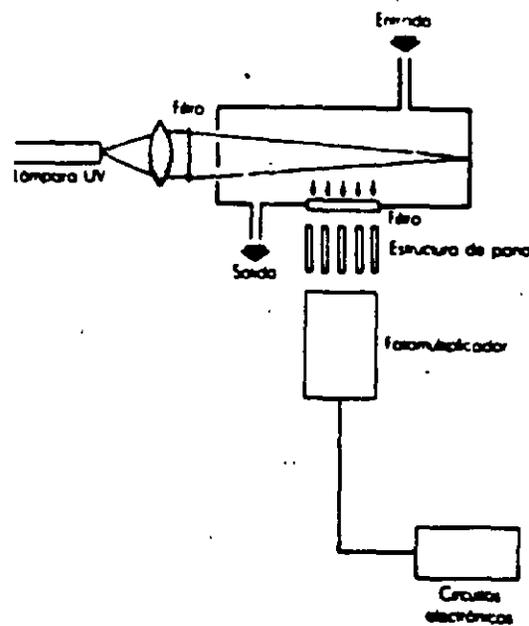


Figura . Analizador de fluorescencia de dióxido de azufre. (De Strauss, W., dir., *Air Pollution Control. Part III*, Wiley Interscience, 1979.)

Oxidos de Nitrógeno

Los óxidos de nitrógeno reaccionan con el ozono (O_3) para formar un dióxido de nitrógeno excitado que emite luz al retornar al estado basal. Este fenómeno se denomina quimioluminiscencia porque la emisión se induce mediante una reacción química; al igual que los métodos de emisión de luz previos, es específico para NO y muy sensible. Hasta 1 ppb hacia abajo (Fig. 4).

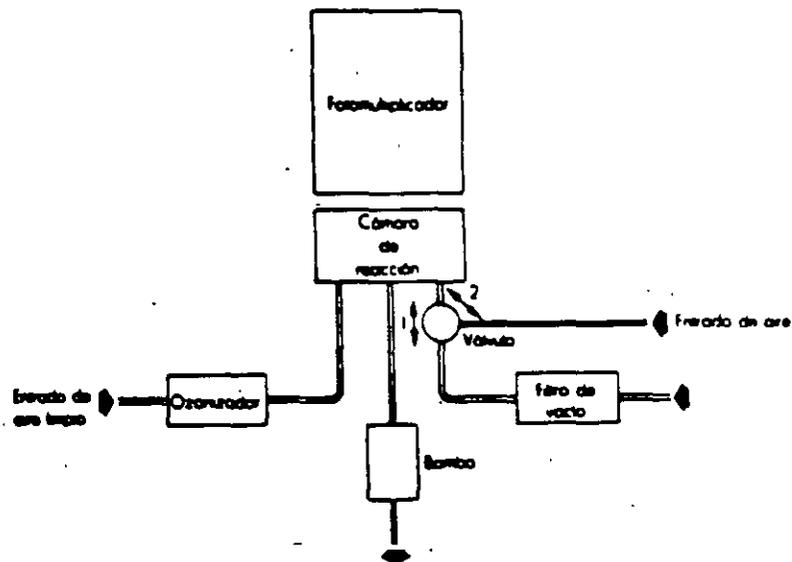


Figura 4. Analizador de quimioluminiscencia de monóxido de nitrógeno. El dióxido de nitrógeno se mide mediante sustracción del valor de monóxido de nitrógeno a partir del valor total de óxidos de nitrógeno que se obtiene mediante una conversión preliminar de dióxido de nitrógeno en monóxido de nitrógeno. (De Strauss, W., dir., *Air Pollution Control. Part III*, Wiley Interscience, 1979.)

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 mas usuales para la medicion de productos de combustion son las siguientes:

DIOXIDO DE AZUFRE	MEDICION POR FLUORESCENCIA MEDICION POR INFRARROJO NO DISPERSIVO
	CONDENSACION Y TITUALCION VOLUMETRICA
TRIOXIDO DE AZUFRE	ESPECTROMETRIA VISIBLE DE FLUJO CONTINUO POR DESPLAZAMIENTO MEDIDOR DE PUNTO DE ROCIO ACIDO METODO E.P.A.8
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 continuacion se describen las características mas importantes de cada una de ellas.

a.- Medicion por Fluorecencia.

La medicion por fluorecencia es aplicable a la determinación de SO_2 .

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 SO_2 . Cuando las moléculas ya excitadas regresan a su estado original.

emiten una fluorescencia característica con intensidad linealmente proporcional a la concentración de SO_2 que existe en la muestra. La luz fluorescente emitida, pasa a través de un segundo filtro, para después iluminar la superficie sensitiva de un tubo fotomultiplicador. La salida del fotomultiplicador es amplificada electrónicamente para proveer una lectura en el medidor y una señal electrónica analógica para el registro de salida.

b.- Medición por Infrarrojo no Dispersivo.

Principios de operación.

El principio de operación se basa en la medición diferencial de absorción de la energía infrarroja. Es aplicable a la determinación SO_2 , CO y CO_2 .

La figura muestra el diagrama funcional del sistema de detección. Dentro del analizador, dos haces de energía infrarroja son dirigidos a través de dos celdas ópticas, una por donde fluye la muestra y otra que contiene un gas neutro (por ejemplo nitrógeno) y que constituye la celda sellada de referencia.

Durante la operación una porción de la radiación infrarroja es absorbida por el componente de interés en la muestra. Un detector eléctrico, mide continuamente la diferencia entre las cantidades de energía infrarroja absorbida por el componente de interés y la celda de referencia. Esta diferencia es una medida de la concentración del componente de interés. La lectura se realiza en el medidor del panel frontal que tiene una escala de 0-100 mv.

c.- Medición por Condensación y Titulación Volumétrica.

La medición es aplicable para la determinación de SO_2 .

Principio de operación.

El principio de operación consiste en hacer pasar la muestra de gas a través de un condensador de serpentín y coleccionar el condensado al final del periodo de muestreo. Realizada la labor de condensación y enfriamiento se procede a la titulación volumétrica del condensado por medio de una base (hidróxido de sodio) y un indicador apropiado (fenolftaleína), para determinar así, la cantidad de ácido. Esta cantidad, junto con el volumen de gases extraídos, permite calcular la concentración de SO_2 .

- d. - Medicion por Espéctrometria visible de Flujo continuo por Desplazamiento.

Principio de operacion.

El SO_2 contenido en los gases, es absorbido como iones de sulfato (SO_4) por contacto directo con una mezcla de isopropanol/agua ($(CH_3)_2COH$)

con una relacion de 4:1. la solucion se hace pasar a traves de un lecho poroso, el cual contiene cloranilato de bario, produciendose la siguiente raccion:



Los iones cloranilato ácidos liberados absorben luz prererentemente a 535 nanómetros y su concentración es medida directamente usando un fotómetro de flujo continuo.

Dado que la reaccion anterior es estequiometrica, la concentración de iones cloranilato ácido es directamente proporcional a la concentración de iones sulfato en la solución de isopropanol y por consiguiente a la concentración de SO_2 en el gas.

El isopropanol inhibe la oxidación del SO_2 , el cual esta invariablemente presente y reduce la solubilidad de los sulfatos de bario, los cuales se forman en las primeras etapas del proceso.

- e. - Medidor de Punto de Rocío Acido.

Principio de operacion.

El medidor de punto de rocío aprovecha la propiedad del ácido sulfúrico de ser conductor de electricidad.

El ácido sulfúrico es condensado a una temperatura que esta por debajo de su temperatura de rocío, formando una película fina en la superficie de detección. Dado que esta película es buen conductor de electricidad, provoca un flujo de corriente a través de los electrodos. La corriente es medida continuamente en el galvanómetro del aparato.

Descripcion 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.

f.- Metodo EPA 8.

En el metodo EPA 8, 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 hidrogeno 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 volumetrico) permite conocer las concentraciones de SO_2 y SO_3 en los gases de combustión.

g.- Medición de Óxigeno, Monóxido de Carbono y Dioxido de carbono con Aparato Úrsat.

Principio de operacion.

La figura siguiente muestra un aparato de Úrsat típico. El principio de operacion 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 despues

del burbujeo) se conoce la cantidad absorbida. Para determinar el contenido de O_2 , se utiliza una solución alcalina de ácido pirogalico; el contenido de dióxido de carbono se determina por medio de una solución de hidróxido de potasio (Potasa caustica) y el contenido de monóxido de carbono por medio de cloruro cuproso amoniacal.

h.- 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 enfoca 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.

La corriente restauradora da origen a una fuerza electromagnética, la cual provoca el par restaurador. Este par es igual pero de sentido contrario al par de desplazamiento en las esferas, provocando el campo magnético no uniforme.

La corriente requerida para restaurar el cuerpo de prueba a la posición cero (inicial), es directamente proporcional al par de desplazamiento original y esta es una función lineal de la susceptibilidad magnética del volumen de gas muestra la cual a su vez es proporcional a la concentración de O₂ del gas analizado.

Equipo para Muestreo Isocinético de Partículas

Para la correcta determinación de la cantidad (y calidad) de las partículas suspendidas en los gases de combustión, el muestreo de las mismas debe realizarse en forma isocinética, esto es, succionando gases con la misma velocidad con que estos se mueven en el ducto que los contiene. O sea:

$$V_{\text{gases en ducto}} = V_{\text{gases sonda}}$$

Si la velocidad de succión es mayor que la del ducto, se tendrá una absorción preferencial de partículas pequeñas; si por el contrario, la velocidad de succión es menor que la velocidad en el ducto, se tendrá una mayor concentración de partículas grandes; en ambos casos no se obtiene la muestra representativa que se desea.

El equipo de medición, está constituido por: sonda de muestreo, manguera metálica de conexión, equipo colector y unidad de control.

Sonda de muestreo

La sonda de muestreo que se introduce en el ducto de gases, contiene en su interior un venturi para proporcionar una presión diferencial que determina la velocidad de la muestra y en su exterior un tubo Pitot para determinar la velocidad de los gases en el ducto. El isocinetismo se logra ajustando la velocidad de los gases en la sonda hasta que sea igual a la que éstos poseen en el ducto mediante un extractor de velocidad variable.

Manguera metálica de conexión

Es una manguera flexible construída en acero inoxidable con una resistencia eléctrica en toda su longitud para su calentamiento, y se encuentra aislada con tela de asbesto 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.

Una vez realizada la extracción, la concentración de partículas se calcula por medio de las siguientes expresiones:

$$\text{Partículas} = P_{\text{muestra}} - P_{\text{limpio}} / V_o \text{ (mg/m}^3\text{)}$$

V_o se calcula con:

$$V_o = (V_m) (P_1 \times T_o / P_o \times T_1) \times f \text{ (m}^3\text{N)}$$

Donde:

P_{muestra} = Peso del filtro de la muestra tomada (mg)

P_{limpio} = Peso del filtro limpio (mg)

V_o = Volumen de gases (m³N)

V_m = Volumen medido en el equipo isocinético (m³)

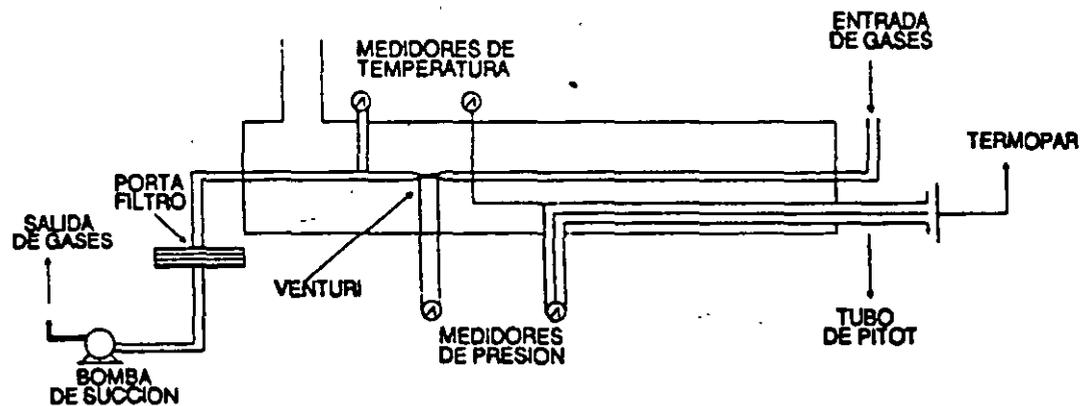
P_1 = Presión atmosférica del lugar (mm Hg)

P_o = Presión atmosférica a nivel del mar (mm Hg)

T_o = 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 isocinético.



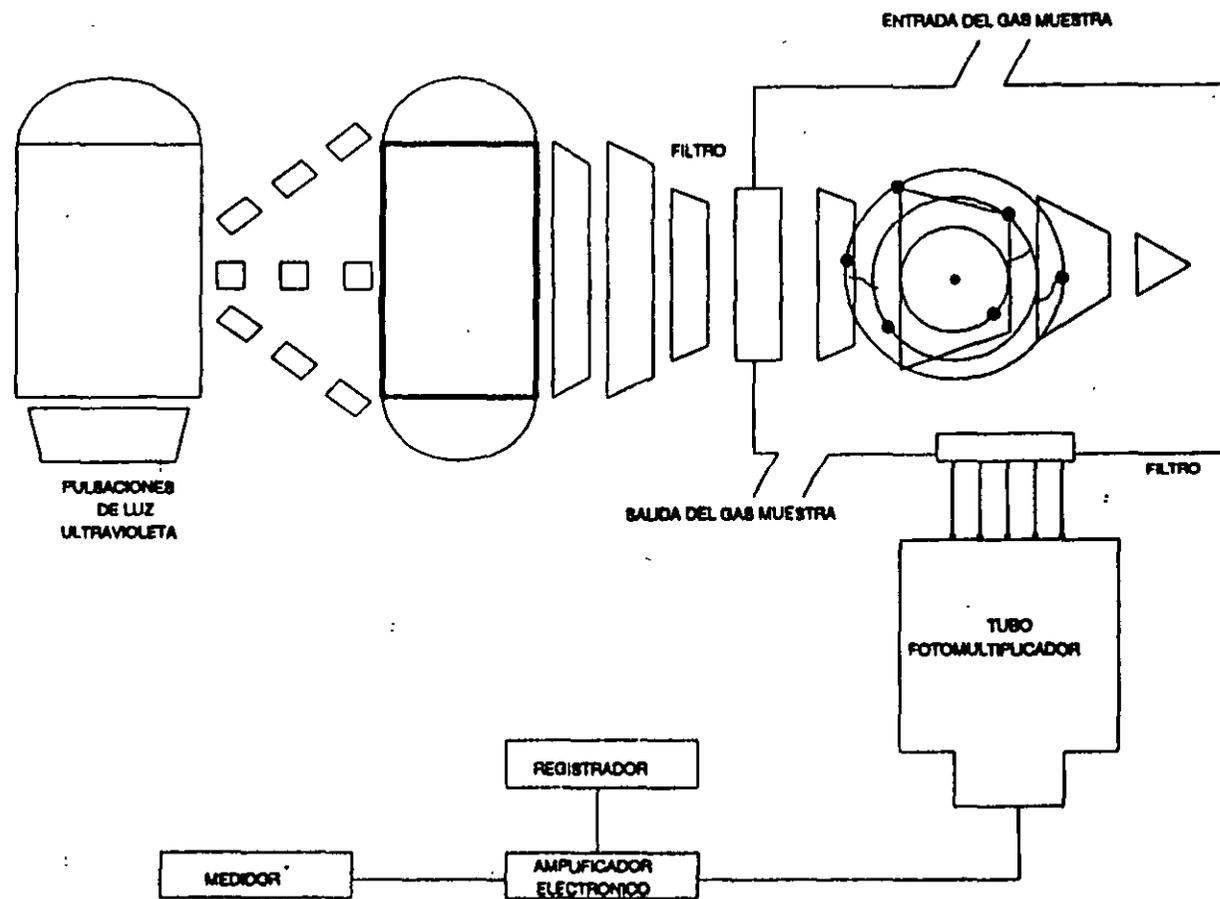
ANALIZADOR DE PARTÍCULAS

Ventajas y Desventajas de las Técnicas de Medicion.

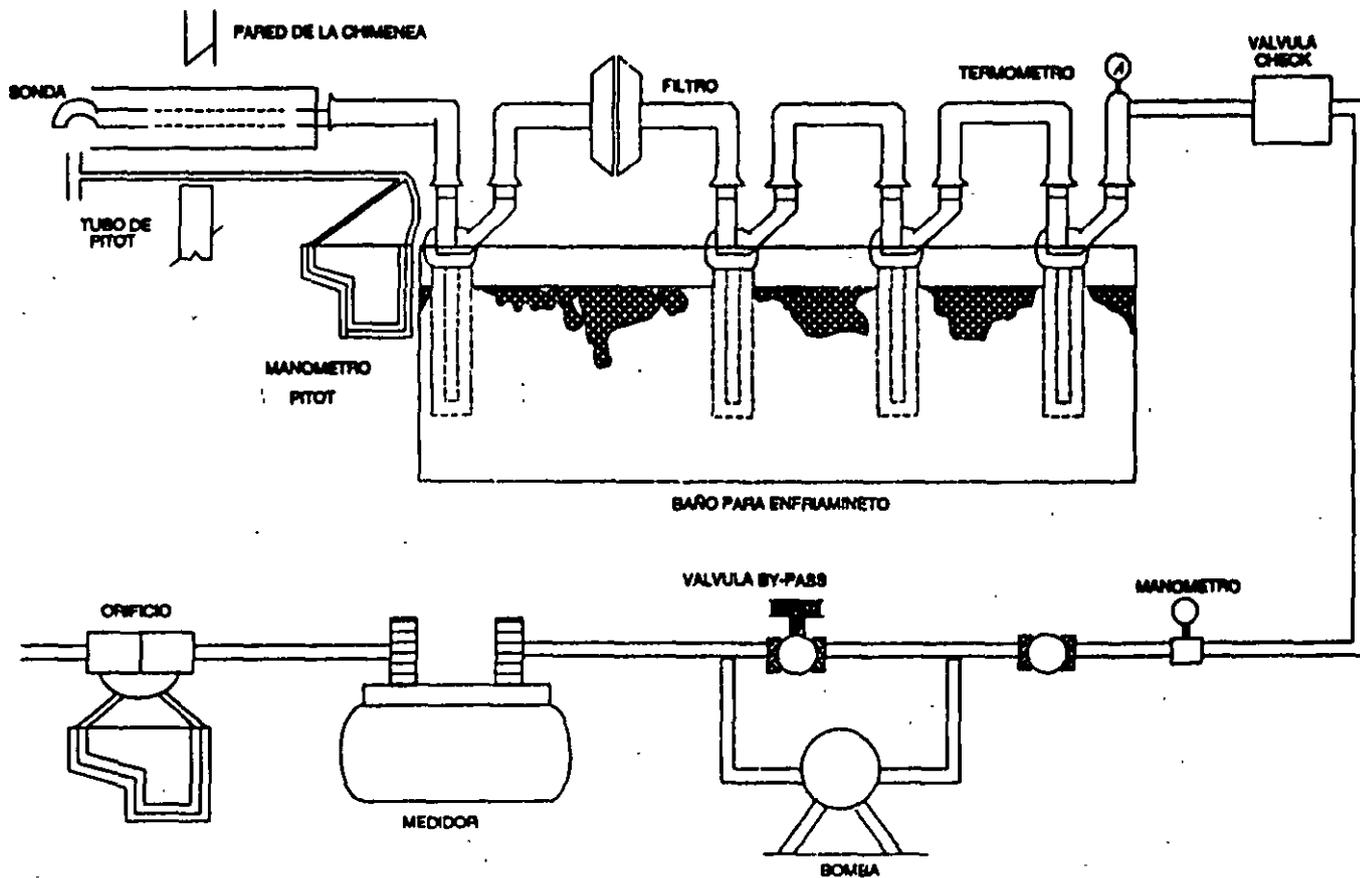
A continuación se presentan algunas de las ventajas y desventajas de las técnicas de medición de productos de combustión descritas.

TECNICAS	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Medición por Fluorescencia. Analizador de SO_2	Respuesta rápida y continua. No presenta interferencias de otros compuestos.	Solo 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.	Preciso y simple	Forma indirecta de determinación. se realiza en forma puntual
Medición por Espectrometria 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.

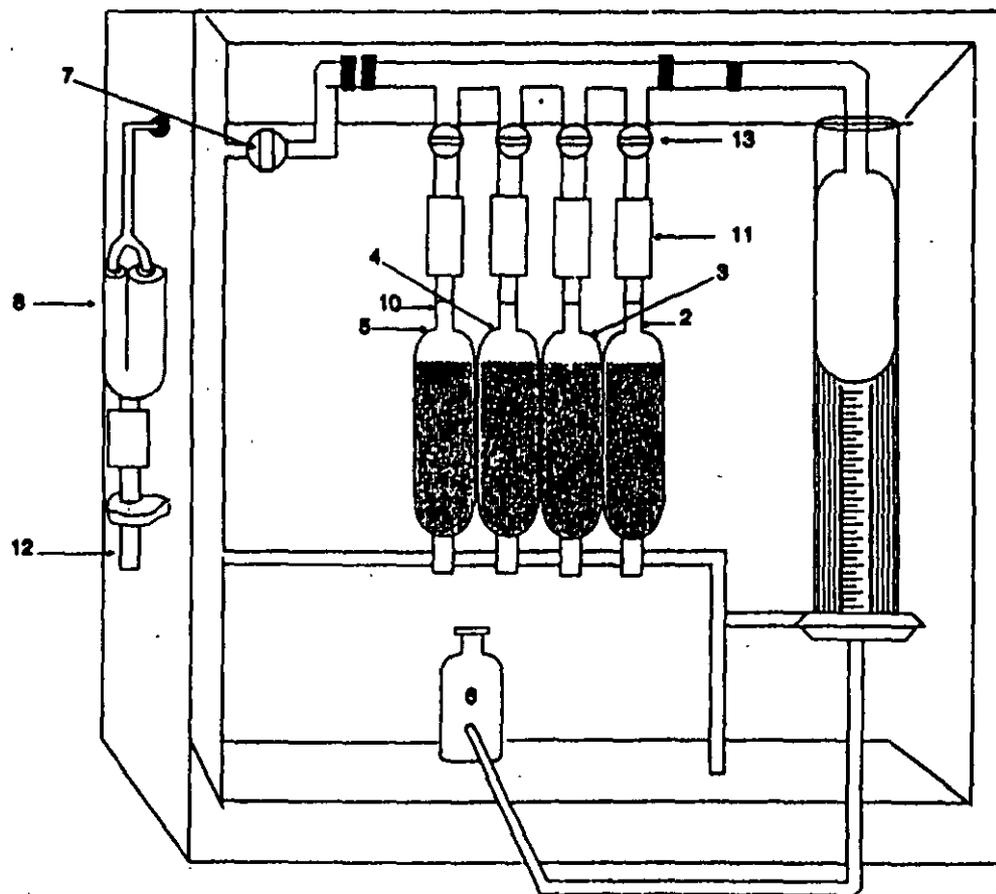
medidor de punto de rocío ácido	Determinación continua . no presenta interferencia.	El punto de rocío detectado depende de la humedad de los gases de combustión.
Metodo E.P.A.6	Muy preciso. Reconocido por la E.P.A.	Metodo indirecto, la determinación es puntual.
Aparato de Ursat Medición de CO. CO ₂ y 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.
Equipo Isocinetico para muestreo de Particulas	Se toma muestra representativa tanto de la cantidad como de la calidad de las particulas.	Medición puntual.



PRINCIPIO DE OPERACION DEL MEDIDOR POR FLUORESCENCIA.



EQUIPO PARA EL MÉTODO E.P.A. 8.



- | | | | |
|------|-----------------------------|-----|---------------------|
| 1. | BURETA DE MEDIDA | 9. | LLAVES DE CONEXION |
| 2. | PIPETA CON POTASA CAUSTICA | 10. | MARCA DE NIVELACION |
| 3. | PIPETA CON ACIDO PIROGALICO | 11. | TUBO DE HULE |
| 4,5. | PIPETA CON COBRE METALICO | 12. | ENTRADA DE GASES |
| 6. | FRASCO NIVELADOR | 13. | VALVULAS DE PASO |
| 7. | VALVULA | 14. | TUBO DE CONDUCCION |
| 8. | FILTRO | | |

APARATO DE ORSAT.



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

CURSOS ABIERTOS

**“ CONTROL DE CONTAMINACIÓN Y
AHORRO DE ENERGÍA
EN CALDERAS ”**

TEMA:

**EFFECTOS DE LA
CONTAMINACIÓN**

**EXPOSITOR. ING. MIGUEL A. CASTILLO HOIL
1997**

EFFECTOS DE LA CONTAMINACION DEL AIRE

Se puede definir a la contaminación del aire como la adición a la atmósfera de cualquier material que tenga efectos perjudiciales sobre la vida; los contaminantes típicos del aire incluyen cosas como:

CO - monóxido de carbono

NOx - óxidos de nitrógeno

SOx - óxidos de azufre

varios hidrocarburos

partículas (pequeñas partículas, por lo general sólidas)

Estos contaminantes pueden ser de alguno de los dos tipos:

. contaminante primario, o letal como se origina en la fuente

. contaminante secundario, formado a través de la reacción con contaminantes primarios (ésta reacción puede ocurrir en el punto de emisión o en localidades remotas).

El smog se considera como contaminante secundario.

La contaminación del aire se genera por seis tipos mayores de fuentes:

. transportes;

. calentamiento doméstico;

. generación de potencia eléctrica;

. quemado de desechos o basura;

. fuegos agrícolas y forestales,

. quemado industrial de combustibles y emisiones de procesos.

En estas notas el enfoque se hará sobre el último tipo (las fuentes industriales), que contribuyen con cerca del 20% de la contaminación total del aire, también algo referente a la contaminación formada durante la generación de electricidad. Muchas industrias consumen grandes cantidades de electricidad, que puede ser comprada de una Cía. Eléctrica o generada en el sitio; en cualquier caso, la industria es responsable de los problemas ambientales debidos a su uso.

En la Fig. se muestran los % relativos de cada tipo de contaminante considerando solo la fuente industrial; consideraciones adicionales sobre los varios tipos de industrias permite clasificarlas de acuerdo al mayor potencial de emisiones (Tabla).

Cuando se analizan los efectos de estos contaminantes, es necesario examinar los efectos sobre:

- . el hombre (incluidos los animales),
- . las plantas;
- . materiales;
- . meteorología.

Estos efectos pueden ir desde molestias y daños estéticos como olor y baja visibilidad, a daños a la propiedad y/o la salud, y disrupción local o global de ecosistemas, como alteración del clima; los efectos precisos dependen de muchos factores, incluyendo:

- . clima;
- . densidad de población;
- . otras condiciones locales.

A pesar de esta variabilidad, hay algunos efectos generales que han sido documentados. Aunque muchas sustancias pueden ser contaminantes del aire, estas notas se concentrarán en algunos de los mas comunes:

CO - monóxido de carbono
SOx - óxidos de azufre
NOx - óxidos de nitrógeno y compuestos relacionados
hidrocarburos
O3 - ozono
partículas

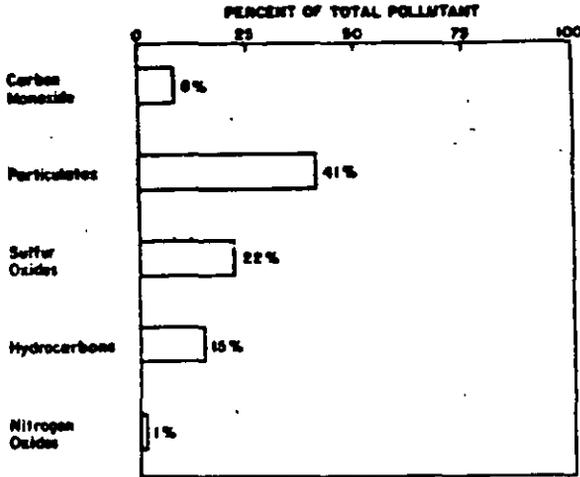


FIGURE Industrial air pollution. (Graph courtesy DOE; data from *Environmental Quality*, Council on Environmental Quality, p. 212.)

TABLE Industrial Air Pollutant Emissions^a

Type of Industry	Annual Emissions Levels (billion lb)	Types of Emissions
1. Petroleum refining	8.4	Particulates, sulfur oxides, hydrocarbons, CO.
2. Smelters for Al, Cu, Pb, Zn	8.3	Particulates, sulfur oxides.
3. Iron foundries	7.4	Particulates, CO.
4. Kraft pulp and paper mills	6.6	Particulates, CO, sulfur oxides.
5. Coal cleaning and refuse	4.7	Particulates, CO, sulfur oxides.
6. Coke (for steel manufacturing)	4.4	Particulates, CO, sulfur oxides.
7. Iron and steel mills	3.6	Particulates, CO.
8. Grain mills and grain handling	2.2	Particulates.
9. Cement manufacturing	1.7	Particulates.
10. Phosphate fertilizer plants	0.624	Particulates, fluorides.

^aData from Ross, R.D., *Air Pollution and Industry*. New York: Van Nostrand Reinhold.

EFFECTOS SOBRE EL HOMBRE

Efectos sobre la salud.

Muchos de los contaminantes comunes del aire tienen muy serios efectos sobre la salud humana, por ejemplo, se conoce que el CO contribuye a enfermedades del corazón. Considerando todas las fuentes de contaminación, especialmente el transporte, es uno de los mayores (sino el mayor) de los contaminantes y es uno de los mas difíciles de eliminar.

El CO se forma durante la combustión de compuestos conteniendo carbono y en donde hay falta de oxígeno (O₂):

$2C + O_2 \rightarrow 2CO$ en donde está limitado el O₂

$C + O_2 \rightarrow CO_2$, en exceso de CO₂

A pesar de que la industria no es en general productora de CO, ésta puede en cientos casos contribuir al problema del CO.

El CO afecta al sistema nervioso central aún en muy bajas concentraciones, por la formación de carboxihemoglobina en el torrente sanguíneo que interfiere con el transporte normal de O₂ al cuerpo de las células, 2% de carboxihemoglobina es suficiente para generar efectos observables, y puede ser formado por una exposición de 8 horas a solo 10 ppm de CO, que es solamente un poco mayor al estandard de calidad del aire de 9 ppm a una exposición de 8 horas.

El transporte de O₂ se afecta claramente a 75% de carboxihemoglobina, generado a niveles de 30 ppm de CO ó mayores, ésto es sumamente serio si se considera que el tráfico pesado de automóviles puede generar de 50 a 140 ppm de CO, y el humo de cigarros puede crear hasta 15% de carboxihemoglobina. En adición a los efectos inmediatos del deficiente transporte de O₂, los niveles altos de carboxihemoglobina tienden a hacer que una persona retenga el colesterol en la aorta.

Los óxidos de azufre SO₂ y SO₃ se generan primariamente en la combustión de combustibles con altos contenidos de azufre; algunos procesos industriales, como la fundición de cobre y el pulpeado de papel, también generan grandes cantidades de óxidos de azufre. El umbral normal de exposición es de 5 ppm por un periodo de 8 horas; la mayoría de las industrias no exceden estos límites, al menos a nivel del suelo, si tienen chimeneas altas.

Las fundiciones son una excepción a lo anterior ya que pueden tener de 30 a 40 veces el nivel del umbral por períodos cortos de tiempo, especialmente si hay inversión térmica.

Una inversión térmica ocurre cuando una capa mas fría baja de aire es atrapada por una capa de aire mas caliente superior; los contaminantes se forman en esta capa mas baja mas fría debido a que el aire frío no puede elevarse para llevarse fuera los contaminantes.

Los óxidos de azufre son tóxicos al cuerpo humano, especialmente si la persona tiene males respiratorios previos como efisemas y/o es anciano; también pueden acentuar la neumonía viral. Por lo general los óxidos de azufre pueden ser detectados por su olor, aunque la exposición prolongada puede desensibilizar a una persona de éstos componentes.

Los óxidos de nitrógeno NO y NO₂ por lo general se encuentran en concentraciones mas bajas, y se generan solo en situaciones de combustión de alta temperatura, por lo que se refieren como un contaminante elitista, solo presente en sociedades avanzadas tecnológicamente.

El último efecto de los óxidos de nitrógeno sobre los humanos, no está claramente comprendido, pero actúan como irritantes de la respiración y crean molestias en los ojos; el NO₂ puede también destruir la actividad celiaca en el sistema respiratorio y suprimir la actividad alveolar, la defensa final de los pulmones contra la materia extraña, habiendo evidencia de que los óxidos de nitrógeno pueden tener varias consecuencias serias.

Altas concentraciones de NO₂ se forman en silos agrícolas, creando el "gas de silos" durante el decaimiento aeróbico del ensilado y hay muchos ejemplos documentados de agricultores que han muerto fatalmente por éstas emanaciones; afortunadamente éstas concentraciones importantes no se forman debido a las operaciones industriales normales.

Estudios recientes de varios contaminantes del aire nitrogenados han indicado que los daños a la salud son mas serios de lo que se había pensado, en particular los peroxinitratos son bastante estables a bajas temperaturas del aire, y pueden ser contaminantes mas importantes que el O₃ (ozono) en ciudades del norte muy frías.

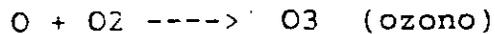
El peroxiacetilnitrato (PAN) es creado por reacciones fotoquímicas involucrando hidrocarburos, tiene una estructura general de un radical con cadenas de hidrocarburos de longitud variable. Algunos PAN's que se generan naturalmente por vegetación de coníferas es una fuente mayor de hidrocarburos y el NO₂ es predominante. El NO puede también reaccionar con algunos hidrocarburos aromáticos policíclicos en pruebas de laboratorio para producir compuestos mutagénicos.

Hay cientos de tipos de hidrocarburos que forman contaminante del aire; muchos de ellos son posiblemente cancerígenos y pueden ser al menos parcialmente responsables del aumento en el cáncer de pulmón.

El ozono (O₃) por lo general es generado por reacción fotoquímica entre los varios óxidos de nitrógeno y el O₂ en la atmósfera, por ejemplo:



El O es un radical libre, un átomo de oxígeno con siete electrones; entonces:



El ozono:

- . agrava el asma, emfisema y la bronquitis crónica;
- . baja la resistencia a la infección;
- . reduce la habilidad a concentrarse;
- . induce la tos, la incomodidad del pecho y la irritación del sistema respiratorio;
- . causa daños en cromosomas en los animales de laboratorio y ha sido ligado a un tipo de anemia en humanos.

LAS PARTICULAS tienen varios efectos adversos, dependiendo de su tamaño:

. abajo de 0.1 μm (micras), el mayor efecto se relaciona con la modificación del tiempo; este es el tamaño más parecido para inducir la nucleación de gotitas de agua;

. entre 0.4 y 0.8 μm , los diámetros son aproximadamente iguales a la longitud de onda de la luz, lo cual lleva a la restricción más grande a la visibilidad;

. entre 1 y 5 μm , hay una deposición máxima en los pulmones durante la inhalación;

. entre 3 y 15 μm , las partículas se depositan en el sistema respiratorio superior;

. entre 10 y 100 μm , las partículas crean caída de polvo y suciedad.

Aunque las categorías se traslapan, las partículas de cualquier tamaño pueden mostrar cualquiera de estos efectos en alguna extensión, esta es una división útil cuando se consideran sus principales efectos.

Las partículas inhaladas son dañinas al sistema respiratorio, y además pueden ser tóxicas, por ejemplo, el mercurio y otros metales pesados pueden conducir directamente a reacciones bioquímicas, sin embargo, la mayoría son sustancias inorgánicas y no-tóxicas.

Cuando se inhalan partículas a través de la nariz y boca junto con los aproximadamente 7600 litros de aire que inhalamos diariamente, las partículas pueden depositarse finalmente en los pulmones causando un depósito sobre la cubierta de los mismos; esto puede resultar en una enfermedad llamada silicosis, que particularmente ocurre en los individuos que trabajan en minas y en la fabricación de cemento.

La enfermedad de pulmón negro, una forma de silicosis, por lo general se ha encontrado en los mineros de carbón; los depósitos en los pulmones reducen la habilidad de éstos para transferir el O_2 a la sangre. El tejido del pulmón normalmente elástico y esponjoso se endurece, reduciendo la eficiencia de respiración de los pulmones; con objeto de bombear un suministro adecuado de O_2 , el corazón debe trabajar más fuerte, lo que conduce a acortar la respiración, posiblemente a un agrandamiento del corazón; y eventualmente a una muerte prematura.

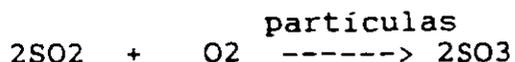
Adicionalmente, algunas veces las partículas pueden causar excesiva secreción mucosa como una protección refleja, ésta mucosa excesiva pueda restringir los tubos bronquiales y producir bronquitis. En otros individuos los contaminantes pueden causar suficiente irritación de los tubos bronquiales para estrecharlos, incrementando la posibilidad del desarrollo de efisema.

Aunque la mayoría de los efectos perjudiciales a la salud son causados por las partículas inhaladas que son suficientemente pequeños para penetrar hondo en los pulmones, evidencias recientes han mostrado que éstos depósitos en el sistema superior respiratorio pueden también llevar a problemas de salud.

Hay muchos grupos de interés público renuentes a aveniencias cuando consideran la salud humana, con mucha justificación; ha habido situaciones cuando grandes cantidades de contaminantes, combinadas con condiciones meteorológicas particulares, han llevado a un gran número de muertes atribuidas directamente, por ejemplo, en Londres en 1952 (3500 - 4000 muertes) y 1956 (900 muertes).

Hay datos que sugieren que la peor condición para la salud humana es la combinación de partículas con altas concentraciones de SO₂; un gran % del SO₂ en la atmósfera se debe directa o indirectamente a fuentes naturales (volcanes, decaimiento de vegetación, brisa de mar, etc.). Este SO₂ que se genera naturalmente, sin embargo se dispersa sobre el mundo en tal forma que nunca llega a niveles peligrosos; las contribuciones del SO₂ por el hombre (SO₂ antropogénico) tiende a concentrarse en áreas industriales y urbanas y pueden elevarse a niveles peligrosos.

El SO₂ en el aire, frecuentemente con partículas actuando como catalizadores, puede convertirse a SO₃:



Las superficies de las partículas pueden proporcionar un sitio para la reacción para que ocurra la formación de SO₃, este SO₃ puede reaccionar fácilmente con el vapor de agua para producir ácido sulfúrico (H₂SO₄), que puede dañar fácilmente el tejido de los pulmones. Este problema particular se conoce a veces como smog industrial (o gris) y predomina en las ciudades que dependen mucho del uso de aceite combustible y carbón.

En la atmósfera, algunas gotas de ácido sulfúrico pueden reaccionar con amoniacó (NH₃) para producir sulfato de amoniacó sólido (NH₄)₂SO₄ perjudicial para la salud.

El H₂SO₄ en el aire lava dondequiera que llueva, generando "lluvia ácida", un fenómeno que se ha incrementado desde los años 1960's; la lluvia ácida no solo ha sido ligada a daños a árboles y otras plantas, aumentando el desgaste y corrosión de materiales y edificios y problemas de contaminación de agua, sino también como una posible amenaza mas a la salud humana.

La lluvia ácida también se forma por emisiones de NO, que reaccionan para formar en la atmósfera ácido nítrico (HNO₃); a finales de los 1970s, la lluvia ácida fué declarada como posiblemente "el problema ambiental mas severo del siglo".

VISIBILIDAD

La pérdida de visibilidad tiene un impacto psicológico en el hombre; en días claros libres de contaminación ambiental se puede ver a unos 250 Km., pero conforme el aire está mas contaminado la visibilidad se deteriora.

La disminución en la visibilidad es causada por una variedad de contaminantes: las partículas pequeñas (de 0.1 a 1.0 um diámetro) diseminan y absorben luz; los compuestos de sulfato, el hollín de carbón y los compuestos de nitrato por lo general forman partículas dentro de este rango.

El NO₂ (un gas), absorbe luz azul, causando que el aire aparezca amarillo o gris rojizo. Las fundiciones de cobre, las plantas generadoras de combustible fósiles y los automóviles son los principales causantes de la reducción de visibilidad.

La visibilidad es un problema algo subjetivo que puede ser cuantificado por el "coeficiente de extinción", una medida de la suma de la diseminación y absorción de la luz por partículas finas y por gases, el coeficiente de extinción es una medida de la pérdida de luz en su camino a través de la atmósfera, por lo que, mientras mas grande es el coeficiente de extinción, la visibilidad es peor. Conforme el tiempo es seco (abajo de 70% de humedad relativa), el coeficiente de extinción es directamente proporcional a la concentración de los tamaños apropiados de partículas.

En las áreas metropolitanas el promedio de visibilidad es de 50 a 55 Km y en los lugares no-urbano es de 100 a 130 Km.

OLOR

El olor, como la visibilidad, tiene primariamente un impacto psicológico sobre el hombre; el olor (y el sabor), son estrictamente sentidos subjetivos. La nariz de una persona es todavía el mejor dispositivo para medir el olor, aunque presenta dificultades cuando se intenta cuantificar la cantidad de olor; es difícil juzgar si un olor industrial es aceptable o no.

Los guías de la ASTM y de la EPA involucran la selección de un panel de ocho o mas juicios; éstos juicios, preferentemente femeninos puesto que las mujeres tienen un sentido mas agudo al olfato que los hombres, aunque no deben fumar ni estar resfriadas.

La prueba consiste en tener una muestra de aire de 100 ml que se inyecta en cada ventana de la nariz del juzgador con una jeringa; si se detecta un olor diluye la muestra de aire con aire limpio hasta que no se detecte mas olor, y a éste nivel de dilución se le llama "umbral de olor".

Los olores se miden en "unidades de olor", consistiendo de que la cantidad de olor que, cuando se dispersa en 1 pie³ de aire libre de olor, es justamente detectable por el 50% de los juzgadores; si por ejemplo, una muestra se diluyó 200 veces para alcanzar el umbral, la muestra contiene 200 unidades de olor/pie³.

Hay otras pruebas que pueden ser usadas para "medir" el olor; éstas incluyen regímenes de flujo de gas y la determinación cualitativa y cuantitativa de los compuestos olorosos, por medio de instrumentos como cromatógrafos de gases y espectrómetros de masas, sin embargo, ninguno de estos métodos realmente determina el olor, y no se emplean cuando se consideran mediciones de contaminación del aire.

EFFECTOS SOBRE LOS ANIMALES

Los efectos sobre la salud de los varios contaminantes en los animales son casi los mismos que los efectos sobre los humanos; adicionalmente, los insecticidas pueden también ser un problema mayor para los animales.

Frecuentemente las fuentes de alimentos de los animales se contaminan por una forma u otra de contaminantes del aire, y hay numerosos casos documentados de gran número de muertes de animales que pueden relacionarse directamente con éste problema; muchos pesticidas pueden ser llevados a través de la cadena de alimentación, por ejemplo, si se rocía un pesticida sobre una área grande, mucho de éste va finalmente a un lago o corriente de agua, para consumo de peces. Los peces pueden ser comidos por ciertos tipos de aves, que entonces son afectados.

Por ejemplo, los pesticidas conteniendo cloro han sido relacionados con cascarones de huevo mas delgados de aves predatorias consumidoras de pescado; éstos huevos de cascarones mas delgados se rompen antes de incubar por lo que se pierden éstas crías.

EFFECTOS SOBRE LAS PLANTAS

Cada contaminante o combinación de contaminantes crean su propio tipo de daño, y a partir de un examen de la planta es a veces posible identificar la naturaleza del contaminante.

Los principales contaminantes que afectan la vida de las plantas son los contaminantes primarios SO₂ y fluoruro de hidrógeno (HF), y los contaminantes secundarios O₃ y PAN.

El SO₂ puede tener efectos agudos o crónicos sobre la vida de las plantas; un blanqueado inicial de las células de las plantas y el impedir su crecimiento con frecuencia conducen a su muerte.

Los fluoruros, aunque no son contaminantes comunes del aire, producen serias afectaciones a las plantas, por lo general los fluoruros se generan en la fabricación de fertilizantes fosfatados y también en la reducción del mineral de aluminio. El síntoma usual es que el tejido de la hoja muere en la punta.

El O₃, igual que el SO₂ blanquea las células de las plantas, siendo las coníferas particularmente susceptibles; inicialmente el daño se observa en el final de la hoja.

El PAN también tiende a ser muy reactivo con el nitrógeno en los materiales de las plantas, probablemente interrumpiendo el enlace en las moléculas proteínicas.

Por lo general las partículas llevan a la fitotoxicidad, inhibición de la respiración y/o fotosíntesis; los culpables típicos son el polvo de los hornos de cemento, el hollín, polvo de fundiciones y el óxido de magnesio. Estos polvos pueden cubrir a las hojas densa y completamente, y no permitir que funcionen las actividades biológicas normales.

EFFECTOS SOBRE LOS MATERIALES

Uno de los mas serios problemas que afectan los materiales es debido al SO₂ y al H₂SO₄ en el aire, la lluvia ácida; el carbonato de calcio (CaCO₃), el constituyente primario de la piedra caliza, es también el mayor ingrediente en el mármol, mortero y concreto. Desafortunadamente el CaCO₃ reacciona fácilmente con el H₂SO₄ para producir sulfato de calcio soluble en el agua (CaSO₄):



El CaSO₄ se lava con la lluvia, dejando los monumentos, estatuas o edificios picados y exponiendo nuevas superficies de CaCO₃ a reacciones posteriores; en los pasados 40 a 50 años se ha causado mas daños a las ruinas griegas y romanas que el causado en los 2000 años previos.

El H₂SO₄ también reacciona con materiales como metales, hule plástico y algunos tipos de telas, arruinándolos parcial o totalmente.

El NO₂ puede blanquear la telas, algo particularmente significativo en algunos de los primeros teñidos sintéticos, y puede también causar degradación en muchas telas, adicionalmente, el NO ayuda en la corrosión de varias aleaciones de níquel-bronce.

Las partículas ennegrecen y dañan materiales que van desde telas hasta edificios; muchos edificios se someten ahora a limpieza de sus fachadas después de muchos años de estar expuestos a partículas contaminantes en las ciudades.

EFFECTOS Y CAMBIOS METEOROLOGICOS

La contaminación del aire puede tener un efecto mayor sobre el clima, tanto regional como globalmente, regionalmente, se puede alterar la lluvia por la presencia de la contaminación del aire.

La razón para lo anterior puede ser vista si se considera como y porque se forma la lluvia: la humedad en el aire se colecta en pequeñas gotas usando una partícula como el nucleo. Estas pequeñas gotas se juntan inicialmente y forman nubes, y si hay suficiente concentración de humedad, las gotas pueden atraer mas vapor de agua hacia ellas mismas, crecen en tamaño y eventualmente formar lluvia, es decir, que la presencia de partículas catalizan la condensación inicial de humedad y la formación de gotas.

Debido a este comportamiento, la contaminación del aire puede tener influencia opuesta sobre la precipitación; demasiadas partículas pueden fortalecer la formación de muy pequeñas partículas nucleares comparadas con la humedad disponible. Cada partícula no puede atraer suficiente vapor de agua hacia ella misma, de forma que no puede crecer lo suficiente para formar gotas de lluvia, y el efecto neto es una disminución en la precipitación.

El efecto climático global se relaciona con el balance de calor de la tierra; hay dos teorías propuestas, pero opuestas para predecir el efecto neto de la contaminación del aire sobre la temperatura.

el efecto invernadero. El incremento en el quemado de combustibles fósiles aumenta la cantidad de CO₂ en la atmósfera; este CO₂ es importante en la medida en que es casi transparente a la radiación visible, pero es fuerte absorbedor y radiador de la radiación infrarroja (calor), y en ésta forma el CO₂ atmosférico actúa como un cristal en un invernadero. La luz visible penetra la capa de CO₂ y es degradada en la superficie de la tierra, pero el calor formado no puede ser radiado hacia fuera; muchas grandes ciudades y áreas metropolitanas se han vuelto en promedio en años recientes mas calientes y tienden a ser mas cálidas que las áreas rurales de alrededor;

la disminución de la penetración de los rayos del sol en la capa de contaminación del aire. La presencia especialmente de partículas en la atmósfera evita que muchos rayos de sol alcancen la superficie de la tierra; no solo las propias partículas cubre algunas ciudades, sino también y mas importante, la presencia de mas partículas tiende a incrementar las nubes en grandes altitudes evitando que algunos rayos del sol lleguen a las superficie de la tierra.

Solo el tiempo podrá decir cual de éstas dos posibilidades predominará, pero un cambio promedio en cualquier dirección de solo unos grados podría ser precursor de cambios climáticos mayores.

La magnitud de los cambios de temperatura ha sido pronosticado en el rango de menos de 0.03°C a un máximo de 3°C; la temperatura de cualquier lugar típico puede variar ésta cantidad en menos de una hora, por lo que éste pequeño cambio no puede representar un peligro inminente.

La noción popular de que con un incremento de temperatura se pueden fundir las glaciares incrementando el nivel de los oceanos 100 m. ó mas, sería devastador porque la mayoría de la población vive en elevaciones de 300 m ó menos.

El impacto mas crítico a corto plazo podría ser el cambio en el crecimiento de cosechas en las regiones del mundo; una elevación promedio de temperatura de 1.5°C podría cambiar las cosechas de granos a regiones mas hacia el norte en donde el suelo es menos productivo.

A la fecha, no hay evidencia de calentamiento o enfriamiento global; datos de temperatura han sido colectados por la serie TIROS-N de satélites de tiempo. La primera década de información (de 1979 a 1988) ha sido analizada y revela que no hay tendencias de temperatura a largo plazo. Las lecturas de satélites muestran mucha variabilidad de mes a mes y de año a año, refutando la percepción popular de que la atmósfera de la tierra se está calentando gradualmente sobre bases anuales.

Observando los datos de temperatura terrestre a largo plazo, los científicos observaron una tendencia de incremento de temperatura antes de 1940, anterior al mayor aumento en la concentración del CO₂ atmosférico; esto fué seguido por un decremento en la temperatura de 1940 a 1965. Se tiene claro que se requieren mas datos antes de que cualquier conclusión firme se tenga sobre las tendencias de temperatura a largo plazo.

Otro posible efecto global (no un efecto climático verdadero) se relaciona con la capa de O₃ ozono sobre la tierra; la presencia de la capa O₃ es muy importante para la vida en nuestro planeta, porque ésta ayuda a protegernos de daños potenciales por radiaciones ultravioletas (UV). Estudios científicos recientes han mostrado un agujero en la capa de ozono sobre la antártida.

La depleción de la capa de O₃ ha sido potencialmente asociada con un número de contaminantes, los óxidos de nitrógeno puede reaccionar con el CO₃:



Normalmente los óxidos de nitrógeno no alcanzan la estratosfera (en donde se encuentra el O₃), porque reaccionan antes de difundirse a esa altura, de forma que esto no es un problema mayor; el NO₂ tiene un tiempo de residencia típico de solo tres días, y el NO de cuatro días, sin embargo, los nuevos aviones de transporte supersónicos emiten óxidos de nitrógeno directamente a la estratosfera, justo a la capa de O₃, de forma que es posible que los efectos podrían ser serios.

Los compuestos clorofluorocarbonados (CFC), que a veces se emplean como propulsores en botes de aerosoles y como líquido refrigerante, puede tener también efectos negativos sobre la capa de O₃; su relativa no-reactividad, que lo hace buen propulsor, le permite emigrar a la estratosfera antes de reaccionar. Muchas Compañías de EUA han reemplazado voluntariamente los CFC's por otros químicos o por técnicos de bombeo mecánico, pero la ONU acuerdo no exigir la eliminación global de los CFC's hasta el año 2000, con un periodo adicional de 10 años de gracia para las naciones en desarrollo.

CONTROL DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA

1 INTRODUCCION.

El deterioro de la calidad del aire en el país ha sido cada vez mas evidente, especialmente en las áreas urbanas como la zona metropolitana de la Cd. de México, Monterrey y Guadalajara, y en zonas industriales como Coatzacoálcos, Minatitlán, Salamanca etc. Debido a esto es cada vez mas importante y necesario que se eviten o reduzcan las emisiones contaminantes de la atmósfera.

La mayor parte de las técnicas usadas en el control de la contaminación atmosférica se conoce desde hace mucho tiempo pero no se han puesto en operación con la intensidad debida. A continuación se intenta una rapida revisión de esas técnicas y sus posibilidades.

2 CONTAMINANTES.

Se entiende por contaminante toda materia o energía que por su naturaleza intensidad, concentración o ubicación, afecte la calidad del ambiente de manera que pueda provocar daños o molestias a la salud, la fauna, la flora y/o el equilibrio ecológico.

2.1 CLASIFICACION.

Los contaminantes pueden clasificarse desde diferentes puntos de vista:

2.1.1 Por su estado físico se dividen en:

- GASES
- VAPORES
- PARTICULAS SOLIDAS
- PARTICULAS LIQUIDAS

2.1.2 Por su origen los contaminantes pueden clasificarse como:

NATURALES:

CENIZAS Y GASES VOLCANICOS
GASES DE PUTREFACCION
PARTICULAS DE EROSION EOLICA

ARTIFICIALES:

Productos de:

COMBUSTION
REACCIONES QUIMICAS
FRAGMENTACION

3 CONTROL DE EMISIONES:

3.1 OBJETIVOS DEL CONTROL DE EMISIONES

Los objetivos de control de emisiones son variados y entre ellos se puede distinguir:

3.1.1 ECONOMICOS. Cuando el control de emisiones o la captación de contaminantes reporta un beneficio directo, ya sea por ser parte del proceso productivo o por permitir la recuperación de materiales valiosos, ahorrar energía o utilizar el gas limpio.

3.1.2 SOCIALES

Entre los objetivos sociales se pueden contar los citados a continuación:

Reducir riesgos a la salud de los trabajadores
Mejorar relaciones con la comunidad.
Atenuar la degradación del ambiente
Cumplir con leyes y reglamentos.

Si bien los demás motivos son válidos, cumplir con las leyes y reglamentos vigentes resulta ser actualmente el motivo más importante, ya que a medida que la contaminación aumenta la sociedad requiere más medios para obligar a sus miembros a cumplir con la parte que le corresponde a la solución del problema.

3.2 MEDIDAS DE CONTROL.

Las medidas de control si bien son semejantes entre si, presentan matices diferentes segun el tipo de fuente que los genera, por lo que las trataremos por separado:

En cuanto a medidas de control, la division mas importante se refiere al tipo de fuente que origina los contaminantes distinguiendose entre:

FUENTES MOVILES
FUENTES FIJAS

3.2.1 FUENTES MOVILES.

La contaminación originada en fuentes móviles se puede controlar o reducir por medio de:

3.2.1.1 REDUCCION DE EMISIONES:

Motores mas eficientes
Mejores carburadores
Mejores combustibles
Uso de catalizador

3.2.1.2 FUENTES DE ENERGIA ALTERNAS:

Humana (bicicleta).
Eléctrica de grandes centrales (metro, trolebús).
Automóviles eléctricos (con sus limitaciones).

3.2.1.3 USO RACIONALIZADO DEL TRANSPORTE:

Reducción del uso de automovil particular utilizando:

Metro
Tren eléctrico
Autobuses
Trolebuses

3.2.1.4 EFECTOS DE LAS MEDIDAS TOMADAS:

En las ultimas dos décadas se han hecho esfuerzos y se han obtenido grandes avances en la reducción de emisiones, pues facilmente se advierte que los vehículos son mas ligeros, tienen motores y sistemas de combustión mas eficientes, y bien mantenidos y operados emiten solo una fracción de los contaminantes que antes se descargaban a la atmósfera; también se han mejorado

los combustibles, eliminando el plomo en una buena parte de la gasolina comercializada y reduciendo significativamente el plomo en el resto de ellas, así como reduciendo el contenido de azufre del diesel y los combustibles usados en la zona metropolitana. sin embargo el aumento en la cantidad de vehiculos ha hecho que esto resulte insuficiente.

En el uso de otras fuentes de energía no se han logrado avances tan espectaculares, pues no se ha incrementado suficiente el uso de la bicicleta ni es aun factible usar automoviles eléctricos autogeneradores, y los otros vehículos que usan electricidad tales como el Metro y Trolebuses requieren la generación de energía que en su mayor parte se producen por termoeléctricas que tambien generan contaminantes.

La medida que mas beneficios puede ocasionar y en el menor plazo es la racionalización del transporte mediante el uso de transporte masivo. El programa HOY NO CIRCULA ha sido un fracaso, pues al volverse obligatorio y sin haber una alternativa real de transporte colectivo, dió origen a un desusado incremento del numero de vehículos en circulación, de tal manera que los dias habiles se tiene igual cantidad de vehículos circulando que antes del programa permanente, y los sabados y domingos que eran periodo de recuperación de calidad del aire, se puede apreciar que tenemos una circulación alta por la abundancia de unidades.

3.2.1.5 SOLUCIONES:

Las soluciones son entonces:

Mas metro.

Mas tren eléctrico

Mas autobuses modernos equipados con motores y dispositivos para reducir la contaminación.

Mejor vialidad para estos vehículos en detrimento de la vialidad de los vehículos privados.

Menos vehículos particulares en circulación, especialmente los que viajan con una sola persona.

La aplicación de estas medidas queda en general fuera del alcance del ciudadano medio que solo puede presionar a las autoridades para que trabajen en este sentido y actuar consecuentemente en lo personal.

3.2.2 FUENTES FIJAS.

Se entiende por fuentes fijas, aquellas que permanezcan en un mismo sitio, aunque pudieran ser transportables. Prácticamente todas las industrias caen dentro de esta clasificación.

3.2.2.1 OPCIONES DE CONTROL:

Para controlar las emisiones de fuentes fijas el procedimiento de selección adecuado incluye:

- 3.2.2.1.1 Revisión del proceso. Investigar si este puede ejecutarse de otra manera que evite o reduzca la generación de contaminantes.
- 3.2.2.1.2 Revisión de equipo. Puede usarse otro tipo de máquina o de materias primas que generen menos contaminación.
- 3.2.2.1.3 Control de emisiones. Una vez que se revisó la posibilidad de usar las dos primeras medidas sin obtener resultados, procede el control de emisiones.

3.2.2.2 CRITERIOS DE SELECCION.

Para seleccionar el sistema de control adecuado se requiere conocer previamente:

3.2.2.2.1 PROPIEDADES DE LOS CONTAMINANTES

GENERALES:

ESTADO FISICO
CORROSIVIDAD
TOXICIDAD
INFLAMABILIDAD
CONDUCTIVIDAD ELECTRICA

PARA PARTICULAS:

TAMAÑO Y FORMA.
DENSIDAD
ADHESIVIDAD
HIGROSCOPICIDAD
ABRASIVIDAD

3.2.2.2.2 CARACTERISTICAS DE LA EMISION.

De las condiciones en que se emiten los contaminantes es necesario saber:

- FLUJO DE GASES
- COMPOSICION
- TEMPERATURA
- HUMEDAD
- INFLAMABILIDAD
- EXPLOSIVIDAD
- CORROSIVIDAD

3.2.2.2.3 DATOS DEL PROCESO.

Del proceso en que se origina la emisión contaminante se requiere:

- DESCRIPCION
- TIEMPO DE OPERACION
- CAPACIDAD
- CARACTERISTICAS DEL EQUIPO EMISOR

3.2.2.2.4 DATOS GENERALES.

Se requieren entre otros datos adicionales:

- UBICACION
- ALTITUD
- LUGAR DISPONIBLE
- CONDICIONES AMBIENTALES
- DISPONIBILIDAD DE:
 - ENERGIA ELECTRICA
 - AIRE COMPRIMIDO
 - VAPOR
 - COMBUSTIBLES

4 EQUIPOS DE CONTROL DE EMISIONES.

4.1 CONTROL DE PARTICULAS

4.1.1 ALTERNATIVAS DE CONTROL DE EMISIONES.

Los equipos de control de emisiones atmosféricas de que se dispone para fuentes fijas (generalmente industrias) son, según su funcionamiento:

4.1.2 COLECTORES SECOS:

Los colectores secos se utilizan principalmente para captar contaminantes sólidos o líquidos, dependiendo su selección del tipo y tamaño de partículas a captar.

Dependiendo de los materiales de construcción, resisten altas temperaturas y corrosividad, y pueden manejar sustancias corrosivas, higroscópicas, inflamables y tóxicas.

TIPOS DE COLECTORES SECOS:

INERCIALES:

CAMARAS DE SEDIMENTACION
SEPARADORES DINAMICOS
CENTRIFUGOS

FILTROS DE BOLSAS:

DE TELA TEJIDA
DE TELA AGUJADA

EQUIPOS DE ABSORCION:

DE CARBON ACTIVADO
DE OTROS ELEMENTOS

PRECIPITADORES ELECTROSTATICOS.

POSTQUEMADORES O INCINERADORES.

DE COMBUSTION NORMAL
DE COMBUSTION CATALITICA

4.1.3 COLECTORES HUMEDOS:

CAMARAS DE ASPERSION
FILTROS HUMEDOS
TORRES EMPACADAS
LAVADORES VENTURI
PRECIPITADORES ELECTROSTATICOS

4.1.2 COLECTORES SECOS.

Sus características mas notables son:

4.1.2.1 COLECTORES INERCIALES:

Los colectores inerciales basan su funcionamiento en la rapidez con que las partículas pueden separarse de los gases que los portan, opuesta a su resistencia a caer en aire quieto. La velocidad máxima de caída se logra cuando el peso es equilibrado por la "flotabilidad" y la fricción generada por el movimiento en contacto con el aire.

4.1.2.2 CAMARAS DE SEDIMENTACION:

Estos equipos funcionan aprovechando la atracción gravitacional, haciendo que las partículas caigan en un depósito cuando pasan por una cámara amplia, que origina una velocidad de translación muy baja y permite que las partículas se separen de la corriente gaseosa que los transporta. Ocupan mucho espacio, requieren poca energía (fricción de 5 a 20 mm de columna de agua) y en la práctica solo se usan para partículas de mas de 100 micrómetros (μm).

4.1.2.3 SEPARADORES DINAMICOS:

Funcionan pasando los gases contaminados por un brusco cambio de dirección, con lo que las partículas suficientemente pesadas se escapan de la corriente gaseosa hacia un deposito. También son voluminosos, requieren poca energía (presión estática requerida de 15 a 50mm CA) y se usan para partículas de 50 μm .

4.1.2.4 CENTRIFUGOS:

La base de su funcionamiento es la fuerza centrífuga que actúa sobre las partículas mas densas que el aire, que son sometidas a un flujo helicoidal semejante al de un ciclón, de donde reciben su nombre mas popular. Necesitan mas energía que los anteriores, pues su resistencia al paso del aire varia habitualmente de 50 a 120 mm CA y se usan con partículas entre 200 y 20 μm .

4.1.2.5 FILTROS DE TELA:

Los filtros de bolsas operan por el principio de cernido, esto es, haciendo pasar el aire contaminado por una tela o tejido, en la que inicialmente se

detienen las partículas mas grandes que los orificios o poros y ya en operación se forma una capa del mismo material retenido (torta), en la que se retienen partículas mucho menores que los poros de la tela. Tienen una caída de presión alta (de 100 a 200 mmCA) y se usan para partículas hasta de un micrómetro. Su principal limitación es que a medida que la torta crece, se requiere mayor presión para pasar los gases por el filtro, por lo que para operar en forma continua se requiere preveer un sistema de limpieza de la tela.

4.1.2.5.1 DE TELA TEJIDA:

Estos filtros usan telas tejidas con hilos multifilamento, tienen la ventaja de ser facilmente limpiables por sacudimiento o inversión de flujo, pero su permeabilidad es limitada, utilizandose en general para cargas de 1 m³/m²-min.

4.1.2.5.2 DE TELA AGUJADA:

La tela agujada, se produce clavando en una tela lisa una gran cantidad de fibras, formando un tejido tipo fieltro, que puede retener partículas a diferentes profundidades, con lo que se pueden filtrar flujos mayores (hasta 3 m³/m²-min), con la misma resistencia que el tipo liso.

4.1.2.5.3 DE CARTUCHO:

Una variante interesante de lo anterior que se empezó a usar recientemente son los filtros de cartucho. Estos filtros consisten en un armazon metálico que sirve de soporte a un medio filtrante continuo, colocado en forma anular zigzagueante, semejante a los filtros que se venian usando para el aire de entrada a motores de combustión interna, llegandose incluso a usar membranas de papel filtro. Estos filtros permiten acomodar una gran area filtrante en un espacio muy reducido; se usan preferentemente para filtrar polvos facilmente desprendidos, requieren limpieza por aire comprimido y tienen una vida útil menor que los otros filtros.

VENTAJAS DE LOS FILTROS DE TELA:

Retiene partículas hasta de un μ m.
Alta eficiencia de captación (superior al 98%)
Eficiencia independiente del flujo manejado.

DESVENTAJAS DE LOS FILTROS DE TELA:

Con telas normales (algodón, poliéster, etc), solo resisten temperaturas de hasta 120 ° C; y con telas especiales (fibra de vidrio o Nomex Dupont), pueden trabajar hasta por encima de 400° C.

Alto costo inicial.

Alto costo de mantenimiento.

4.1.2.6 EQUIPOS DE ADSORCIÓN:

Con la necesidad de captar vapores contaminantes, especialmente vapores orgánicos, se ha venido extendiendo el uso de sistemas de adsorción, en los que se hace pasar los gases contaminados por un relleno de material adsorbente, tal como carbón activado o sílica gel; estos materiales adsorben, es decir, retienen en su superficie las moléculas de los contaminantes.

Estos elementos pueden ser:

4.1.2.6.1 Regenerables, cuando cuentan con un sistema que mediante vapor o gases calientes, separan el material captado (desorben) para recuperarlo o destruirlo.

4.1.2.6.2 Desechables, cuando una vez que por estar cerca de la saturación, la eficiencia de adsorción disminuye por abajo de lo requerido. En este caso debe considerarse la posibilidad de que el elemento gastado constituya un residuo peligroso.

4.1.2.7 PRECIPITADORES ELECTROSTÁTICOS.

Los precipitadores electrostáticos son considerados lo máximo en control de contaminación. La razón de ello es que pueden trabajar con eficiencias muy altas, pero ello depende de una correcta selección, fabricación, armado y operación.

Su funcionamiento se basa en que una partícula con carga electrostática es atraída por cualquier cuerpo que tenga carga opuesta, con una fuerza que es directamente proporcional a la diferencia de carga e inversamente a la distancia que las separe. El equipo consiste generalmente de electrodos emisores cargados negativamente y electrodos receptores cargados positivamente, entre los que se hacen pasar las

partículas contaminantes, que son bombardeadas por los electrones que fluyen en el campo electrostático y cargadas hasta su saturación; depositándose luego en el electrodo receptor.

VENTAJAS:

Pueden lograrse eficiencias de mas de 99.997 %.
Presentan baja resistencia al flujo (10 a 50 mmCA)
Pueden manejar materiales húmedos y abrasivos.
Bajo costo de operación.

DESVENTAJAS:

Solo operan a temperaturas menores de 300 °C.
No pueden manejar gases o partículas inflamables o explosivos.
Alto costo inicial.

4.1.2.8 POSTQUEMADORES O INCINERADORES:

Los postquemadores son especialmente adecuados para destruir substancias peligrosas, tales como compuestos volátiles orgánicos, solventes, materiales tóxicos, etc. Operan por el principio de combustión, oxidación o disociación de los contaminantes.

DE COMBUSTION NORMAL:

Los incineradores de combustión normal se usan llevando la temperatura de los gases, mediante la combustión de un combustible idoneo (generalmente gaseoso), a las temperaturas adecuadas para lograr los objetivos (de 800 a 1200 °C), durante el tiempo necesario (de 0.1 a 1.5 segundos).

DE COMBUSTION CATALITICA:

Cuando los contaminantes son combustibles, tales como la mayoria de los solventes y vapores orgánicos, se puede utilizar un quemador catalítico, en el que mediante la presencia de una gran superficie recubierta con un metal precioso (generalmente platino) que actua como catalizador, la combustión tiene lugar a temperaturas mucho mas bajas, de alrededor de 400 °C.

VENTAJAS:

Destruyen totalmente los contaminantes, produciendo generalmente solo CO₂ y vapor de agua,

rompiendo moléculas peligrosas (askareles).

Aprovechan el calor de combustión de los vapores contaminantes.

DESVENTAJAS:

Frecuentemente tienen un alto costo de operación por consumo de combustible. requieren instrumentación sofisticada y cuidadoso mantenimiento para evitar emisiones tóxicas.

4.1.3 COLECTORES HUMEDOS:

Los colectores húmedos funcionan haciendo entrar en contacto los contaminantes de una corriente gaseosa con agua u otro líquido capaz de retenerlos, absorberlos o diluirlos. La eficiencia de captación depende de la superficie de contacto gas-líquido y de la relación entre el tamaño de las partículas y las gotas, pues entre menores sean las gotas en que se fragmenta el líquido captador, mayor será la eficiencia de captación. Los principales tipos son:

4.1.3.1 CAMARAS DE ASPERSION:

Las camaras de aspersion son generalmente cuerpos cilíndricos o rectangulares por los que pasan los gases expuestos a una lluvia de líquido que sale de boquillas de aspersion situadas dentro del conducto. Generalmente son de baja eficiencia y sirven solo para partículas de 50 μm o más.

4.1.3.2 DE FILTRO HUMEDO.

Un mejor funcionamiento se obtiene cuando se instalan elementos filtrantes o superficies de contacto mojadas por medio de aspersores de baja presión, facilitando el contacto gas líquido. Los elementos de contacto pueden ser paquetes de fibra o láminas corrugadas, se usan para partículas de 20 a 50 μm .

4.1.3.3 TORRES EMPACADAS:

Las torres empacadas se usan desde hace mucho tiempo en procesos de absorción y se basan en hacer pasar los gases contaminados a través de un paquete de elementos de contacto (anillos rashing o similares), en los que se obtiene una superficie de contacto ampliada, se usan para condiciones semejantes a las de filtro húmedo.

4.1.3.4 VENTURI

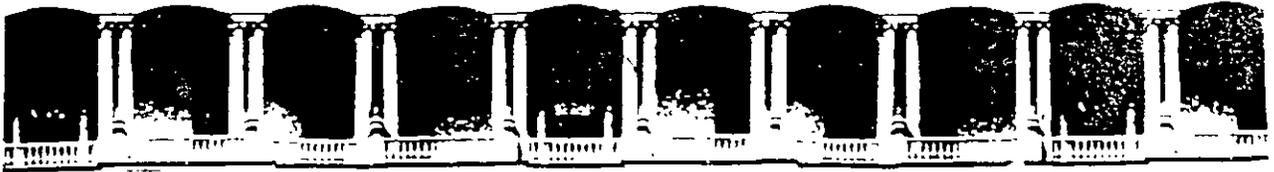
En los colectores venturi la alta eficiencia se logra fragmentando el agua al hacerla pasar por una garganta o estrechamiento del ducto, en contacto con agua sin presión. La finura de la fragmentación del agua depende de la velocidad de los gases, y ésta a su vez de la energía que se

les aplique. Los rangos de operación son los siguientes:

TIPO	PRESION ESTATICA (mm CA)	TAMAÑO PARTICULA (μm)
BAJA PRESION	De 100 a 200	10 o mayores
MEDIA PRESION	De 201 a 300	3 o mayores
ALTA PRESION	Mayor de 300	0.5 o mayores

4.1.3.5 PRECIPITADORES ELECTROSTATICOS

Algunas aplicaciones de este tipo de colector permiten el uso de agua para limpiar los electrodos colectores y obtener mejor eficiencia de captación con menor voltaje y consumo de energía.



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

CURSOS ABIERTOS

**“ CONTROL DE CONTAMINACIÓN Y
AHORRO DE ENERGÍA
EN CALDERAS ”**

TEMA:

**CONTROL DE CONTAMINACIÓN
Y NORMAS**

**EXPOSITOR ING. MARTINIANO AGUILAR RODRÍGUEZ
1997**

SECRETARIA DE MEDIO AMBIENTE, RECURSOS NATURALES Y
PESCA

NORMA OFICIAL MEXICANA

NOM-085-ECOL-1994

Contaminación Atmosférica - Fuentes fijas - para fuentes fijas que utilizan combustibles fósiles sólidos, líquidos o gaseosos o cualquiera de sus combinaciones, que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de humos, partículas suspendidas totales, bióxido de azufre y óxidos de nitrógeno y los requisitos y condiciones para la operación de los equipos de calentamiento indirecto por combustión, así como los niveles máximos permisibles de emisión de bióxido de azufre en los equipos de calentamiento directo por combustión.

JULIA CARABIAS LILLO, Presidenta del Instituto Nacional de Ecología, con fundamento en los artículos 32, fracciones I, XXIV y XXV de la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal; 5°, fracciones I y VIII, 6°, último párrafo, 8°, fracciones I y VII, 36, 37, 111, fracción I, del 161 al 169, 171 y 173 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente; 7° fracciones II y IV, 16, 25, 46 y 49 del Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera; 38, fracción II, 40 fracciones I y X, 41 y 48 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización; Primero y Segundo del Acuerdo mediante el cual se delega en el Subsecretario de Vivienda y Bienes Inmuebles y en el Presidente del Instituto Nacional de Ecología, la facultad de expedir las normas oficiales mexicanas en materia de vivienda y ecología, respectivamente, y

C O N S I D E R A N D O

Que esta Norma Oficial Mexicana fué expedida por primera vez con carácter emergente con la clave NOM-PA-CCAT-019/93 (NE), el 30 de marzo de 1993 y publicada en el Diario Oficial de la Federación el 7 de abril del mismo año.

Que la misma Norma fué expedida por segunda ocasión con la clave NOM-CCAT-019-ECOL/1993 (NE), y publicada en el Diario Oficial de la Federación el 18 de noviembre de 1993.

De igual forma fue expedida por tercera ocasión con la clave NOM-085-ECOL-1994, y publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de diciembre de 1994.

Que atendiendo a las opiniones de los sectores involucrados, se determinó revisar y modificar la norma oficial mexicana NOM-085-ECOL-1994.

Ecuación 1

$$E_{pc} = \frac{EC_1 \cdot C_1 + EC_2 \cdot C_2 + \dots + EC_n \cdot C_n}{C_1 + C_2 + \dots + C_n}$$

donde:

E_{pc} = Emisión ponderada en base al consumo energético horario expresada en $kg/10^6$ MJ

E_{cn} = Emisión de contaminante determinado en cada equipo de combustión expresada en $kg/10^6$ MJ.

C_n = Consumo energético horario de cada equipo de combustión, expresada en MJ/h. Se obtiene al multiplicar el consumo de combustible por su poder calorífico.

n = Número de equipos de combustión existentes en una misma fuente fija.

Ecuación 2

$$LEP = \frac{LE_1 \cdot C_1 + LE_2 \cdot C_2 + \dots + LE_n \cdot C_n}{C_1 + C_2 + \dots + C_n}$$

LEP = Nivel Máximo Permisible por Fuente Fija expresada en $kg/10^6$ MJ, ppm V ó mg/m^3 , según el caso.

L_e = Nivel Máximo Permisible de Emisión de contaminantes para el equipo de combustión i, seleccionado de las tablas 4 o 5 en función del tipo de combustible, expresado en $kg/10^6$ MJ, ppm V. ó mg/m^3 , según el caso.

C_n = Consumo energético horario del equipo de combustión n expresado en MJ/h. (Anexo 5).

n = Número de equipos de combustión existentes dentro de una misma fuente fija.

Ecuación 3

$$E_{pQ} = \frac{E_1 \cdot Q_1 + E_2 \cdot Q_2 + \dots + E_n \cdot Q_n}{Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n}$$

donde:

E_{pQ} = Emisión ponderada en base a flujo de gases en chimenea, expresada en unidades de concentración según se indica en las tablas 4 y 5.

E_n = Emisión determinada en cada equipo de combustión, expresada en unidades de concentración según se indica en las tablas 4 y 5.

n = Número de equipos de combustión existentes en una misma fuente fija.

Q_n = Flujo de gases en chimenea expresado en m^3/min a condiciones de 760 mm de Hg a 25°C, base seca y 5% de oxígeno.

TABLA 4.
1994 AL 31 DE DICIEMBRE DE 1997

CAPACIDAD DEL EQUIPO DE COMBUSTIÓN MJ/h	TIPO DE COMBUSTIBLE EMPLEADO	DENSIDAD DEL HUMO	PARTÍCULAS (PST) mg/m ³ (kg/10 ⁶ MJ) (1) (2)			BIÓXIDO DE AZUFRE ppm V (kg/10 ⁶ MJ) (1) (2)			ÓXIDOS DE NITRÓGENO ppm V (kg/10 ⁶ MJ) (1) (2)(6)			EXCESO DE AIRE DE COMBUSTIÓN % volumen (4)
		Número de mancha u opacidad	ZMCM	ZC	RP	ZMCM	ZC (5)	RP	ZMCM	ZC (3)	RP	
De 176.5 a 706.0	Combustible o gasóleo	4	NA	NA	NA	1100 (975.12)	2100 (1864.2)	2600 (2344.59)	NA	NA	NA	60
	Otros líquidos	3	NA	NA	NA	1100 (975.12)	2100 (1864.2)	2600 (2306.35)	NA	NA	NA	
Mayor de 706.0 a 5,250	Combustible o gasóleo	4	NA	NA	NA	1100 (975.12)	2100 (1864.2)	2600 (2344.59)	NA	NA	NA	
	Otros líquidos	3	NA	NA	NA	1100 (975.12)	2100 (1864.2)	2600 (2306.35)	NA	NA	NA	
	Gaseosos	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
Mayor de 5,250 a 43,000	Líquidos	NA	100 (33.938)	425 (144.556)	600 (188.659)	1100 (975.12)	2100 (1864.2)	2600 (2306.35)	220 (140.532)	300 (191.678)	400 (255.941)	
	Gaseosos	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	220 (134.557)	300 (183.313)	400 (244.491)	
Mayor de 43,000 a 110,000	Líquidos	NA	100 (33.938)	425 (144.556)	550 (188.659)	1100 (975.12)	2100 (1864.2)	2600 (2306.35)	180 (144.954)	300 (191.439)	400 (255.491)	40
	Gaseosos	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	180 (109.94)	300 (183.313)	400 (244.497)	
Mayores a 110,000	Sólidos	NA	70 (25.095)	325 (118.544)	435 (158.696)	1100 (1032.48)	2100 (1732.75)	2600 (2440.19)	160 (107.311)	280 (187.615)	400 (268.158)	30
	Líquidos	NA	70 (23.661)	325 (110.418)	500 (169.69)	1100 (975.12)	2100 (1864.2)	2600 (2306.35)	160 (102.053)	280 (178.772)	400 (255.491)	
	Gaseosos	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	160 (97.751)	280 (171.124)	400 (244.497)	

Notas y significados de siglas en Anexo 1.

**TABLA 6
MEDICION Y ANALISIS DE GASES DE COMBUSTION**

CAPACIDAD DEL EQUIPO DE COMBUSTION MJ/h	PARÁMETRO	FRECUENCIA MÍNIMA DE MEDICIÓN	TIPO DE EVALUACIÓN (1)	TIPO DE COMBUSTIBLE
De 176.5 a 5,250	densidad de humo	1 vez cada 3 meses	puntual (3 muestras); mancha de hollín	líquido y gas
	CO ₂ , CO, O ₂ , N ₂	1 vez cada 3 meses	puntual (3 muestras)	líquido y gas
	SO ₂	1 vez cada 3 meses	medición indirecta a través de certificados de calidad de combustibles que emita el proveedor	líquido
Mayor de 5,250 a 43,000	Partículas suspendidas totales	una vez por año	isocinético (mínimo durante 60 minutos); 2 muestras definitivas	líquido
	NO _x	una vez por año	continuo (3); quimiluminiscencia o equivalente	líquido y gas
	SO ₂	una vez por año	medición indirecta a través de certificados de calidad de combustibles que emita el proveedor	líquido
	CO ₂ , CO, O ₂ , N ₂	diario	puntual (3 muestras) o equivalente	líquido y gas
Mayor de 43,000 a 110,000	Partículas suspendidas totales	una vez por año	isocinético (mínimo durante 60 minutos); 2 muestras definitivas	líquido
	NO _x	1 vez cada 6 meses	continuo (3); quimiluminiscencia o equivalente	líquido y gas
	SO ₂	una vez por año	medición indirecta a través de certificados de calidad de combustibles que emita el proveedor	líquido
	CO ₂ , CO, O ₂ , N ₂	una vez por turno	puntual (3 muestras) o equivalente	líquido y gas
Mayores de 110,000	Partículas suspendidas totales	1 vez cada 6 meses	isocinético (mínimo durante 60 minutos); 2 muestras definitivas	sólido, líquido
	NO _x	permanente (2)	continuo (3); quimiluminiscencia o equivalente	sólido, líquido y gas.
	O ₂	permanente	continua; campo magnético o equivalente, con registrador como mínimo ó equivalente	líquido y gas
	SO ₂	una vez por año	medición indirecta a través de certificados de calidad de combustibles que emita el proveedor	sólido, líquido
	CO ₂ , CO, O ₂ , N ₂	una vez por turno	puntual (3 muestras) o equivalente	líquido y gas

NOTAS:

(1) Ver 6.1.1.4

(2) El monitoreo continuo de NO_x será permanente en las zonas metropolitanas de las ciudades de México, Guadalajara y Monterrey; con una duración de cuando menos 7 días una vez cada 3 meses en las zonas críticas; y con una duración de cuando menos 7 días una vez cada seis meses en el resto del país.

(3) Ver 4.13