



**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 período 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.

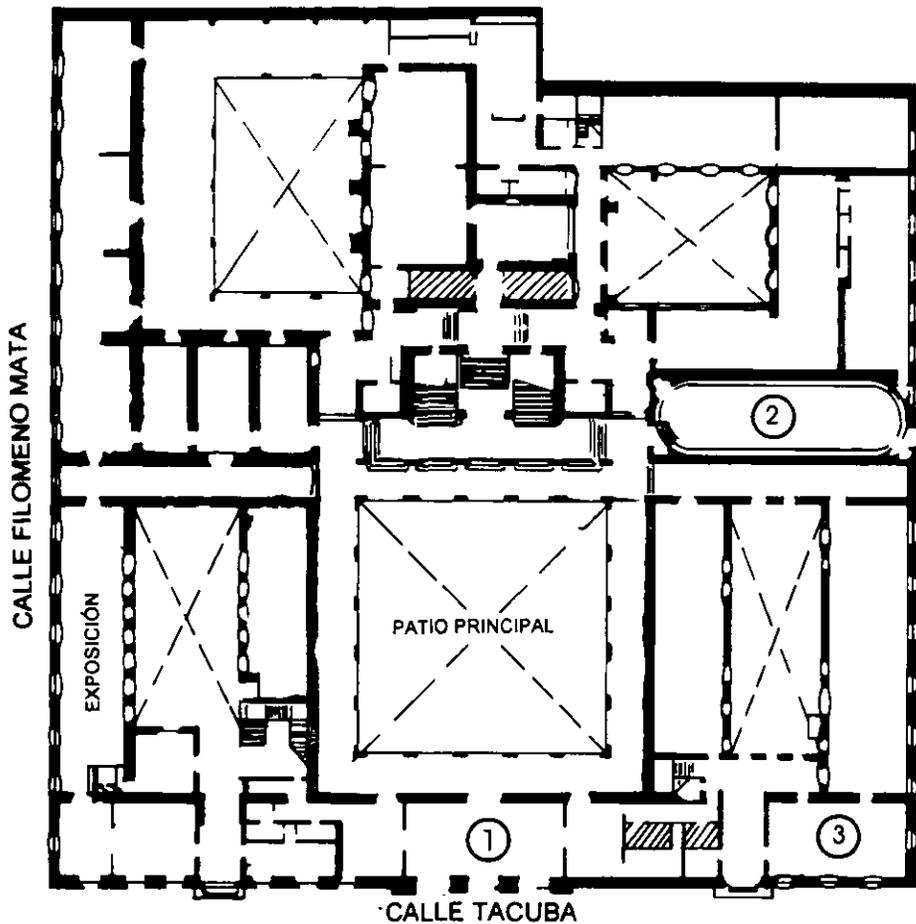
Con el objeto de mejorar los servicios que la División de Educación Continua ofrece, al final del curso deberán entregar la evaluación a través de un cuestionario diseñado para emitir juicios anónimos.

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.

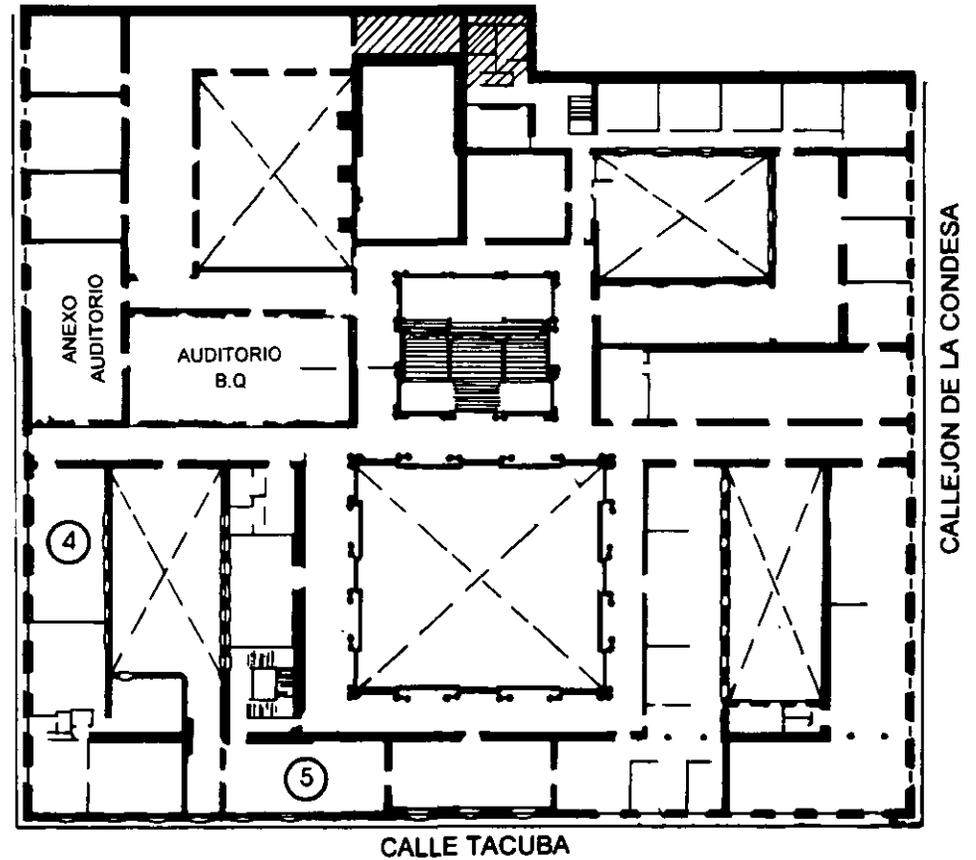
Atentamente

División de Educación Continua.

PALACIO DE MINERIA



PLANTA BAJA



MEZZANINNE

CONTROL DE LA CONTAMINACION Y USO EFICIENTE DE ENERGIA Y EN CALDERAS

TEMARIO

I. CONFIGURACIONES Y COMPONENTES DE CALDERAS.

II. COMBUSTIBLES

- Características
- Sistemas de alimentación

III. QUEMADORES Y HORNOS

IV. LA COMBUSTIÓN

- Conceptos
- Productos
- Energía
- Problemas de contaminación por mala combustión

V. SISTEMAS DE CONTROL DE COMBUSTIÓN

VI. AFINACIÓN O CARBURACIÓN DE CALDERAS

- Diagnósticos
- Ajustes
- Optimización

VII. MANTENIMIENTO Y LA CONTAMINACIÓN

VIII. PROCEDIMIENTOS DE PRUEBAS A CALDERAS

- Metas
- Preparación
- Principales factores que controlan la eficiencia
- Métodos de cálculo

IX. RECUPERACIÓN DEL CALOR Y DISMINUCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN

X. TÉCNICAS Y EQUIPOS DE MEDICIÓN DE PRODUCTOS DE COMBUSTIÓN CONTAMINANTES

XI. LOS EFECTOS DE LOS CONTAMINANTES

XII. EL CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN Y LA NORMATIVIDAD



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

CURSOS ABIERTOS

**CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN Y USO
EFICIENTE DE ENERGÍA EN CALDERAS**

TEMA :

CONFIGURACIONES Y COMPONENTES

**ING. MARTINIANO AGUILAR RODRÍGUEZ
PALACIO DE MINERÍA
SEPTIEMBRE 1999**

I. CONFIGURACIONES Y COMPONENTES DE CALDERAS

1. DEFINICIONES Y COMPONENTES

Generador de vapor o caldera es un dispositivo para generar vapor o ~~calentar agua~~ 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; ésta última puede definirse como:

“Un recipiente cerrado en donde un líquido se convierte en vapor por la conducción de calor desde una fuente de calor a través de una superficie de calentamiento”.

En la mayoría de los casos el líquido es agua; a pesar que la definición anterior incluye una acción evaporadora en el recipiente, por lo general se acepta que las unidades de agua caliente a alta temperatura se conocen también como calderas.

Una clasificación general de calderas puede dividirse a estas en: Calderas de

tubos de humo y Calderas de tubos de agua.

Las calderas de tubos de humo se fabrican de acero en tamaños hasta de 7,000 kg de vapor por hora con una presión máxima de trabajo de 18 kg/cm².

Las calderas de tubos de agua también se fabrican de acero y se emplean cuando se requieren grandes cantidades de generación de vapor y altas presiones. En general tienen mejor eficiencia que las calderas de tubos de humo, aunque su costo de instalación es mayor.

1.1 Los Sistemas de las Calderas

Una Caldera no puede funcionar independientemente en forma apropiada sin el soporte de fuentes externas.

Para que una Caldera pueda ser operada seguramente se requiere la activación de varios sistemas separados aunque interrelacionados; éstos sistemas proveen:

- Agua de alimentación
- Combustible
- Aire para combustión
- Regulación de la presión
- Control y seguridad de la unidad

Un mal funcionamiento de cualquiera de estos sistemas puede terminar en un desastre.

- Los sistemas de agua de alimentación y retorno de condensado tienen el doble trabajo de retornar al sistema el condensado para reusarlo como agua de alimentación, además de proveer el repuesto, de una fuente alterna, para reponer el agua pérdida durante el ciclo de agua-vapor-agua. La separación del condensado del vapor se realiza en trampas de vapor localizadas corriente arriba del sistema de agua de alimentación.

Antes de retornar a la caldera, por lo general el condensado se almacena en un tanque a vacío, recibidor de condensado, calentador de aireador de agua de alimentación o alguna combinación de éstos, en donde normalmente se agrega el agua de repuesto y se precalienta y tiene lugar la deaireación y tratamiento químico preliminar.

Desde estos tanques el agua de alimentación pasa a través de válvulas y controles localizados a lo largo del tren de agua de alimentación antes de que sea introducida a la Caldera, por bomba o inyector, a una presión superior a la de operación de la unidad.

- El sistema de combustible puede ser simple o elaborado, dependiendo del tipo de combustible usado y del acondicionamiento a que está sujeto. Las Calderas pueden

diseñarse para quemar cualquier tipo de combustible, pero por lo general los más usados son el gas natural o LP, el *aceite* y en cierto grado el carbón, o una combinación de éstos.

El gas natural es el combustible más limpio en su combustión y causa la menor cantidad de mantenimiento en la caldera, y no requiere bombeo o almacenamiento, siendo suministrado por PEMEX a través de ramales de gasoductos.

El aceite combustible debe ser transportado, almacenado en tanques, analizado y tratado cuando se almacena por largos periodos, calentado (dependiendo del grado), filtrado, bombeado a través de sistemas con recirculaciones y limpiado de las superficies de calentamiento de las calderas en la forma de hollín y depósitos de carbón regularmente.

El carbón debe enviarse junto con una hoja de análisis de sus constituyentes, lavado, almacenado, molido, movido en transportadores e introducido al hogar en parrillas o quemadores, y limpiado de la Caldera en la forma de hollín o cenizas.

- El sistema de tiros suministra el aire para el proceso de combustión y remoción de los gases de combustión; el tiro mecánico se provee con ventiladores de tiro forzado que soplan aire a través de la cámara de combustión, o con ventiladores de tiro inducido que succionan al

aire y gases o por una combinación de los dos ventiladores.

- El sistema de presión alimenta vapor bajo su propia fuerza o agua caliente con bombas, hacia la línea principal de descarga a través de cabezales y a la carga. En calderas de vapor, la presión se controla por el control de operación que enciende o apaga el quemador, según la presión, dentro del rango de ajuste de operación de la caldera.
- El sistema de seguridad incorpora todos los dispositivos y consideraciones para garantizar la operación segura del equipo. Este incluye:
 - i. La válvula de seguridad y al operador que periódicamente la prueba.
 - ii. Al control de la falla de flama y al electricista que la checa.
 - iii. Al interlock y al mecánico que le da mantenimiento.

Es decir, la operación segura de la unidad no está garantizada por su diseño, o debe tomarse como concedida; el diente más importante de este engrane de seguridad es una vigilancia constante por una persona competente.

1.2 Vestido o Arreglos (TRIM) de la Caldera

Los accesorios ajustados o conectados al cuerpo de la Caldera se conocen como arreglo (trim).

Las partes del arreglo de la caldera son todos los elementos integrales y

conectados a la propia caldera, incluyendo:

- Características de diseño
- Todos los controles de seguridad, monitoreo y operación que la hacen una unidad completa.

Las partes de un arreglo mas comúnmente encontradas en los tipos de calderas son las siguientes:

- Válvulas de purga de fondo.- Se usan para drenar la caldera, para limpieza, inspección, reparación, controlar condiciones de alto nivel de agua y arrastres, bajar las concentraciones químicas y remover sedimentos y lodos
- Tablero de control de quemadores.- Contiene el interlock de seguridad de combustión y control de ciclos que provee operación segura del quemador.
- Regulador de agua de alimentación.- Abre y cierra la válvula de agua de alimentación o bien arranca o para la bomba de agua de alimentación mientras monitorea el nivel de agua en la caldera.
- Cristal de nivel.- Indica visualmente el nivel del agua en una caldera de vapor.
- Registro de mano.- Es una apertura de inspección en la cubierta de la Caldera que tiene dimensiones mínimas permisibles de 7 cm (2 ¾") x 9 cm (3 ½").
- Control de Límite Alto.- Es un dispositivo que se usa para apagar el quemador cuando se excede la presión de operación normal.

- Corte de Combustible por Bajo Nivel de Agua.- Corta el suministro de combustible al quemador cuando el nivel de agua en la Caldera cae por abajo del ajuste inferior en el regulador de agua de alimentación.
- Válvula Principal de Salida.- Es la primera válvula en la línea de descarga, localizada entre lo alto de la caldera y el cabezal, que se usa para aislar la unidad en una batería mientras se conservan las otras con presión.
- Registro de Hombre.- Es una apertura de inspección en la cubierta de la caldera, suficientemente grande para permitir que una persona de tamaño promedio entre a ella, con el propósito de limpieza, inspección o reparación, de dimensiones mínimas permisibles de 28 cm (11") x 38 cm (15") ó 25 cm (10") x 42 cm (16") en aperturas elípticas, y de 32 cm (15") de diámetro en aperturas circulares.
- Puerto de Observación.- Permite al operador observar la flama en el horno, para que pueda hacer ajustes al quemador.
- Válvulas de Sobrepresión.- Son válvulas que se usan para relevar la presión generada por la caldera cuando se excede la máxima presión permisible de trabajo o de diseño de la unidad. En servicio de vapor se conocen como válvulas de seguridad, y en servicio de agua caliente como válvulas de alivio.
- Manómetro.- Indica la presión dentro de la caldera en kg/cm².
- Termómetro de la Chimenea.- Indica la temperatura a la cual salen los gases de la unidad.
- Columna de Agua. Es un dispositivo con válvulas grifos de prueba que sirve como un medio secundario para checar el nivel de agua en una caldera de vapor. También actúa como un colchón amortiguador contra acciones turbulentas de la evaporación de agua en la unidad, de forma que el cristal de nivel provea una indicación verdadera del nivel de agua en la caldera.

1.3 Partes del Generador de Vapor

El generador de vapor está compuesto principalmente por las siguientes partes, algunas de las cuales se muestran en la Fig. I-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
- Muestras 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.

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

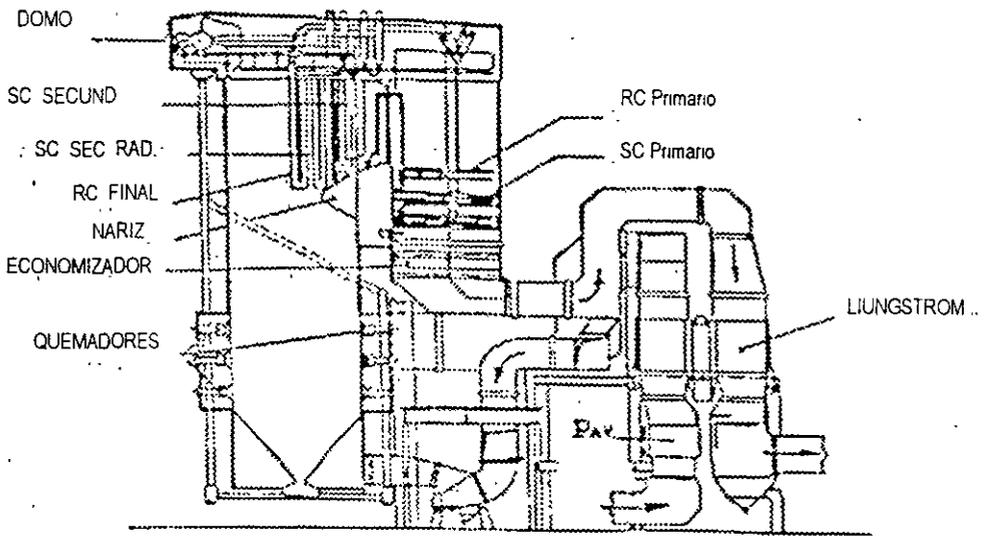


FIG. I-1.- COMPONENTES PRINCIPALES DE UN GENERADOR DE VAPOR

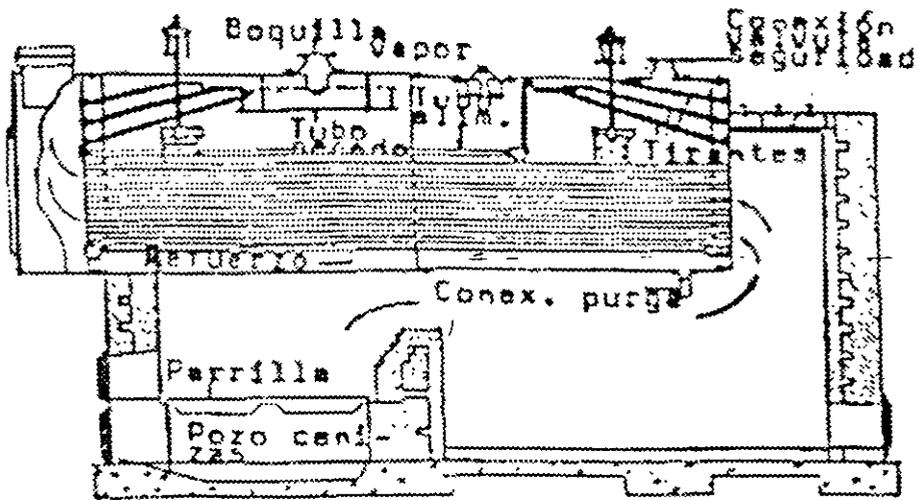


FIG. I-2.- SECCIÓN DE CALDERA DE RETORNO HORIZONTAL TUBULAR (HRT)

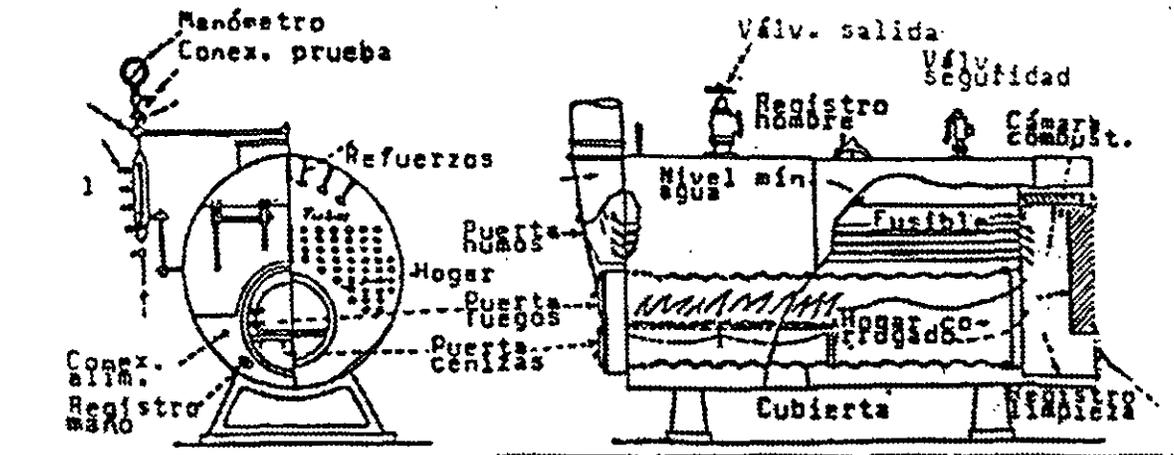


FIG. 1-3.- CALDERA ESCOCESA MARINA, DE FONDO SECO, DOS PASOS DE GASES Y HOGAR CORRUGADO

2. DESARROLLO Y CONFIGURACIONES

A fines del Siglo XVIII y como consecuencia del desarrollo de la fabricación de la máquina de vapor, apareció por primera vez la caldera de vapor realizada en la forma de un tambor calentado por el exterior, en donde se hervía el agua y el vapor se recogía en la parte superior y se conducía a la máquina de fuerza. En la Fig. 1-4, 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, el 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 consistentes 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 u horno, 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.

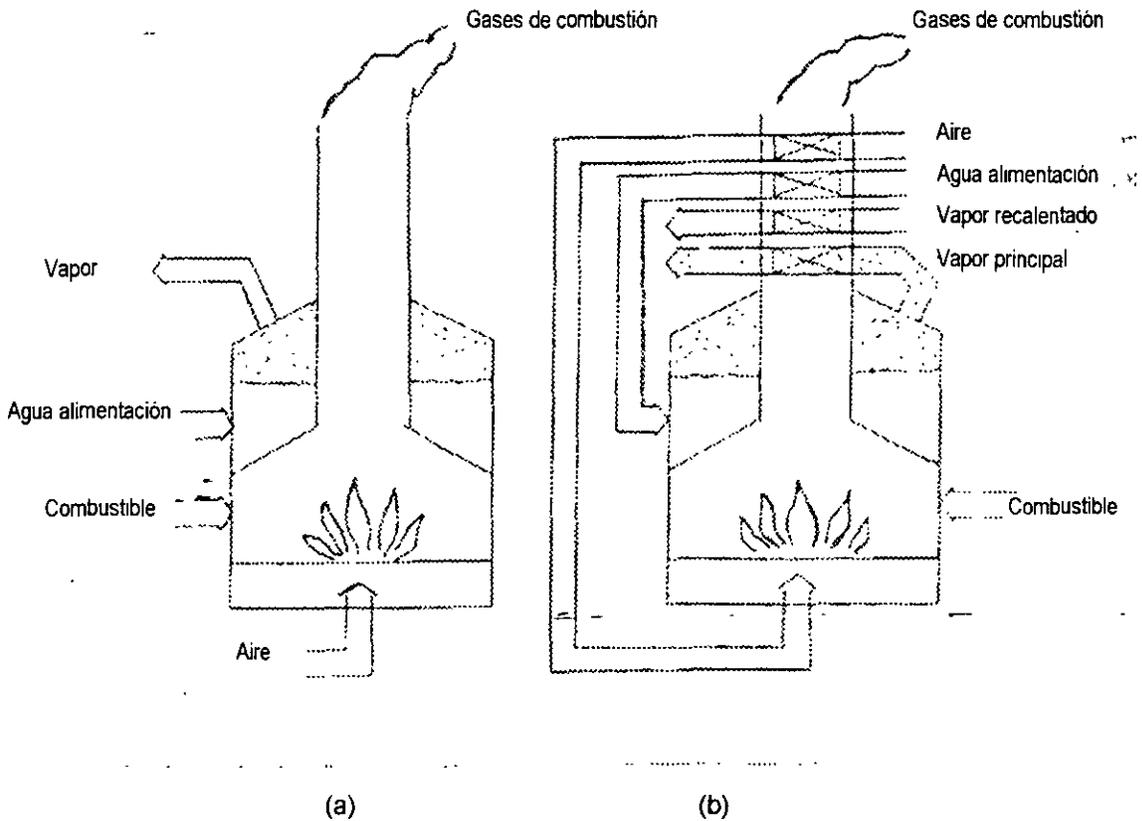


FIG. 1-4.- ESQUEMA DE LA EVOLUCIÓN DE LAS CALDERAS

3. TIPOS DE CALDERAS

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 termoelectricas que suministran vapor de presión elevada, normalmente con bastante sobrecalentamiento, y finalmente calderas para propósitos específicos como móviles, navales, de recuperación, etc.

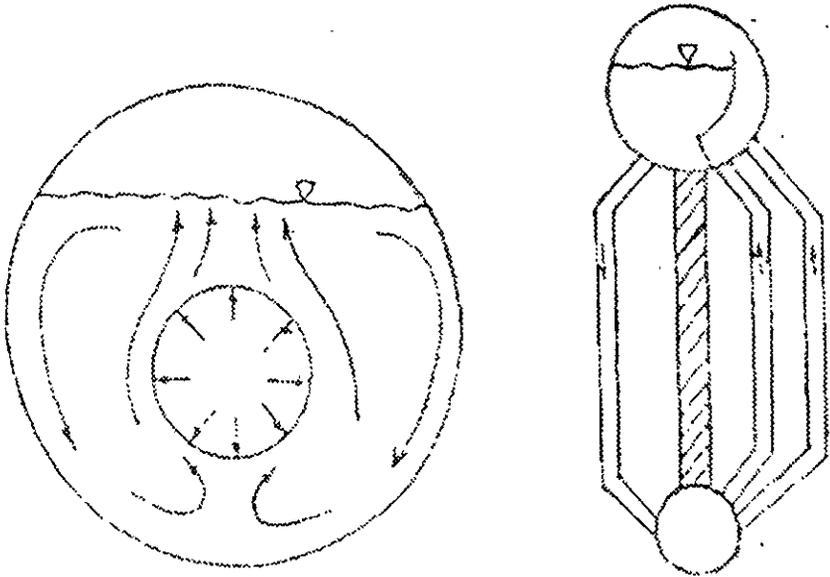
Desde el punto de vista constructivo, las calderas se pueden clasificar en dos grandes categorías.

Calderas con gran volumen de agua en que el agua está comprendida dentro de un tambor de dimensiones grandes cuyo interior está calentado en su superficie por los gases de combustión y calderas de pequeño volumen de agua en que el agua circula en el interior de un sistema de tubos que recogen el calor de los gases de combustión que circulan en

el exterior de los tubos, estando la zona de gases delimitada por muros de tubos o paredes de membrana.

Otro factor importante que determina la solución constructiva de calderas es el modo en que se asegura la circulación de agua y emulsión en el interior del sistema hervidor. Las calderas llamadas clásicas o de circulación natural se basan en la realización dentro de un circuito de diferentes presiones estáticas entre dos columnas con contenido diferente de vapor en emulsión. En otra categoría de calderas llamada de circulación forzada, la circulación del agua se asegura con una bomba especial colocada en el circuito de agua: si la bomba se coloca a la entrada del agua antes del 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 del agua en el proceso de calentamiento; en la Fig. 1-5, 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. I-5.- CIRCULACION NATURAL



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

CURSOS ABIERTOS

**CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN Y USO
EFICIENTE DE ENERGÍA EN CALDERAS**

TEMA :

COMBUSTIBLES

**ING. MARTINIANO AGUILAR RODRÍGUEZ
PALACIO DE MINERÍA
SEPTIEMBRE 1999**

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 ésta característica que se presentan en el transporte, manejo, almacenamiento y quemado del combustible.

1.1 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 9400 Kcal/m³ 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, además de monóxido de carbono, bióxido de carbono, nitrógeno y oxígeno; el gas de alumbrado que se obtiene como un subproducto en la fabricación de coque y el gas de gasógeno que se obtiene por la gasificación de combustibles sólidos. Un caso especial es el de los gases de petróleo licuados (GPL), que por su baja tensión de vapor a la temperatura ambiente, operando a presiones reducidas, pueden ser almacenados y transportados en estado líquido y utilizarse luego como combustibles gaseosos, distribuyéndose como propano o butano puros o bien, como mezclas.

Los componentes promedio de algunos gases combustibles son los siguientes:

a) Gas de gasógeno

de lignito:	H ₂	-	10 a 15%
	CH ₄	-	2 a 2.5%
	C ₂ H ₄	-	0.5%
	CO	-	22 a 30%
	N ₂	-	47 a 57%
	CO ₂	-	3 al 8.3%
	O ₂	-	0.2%
	PCI	-	1150 a 1600 kcal/m ³
de hulla:	H ₂	-	8 a 12%
	CH ₄	-	1.5 a 2%
	C ₂ H ₄	-	0.2%
	CO	-	24 a 28%
	N ₂	-	53 a 59%
	CO ₂	-	4 al 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 metano CH₄ (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:

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

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

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.

1.2 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:

El aceite combustible 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:

Gravedad específica

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

CARACTERÍSTICAS	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		38
Temp. min. de atomiz en °C	bajo cero	bajo cero	bajo cero		94
Residuo de carbón, en %	trazas	trazas	2.5		12.0
Agua y sedimentos, en % (max)	trazas	trazas	0.5		2.0
Ceniza, en %	trazas	trazas	bajo		0.08
Kcal/l	9140	9400	9740	9870	10 000

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

$$\text{PCS} = 7500 \text{ C} + 33830 \text{ H} + 2000 \text{ S},$$

en kcal/kg

$$\text{PCS} = 9878 + 30 \times \text{gravedad API},$$

en kcal/kg

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

en kcal/kg

En donde

$$\text{Grados Bé} = \text{grados Baumé} - 30$$

$$= \frac{140}{\text{gravedad específica } 15.6/15.6^\circ\text{C}} - 30$$

Normalmente en México el contenido de C del combustible 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 se utiliza el 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:

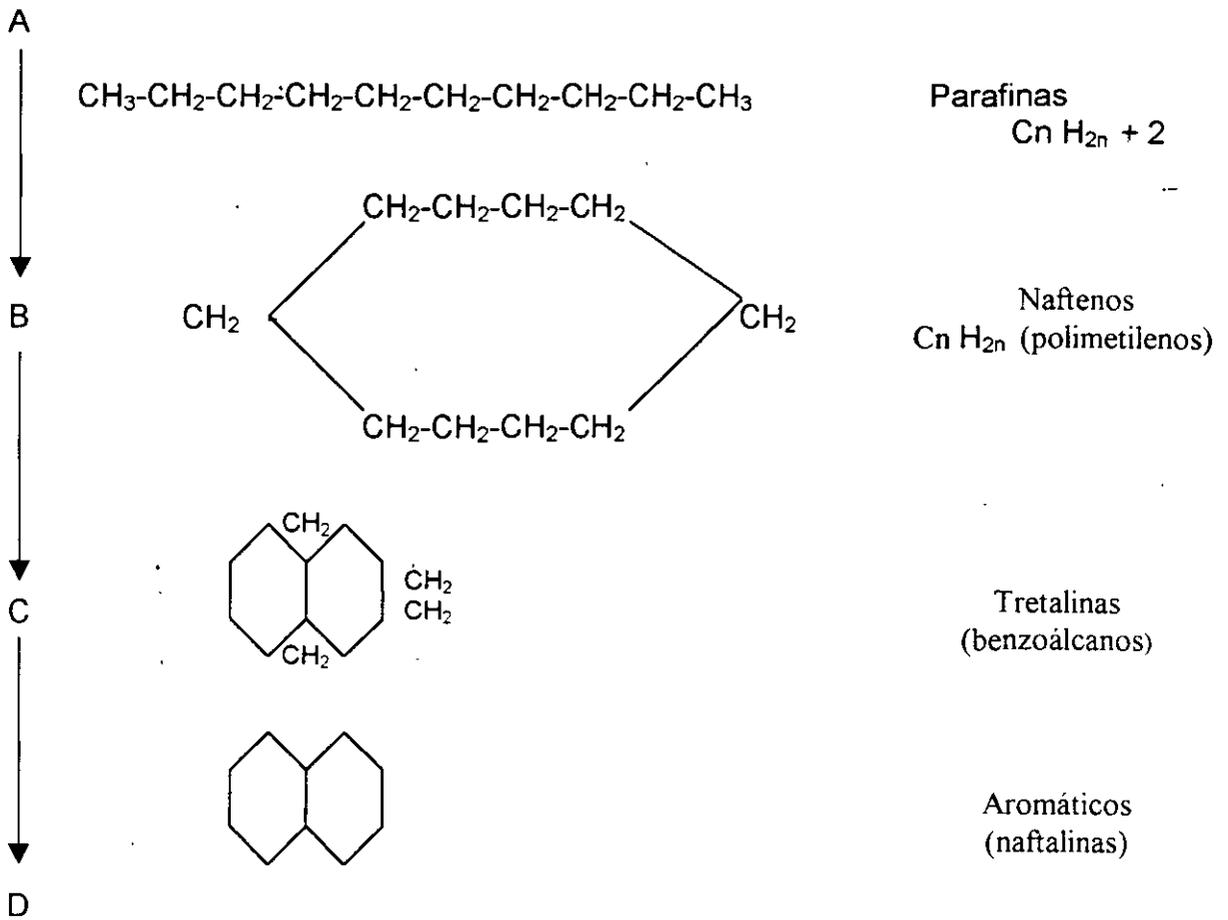
El petróleo crudo es una mezcla de hidrocarburos que contiene impurezas Azufre (de 1% a 5% según la fuente) y un número de compuestos metálicos inorgánicos (Vanadio, Niquel, Sodio).

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

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

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

A continuación se incluyen algunas características de los aceites combustibles.



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

Viscosidad.- La viscosidad de un líquido puede definirse por la resistencia que oponen sus moléculas a la fuerza que tiende a desplazarlas. Mide el frotamiento interno; decrece con el incremento de 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.

Algunas Unidades de Viscosidad utilizadas son las siguientes:

<u>FRANCIA</u>	<u>USA</u>	<u>INGLATERRA</u>
Centistoke ° Engler * 1/10 del precedente	° Saybolt universal ° Saybolt Furol (*)	° Redwood No. 1 ° Redwood almirante (*)

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 distingue:

- a) "Poder calorífico superior", en 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 sus componentes.
- b) "Poder calorífico inferior", en que el vapor de agua de la combustión forma parte de los humos y las calorías de condensación se estiman perdidas

La diferencia entre los dos poderes caloríficos, es del orden de 600 kcal/kg

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 Temperatura		
	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

Temperatura	Densidad	Coefficiente de Dilatación
		Cúbica
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.

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.

En la gráfica de la Fig. II-1, se muestran las curvas de viscosidades contra temperatura de varios combustóleos, incluyendo los puntos de viscosidad a 40°C de los Gasóleos Industriales de PEMEX F1 y F4.

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

1.3 Combustibles Sólidos

- lignito
- subbituminoso
- bituminoso
- antracita

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,

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

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

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

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

La antracita es un carbón muy duro de color negro lustroso y brillante, no coquizable y arde con llamas muy cortas y azules; el contenido de materia volátil es de menos de 8%.

La humedad de impregnación es la humedad de la superficie o que se le incorpora mecánicamente; la humedad higroscópica es la humedad original que depende de su naturaleza.

Debido a que el carbón en estado natural no tiene una composición uniforme, es necesario efectuar análisis específicos para determinar sus características y el efecto que tendrán sobre la combustión y las calderas.

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

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

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

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

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.

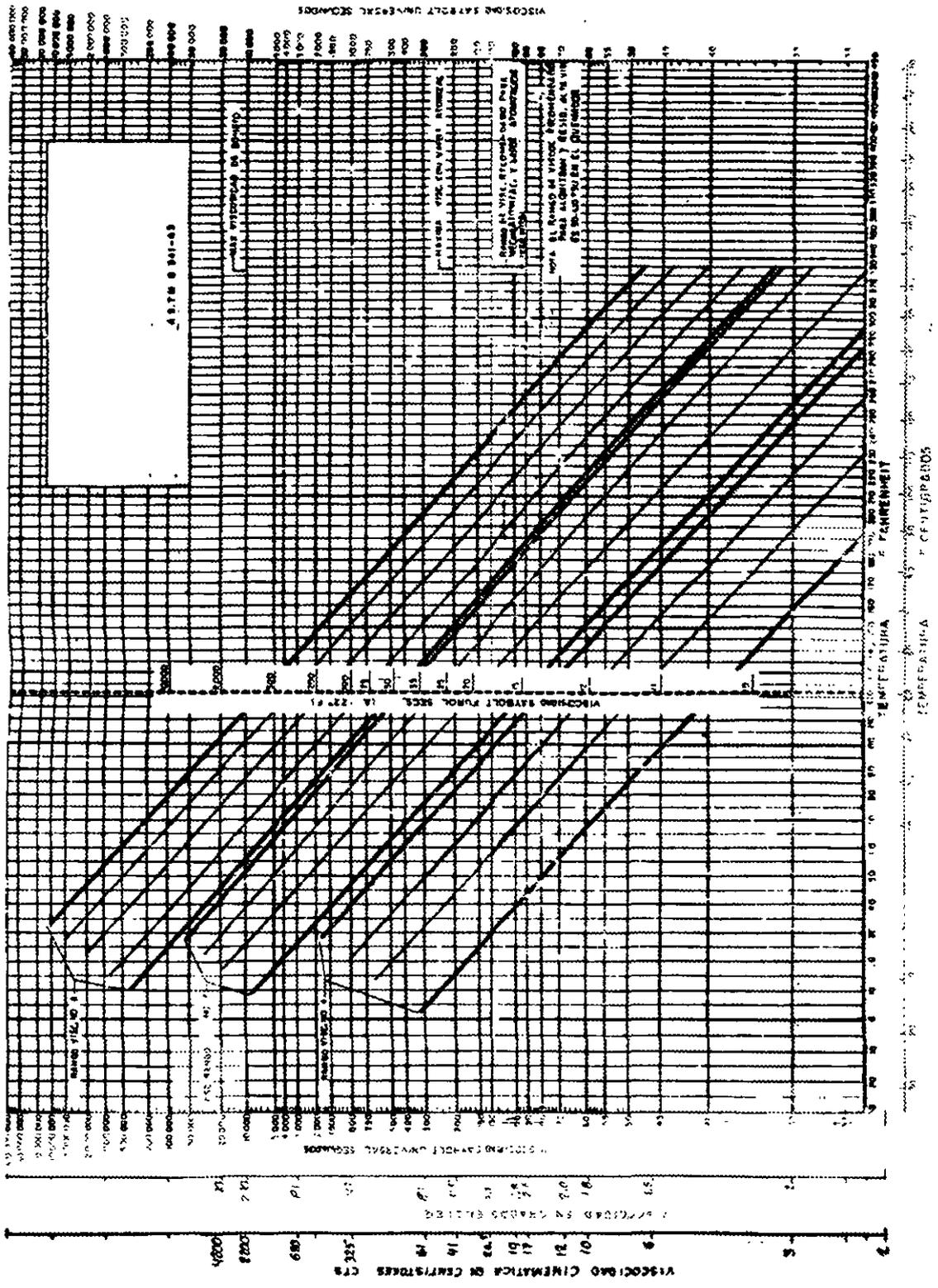


FIG. II-1.- VISCOSIDADES DE LOS ACEITES COMBUSTIBLES

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

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

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

2.1 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/cm^2 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/cm^2 hasta llegar a la caldera en donde nuevamente se reduce la presión a unos 0.5 kg/cm^2 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. En la Fig. II-2, se muestra un esquema de alimentación de gas combustible.

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 este abierta alguna de las válvulas macho a quemadores. Para el arranque, la válvula de paro general se bloquea con un relevador de tiempo enlazado con los ventiladores de aire de la caldera.

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

- Definir los modos de funcionamiento de los equipos que configuran el sistema de gas a quemadores y encendido.

- Establecer la secuencia de actividades y/o pasos necesarios para el arranque y paro del sistema.

Los permisos 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.

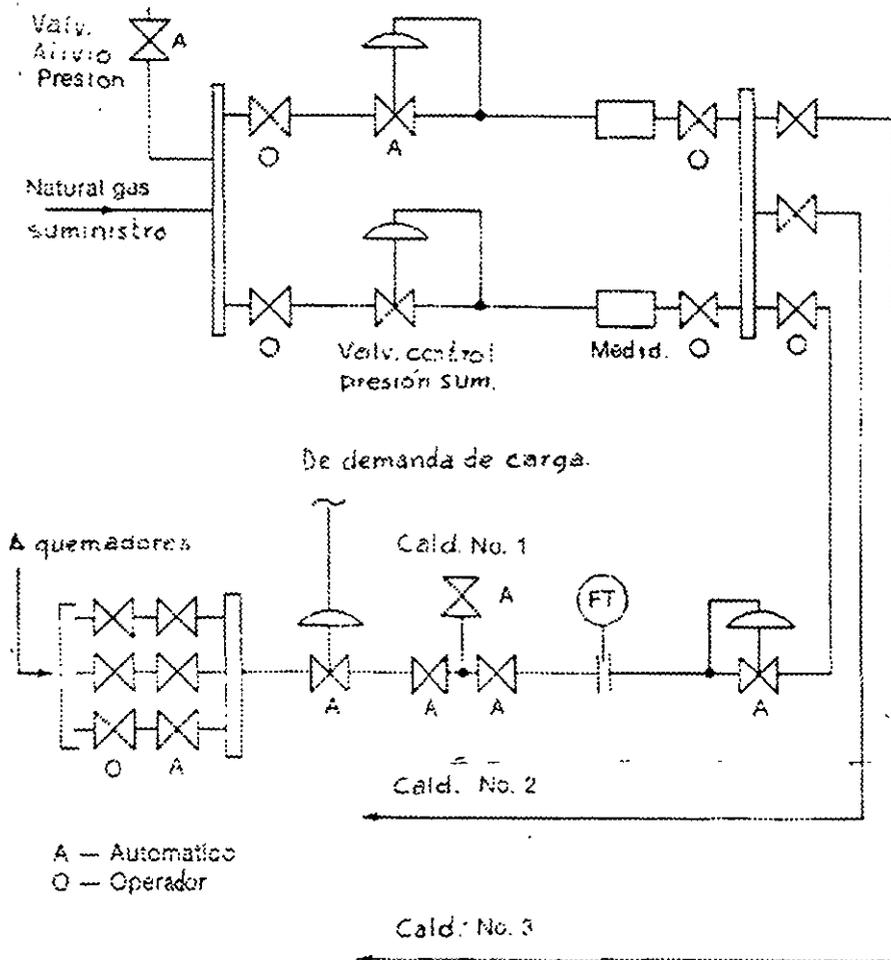


FIG. II-2.- ARREGLO DE REDUCCION DE PRESION Y MEDICION DE GAS COMBUSTIBLE

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 hace 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 siguientes:

- La presión del gas suministrado no deberá exceder de 12 kg/cm^2 , ni disminuir a menos de 6 kg/cm^2 , siendo la presión normal de funcionamiento de 9 kg/cm^2 .

- Las válvulas reductoras de presión en el cabezal de gas deberán 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.

El paro 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.

2.2 Sistema de combustible líquido

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; en zonas metropolitanas se utiliza el gasóleo. En la Fig. II-3 se muestra un esquema de alimentación de aceite combustible.

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 o 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 II-4, 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; la 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.

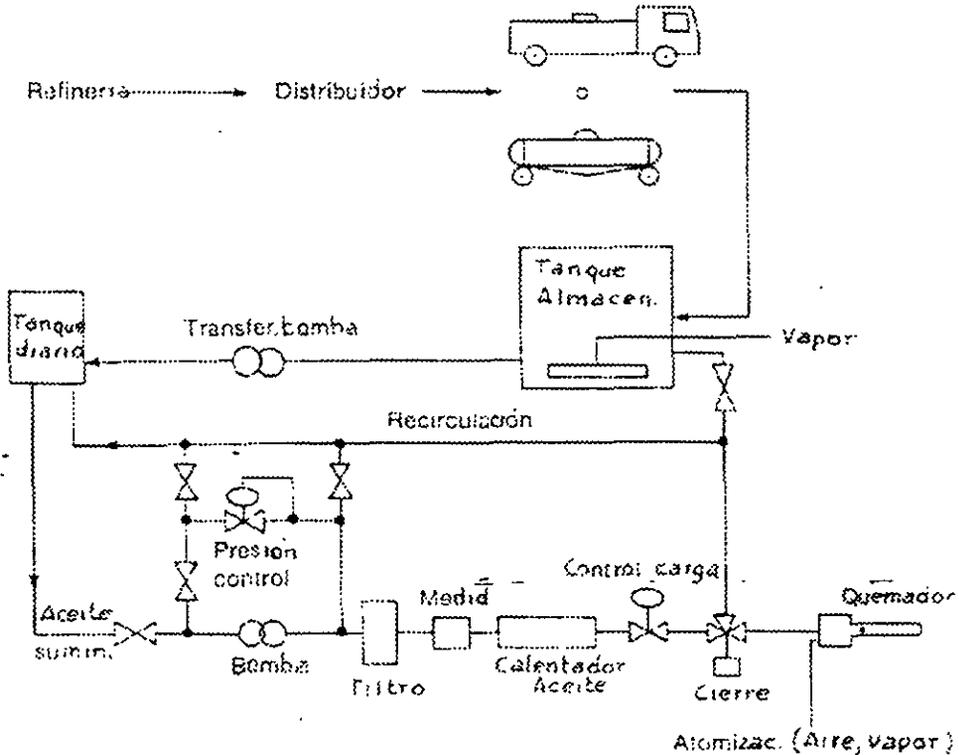


FIG. II-3.- ARREGLO TÍPICO DE BOMBEO Y CALENTAMIENTO DE ACEITE COMBUSTIBLE

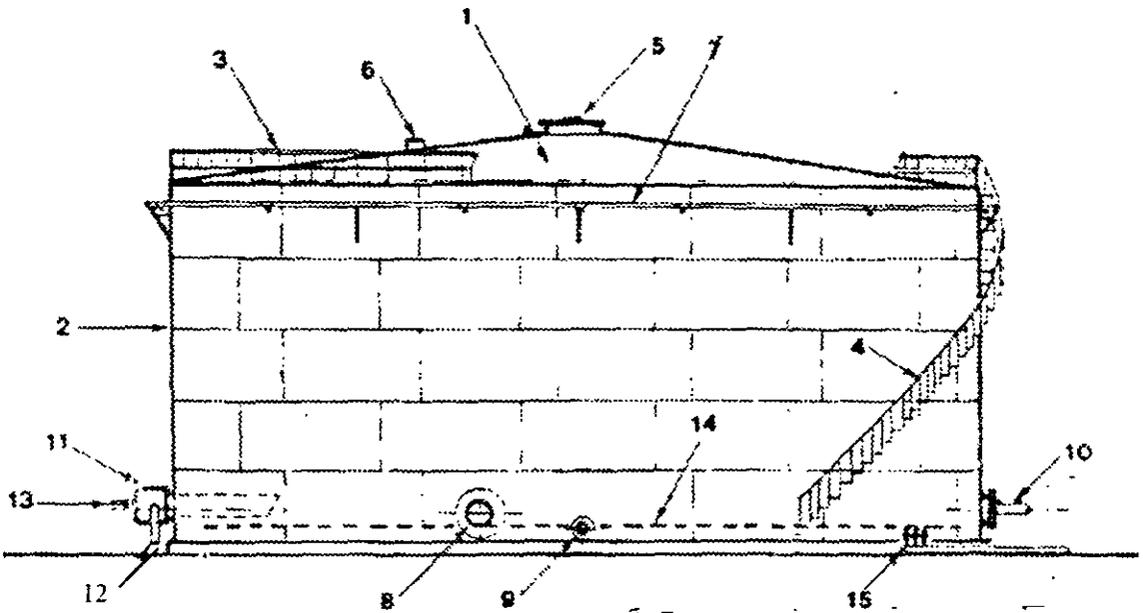
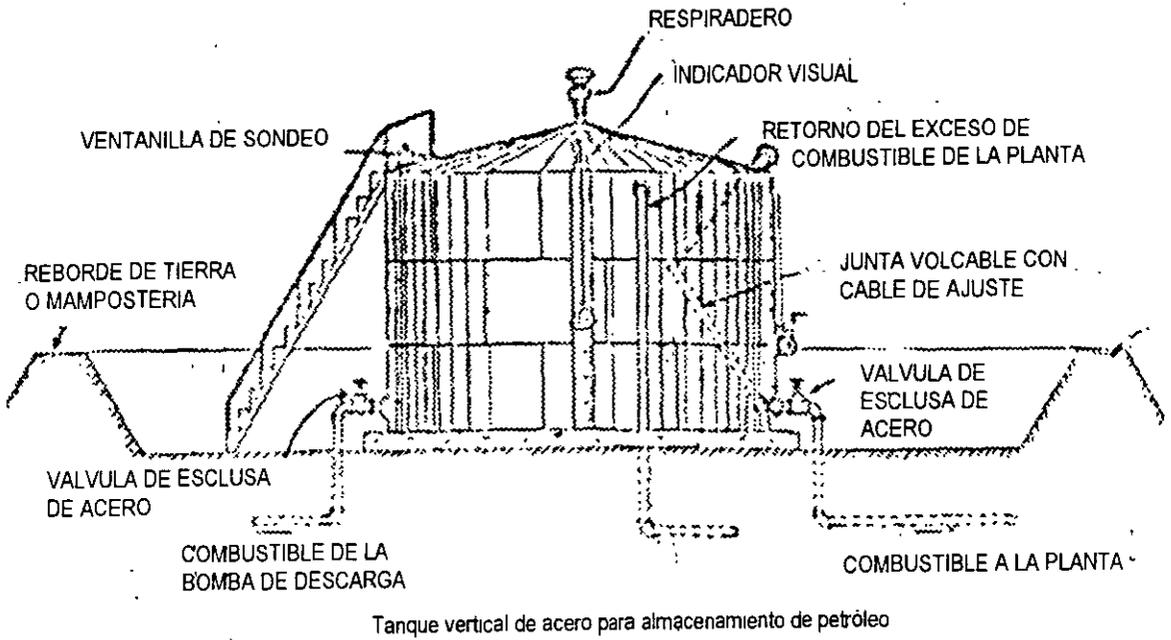


FIG. II-4.- TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLE

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 roscadas.
- 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.

Paro 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/cm^2 .
- 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 $120\text{-}135^\circ\text{C}$ en el cabezal.

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

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

- En caso necesario puede regularse la presión de descarga de las bombas de combustóleo mediante válvulas que recirculan parte del combustible bombeando 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 combustóleo puede ser la causa de:
 - Cavitación de las bombas
 - Coquización del combustóleo en el calentador (a temperaturas superiores a 145°C).
- Si al arrancar una bomba de combustóleo se observa que la presión de descarga permanece en valores bajos, deberá **DISPARARSE** la bomba y proceder a comprobar los puntos siguientes:
 - Alineación de las válvulas de succión de la bomba desde el tanque de día y comprobación de nivel del tanque.
 - Temperatura de combustóleo en la succión (un "TAPON" de combustóleo frío puede interrumpir el paso hacia la succión de las bombas).
 - Alineación de las válvulas de recirculación y by-pass de la controladora de presión.
 - 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 kg/cm^2 $^\circ\text{C}$ 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 combustible.

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 combustible a quemadores se montan adyacentes a las bombas; con excepción de las bombas centrífugas, 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

bombear 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 combustible a través de la misma pudiendo mantenerse el equipo en condiciones de temperatura de arranque.

2.3 Combustible sólido (carbón)

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 el diagrama de flujo de la Fig. II-5.

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 320 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.; 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.

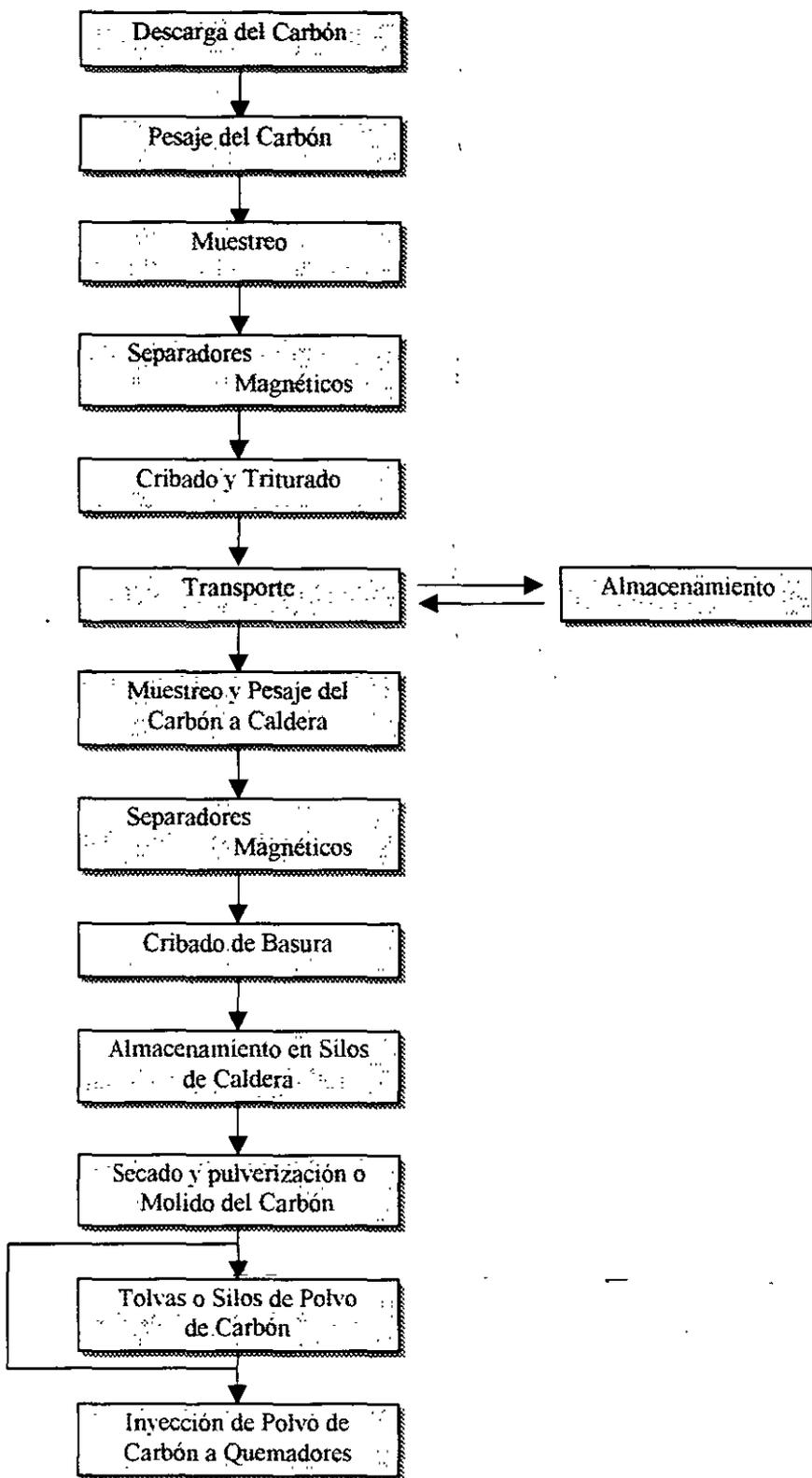
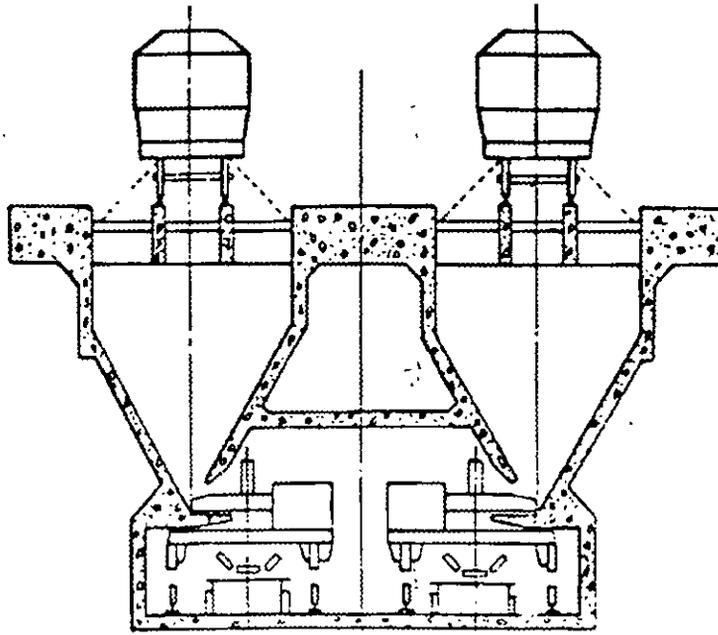
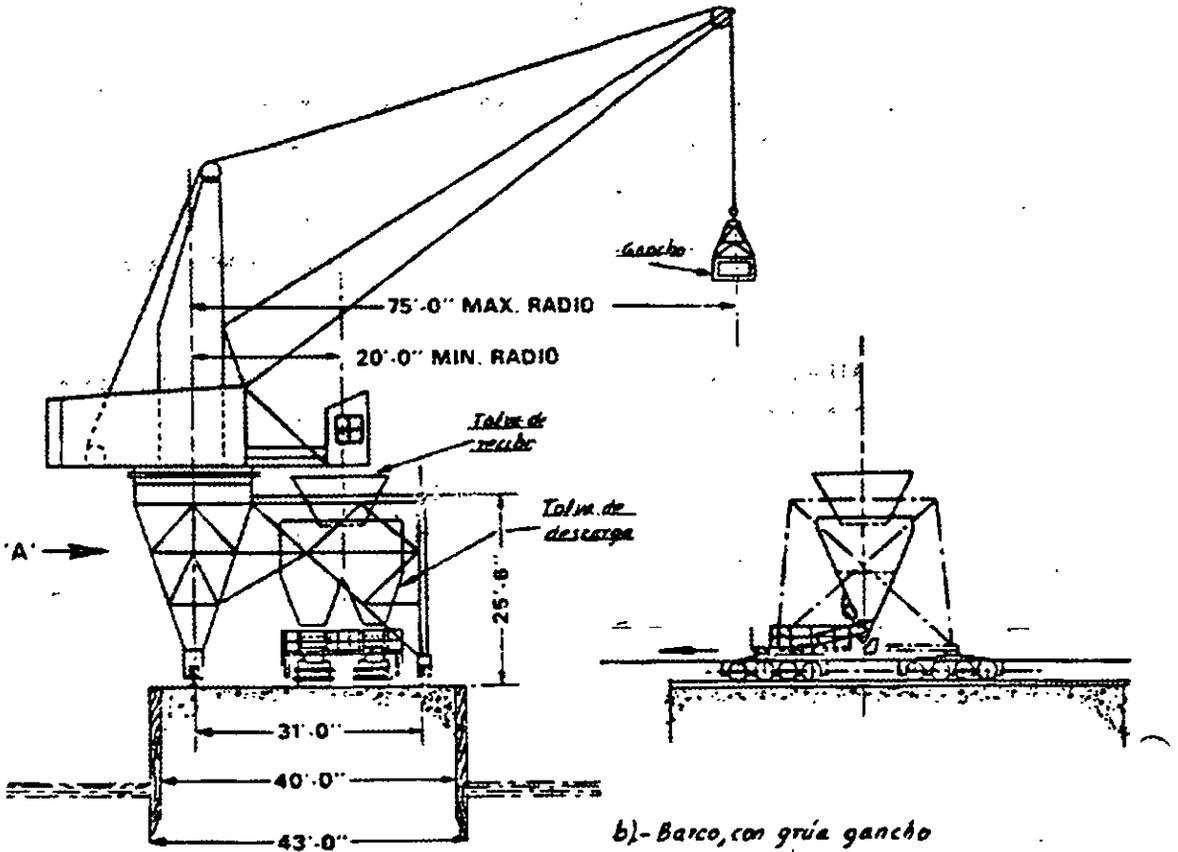


DIAGRAMA DE FLUJO

FIG. II-5.- ESQUEMA DE MANEJO Y PREPARACIÓN DEL CARBON

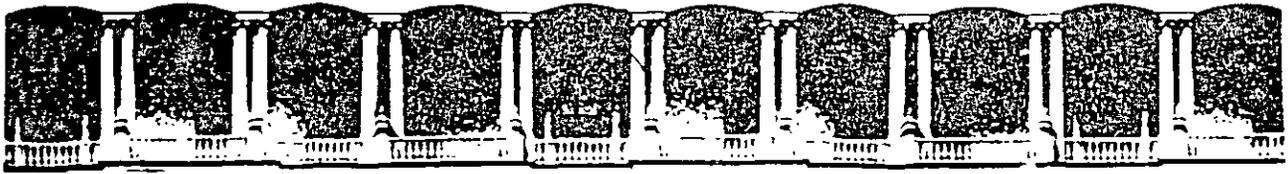


d) - Vagones de FFCC



b) - Barco, con grúa gancho

FIG. II-6.- METODOS DE DESCARGA DE CARBON



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

CURSOS ABIERTOS

**CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN Y USO
EFICIENTE DE ENERGÍA EN CALDERAS**

TEMA :

QUEMADORES Y HORNOS

**ING. MARTINIANO AGUILAR RODRÍGUEZ
PALACIO DE MINERÍA
SEPTIEMBRE 1999**

III. QUEMADORES Y HORNOS

1. QUEMADORES

1.1 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 finísimas 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.

1.2 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 de petróleo, 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 los combustibles sólidos. Los quemadores de gas se pueden regular fácilmente y su presión es más baja que el de los quemadores de combustibles líquidos.

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

muchos quemadores de gas presentan propiedades de dos categorías.

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

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

En la construcción de quemadores de grandes flujos se prevén dispositivos que crean condiciones para una combustión intensa. El movimiento axial de gran turbulencia necesario para la combustión intensa se puede obtener introduciendo el chorro de la mezcla en obstáculos no aerodinámicos que provocan turbulencia por aceleración brusca de la corriente y por turbulencia local creada en los espacios de los obstáculos. Los obstáculos pueden ser rejillas auxiliares cuyo efecto turbulento se determina siempre experimentalmente. El método que más se emplea para intensificar la combustión es el de la mezcla turbulenta del aire antes de la zona de combustión que, en forma general, asegura un movimiento helicoidal del

aire de combustión que siendo relativamente grande le da también movimiento helicoidal al combustible. La turbulencia se obtiene introduciendo el aire al quemador en una carcasa espiral o introduciendo en el tambor de aire una serie de paletas que eventualmente pueden ser con dirección regulable, que imprime al aire un movimiento circular.

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

En el caso de turbulencias muy fuertes puede aparecer una zona de depresión en el centro del quemador con circulación inversa del fluido (del hogar hacia el quemador); esta situación debe evitarse ya sea disminuyendo la turbulencia, o acelerando la salida del chorro con dispositivos auxiliares para aumentar la velocidad en el centro. El regreso de la flama hacia el quemador produce el apagado de la flama. En la Fig. III-1, se muestran los diferentes tipos de quemadores de gas combustible descritos.

1.3 Quemadores para combustible líquido

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 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.

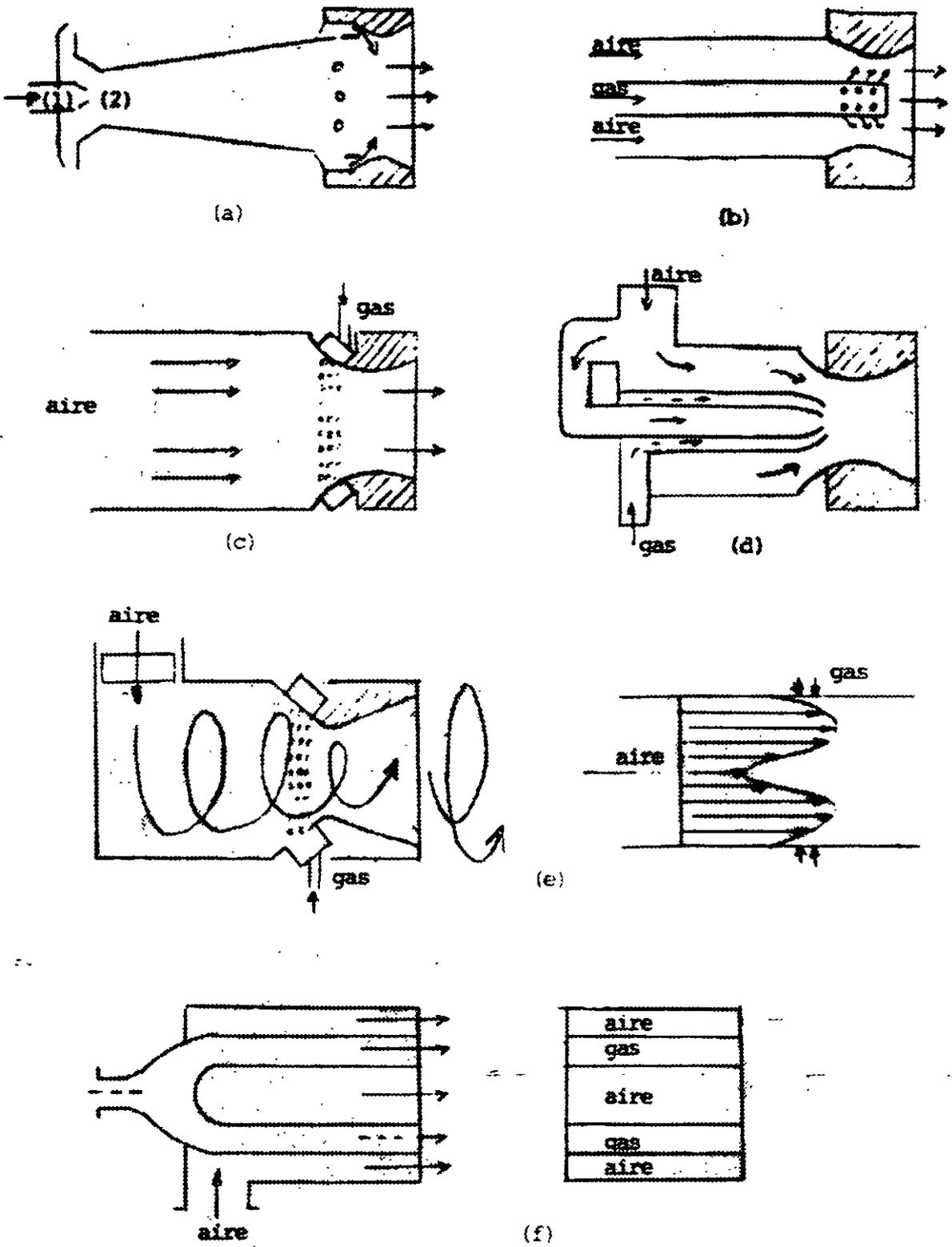


FIG. III-1.- ESQUEMAS DE DIFERENTES TIPOS DE QUEMADORES PARA GAS COMBUSTIBLE

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 ("craking") 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.

1.4 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

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)

2.1 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 y 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 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. III-2, 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 llama. Generalmente el modelo de quemador es el que determina la forma del horno y sólo en casos excepcionales es preciso que un

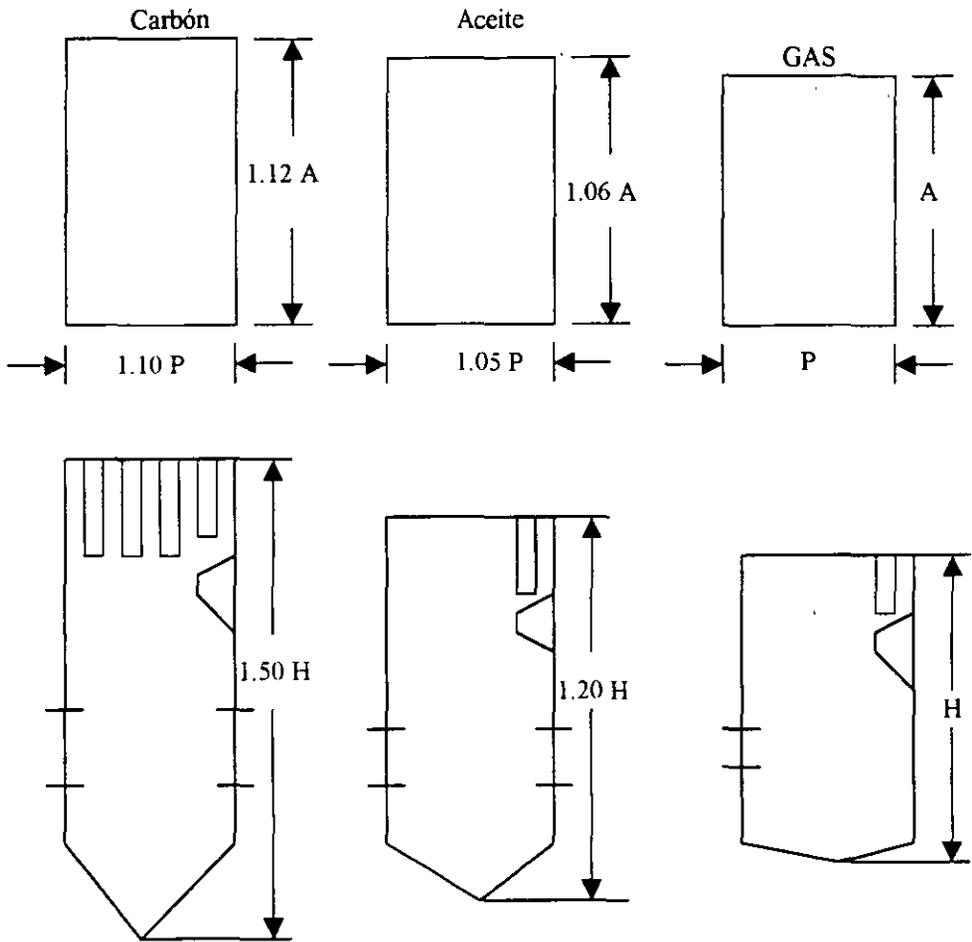
quemador se ajuste a las dimensiones de una cámara de combustión; esto no excluye que para las dimensiones de una llama determinada se pueda fabricar un horno con medidas diferentes.

Se entiende por rendimiento de una llama 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.

2.2 Regímenes de liberación de calor

El régimen de liberación de calor volumétrico en el hogar Cl_v de las calderas, en $Kcal/m^3h$, 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 ($Kcal/m^3h$)	Paredes metálicas enfriadas con agua ($Kcal/m^3h$)
carbón en parrillas	200 000	250 000
carbón pulverizado	150 000	200 000
aceite	200 000	300 000
gas	200 000	300 000



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

FIG. III-2.- TAMAÑOS RELATIVOS Y PARÁMETROS AIRE-COMBUSTIBLE DE HOGARES DE CALDERAS

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 Cls , 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:

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

Temperatura de salida de gases.

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

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

Rojo visible solamente en la 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
Bianco incandescente	1300°C
Bianco deslumbrante	1400°C

La Fig. III-3, se muestra la correlación de la temperatura de salida del hogar con la temperatura teórica de combustión, la transferencia de calor

en Kcal/m²h y el grado de ennegrecimiento del hogar.

2.3 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.

2.4 El quemado de combustibles líquidos 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 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, aumentó 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.

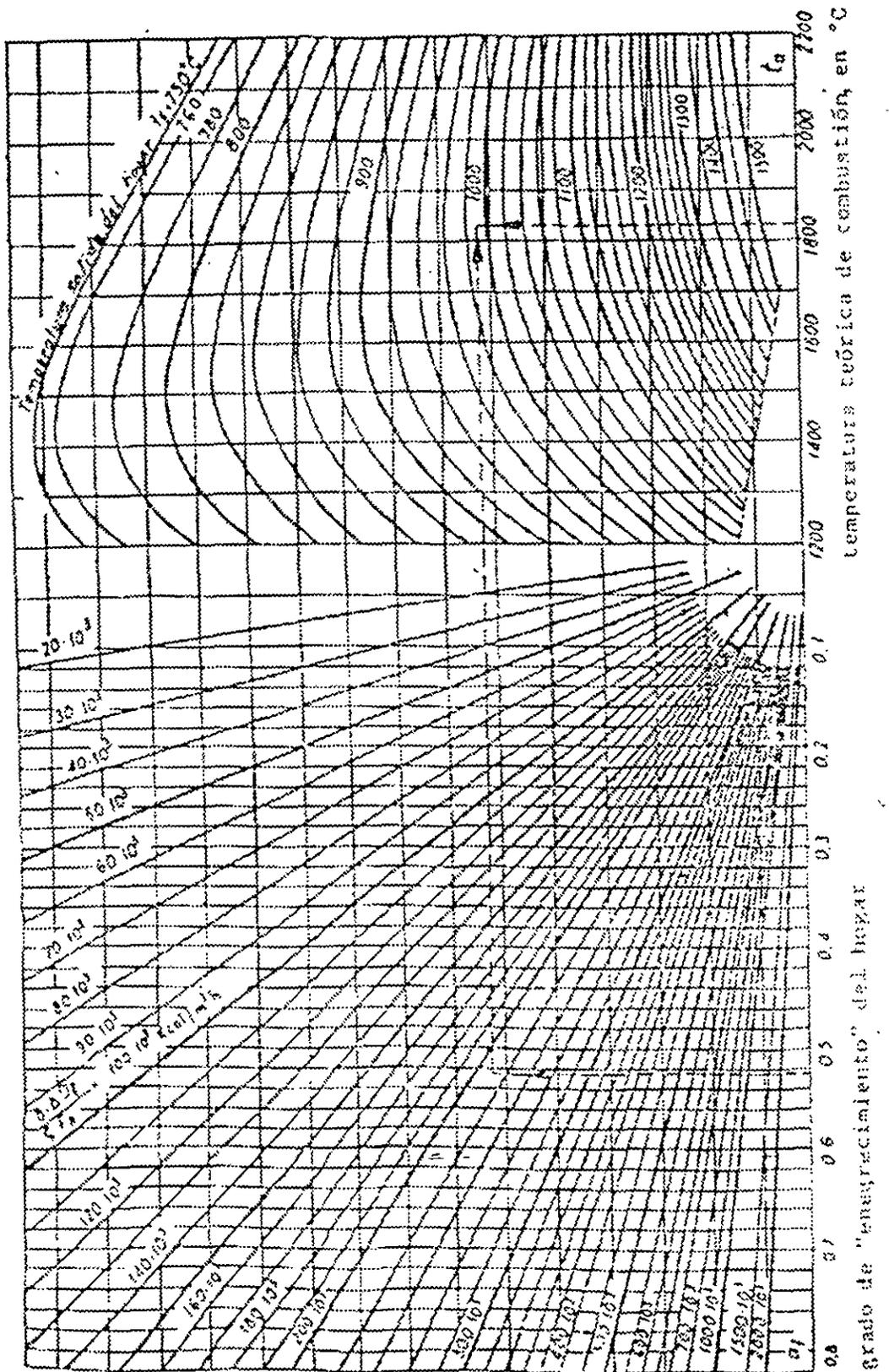


FIG. III-3.- CALCULO DE LA TRANSMISIÓN DE CALOR EN EL HOGAR

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 buena mezcla homogénea y la mezcla de aire-combustible se hace

en el recinto del hogar, el tiempo de mezcla va a ser mayor y aparece la posibilidad de precalentamiento del combustible a temperaturas altas sin estar en contacto con suficiente oxígeno para la combustión; en este caso se tiene una combustión difusa del carbono con coeficientes de radiación de flama mayor y en consecuencia la temperatura máxima se desplaza hacia el centro y final del hogar obteniéndose una temperatura a la salida del hogar disminuida, debido al aumento de cambio de calor por radiación.

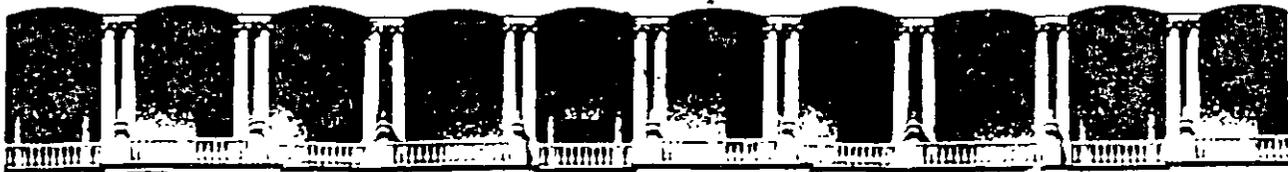
En el caso de una combustión con una mezcla demasiado homogénea de combustible-aire, el flujo radiante de la flama va a ser menor y va a variar mucho con la altura del hogar, pero en el caso de que la mezcla de aire y combustible se realice apenas en el hogar, el flujo térmico va a ser mayor y mucho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

La duración del proceso de combustión en el hogar con radiación intensa se encuentra en el proceso que necesita tiempos más largos y en consecuencia la longitud del hogar se dimensiona para el tiempo 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.

Los 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 LA CONTAMINACIÓN Y USO
EFICIENTE DE ENERGÍA EN CALDERAS**

TEMA :

LA COMBUSTIÓN

**ING. MARTINIANO AGUILAR RODRÍGUEZ
PALACIO DE MINERÍA
SEPTIEMBRE 1999**

IV. LA COMBUSTIÓN

1. CONCEPTOS GENERALES

1.1 El proceso de combustión.

El proceso de combustión es un fenómeno físico y químico en donde una sustancia llamada combustible se combina con el oxígeno (por lo general del 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, que es mucho más lento que el proceso de combustión; las velocidades de reacción de las flamas difusivas se determinan por la velocidad de difusión.

1.2 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, además del CO_2 a una cierta cantidad de óxido de carbono o gas carbónico (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. Como se verá posteriormente, es más conveniente el uso del O_2 en lugar del CO_2 .

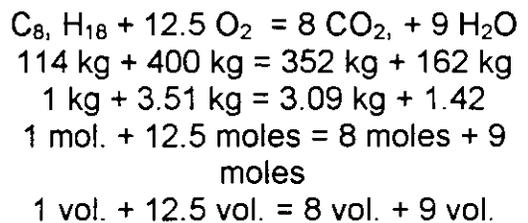
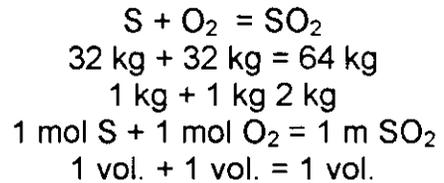
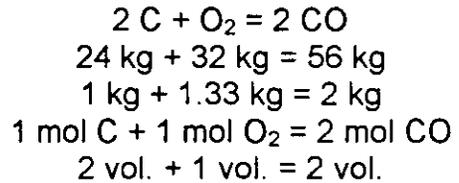
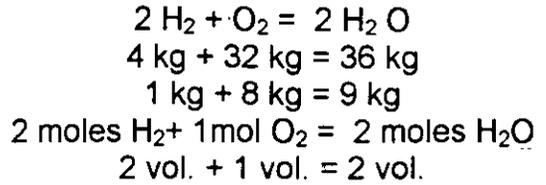
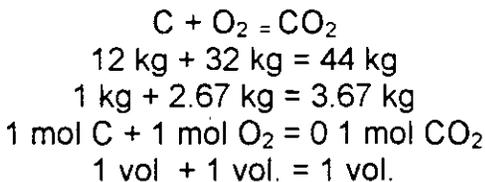
Si, por ejemplo, se emplea 1 m^3 de O_2 para la combustión de carbono, se obtiene como producto de la combustión 1 m^3 (m^3 normal) de CO_2 . Como el comburente suele estar constituido por aire (21 por 100 de O_2 y 79 por 100 de N_2) un combustible sin nitrógeno e hidrógeno, debería dar lugar a un gas 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 son 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 con fluidos 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, el 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 obligada a reaccionar por una fuente de calor externa, obteniéndose una onda de deflagración o frente de flama.
- Ondas de detonación directamente o por transición de una onda precedente de deflagración.

Factores Físicos de la Combustión.- En condiciones de flama estable a altas temperaturas y presiones arriba de la atmosférica, los aspectos físicos son los que

adquieren más importancia en el proceso de combustión.

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

Los combustibles gasóleos y diesel tienen temperaturas medias de ebullición elevadas y estabilidades térmicas reducidas, por lo que para quemarlos no se puede proceder mediante evaporación, requiriéndose para una buena combustión, realizar una subdivisión forzada de líquido para producir pequeñísimas gotas infinitesimales dispersas en el aire para formar una niebla muy uniforme (pseudo mezcla gaseosa), dentro de la cual puede provocarse la 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. IV-1, se muestra el tamaño de la subdivisión de gotas con la presión de atomización (pulverización) tanto para combustóleo como gasóleo.

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

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

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:

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

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

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

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

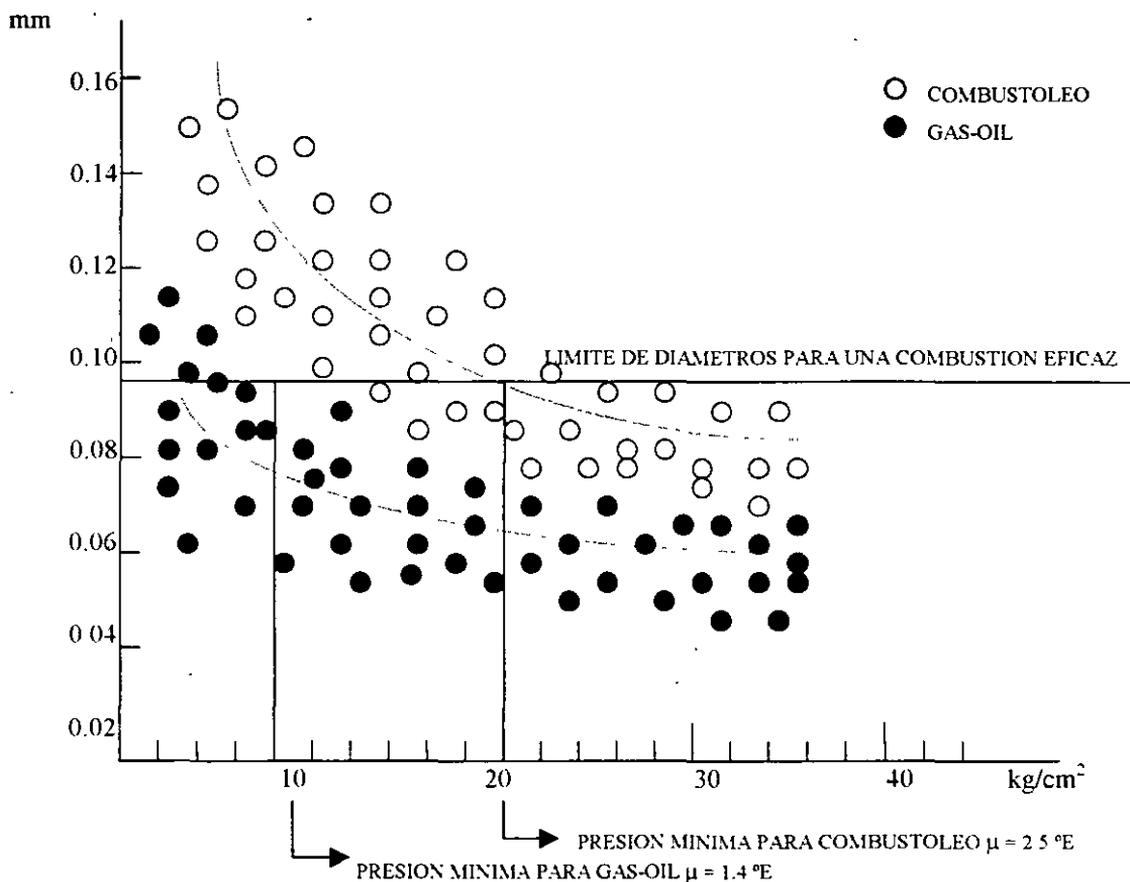


FIG. IV-1.- RELACION DE LOS DIAMETROS DE PULVERIZACION CON LA PRESION

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%

1.3 Flamas o llamas

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 llama.

La temperatura teórica de la flama puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

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

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°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.

En la gráfica de la Fig. IV-2, se muestra la variación de la temperatura de la flama para diferentes combustibles y excesos de aire.

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 líquidos que se encuentren vaporizados antes de alcanzar el frente de flama). Son flamas poco luminosas, de color azul.

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 1 cm³ 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 COMBUSTIÓN

2.1 General

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

- CO_2
- O_2
- N_2
- H_2O (en forma de vapor)

En los combustibles que contienen azufre (S), se tienen además SO_2 y SO_3 .

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 G_1 se puede obtener de la Tabla IV-1 de valores 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 $26.48 \left(H - \frac{O}{8} \right)$ o 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.

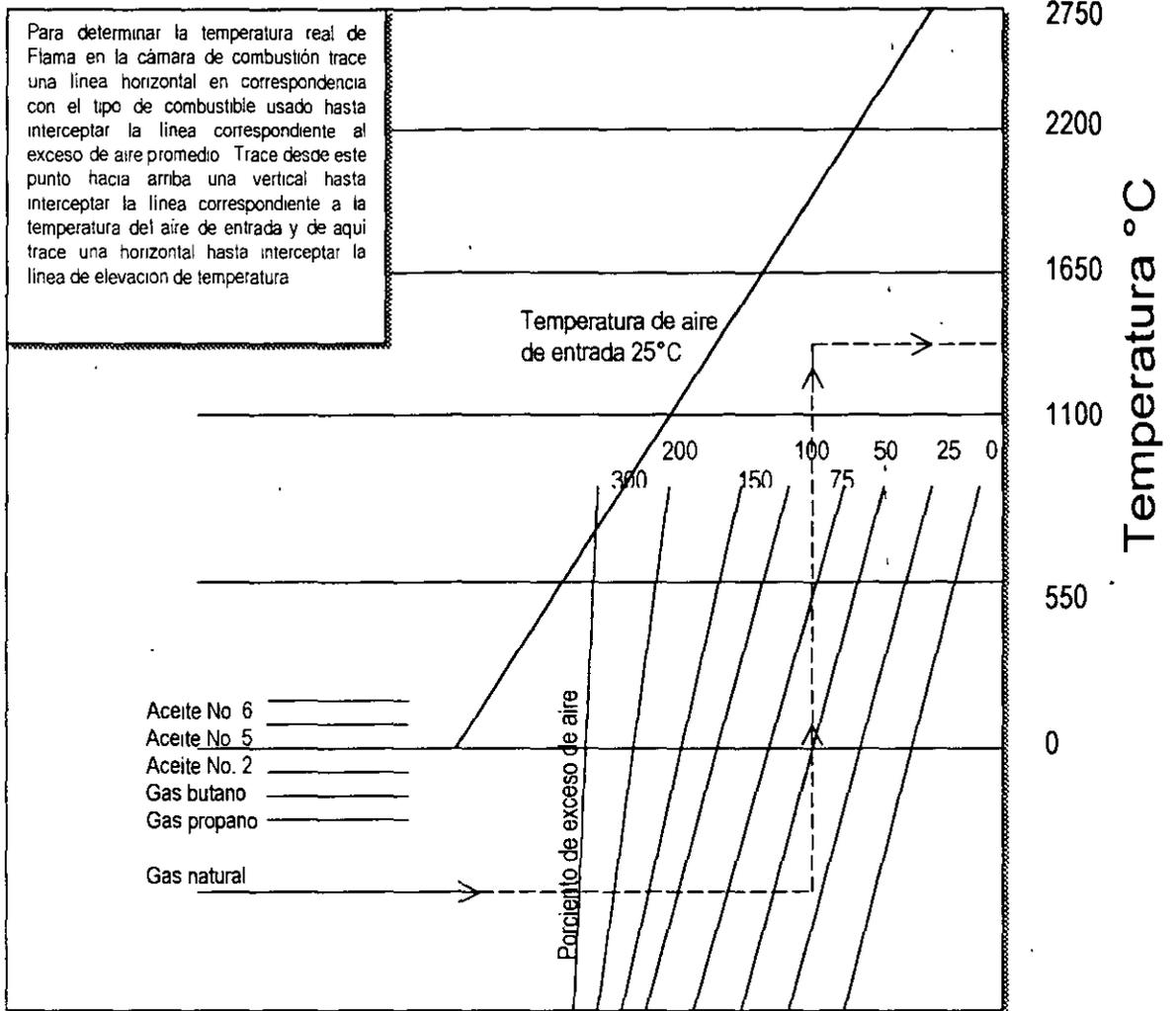


FIG. IV-2.- VARIACIONES DE TEMPERATURA DE FLAMA CON EL EXCESO DE AIRE

TABLA IV-1.- VALORES DE COMBUSTIÓN

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	21.10	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	2.25	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

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

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

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

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

La cantidad total de gases teóricos G_3 , será:

$$G_3 = G_2 + G_1$$

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

8

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

8

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

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

Y la cantidad real de gases G_r , será:

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

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

$$p = 1.34$$

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

c_p referido a 1 kg de gases

C_p 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 IV-2, se muestran los valores 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 C_p o c_p 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 Gm^3 o Gkg de gases de la temperatura t a t' , la cantidad de calor Q extraída de los gases es:

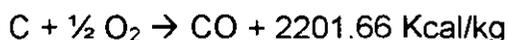
$$Q = G C_p (t - t'), \text{ en Kcal}$$

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

Siendo c_p y C_p los valores específicos promedios entre t y t' .

2.2 Productos de Combustión del carbono

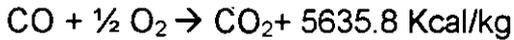
En las primeras etapas de la combustión y como resultado de la combustión incompleta del carbono del combustible se forma monóxido de carbono según la reacción:



Densidad P, en kg/cm ³	1,257	1,429	1,293	1,977	0.804
Gas	N ₂	O ₂	Aire	CO ₂	H ₂ O
t en °C					
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 IV-2.- CALORES ESPECÍFICOS MEDIOS DE GASES, AIRE Y VAPOR DE AGUA EN KCAL/M³ (A PRESION CTE)

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 ppm 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

hollín (soot), constituido predominantemente por carbón y con un tamaño inferior a 5 micras, y las cenósferas, de tamaño de 10 y 100 micras, formadas por una matriz carbonosa que incluyen óxidos y sulfatos provenientes principalmente de los metales presentes en el combustible.

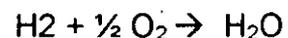
La concentración de partículas carbonosas, así como su contenido de carbón y su morfología, están ligados a varios factores: cantidad de compuestos asfálticos y polararomáticos del combustible, diámetro medio de las gotas producidas por los atomizadores, exceso de aire de combustión y tiempo de residencia 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 utilizado.

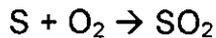
2.3 Productos de Combustión del Hidrógeno.

La combustión de hidrógeno forma agua siguiendo la reacción:

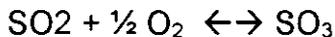


2.4 Productos de Combustión del Azufre

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 (SO_3) siguiendo diversos mecanismos de reacción. La reacción es en realidad un equilibrio representado por:



El SO_3 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 SO_2 en SO_3 , 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.

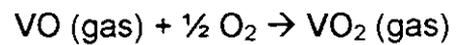
2.5 Productos de Combustión del Nitrógeno

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 $1500^\circ C$,

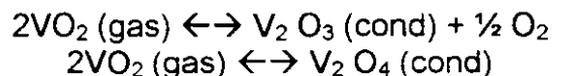
formando diversos óxidos (NO_x) que se incorporan a los productos de combustión. La formación de estos productos, depende del combustible utilizado, de la reacción aire/combustible y de las condiciones en que se realice la combustión.

2.6 Productos Provenientes del Vanadio

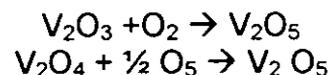
Los productos iniciales en que se transforma el vanadio durante el proceso de combustión son probablemente VO y VO_2 (monóxido y dióxido de vanadio respectivamente). La proporción relativa de los mismos queda determinada por la temperatura y la concentración de oxígeno en los gases.



Como estos óxidos tienen una presión de vapor muy baja aparecen en la flama como partículas sólidas o semisólidas de V_2O_3 y V_2O_4 (trióxido y tetraóxido de vanadio respectivamente) debido a las reacciones:



A medida que los gases se van enfriando, las partículas de V_2O_3 y V_2O_4 pueden absorber oxígeno transformándose en V_2O_5 (pentóxido de vanadio, con P.F. $687^\circ C$), siguiendo las siguientes reacciones:



Por su gran agresividad química y su bajo punto de fusión, el V_2O_5 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 V_2O_5 . El modo más simple de hacerlo es reduciendo el exceso de aire de combustión para que los óxidos inferiores de vanadio (V_2O_3 y V_2O_4) no dispongan de oxígeno para oxidarse a V_2O_5 .

3. ENERGÍA O CALOR DE COMBUSTIÓN

3.1 General

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 Kcal/m^3

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

Aceite combustible: $PCS = 7,500 C + 33,830 H + 2,000 S, \text{ Kcal/kg}$

Carbón: $PCS = 8,111 C + 34,444 (H - O) + 2,205 S, \text{ Kcal/kg}$

8

Temperatura de Rocío.- La temperatura de rocío de los gases de combustión, es decir, la temperatura de condensación del H_2O en los gases no debe alcanzarse y trabajarse por debajo de ella, debido a que las superficies de cambio de calor se humedecen con lo que se vuelven susceptibles a ataques de corrosión. La temperatura de rocío varía 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 SO_2 (Anhídrido Sulfuroso) que a temperaturas inferiores a 700°C para un exceso de aire dado produce SO_3 Anhídrido Sulfúrico. A temperaturas inferiores a 500°C el SO_3 por reacción en el vapor de agua de los gases de escape, se transforma en H_2SO_4 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 Maya de México que tiene hasta un 5% de S.

3.2 Diagrama de Calor Total-Temperatura (Q-t) Fig. IV-3

El diagrama de calor total-temperatura (Q-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 m^3 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 1 m³ de gases de combustión contiene $8080/8.887 = 909$ 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 del H₂, es decir 28570 Kcal y en consecuencia, 1 m³ de gases de combustión contiene $28570/32.29 = 885$ kcal.

La diferencia en el calor de los gases es de $\pm 1.33\%$ en promedio. En la misma forma el calor específico de los dos gases de combustión tiene poca diferencia.

En la parte vertical del diagrama de la Fig. IV-3, 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.

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 de productos sin quemar 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. IV-4, de la conformación 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.

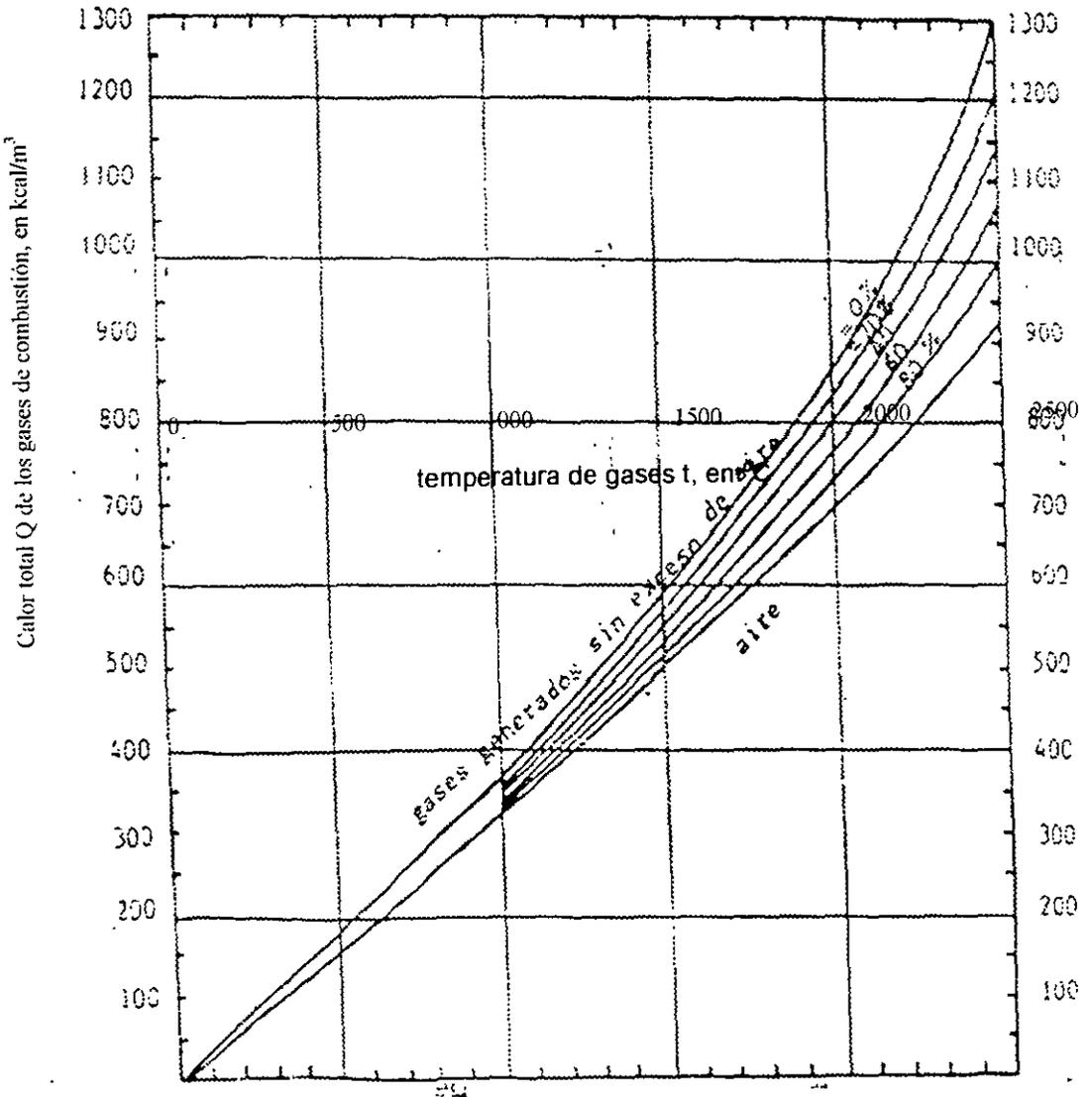


FIG. IV-3.- DIAGRAMA CALOR TOTAL-TEMPERATURA (t) DE GASES DE COMBUSTIÓN

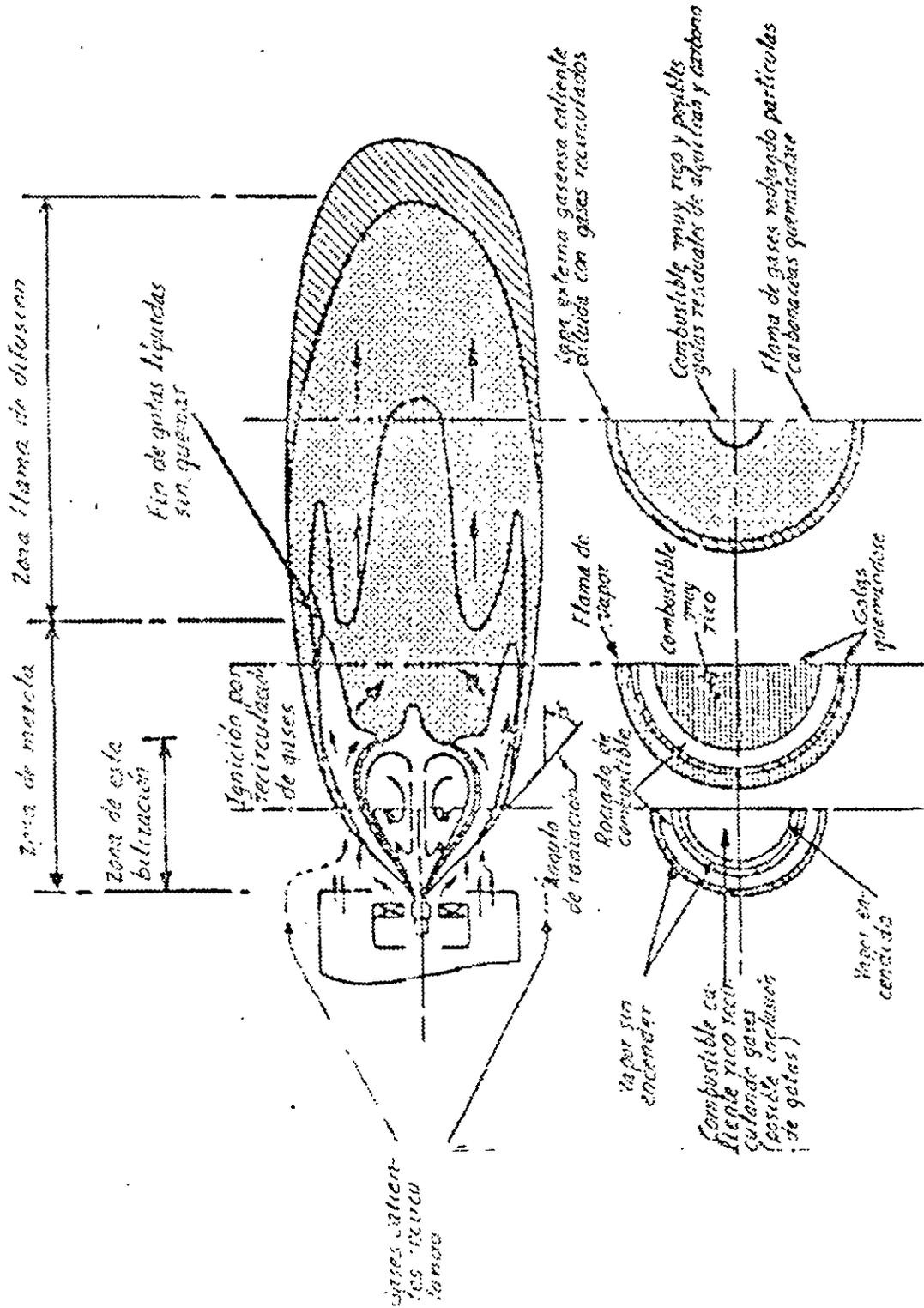


FIG. IV-4.- COMPOSICIÓN ESPECULATIVA DE LAS FLAMAS DE ACEITES COMBUSTIBLES

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

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 modo que se observa en la Fig. IV-5.

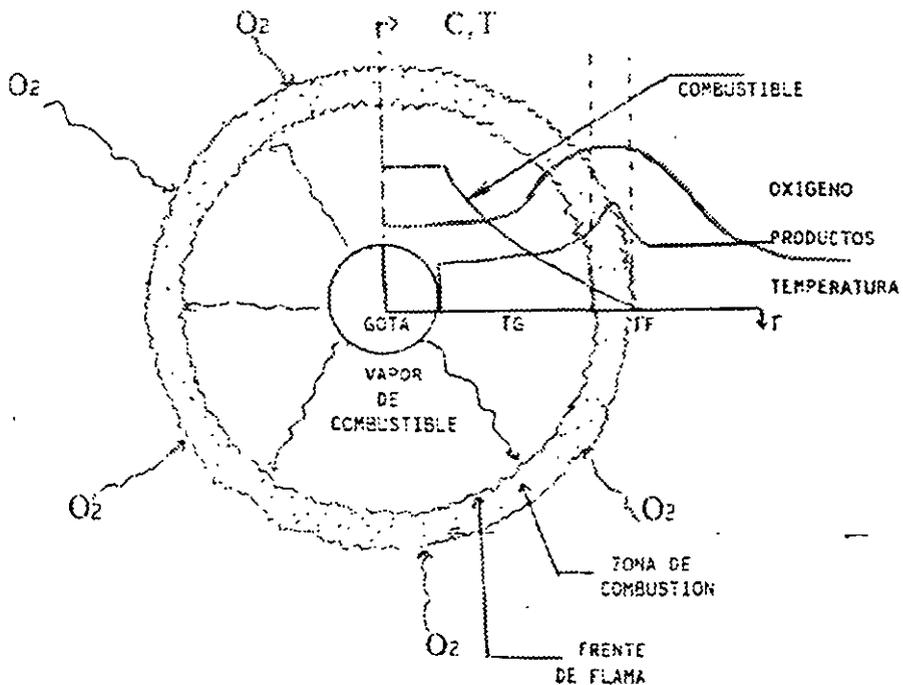


FIG. IV-5.- ESQUEMA DE COMBUSTIÓN DE UNA GOTA DE ACEITE COMBUSTIBLE

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 Fig. IV-6, 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 Kd^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 si 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 que 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 se debe a que ocurren varias reacciones endotérmicas complejas que resultan en un craqueo químico de las moléculas grandes que están en la gota. El tramo final de la combustión de gotas no ocurre en fase vapor sino como combustión superficial del residuo carbonoso.

Durante esta fase final el carbón puede romperse formando partículas más pequeñas, las cuales finalmente se queman transformándose en cenizas. Esta etapa final de la combustión generalmente requiere entre el 30% y el 40% del tiempo total de quemado de la gota.

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

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 despedidos fluyen dentro de la estela turbulenta detrás de la gota hasta alcanzar una mezcla de aire y vapor capaz de quemarse, y entonces si la temperatura en la estela es suficientemente alta para ello ocurre la ignición.

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 que los gases

que la rodean están por abajo de la temperatura de ignición correspondiente al vapor de combustible que se está produciendo. Por lo tanto, las flamas con mala calidad de atomización tienden a tener menor cantidad de gotas pequeñas recirculando cerca de la ficha de atomización y son muy difíciles de encender.

Existe otro problema que posteriormente complica los problema de combustión de gotas grandes en combustión de estela. Los productos de combustión al expandirse tienden

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

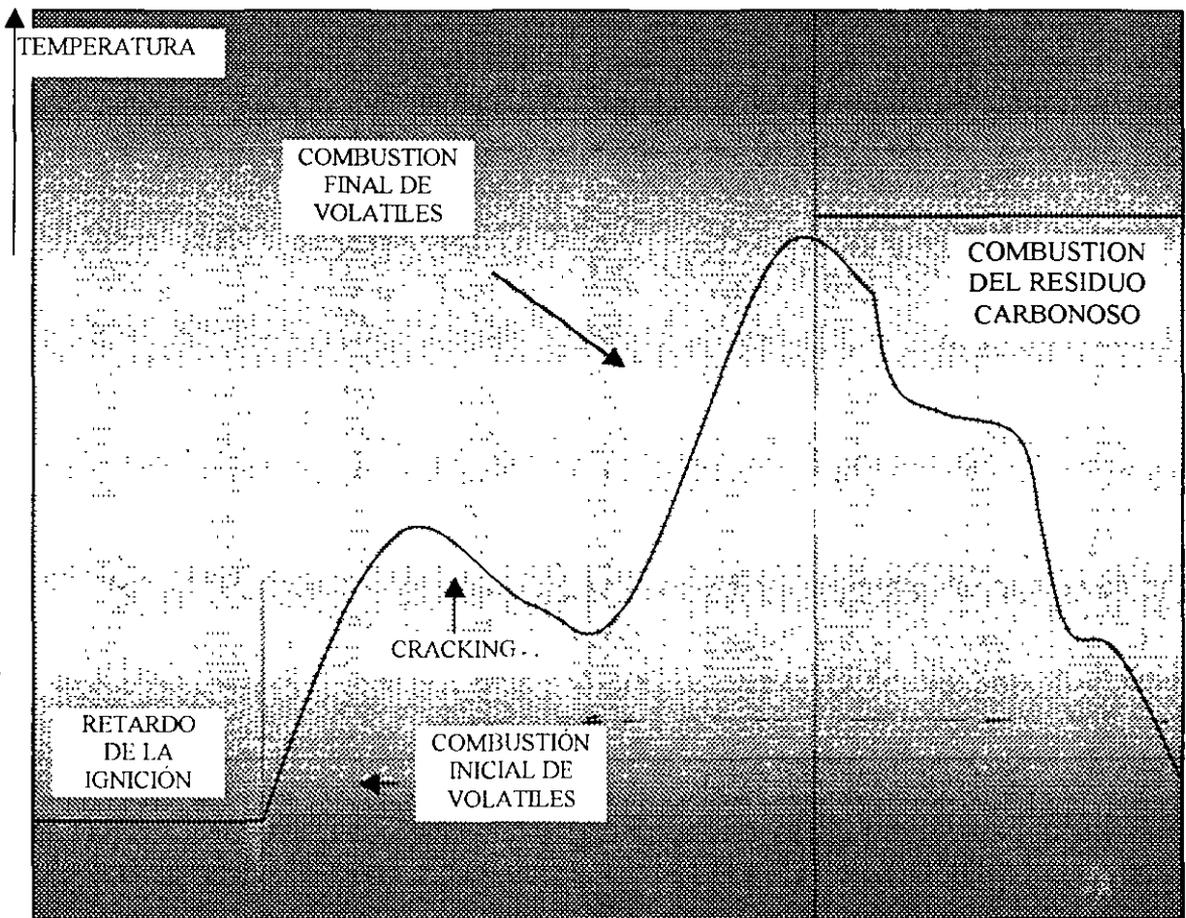


FIG. IV-6.- VARIACIÓN TÍPICA DE LA TEMPERATURA DE UNA GOTAS CON EL TIEMPO DE RESIDENCIA EN EL HOGAR

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 el punto de vista físico, el proceso de combustión del combustóleo puede representarse mediante el esquema de la Fig. IV-7.

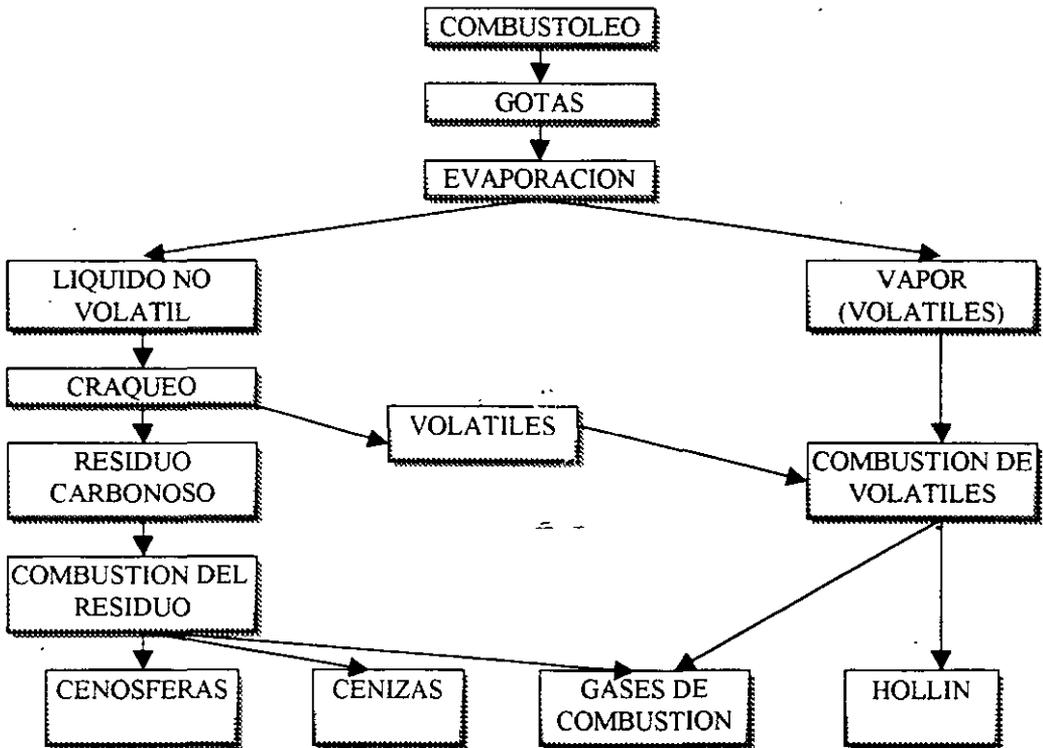


FIG. IV-7.- PROCESO FÍSICO DE COMBUSTIÓN DEL COMBUSTOLEO

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 que 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 enciende más rápido. La combustión es esencialmente la del vapor de combustible.

El fenómeno de la combustión de las gotitas de aceite puede esquematizarse como se muestra en la Fig. IV-8.

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 cenósferas, cenizas y gases de combustión (las cenósferas se forman a partir del residuo carbonoso, por la combustión incompleta del mismo).

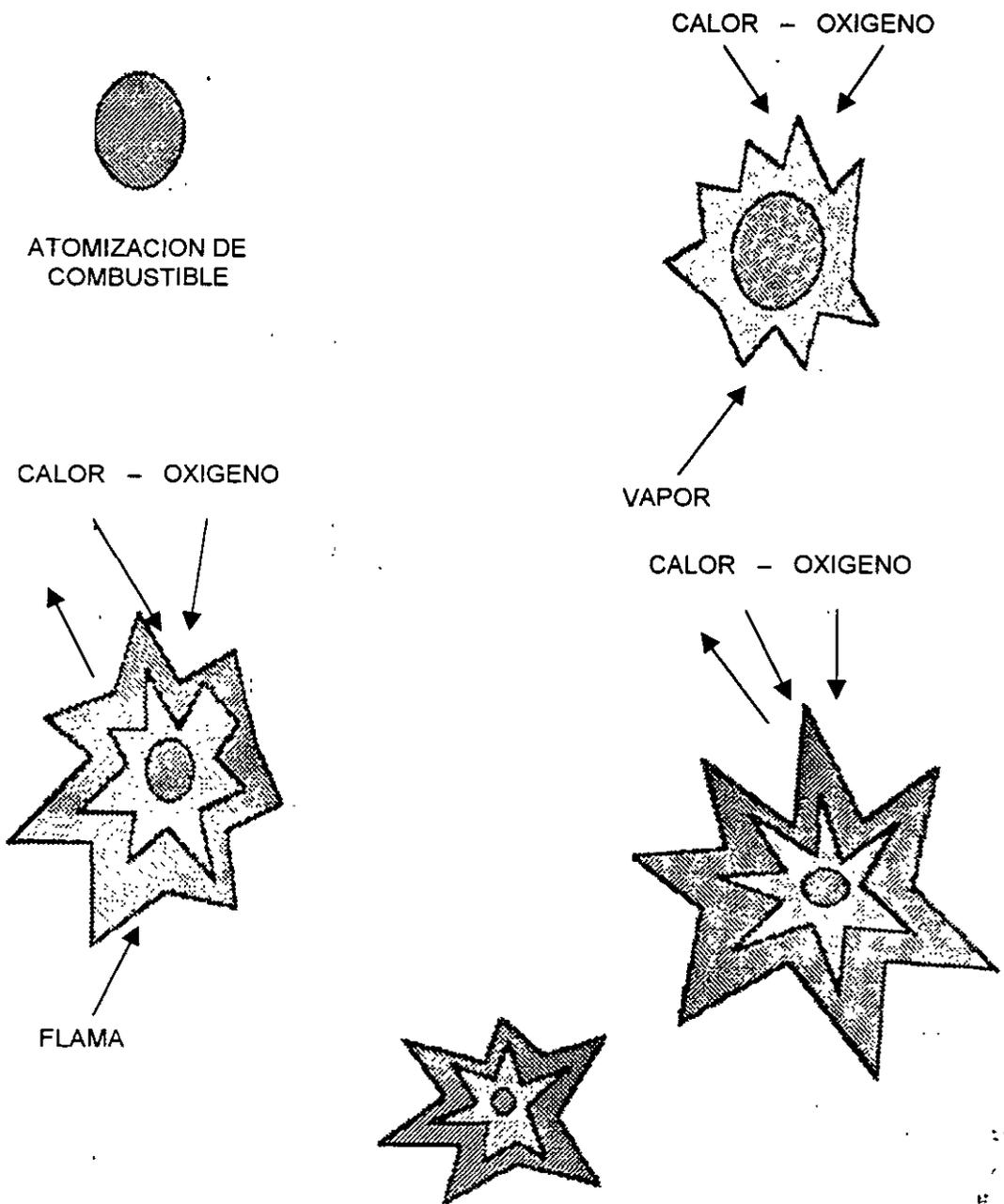


FIG. IV-8.- COMBUSTIÓN DE ACEITE. (A) EL ACEITE SE ESPARCE EN FINAS PARTÍCULAS ESFÉRICAS POR EL PROCESO DE ATOMIZACION PARA TENER UNA SUPERFICIE MAYOR PARA LA FORMACIÓN DE VAPOR PARA LA COMBUSTIÓN, EL VAPOR, NO QUEMA EL ACEITE POR SI MISMO DESPUÉS, (B) EL INTENSO CALOR EN LA ZONA DE COMBUSTIÓN CALIENTA EL VAPOR HASTA EL PUNTO DE IGNICIÓN Y EL OXIGENO ES MEZCLADO CON EL COMBUSTIBLE PARA DAR LUGAR A LA COMBUSTION (C) EL VAPOR Y LOS RESIDUOS DE CARBÓN CONTINÚAN QUEMÁNDOSE, REDUCIENDO EL TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS MIENTRAS ESTAS SON EXPULSADAS DEL QUEMADOR Y (D) TODO EL COMBUSTIBLE DEBE SER QUEMADO EN LA ZONA DE COMBUSTIÓN PARA ASEGURAR QUE ESTA SEA LIMPIA Y NO PERMANEZCAN GASES DENTRO DE LA CALDERA

INFORMACIÓN BÁSICA SOBRE BITÁCORA PARA PROCESOS DE COMBUSTIÓN

1. ANÁLISIS DE GASES DE COMBUSTIÓN (CO, CO₂, O₂)
2. HUELLA DEL HUMO
3. MANTENIMIENTO MAYOR
4. MANTENIMIENTO MENOR
5. DÍAS DE OPERACIÓN
6. HORA DE ARRANQUE
7. PAROS
8. OPERACIONES DE SOPLADO
9. CONSUMOS DE COMBUSTIBLES POR HORA, DÍA, MES, AÑO ACUMULATIVO
10. MUESTREOS DE PARTÍCULAS SO₂, NO_x
11. ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO DEL COMBUSTIBLE



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

CURSOS ABIERTOS

**CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN Y USO
EFICIENTE DE ENERGÍA EN CALDERAS**

TEMA :

SISTEMAS DE CONTROL DE COMBUSTIÓN

**ING. ISIDRO BECERRIL SALINAS
PALACIO DE MINERÍA
SEPTIEMBRE 1999**

V. SISTEMAS DE CONTROL DE COMBUSTIÓN

1. FUNDAMENTOS PARA CONTROLAR LA COMBUSTIÓN

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 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 pérdida 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 que 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 E , se determina por la relación:

$$E = \frac{CO_2 \text{ max}}{CO_2}$$

en donde

CO_2 = concentración obtenida en la medición efectuada

$CO_2 \text{ max}$ = concentración de CO_2 que se obtendría en una combustión perfecta, o estequiométrica con el

aire mínimo necesario para la combustión es decir, $E = 1$.

El valor de CO_2 máximo se puede determinar por cálculo; para combustibles cuya composición no varía en grandes límites, se tiene los siguientes valores: (Fig. V-1)

$CO_2 \text{ max} = 15.8\%$ para aceites combustibles derivados del petróleo (combustóleo, gasóleo, diesel, nafta, diáfano).

$CO_2 \text{ max} = 11.5\%$ para gas natural.

2. CONTROL O REGULACION DE LA CALDERA

2.1 Equipos requeridos

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 sí 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).
- Bloqueos (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.

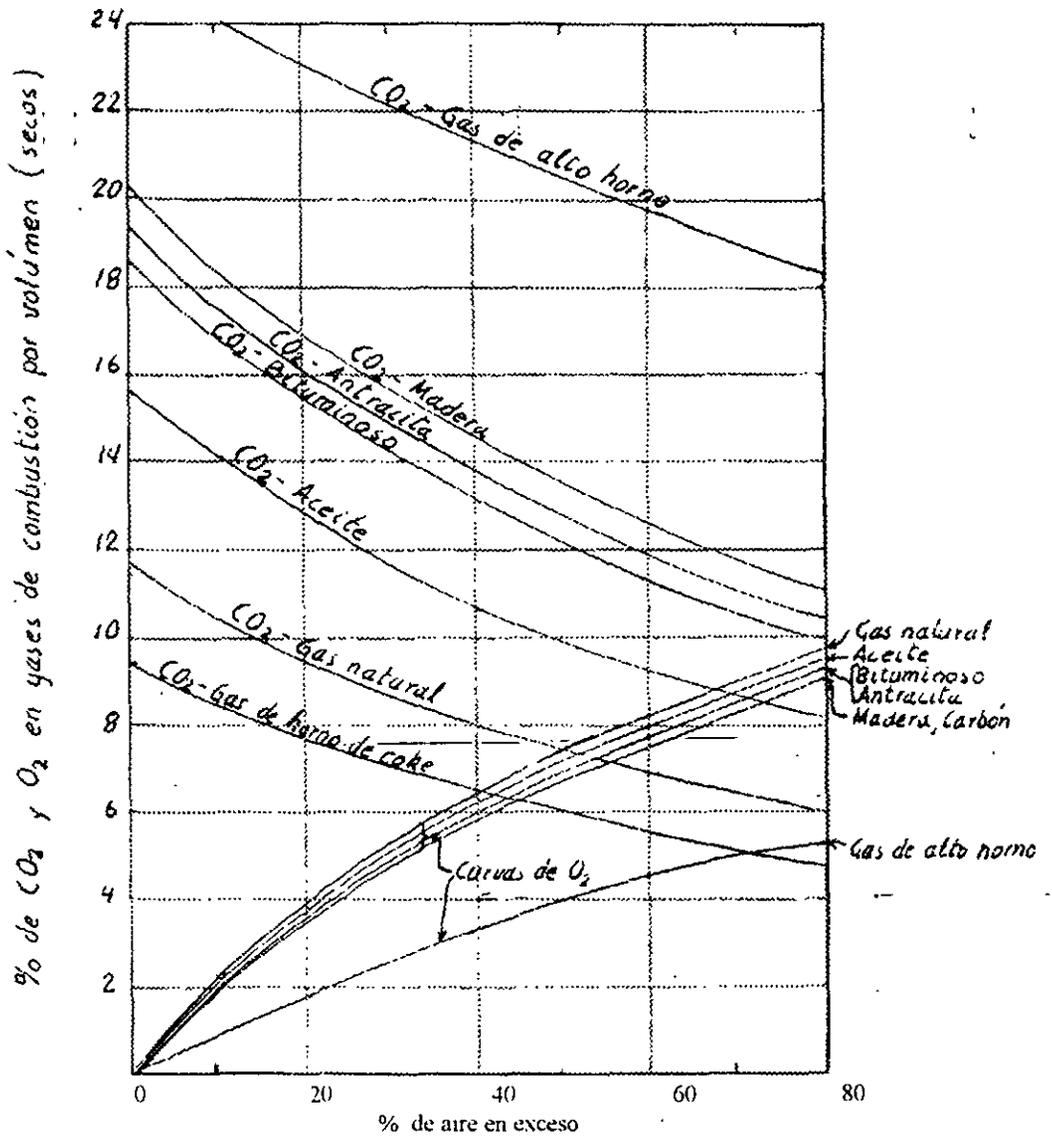


FIG. V-1.- INTERRELACION ENTRE OXIGENO (O_2) DIOXIDO DE CARBONO (CO_2) Y EXCESO DE AIRE

2.2 Medidas regulables

La instalación de automatización, tiene el objeto de efectuar la regulación sobre un cierto número de medidas regulables de la caldera, entre las que se encuentran:

- 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, las siguientes tienen una correlación directa:

- 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).

2.3 Regulación de la combustión

La regulación de la 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 de 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 del

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 la posición inicial de relevador de comando, antes de que se produzca la respuesta con retraso del parámetro regulable.

En la Fig. V-2, 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 concordancia entre el flujo de la caldera y el flujo suministrado al usuario.

El regulador principal transmite un impulso al bloque de combustible y este impulso es recibido por el sensor o captador y transmitido al relevador

que acciona al 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.

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 relativamente grande, en la respuesta se necesita un relevador de reajuste; este relevador está comandado por una medición de flujo de aire suministrado por el ventilador, acostumbrándose medir el flujo de aire por la caída de presión a través del precalentador de aire (p_{pa}). Una vez que por la variación del flujo de aire el relevador de reajuste detiene la acción del servomotor, se suspende de este modo el impulso.

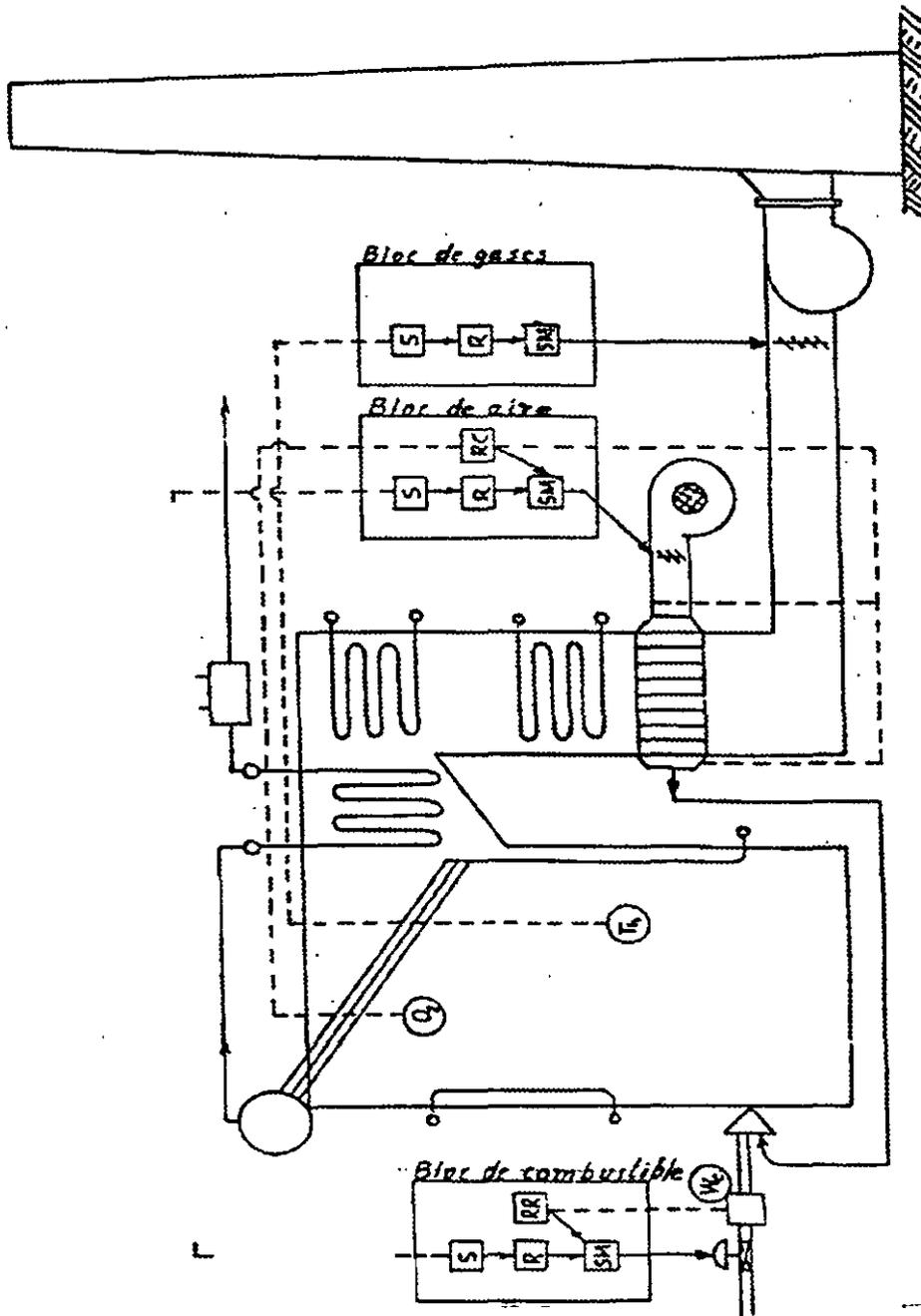


FIG. V-2.- ESQUEMA DE AUTOMATIZACION DE COMBUSTIÓN DE UNA CALDERA

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 AUTOMÁTICO DE COMBUSTIÓN PARA CALDERAS

La operación satisfactoria de una planta de calderas, de cualquier tamaño o número de unidades, requiere que se mantenga constantemente la más alta eficiencia posible en el uso de combustible.

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 constante 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. En la Fig. V-3 se muestra un esquema conceptual de sistemas de control de combustión.

3.1 Propósitos del control de combustión

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 las funciones mencionadas anteriormente.

3.2 Sistemas básicos de control de combustión

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 pueden clasificarse de acuerdo a la trayectoria de la señal maestra 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. V-4.

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.

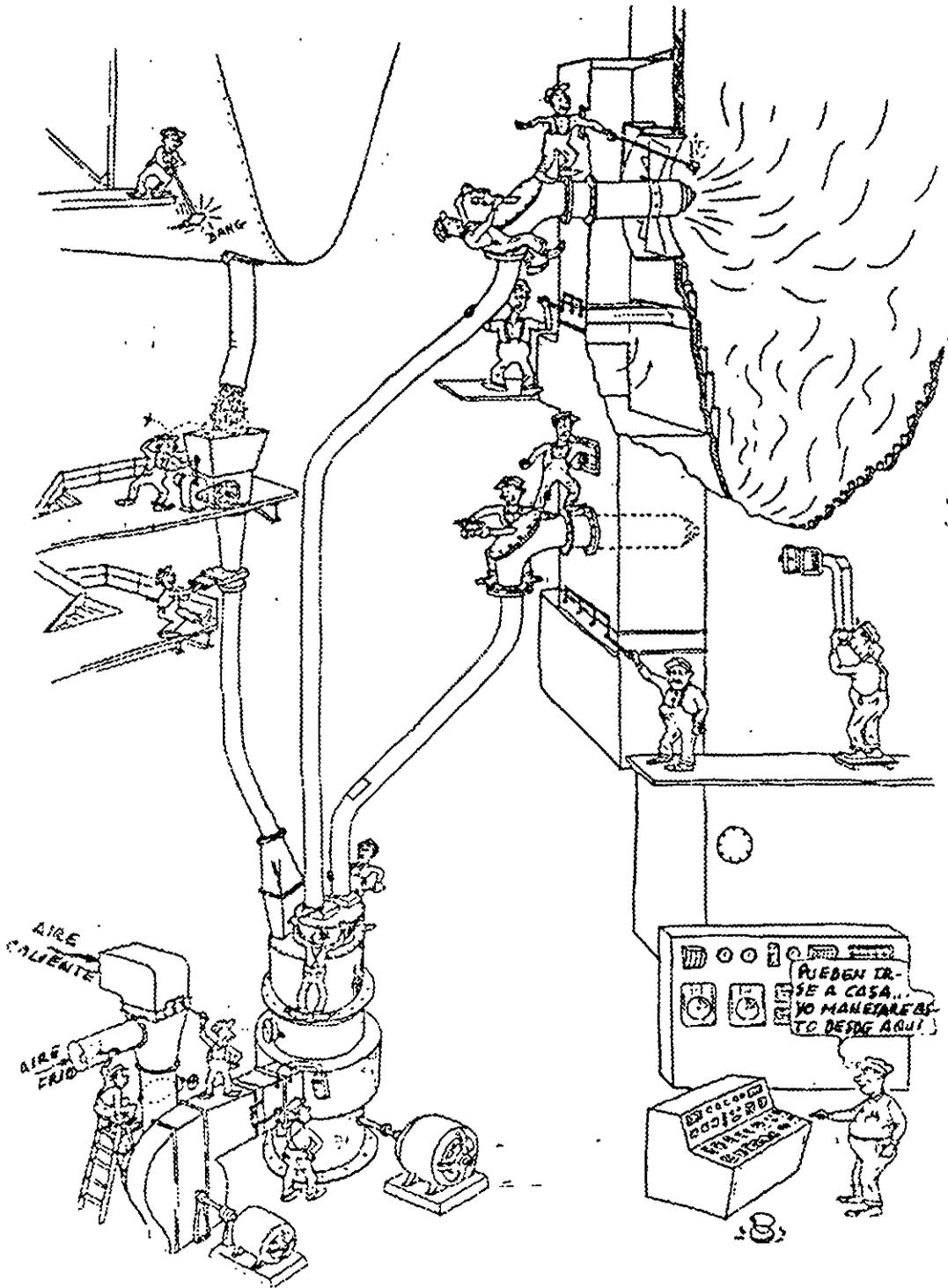


FIG. V-3.- ESQUEMA CONCEPTUAL DE SISTEMAS DE CONTROL DE COMBUSTION

Los sistemas de control de combustión también pueden clasificarse de acuerdo al origen de la señal como:

- Controles de posición
- Controles de medición

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

En los sistemas de control por medición, la respuesta es controlada por la medición real de los flujos combustible y/o aire.

La aplicación y grado de control de combustión varía con el tamaño de la caldera y está influenciada por los costos. Existe un rango de óptimo exceso de aire para cada combinación de combustible, modo de quemado y condiciones del horno.

Demasiado poco flujo de aire resulta en emisiones de combustible que son peligrosas, contaminantes y pueden contener cantidades considerables de energía sin usar. El nivel mínimo seguro de exceso de aire para quemadores convencionales por lo general se toman como 10% para gas combustible y 15% para aceite combustible, sin embargo, algunas aplicaciones específicas pueden requerir otros niveles.

Demasiado exceso de aire resulta en altos niveles de emisión de NO_x e incrementa el flujo de masa y pérdidas de energía en la chimenea. Con altos niveles de exceso de aire, también se reduce la transferencia de calor dentro de la caldera, culminando en temperaturas 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 más altas.
- Regulaciones de contaminación que requieran operación a bajos excesos para minimizar las emisiones de NO_x.
- Bloqueos 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 ésta información es imposible determinar si el equipo está operando en las mejores condiciones o que acción correctiva es necesaria para restaurar el comportamiento.

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 O_2

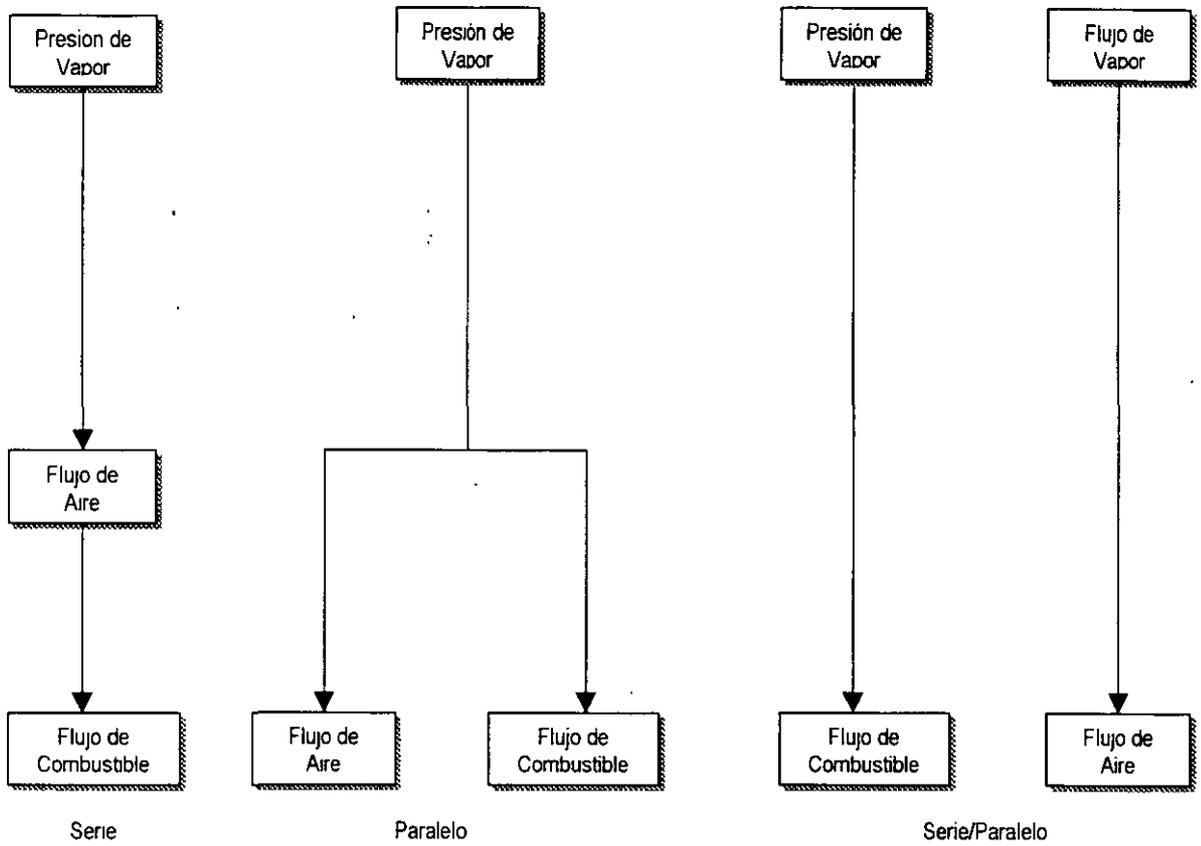


FIG. V-4.- SISTEMAS BASICOS DE CONTROL DE COMBUSTIÓN

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.

3.2.1 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 preajustada en respuesta a un cambio en la presión de vapor. (Fig. V-5).

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 dominar 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

Este tipo de sistema de control resulta en variaciones considerables de excesos 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.

En la Fig. V-6, se muestra la versión de este tipo con sistema neumático.

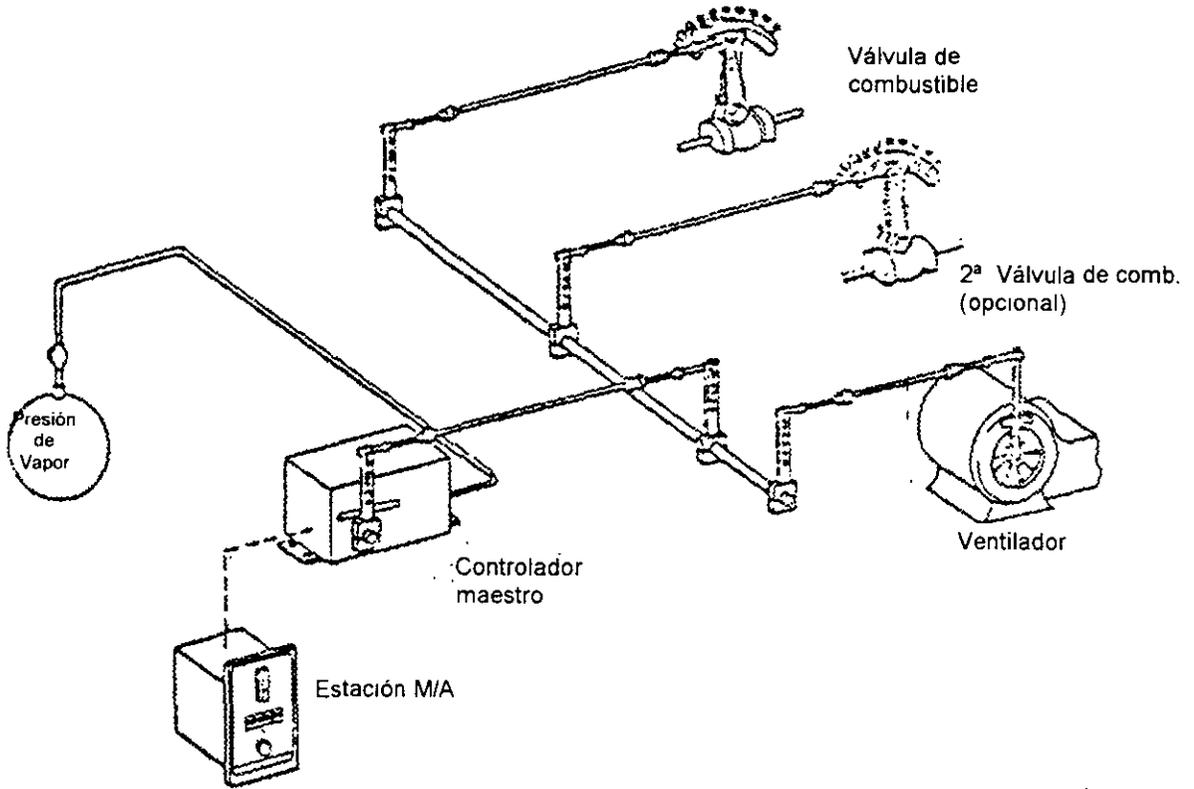


FIG. V-5.- SISTEMA DE CONTROL DE COMBUSTIÓN TIPO POSICIONAMIENTO FIJO

3.2.2 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.

También 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 mas ampliamente usado en calderas de menos de 45,000 kg de vapor/hora. Ajustando la relación aire/combustible, como se muestra en la Fig. V-7, se pueden hacer compensaciones por variaciones en las características del combustible, condiciones de combustión o equipo del sistema de control.

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

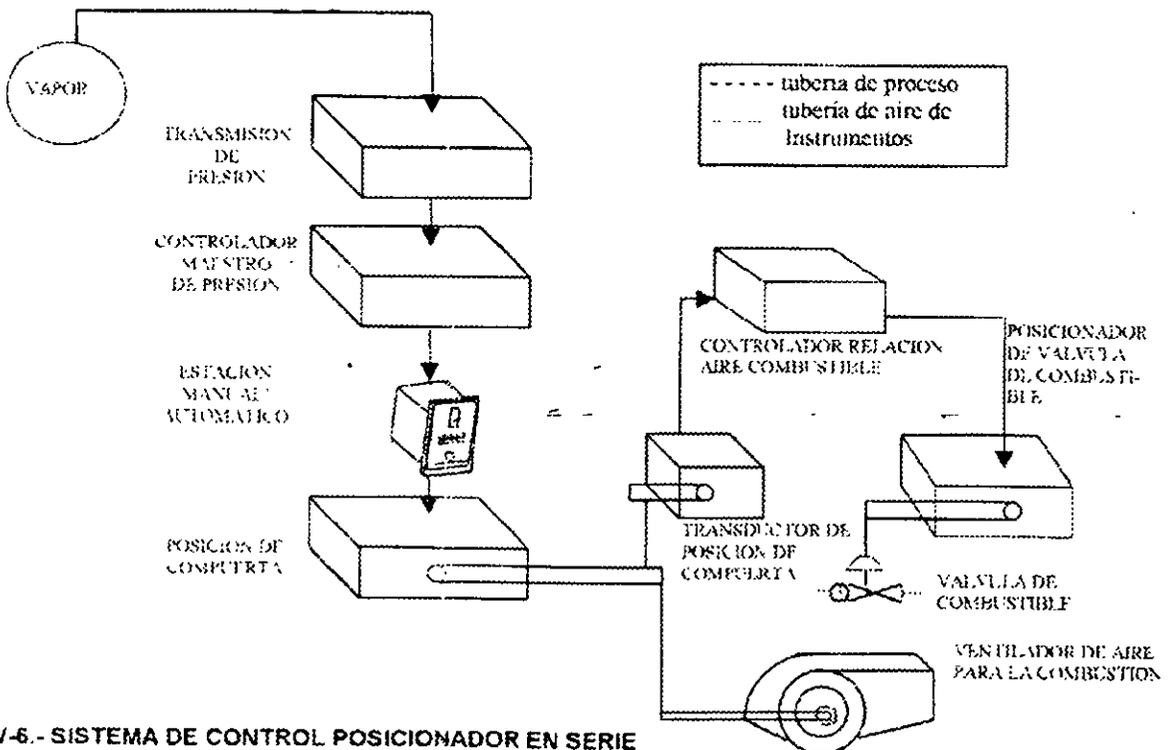


FIG. V-6.- SISTEMA DE CONTROL POSICIONADOR EN SERIE (ENTRADA AIRE/COMBUSTIBLE)

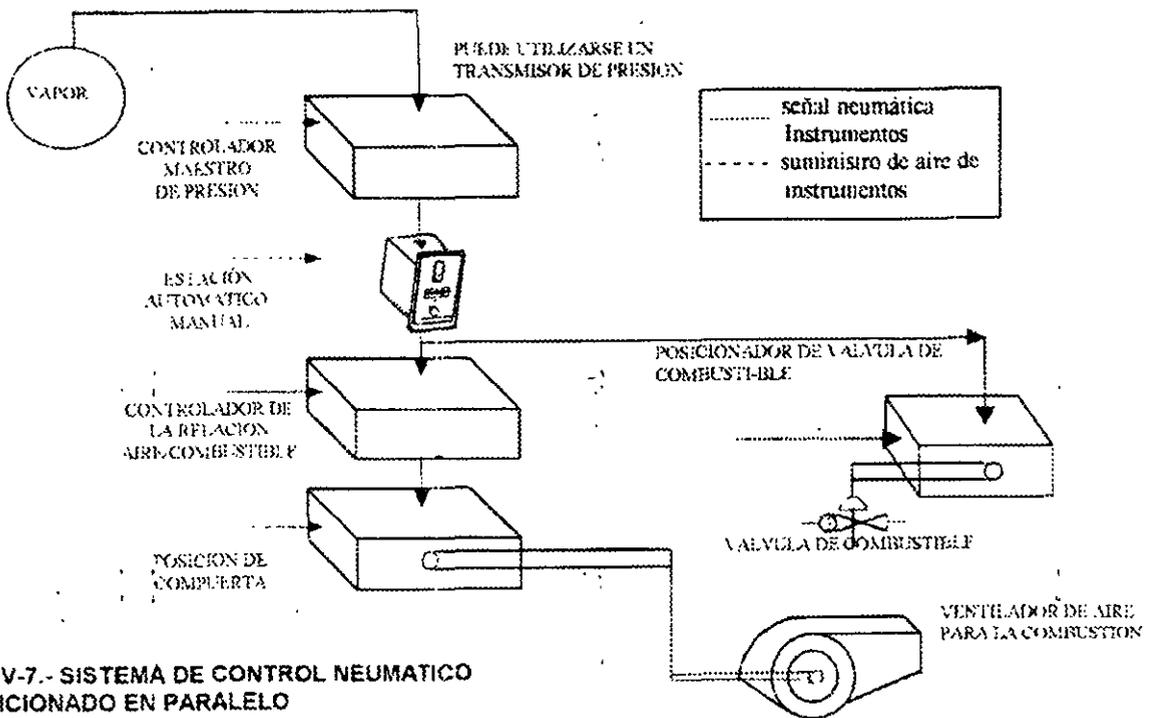


FIG. V-7.- SISTEMA DE CONTROL NEUMÁTICO POSICIONADO EN PARALELO

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 (Fig V-2) 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.

3.2.4 Medición de combustible y aire.- Si se refina más el sistema de control incluyendo mediciones reales de combustible y aire, se pueden eliminar fuentes de error adicionales, 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 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. (Fig. V-8) Estos flujos se miden y su señal es retroalimentada a los dispositivos de control para asegurar su coordinación con el controlador maestro.

3.2.5 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 comprensible 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 posición 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. En la Fig. V-9, se muestra un esquema de este sistema.

3.2.6 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 ésta 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

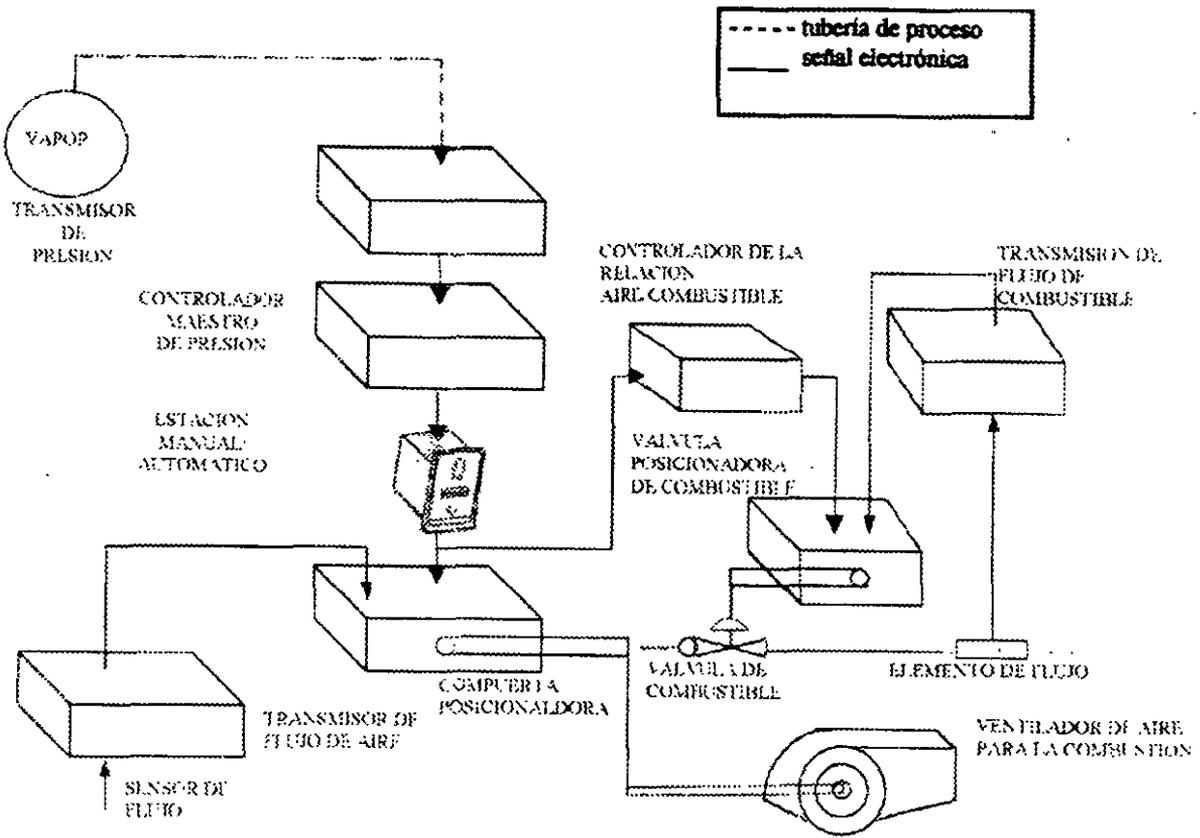


FIG. V-8.- SISTEMA DE CONTROL POR MEDICION

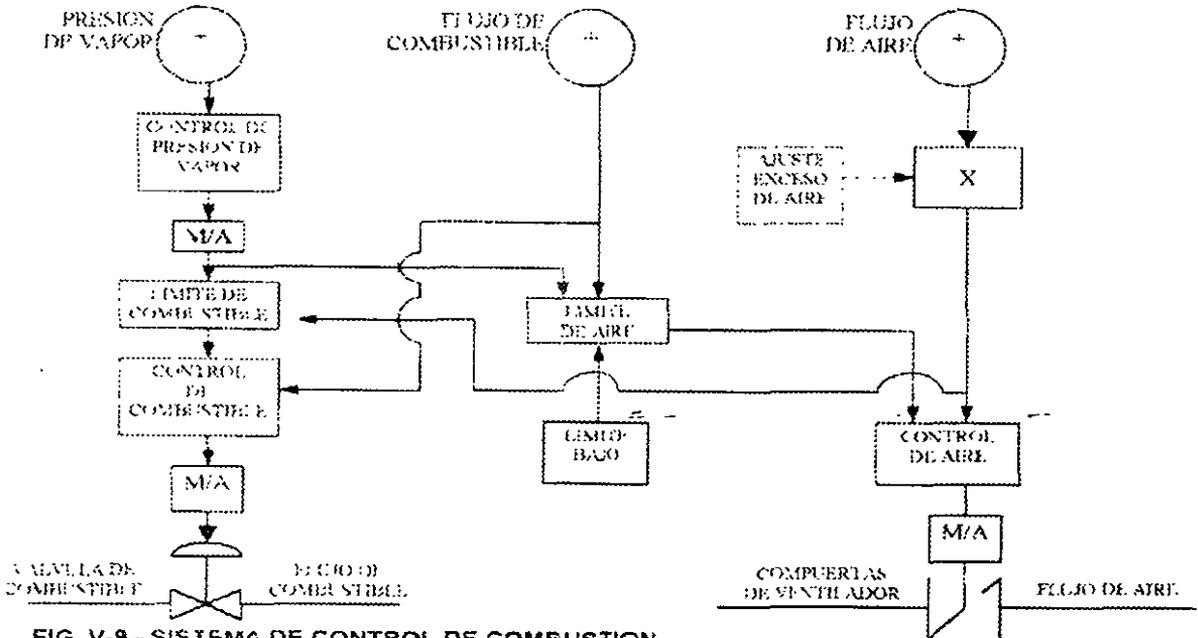


FIG. V-9.- SISTEMA DE CONTROL DE COMBUSTION POR MEDICION CRUZADA-LIMITADA



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

CURSOS ABIERTOS

**CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN Y USO
EFICIENTE DE ENERGÍA EN CALDERAS**

TEMA :

AFINACIÓN O CARBURACIÓN DE CALDERAS

**ING. ISIDRO BECERRIL SALINAS
PALACIO DE MINERÍA
SEPTIEMBRE 1999**

VI. AFINACIÓN O CARBURACIÓN DE CALDERAS

1. DIAGNOSTICO

1.1 Propósitos

Uno de los medios más 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 más 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 más 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 en 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, los fabricantes de éstos equipos y de los quemadores recomiendan inspecciones y afinaciones periódicas. Por lo general se recomienda que se realice una afinación completa anualmente, pero en algunos lugares prefieren efectuar chequeos rápidos de la eficiencia de la caldera con mucha mayor frecuencia, por ejemplo semanalmente. En ésta forma, los

problemas de eficiencia pueden detectarse tempranamente, antes de perder mucha cantidad de combustible o se requiera algún mantenimiento costoso. Una afinación mínima debe incluir:

- Verificación de la operación automática del control de combustible y aire, así como su rango de operación
- Observación visual del horno
- Mediciones de exceso de O₂, CO y CO₂
- Temperatura de salida de gases.

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

- 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 más crítico durante el paro
- Calibración y reparación de instrumentos.

Las reparaciones mayores pueden requerir posteriormente un paro mas largo, 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 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 más 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

1.2 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 $22^\circ C$ 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.

1.3 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

2.1 Prueba preliminar

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 Tabla VI-1, 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.

2.2 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 las comparaciones deben considerarse condiciones similares de operación.

TABLA VI-1.- 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	PARRILLAS (STOKER)	20 - 30	3.5 - 5

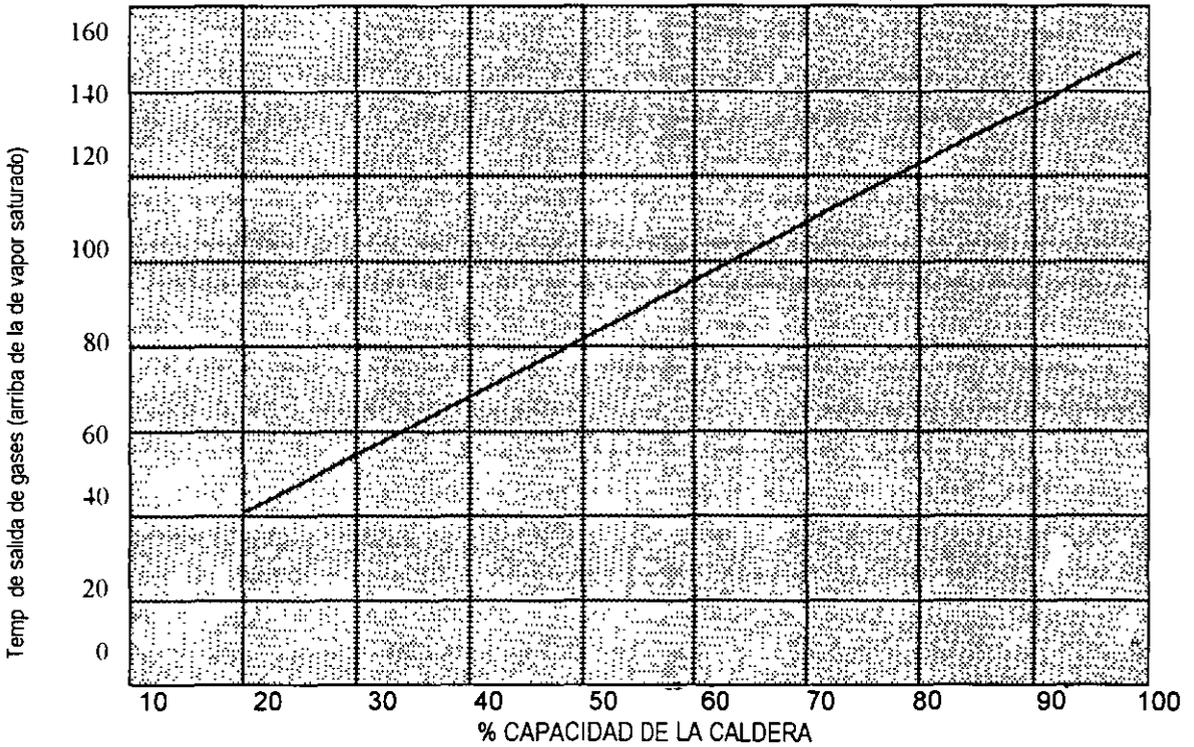


FIG. VI-1.- TEMPERATURA DE LOS GASES DE SALIDA DE CALDERAS POR ENCIMA DE LA TEMPERATURA DEL VAPOR SATURADO

Si no se cuenta con esta información o si las temperaturas son excesivas puede usarse la Fig. VI-1, 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.

2.3 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 incluyen a continuación en forma enunciativa, no limitativa.

2.3.1 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 usado.
- 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.
- Inspecciónese los conductos y orificios de las boquillas y verifíquese que no presenten desgaste, rayaduras u otras marcas.

- Usense calibradores para esta prueba.

2.3.2 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 orificio 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 de filtro de aceite combustóleo.
- Condición de tuberías de carbón.
- Temperatura de aceite.
- Presión de atomización de 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 o difusores

- Verificar temperaturas y presión correctas de combustible en quemadores. Esto puede incluir reajuste en el equipo de bombeo y calentamiento para adecuarse a la condición actual del combustible que se quema, así como calibración de equipo de medición y reajuste de presiones a los valores originales. Si se hace algún cambio deben observarse cuidadosamente los efectos producidos y prever cualquier problema que se desarrolle en consecuencia.
- Verificar la presión correcta de vapor o aire de atomización y revisar si no se tiene alguna trampa de vapor defectuosa que pueda introducir 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.

2.3.3 Controles de combustión

- Limpieza y movimiento libre de las 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.

2.3.4 Horno

- Las superficies del lado del fuego deben estar limpias, verificar la eficiencia de los sopladores de hollín y considerar limpieza periódica con chorro de agua si no es suficiente la acción de sopladores.
- Inspeccionar y reparar las mamparas internas; el deterioro de estas establece corto circuito de gases calientes causando alta temperatura en chimenea. Pueden localizarse puntos calientes recorriendo transversalmente el horno con una 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 hollín.
- Fugas en envoltentes de ductos y equipo auxiliar.
- Puertas de observación e inspección del hogar limpias y en condiciones de operación.

2.3.5 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.

2.3.6 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 O_2 , 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 registro de aire
- Posición incorrecta del cañón del quemador.

2.4 Aspectos fundamentales de pruebas y ajustes de combustión

Para una buena combustión deben tomarse en cuenta los conceptos básicos siguientes:

- 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.

2.5 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 dé una medición precisa de las condiciones promedio para el quemador que se ajusta.

Deben 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 de 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 de 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.
- Si se tienen dudas consultar al personal de la planta o al fabricante de la caldera.
- 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. OPTIMIZACIÓN DE LA COMBUSTION

3.1 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 O_2 al que la unidad puede operar con seguridad y cumplir con la reglamentación existente.

Las pruebas deben correrse a varios regímenes de combustión y determinar los valores mínimos de O_2 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 por concepto de combustible.

En cada una de las cargas en que se hallan realizado pruebas y ajustes debe variarse el O_2 de 0.5 a 1% del punto de operación normal, y hacia abajo hasta el punto en que la caldera empiece a producir humo o hasta que las emisiones de CO presenten valores entre 150 a 250 ppm.

Debe verificarse cuál es el límite legal establecido; en muchas localidades y por las compañías de seguros es 400 ppm, que es el caso de la NOM-085-ECOL. A esta condición se le refiere como la "marca máxima" de humo, o simplemente como el punto de O_2 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 VI-2, 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.

3.2 Mínimo O_2 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/ O_2 y CO/O_2 en la Fig. VI-2, que tienen como base mediciones de prueba.

Se muestran 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 O_2 relativamente altos y una pendiente más pronunciada cerca del punto de O_2 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 tienen características graduales en una zona de capacidades y pronunciadas en otras.

3.3 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 la caldera se estabilice en la carga previamente seleccionada.

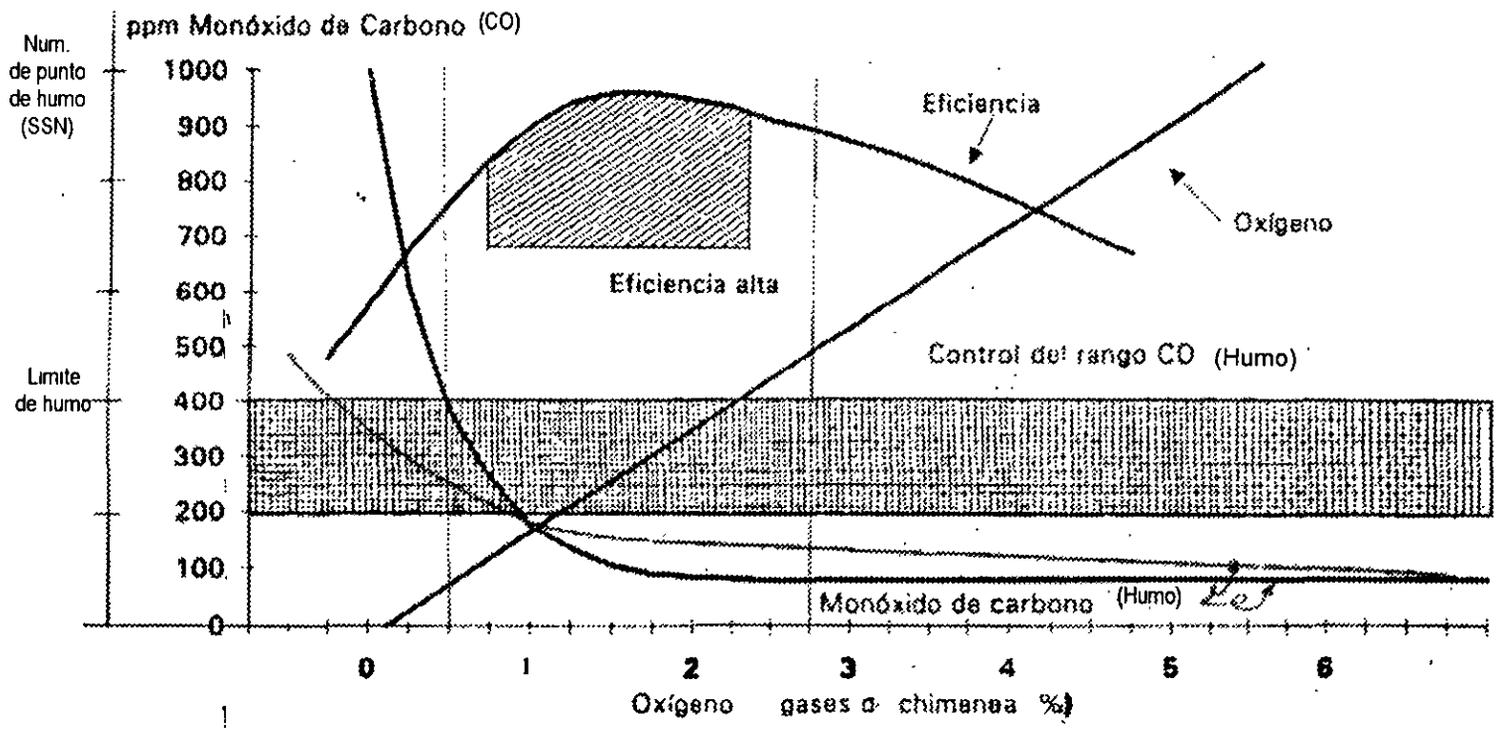
Si se observa que la cantidad de O_2 en los gases de combustión se encuentra en los valores bajos del rango de valores típicos y el CO y humo se encuentran en niveles aceptables, esto es indicación que la caldera está operando ya cerca del punto de relación aire/combustible óptimo. Lo anterior puede 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 O_2 .

- c) Incrementar el flujo de aire al hogar hasta que las lecturas en O_2 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 O_2 , el SSN, CO y la temperatura en la chimenea después de cada cambio.

TABLA VI-2.- EFECTO DEL SSN EN LA FORMACION DE HOLLIN

COMBUSTIBLE	SSN MÁXIMO DESEABLE PARA MARCA MÁXIMA DE HUMO	CLASIFICACIÓN DEL EFECTO DEL HUMO EN FORMACION DE HOLLIN	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	PUEDA 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. VI-2 RELACION CO/OXIGENO MOSTRANDO EL RANGO DE CONTROL DE CO Y EL EFECTO DE LOS NIVELES DE CO Y OXIGENO SOBRE LA EFICIENCIA DE COMBUSTION.



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 de cargas 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 la figura, usando el O₂ y CO o el SSN obtenido en cada ajuste aire/combustible.

g) Encontrar el nivel mínimo de O₂ para la caldera a partir de las curvas trazadas en la figura, 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 NO_x normalmente es impráctico operar los controles de la caldera en este punto ya que se tendrá tendencia a producción de humo o a incrementar el contenido de CO a niveles peligrosos durante los cambios de carga.

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

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

i) Repetir los pasos desde a hasta h para cada régimen de carga en que se realicen pruebas; en

algunos sistemas de control no es posible establecer el 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 quemara un combustible alterno deben realizarse estas mismas pruebas y ajustes para el segundo combustible, aunque no siempre es posible lograr el nivel de O_2 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.

3.4 Proceso de revisión de ajustes finos

En los programas de optimización es posible algunas veces bajar los límites de humo y CO para conseguir excesos₃₄ 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.

3.5 Procedimiento paso a paso del ajuste de caldera para operación 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 operar 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 O_2 de 0.5 al 1% dando suficiente tiempo para estabilización y tomar un juego de lecturas.
- f) Reducir el nivel de O_2 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 O_2 .
- h) Trazar la curva de CO u opacidad versus O_2 .
- i) Comparar el nivel mínimo de O_2 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 O_2 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 considerado; se deben hacer consideraciones para el ajuste del O_2 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 LA CONTAMINACIÓN Y USO
EFICIENTE DE ENERGÍA EN CALDERAS**

TEMA :

**EL MANTENIMIENTO RELACIONADO CON LA EFICIENCIA Y LA
CONTAMINACIÓN**

**ING. JUAN PELAYO ROJAS
PALACIO DE MINERÍA
SEPTIEMBRE 1999**

VII. EL MANTENIMIENTO RELACIONADO CON LA EFICIENCIA Y LA CONTAMINACION

1. PROPÓSITO

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

De hecho, el mantenimiento relacionado con la eficiencia de la caldera puede ser visto simplemente como una aplicación mas intensiva de los procedimientos de mantenimiento preventivo en áreas donde la eficiencia está afectada, antes de que el equipo se deteriore hasta un punto en donde la confiabilidad, seguridad o capacidad estén amenazadas. Por ejemplo, los depósitos de hollín o ceniza en las superficies de calentamiento pueden reducir la transferencia de calor e incrementar la temperatura de salida de gases, pero podrían no afectar la seguridad de la planta o la capacidad para tomar carga, a menos que los depósitos restrinjan 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; éstas 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 pueda ser fácilmente identificado el deterioro en la eficiencia de operación; la frecuencia de estos puntos de verificación dependerá de la complejidad de los sistemas y del personal disponible, pero al menos deben hacerse sobre una base semanal.

Establecimiento de Metas de Comportamiento

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

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

carbón, mientras los depósitos en el lado de gases se estabilizan.

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

- 15% ó menos de exceso de aire quemado gas combustible;
- 20% ó menos de exceso de aire quemado aceite combustible;
- 20 a 30% de exceso de aire quemado 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 ésta información si los registros de la planta están incompletos.

2. MONITOREO DEL COMPORTAMIENTO (BITACORA DE LA CALDERA)

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

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

El comportamiento registrado bajo estas condiciones indicará

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

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

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

2.1 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

2.2 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

2.3 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.

2.4 Temperaturas de aire y de gases de combustión

- Gases salida de caldera
- Gases de salida del economizador o precalentador de aire
- Aire a precalentador de aire

2.5 Indicación de combustible no quemado

- Medición de CO
- Apariencia de la chimenea
- Apariencia de la flama

2.6 Presión de aire y gases de combustión

- Descarga del ventilador de tiro forzado
- Hogar

- Salida de caldera
- Diferencial en economizador
- Diferencial lado de aire y gases en precalentador de aire

2.7 Condiciones inusuales

- Fugas de vapor
- Vibraciones o ruidos anormales
- Mal funcionamiento de equipos
- Excesiva agua de repuesto

2.8 Operación de purgas

2.9 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
- Operación de purgas
- Condiciones inusuales o mal funcionamiento de equipos.

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

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

Inspección Periódica del Equipo de Combustión

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

La Tabla anterior debe complementarse con la Tabla VII-2, en donde se da una relación de las inspecciones mínimas requeridas para mantenimiento, y con la Tabla VII-3 que muestra la lista preliminar de verificación de calderas.

3. 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 VII-4 se presenta un resumen de los problemas frecuentemente encontrados en los sistemas de la caldera y sus posibles causas.

Entre los problemas que afectan el comportamiento de una caldera, además de los de combustión, se encuentran los siguientes:

- Depósitos o incrustaciones en el lado de agua y/o en el lado de gases

QUEMADORES				CONTROLES DE COMBUSTIÓN	HOGAR
GAS	ACEITE	CARBÓN PULVERIZADO	STOKER		
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Limpieza y condiciones de orificios de inyección. ✓ Limpieza y operación de filtros de trampas de humedad. ✓ Limpieza y orientación de difusores. ✓ Condición del refractario 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 quemándose. ✓ 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. ✓ Fineza 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 proporcionadoras 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 innecesarios de régimen de combustión (quemado). ✓ Operación apropiada de todos los interlocks de seguridad y circuitos de disparo de la caldera. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Depósitos excesivos o suciedad en el lado de gases de tubos. ✓ Operación apropiada de sopladores. ✓ Fugas en cubierta y ductos. ✓ Operables y los registros de inspección.

TABLA VII-1.- LISTA DE VERIFICACIÓN DE INSPECCIÓN PRELIMINAR DE CALDERAS

TABLA VII-2.- RELACIÓN DE MÍNIMO MANTENIMIENTO PREVENTIVO (MP) DE CALDERAS

<p>DIARIAMENTE</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Observar su operación y bitácora ✓ Purgar el cristal de nivel ✓ Probar el regulador de agua de alimentación ✓ Probar el corte de combustible por bajo nivel de agua
<p>MENSUALMENTE</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Probar la válvula de seguridad ✓ Checar mecanismos (eslabones) del quemador ✓ Probar el control por falla de flama ✓ Lubricar el motor del ventilador ✓ Probar lentamente el corte de combustible por bajo nivel de agua ✓ Revisar la bitácora de tratamiento de agua
<p>ANUALMENTE</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Desmantelar e inspeccionar los accesorios ✓ Limpiar e inspeccionar el lado de fuegos y gases de combustión ✓ Limpiar e inspeccionar el lado de agua-vapor ✓ Revisar las bitácoras de operación ✓ Desmantelar y limpiar el equipo soporte ✓ Ajustar la flama ✓ Reparar los controles de quemadores ✓ Calibrar el programador de quemadores ✓ Reemplazar los bulbos de las lámparas indicadoras ✓ Operar todos los dispositivos de seguridad ✓ Apretar las conexiones flojas ✓ Inspeccionar la chimenea ✓ Checar el sistema de inyección de químicos ✓ Inspeccionar el sistema de retorno de condensado

TABLA. VII-3.- LISTA PRELIMINAR DE VERIFICACIÓN DE CALDERAS

N U M	CONDICIONES		BUENAS	REPARACIÓN	SUSTITUCIÓN	OBSERVACIONES
	PARTE					
1.	Horno					
2.	Sobrecalentadores					
3.	Recalentadores					
4.	Economizador					
5.	Precalentadores de aire					
6.	Filtros de ceniza					
7.	Chimenea					
8.	Tambor (domo)					
9.	Válvulas de seguridad					
10.	Sopladores de hollín					
11.	Aislamiento térmico					
12.	Estructura soporte, cimentación					
13.	Tanque de purgas					
14.	Mirillas, registros de inspección					
15.	Cristales de nivel					
16.	Grifos de prueba					
17.	Tomas de muestreos					
18.	Instrumentación					
19.	Válvulas					
20.	Tubería, soportes					
21.	Quemadores					
22.	Bombas					
23.	Ventiladores					
24.	Ductos					
25.	Tratamiento de agua					
26.	Motores eléctricos, tableros etc.					

- Purgas de la caldera (por el tratamiento del agua)
- Pérdidas de calor (por radiación, convección y transmisión)

3.1 Efecto de los depósitos en el lado de agua y lado de gases

Por lo general una caldera tiene una temperatura de salida de 10° a 65°C arriba de la temperatura de saturación del vapor, antes del economizador u otro equipo recuperador de calor, dependiendo del tipo de caldera. Se considera que una temperatura de salida más alta es un signo que indica ensuciamiento o incrustación en las superficies de transferencia de calor en la caldera; la acumulación de depósitos o incrustación actúan como un aislamiento térmico que reduce la eficiencia total de la caldera.

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

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

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

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

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

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

TABLA VII-4.- 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
	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.
Combustión	Bajo exceso de aire	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Operación impropia del sistema de control. ✓ Limitaciones del ventilador. ✓ Aumento de temperatura 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 inadecuada de rejilla del stoker. ✓ Orientación de distribución de combustible del stoker. ✓ Sistemas de aire sobrefuegos inapropiados. ✓ Sistema de pulverización de baja finura.
	Fugas en cubierta	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Cubierta y aislamiento dañados.
Misceláneos	Fugas en precalentadores de aire	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Sellos desgastados o con ajuste impropio en precalentadores rotatorios. ✓ Corrosión en tubos.
	Potencia en pulverizadores de carbón	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Mala reparación del pulverizador. ✓ Ajuste muy bajo de clasificador.
	Purga excesiva	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Operación inapropiada.
	Fugas de vapor	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Perforaciones en tubos de paredes de agua. ✓ Empaques de válvulas.
	Aislamiento flojo o perdido	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Sobrecalentamiento. ✓ Intemperismo.
	Excesiva operación de sopladores	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Programa arbitrario de operación en exceso a requerimientos.

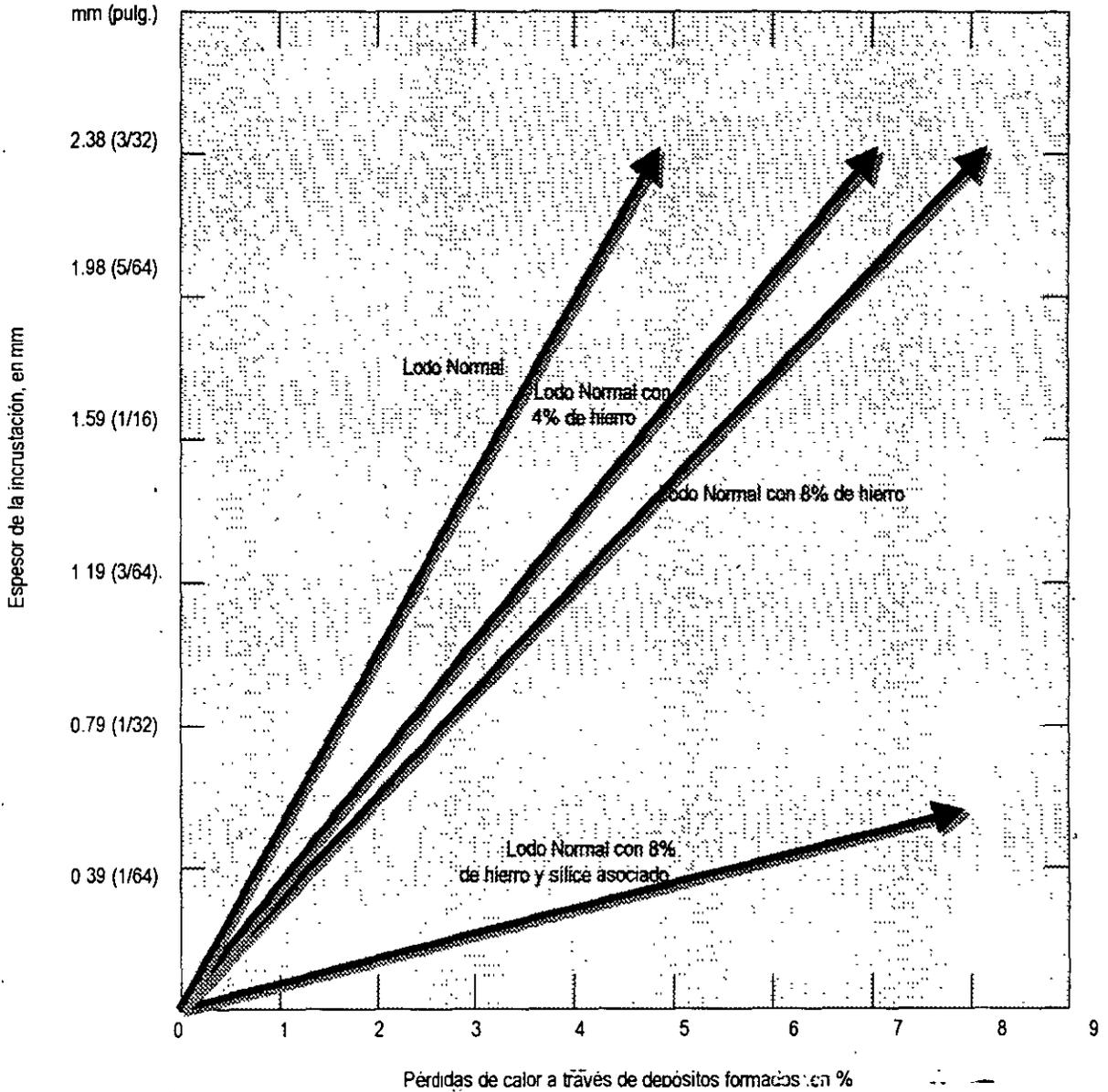


FIG. VII-1.- PERDIDAS DE ENERGÍA POR DEPÓSITOS DE INCRUSTACIÓN

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

$$q = \frac{\epsilon \Delta T}{le}, \text{ en donde:}$$

q = calor transferido

le = espesor de la incrustación

ϵ = conductividad térmica

ΔT = diferencial de temperatura

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

Las conductividades térmicas de varias sustancias características de depósitos de incrustación de calderas se muestran en la Tabla VII-5.

Incrustación en el Lado del Agua

El material de incrustación en la forma de sólidos disueltos se deposita en el lado del agua de las superficies de los tubos durante el

proceso de evaporación del agua. El vapor se forma en burbujas sobre la superficie de los tubos, y el material disuelto puede precipitarse de éstas, puesto que sus superficies contienen una concentración más alta de sólidos que el cuerpo principal de agua.

La concentración máxima permisible de sólidos disueltos en el agua de la caldera se determina de acuerdo con la presión de operación como se muestra en la Fig. VII-2 y en la Tabla VII-6.

TABLA VII-5.- CONDUCTIVIDADES TÉRMICAS DE VARIAS SUSTANCIAS

MATERIAL	CONDUCTIVIDAD TERMICA Kcal/m ² °C cm hr.
Analcita (Na ₂ O.Al ₂ O ₃ .4SiO ₂ .2H ₂ O)	
Fosfato de calcio	
Sulfato de calcio	
Fosfato de magnesio	
Oxido de hierro magnético	
Incrustación de silicato, porosa	
Ladrillo refractario	
Ladrillo aislante	
Acero de caldera	

TABLA VII-6.- CONCENTRACIONES MAXIMAS DE IMPUREZAS RECOMENDADAS

AGUA DE ALIMENTACION				AGUA DE CALDERA		
Presión del domo, en kg/cm ²	ppm de Fe (hierro)	ppm de Cu (cobre)	Dureza total ppm CaCO ₃	ppm de SiO ₂	Alcalinidad total, ppm de CaCO ₃	Conductividad específica
0 - 21						μ
21, ¹ - 31, ⁷						
31, ⁸ - 42, ²						
42, ³ - 52, ⁸						
52, ⁹ - 63, ⁴						
63, ⁵ - 70, ⁴						
70, ⁵ - 105, ⁶						
105, ⁷ - 141						

Por lo general la concentración de sólidos disueltos se controla con procedimientos de pre-tratamiento del agua de alimentación y por medio de purgas; éstas se refieren a la extracción de una parte del agua del domo de la caldera cuando tiene exceso de la concentración de sólidos y su reposición con agua de repuesto a concentraciones más bajas. El % de purga requerida para mantener una concentración dada de sólidos disueltos se muestra en la Fig. VII-3.

Como los depósitos de incrustaciones retardan la transferencia de energía calorífica al agua de la caldera, en consecuencia ocurre una reducción en la eficiencia de operación. La pérdida de energía aproximada en función del espesor de la incrustación se muestra en la Fig. VII-1, para varios materiales de incrustación.

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

Depósitos en el Lado de Gases

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

- Partículas de hollín;
- Cenizas volantes;
- Partículas de escoria.

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

- Propiedades del combustible
- Características del sistema de quemado
- Distribución de temperatura resultante en la caldera.

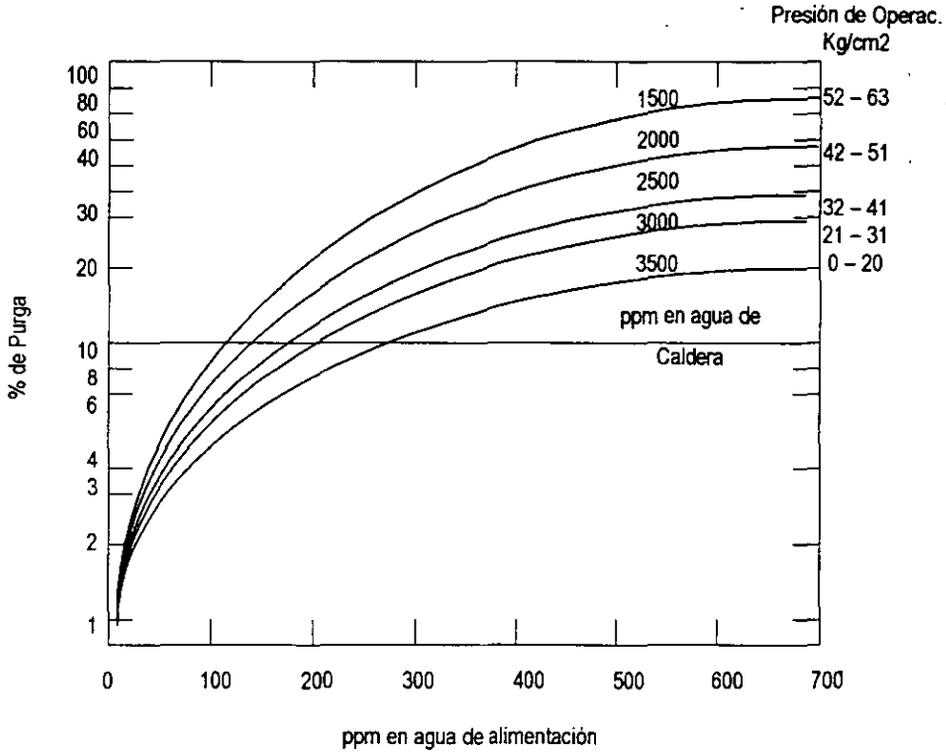


FIG. VII-2.- % DE PURGA PARA SOSTENIMIENTO DE SÓLIDOS DISUELTOS EN AGUA DE CALDERA

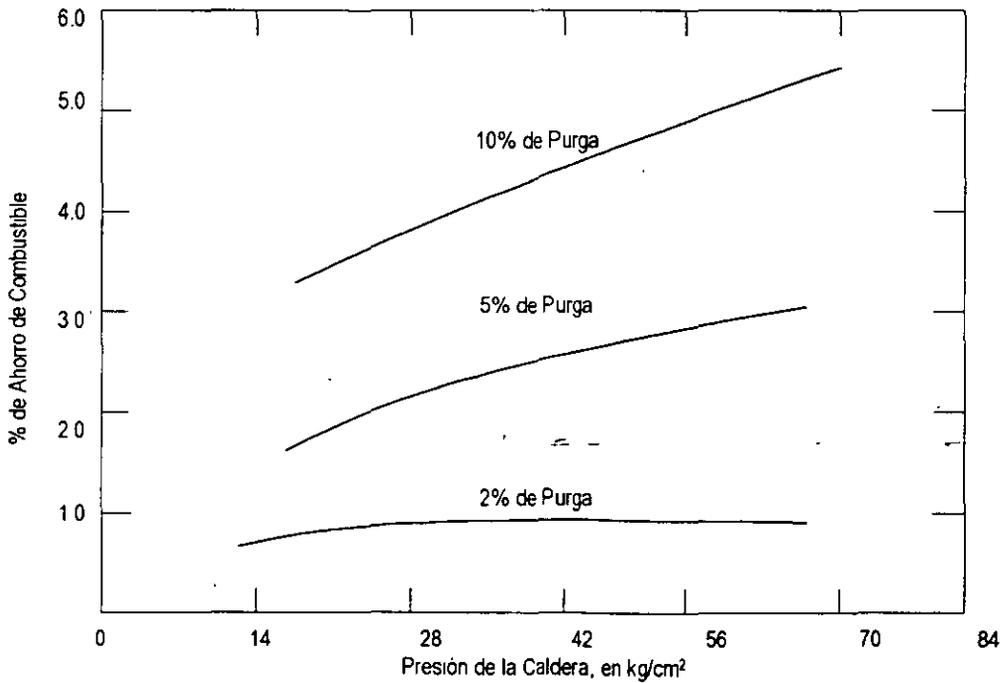


FIG. VII-3.- POTENCIAL DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA, CON PURGA CONTINUA, RECUPERACIÓN DE VAPOR FLASHADO Y CAMBIADORES DE CALOR

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

- Niveles demasiado bajos de exceso de aire
- Contacto de la flama con las paredes de agua

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

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

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

3.2 Purgas de la Caldera

El agua alimentada a la caldera contiene impurezas en la forma de sólidos disueltos y sólidos suspendidos; una parte importante de éstas impurezas se quedan en la caldera cuando el vapor sale de ella.

Algunas de las impurezas suspendidas son de tal naturaleza que se asientan en la parte mas baja de la caldera, pero otras son ligeras y flotan en la superficie del agua. Esta condición frecuentemente requiere la instalación de líneas de purga tanto

de superficie como de fondo en algunas calderas.

Purga de superficie.- Hay dos tipos de arreglos de purga de superficie:

- Uno consiste de un tubo que entra al domo aproximadamente en el nivel normal de agua con el tubo fijo en una posición.
- Otro arreglo tiene una junta o articulación giratoria en un extremo de una pieza corta de tubo, siendo sostenido el extremo libre en la superficie por un flotador.

La purga de superficie tipo flotador frecuentemente se conoce como "espumadera". La purga de superficie es ventajosa para quitar la espuma o remover el aceite del agua de caldera; una línea de purga de superficie no debe exceder de 63 mm (2 ½ de diámetro).

Purgas a bajo régimen sobre largos periodos de tiempo reducen la concentración mas efectivamente de lo que es posible con aperturas grandes de la válvula principal de purga, con lo que se logra un mejor control y regulación mas precisa de la purga; adicionalmente, la erosión y el desgaste de partes de la válvula se mantienen al mínimo.

= La purga continua requiere de un tanque de "flasheo" en donde el agua a alta presión pueda ser "falseada" a vapor de baja presión y usada para proceso o calentamiento de agua de alimentación, o bien la purga continua puede pasarse a través de un cambiador de calor para precalentar el agua de repuesto. En caso necesario, una pequeña parte del

agua de la purga con alcalinidad alta puede inyectarse a la línea de agua de alimentación a la caldera para elevar el valor del pH del agua y eliminar la corrosión en la línea de alimentación o economizador.

Para ser efectiva la purga continua, la toma debe colocarse en un punto de la caldera en donde el agua tiene la concentración más alta de sólidos disueltos; por lo general este punto se localiza en donde la mayor parte del vapor se separa del agua de la caldera; ordinariamente en el domo de vapor, de donde adquiere el nombre de purga de superficie.

Purga de fondo.- Todas las calderas deben estar equipadas con una tubería de purga de fondo unida con una válvula conectada directamente al punto mas bajo en el espacio de agua de manera que pueda ser drenada completamente la caldera.

Las líneas de purga de fondo deben ser extra-fuertes, de no menos de 25.4 mm (1") y no más de 63.5 mm (2 1/2") de diámetro, excepto para las calderas con 9.3 m² (100 pies²) de superficie de calentamiento o menos, que pueden llevar un tamaño mínimo de 19 mm (3/4"). Una tubería muy pequeña puede taponarse y una muy grande podría descargar el agua demasiado rápido.

Debido a que no hay circulación de agua en la tubería de purga de fondo, frecuentemente se les acumula incrustación y lodos, a menos que esta tubería se proteja de los gases calientes con materiales aislantes adecuados, está en riesgo de quemarse.

En calderas que operan a una presión de 7 kg/cm² (100 psi) o mayor, se requieren dos válvulas de purga (de fondo); éstas pueden ser:

- Dos válvulas de apertura lenta
- Una de apertura lenta y otra válvula de apertura rápida.

Una válvula de apertura lenta es una en la cual se requiere al menos cinco vueltas de 360° del dispositivo de operación para cambiar de completamente cerrada a abierta o viceversa.

La válvula de apertura rápida se instala cerca de la caldera y es la "primera" en abrir y la "última" en cerrar.

En la combinación tandem la válvula de apertura rápida se convierte en la válvula selladora en lugar de la válvula de purga o soplado; la válvula mostrada esta diseñada para operar a una presión máxima de 22.5 kg/cm² (320 psi).

NOTA: Para todos los otros arreglos de válvulas en tandem, la secuencia de operación es al revés; aquí, la segunda válvula desde la caldera se abre primero y se cierra al último; la purga o soplado tiene lugar a través de la siguiente válvula de la caldera.

En la Fig. VII-2, se muestra el % de purga requerida para mantener la concentración de sólidos (ppm) permitida en función de la calidad (ppm) del agua de alimentación. En la Fig. VII-3, se muestra el % de

ahorro de combustible utilizando purga continua.

3.3 Pérdidas de Calor

El aislamiento es cualquier material que se emplea para restringir la transferencia de energía de calor, y puede ser categorizado en la siguiente forma:

- Masivo.- Para reducir la transmisión de calor convectivo
- Reflectivo.- Para reducir la transmisión de calor por radiación

La resistencia total térmica del aislamiento tipo masivo depende tanto de su composición como de su estructura física, los materiales mas efectivos son los que tienen baja conductividad térmica, aunque es mas importante que tengan muchos pequeños vacíos llenos de aire o gas. Estos pequeños vacíos proveen la resistencia primaria a la transferencia de calor conductivo; la efectividad del aislamiento también se determina por el espesor o cantidad de material usado.

El aislamiento tipo reflectivo, que por lo general consiste de metal de superficie suave, reduce las pérdidas de energía de calor por radiación, con frecuencia este tipo de aislamiento se usa como una cubierta para el

aislamiento tipo masivo y también se emplea en capas separadas por espacios de aire para reemplazar el aislamiento 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.

El aislamiento provee otros beneficios además de reducir las pérdidas de calor, que incluyen, las siguientes:

- Control de temperatura de superficie, para confort y seguridad
- Resistencia estructural
- Reducción del ruido
- Protección de incendios

El aislamiento aplicado apropiadamente puede resultar en importantes ahorros de energía, dependiendo del tipo, espesor (solo para el tipo masivo) y condición del aislamiento existente. En la Fig. VII-4, se muestra el régimen aproximado total de pérdida de energía de calor por radiación y convección de una superficie plana desnuda, basada en la diferencia de temperatura entre la superficie y aire quieto.

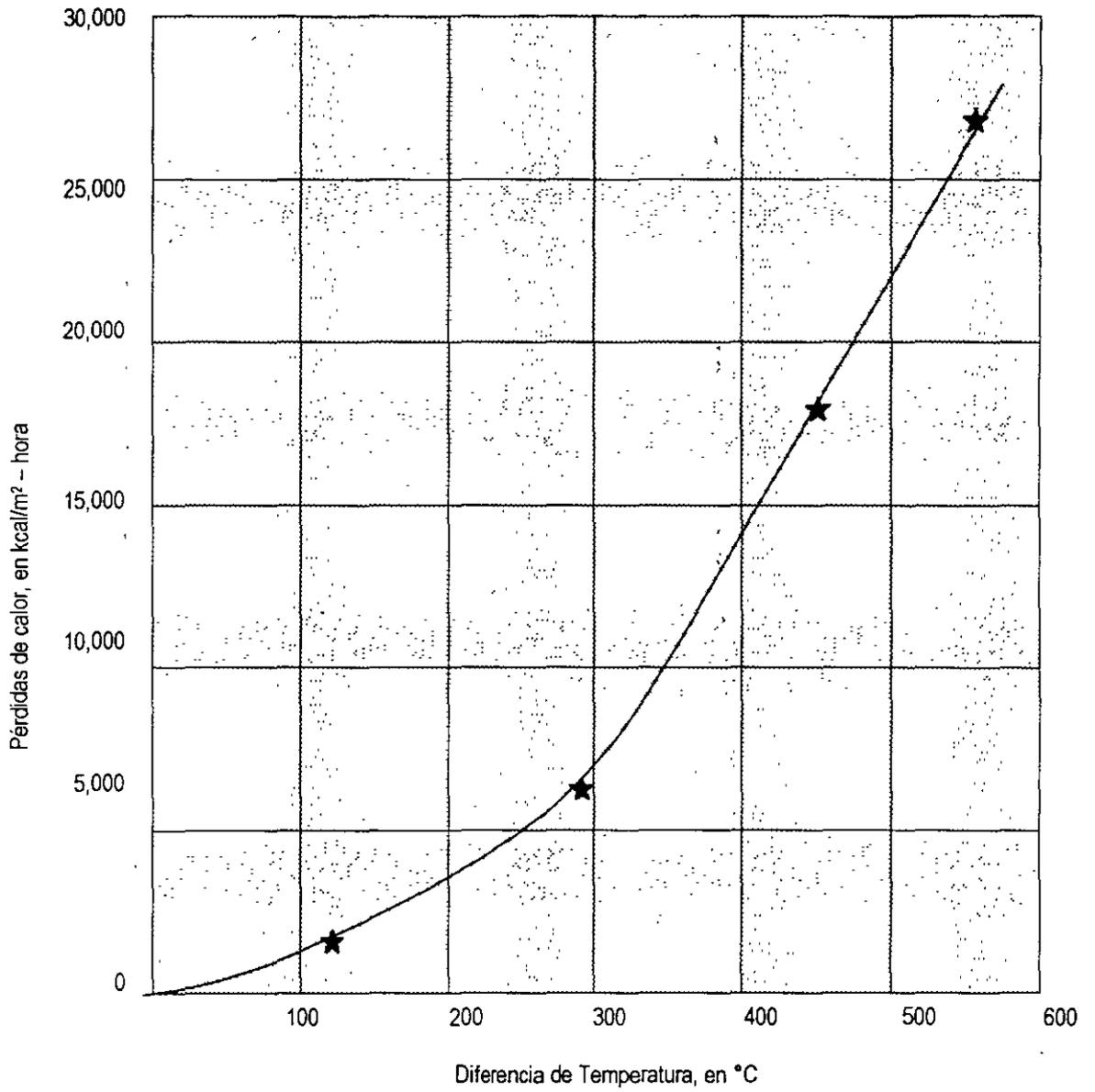
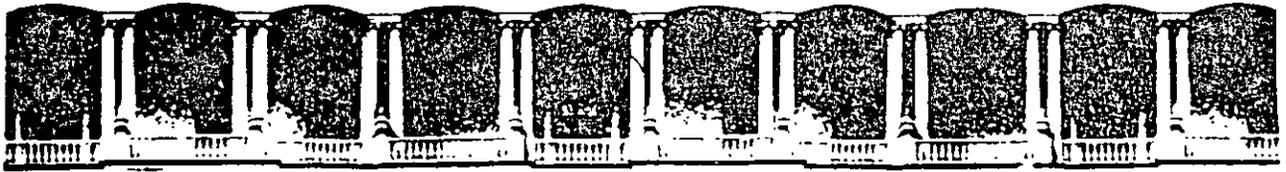


FIG. VII-4.- PERDIDAS DE ENERGÍA DE CALOR EN SUPERFICIES DESNUDAS



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

CURSOS ABIERTOS

**CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN Y USO
EFICIENTE DE ENERGÍA EN CALDERAS**

TEMA :

PROCEDIMIENTOS DE PRUEBAS

**ING. ISIDRO BECERRIL SALINAS
PALACIO DE MINERÍA
SEPTIEMBRE 1999**

VIII. PROCEDIMIENTOS DE PRUEBAS A CALDERAS

1. CATEGORÍAS DE PRUEBAS

Para conocer las condiciones 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 estándar de precisión alto. 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 operativas.
- Pruebas de datos de diseño para obtener información que retroalimenten a los departamentos de diseño o investigación.
- Pruebas de diagnóstico para localizar y medir la extensión de defectos.

2. METAS

Existen diferentes "eficiencias" de una caldera que pueden obtenerse con las pruebas; estas eficiencias pueden definirse en la forma siguiente:

- 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 si toma en cuenta consideraciones realistas de costos del equipo para mejoramiento de la eficiencia que se agrega solo si es económicamente justificable.

2.1 Eficiencia como se encuentra

En la Fig. VIII-1, se muestran los rangos significativos 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 88% para gas combustible
- 78 a 89% para aceite combustible
- 85 a 88% con carbón

En la Tabla VIII-1, se muestra un promedio de eficiencias de operación "como se encuentra" de calderas industriales, tanto de valores medidos como calculados.

2.2 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 VIII-2, se muestran las eficiencias afinadas de calderas industriales de diferentes tipos, diferente combustible y varias capacidades, incluyéndose valores medidos, calculados y de diseño.

2.3 Eficiencia máxima obtenible económicamente

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

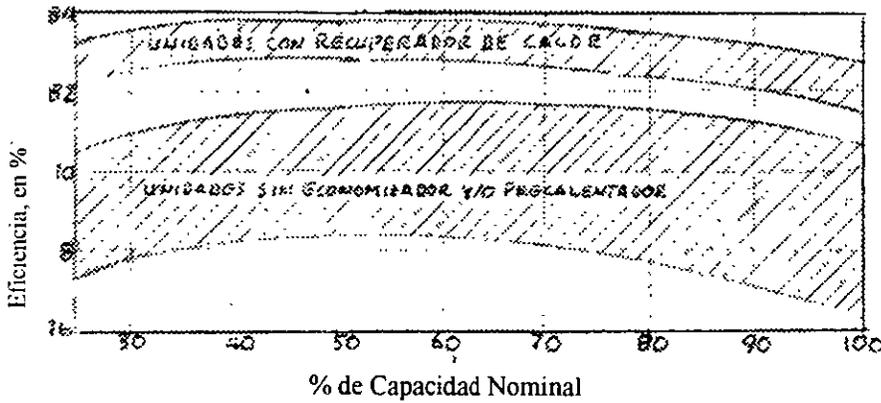
cualquier estimado de los beneficios económicos que determinan la factibilidad económica de instalación de equipo para mejoramiento de la eficiencia debe ser altamente calificado con relación a la situación económica industrial de cada unidad.

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.

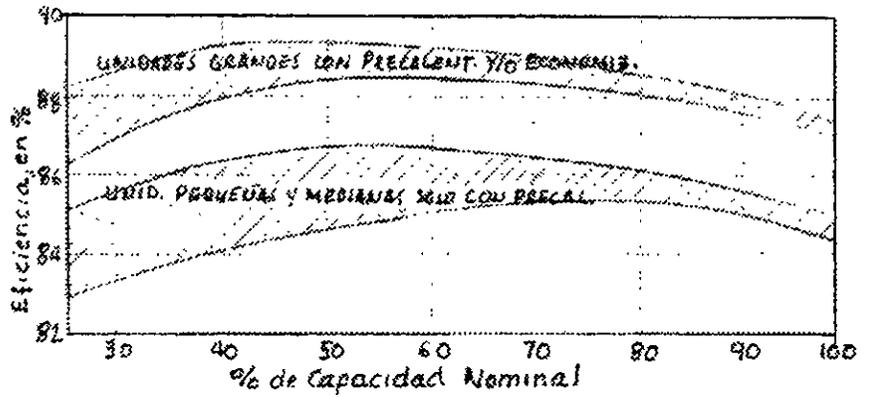
En la Tabla VIII-3, se muestran los niveles de eficiencia máxima obtenible económicamente calculada, basada en la adición de recuperadores de calor en los gases de salida en unidades con potencial suficiente para justificar su adición.

2.4 Eficiencia máxima obtenible

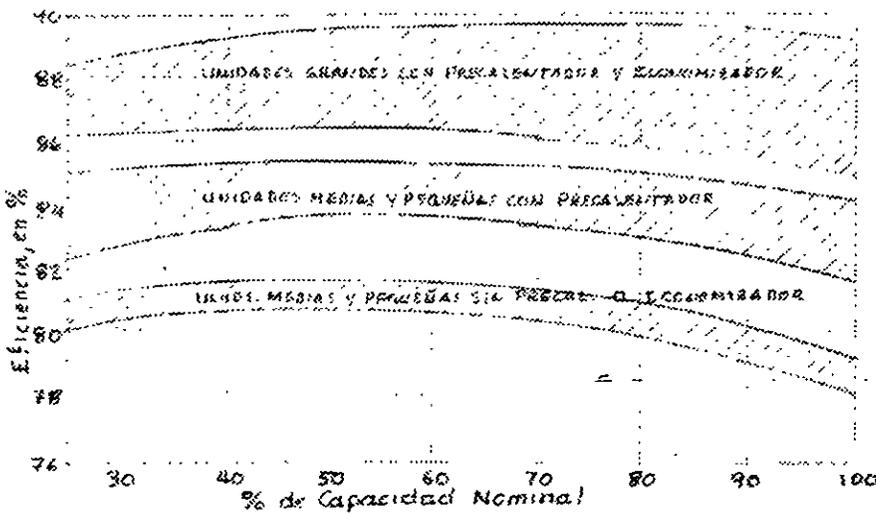
La eficiencia máxima obtenible puede calcularse para cada categoría de caldera sobre la base de aplicar todo el equipo auxiliar requerido para lograr los niveles mínimos de operación prácticos de exceso de aire y de temperatura en la chimenea. En la Tabla VIII-4, se muestran estos resultados con una 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.



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



Comportamiento típico de Calderas de Carbon pulverizado de tubos de agua



Comportamiento típico de Calderas de tubos de agua de Aceite combustible

FIG. VIII-1.- RANGOS DE EFICIENCIAS DE OPERACIÓN DE CALDERAS

Categoría/Comb.	Capacidad (MBtu/hr)							
	10-16		16-100		100-250		250-500	
	Medida	Calculada	Medida	Calculada	Medida	Calculada	Medida	Calculada
Tubos de agua								
Gas	(78.0)	79.9	79.5	79.9	81.2	80.9	(82.8)	81.2
Aceite	(81.5)	83.7	82.8	83.7	(83.4)	84.6	(82.7)	85.3
Carbón-Stoker	*	81.0	76.6	81.2	82.2	81.8	*	82.5
Pulvenzado	*	83.2	*	83.3	(86.6)	86.1	(85.3)	86.3
Tubos de humos								
Gas	(81.0)	79.9	79.5	79.9	NA		NA	
Aceite	(86.3)	83.7	(85.8)	83.7	NA		NA	

**TABLA VIII-1.- PROMEDIO DE EFICIENCIA DE CALDERAS
"COMO SE ENCUENTRAN", EN %**

Categoría/Comb.	Capacidad (10 ⁶ Btu/hr)											
	10-16			16-100			100-250			250-500		
	Medida	Diseño	Calculada	Medida	Diseño	Calculada	Medida	Diseño	Calculada	Medida	Diseño	Calculada
Tubos de agua												
Gas	(78.4)	*	80.1	81.2	80.2	80.2	81.2	82.0 85.1	81.7	(83.7)	(83.4)	82.0
Aceite	*	*	84.1	83.7	82.5	84.2	82.8	(82.9)	85.5	(81.5)	*	86.2
Carbón-Stoker	*	*	81.3	80.9	(86.6)	81.0	83.6	(86.3)	82.0	*	*	82.7
Pulvenzado	*	*	83.8	*	*	83.9	(86.1)		86.5	(85.4)	(88.0)	86.7
Tubos de humos												
Gas	(81.2)	(82.0)	80.1	(81.9)	(83.0)	80.2	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Aceite	86.2)	(85.0)	84.1	(87.4)	(85.0)	84.2	NA	NA	NA	NA	NA	NA

TABLA VIII-2.- PROMEDIO DE EFICIENCIA DE CALDERAS AFINADAS, EN %

En la Tabla VIII-5, 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.

Categoría/Comb	Capacidad (MBtu/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
Carbón				
Stoker	81.0	83.9	85.5	85.8
Pulverizado	83.3	86.8	88.8	89.1

TABLA VIII-3.- NIVELES DE EFICIENCIA MAXIMA ECONÓMICAMENTE OBTENIBLE, EN %.

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

TABLA VIII-4.- NIVELES DE EFICIENCIA MAXIMA OBTENIBLE, EN %

Fuel	10-16 k lb/hr										10-100 k lb/hr									
	Base η	Afinada η $\Delta\eta$ %Fuel			Max. Econ. Abtenible η $\Delta\eta$ %Fuel			Máxima Abtenible η $\Delta\eta$ %Fuel			Base η	Afinada η $\Delta\eta$ %Fuel			Max. Econ. Abtenible η $\Delta\eta$ %Fuel			Máxima Abtenible 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
Carbón-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
	100-250 k lb/hr										250-500 k lb/hr									
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
Carbón-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 VIII-5.- POTENCIAL DE CONSERVACION DE ENERGIA EN CALDERAS INDUSTRIALES, EN %.

3. PREPARACION PARA LA PRUEBA

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.

3.1 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 medición de emisiones excesivas de CO se emplean en el quemado de gas natural.

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

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

3.2 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.

3.3 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 O₂ puede resultar en una apariencia diferente de la flama:

- las flamas pueden parecer creciendo en volumen y "llenar" mas completamente el hogar;
- algunas veces las flamas pueden mostrar una apariencia de rodado "perezoso";
- el color puede cambiar con fuegos de gas natural volviéndose más visibles o luminosas;
- en flamas de aceite y carbón se vuelven amarillas oscuras o naranjas.

4. PRINCIPALES FACTORES QUE CONTROLAN LA EFICIENCIA

4.1 Pérdidas principales

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 purgas 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 aísla los componentes considerados como parte de la caldera de aquellos que están excluidos. En la Fig. VIII-2, 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.

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.

4.2 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).

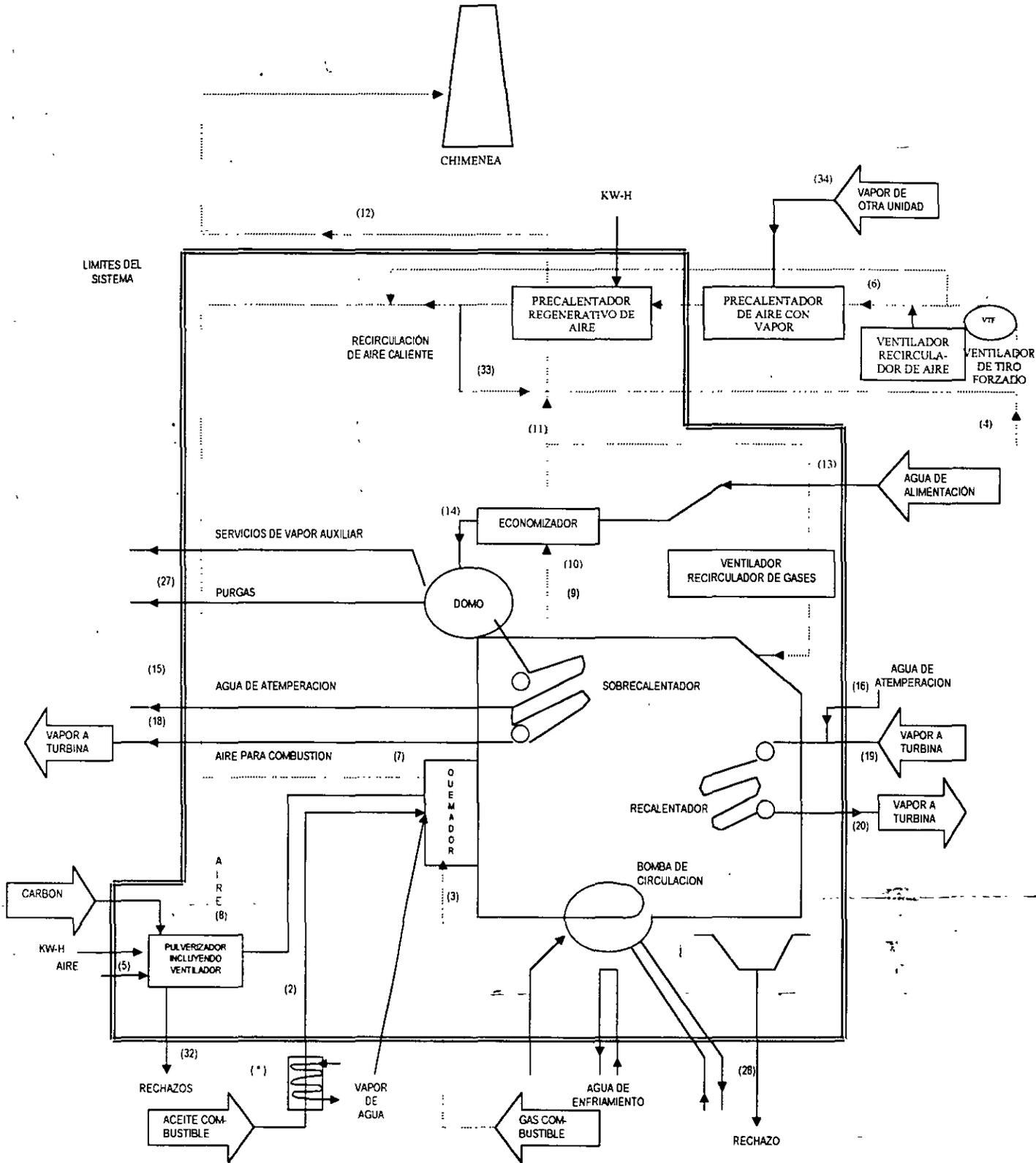


FIG. VIII-2.- DIAGRAMA DE FLUJO UNIDAD DE GENERACIÓN DE VAPOR DE AGUA

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 desarrollarán 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.

4.3 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.

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 éstas calderas, la magnitud de la 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.
- Exceso de aire.
- Tipo de quemador.
- Balance de combustión entre quemadores.

4.4 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. VIII-3, se muestran las pérdidas por radiación aproximadas, desarrolladas por la AMBA.

La cantidad de calor perdido en ésta 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. VIII-3 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 éstas pérdidas son inevitables, y cuando el aislamiento y el refractario del hogar están deteriorados, se incrementan en todas las cargas.

4.5 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.

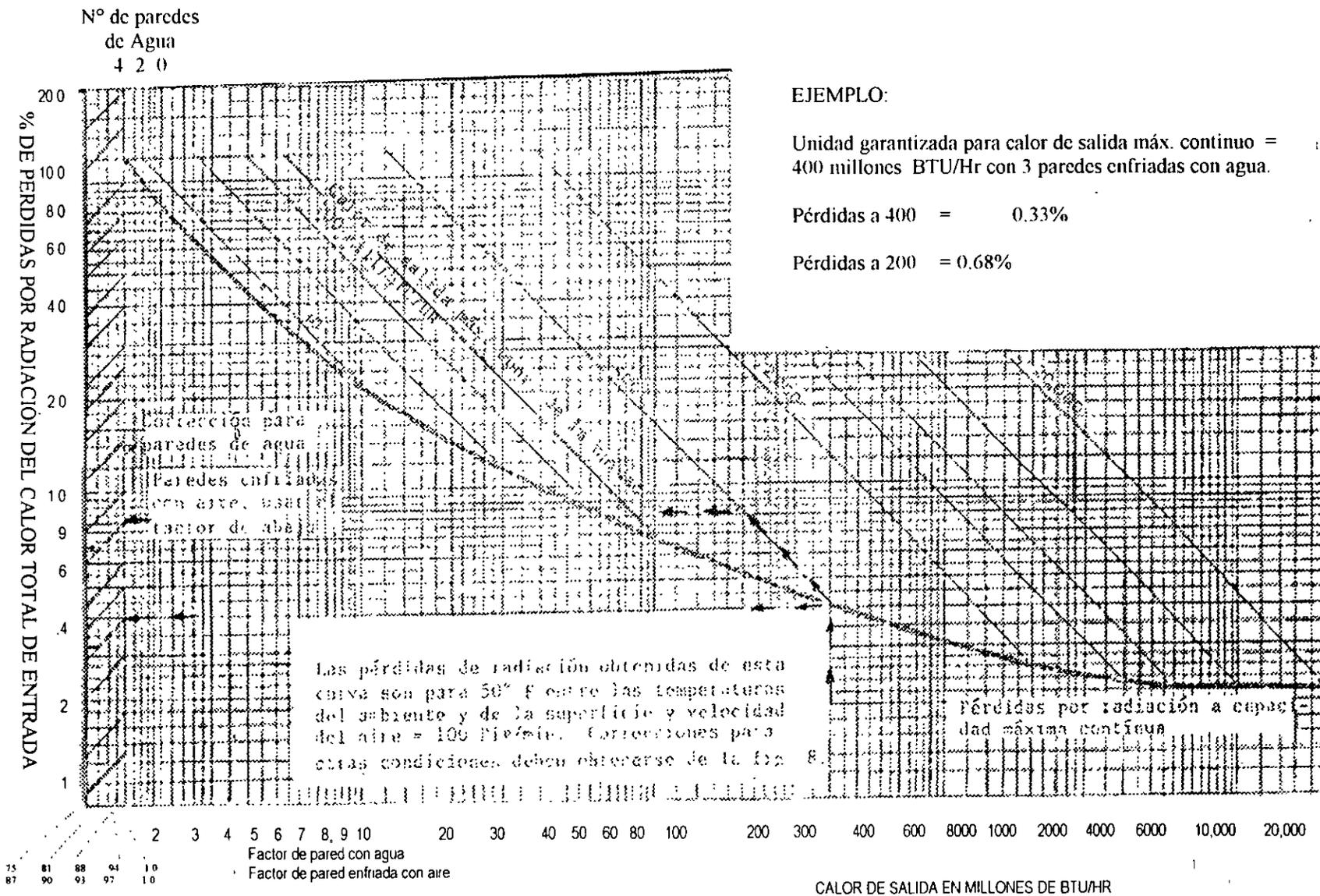
En la Fig. VIII-4, se muestra la importancia de la carga, en donde se observa como las varias pérdidas de eficiencia cambian con las variaciones de carga.

Como se observa en la Fig. VIII-5, el cambio en exceso de O₂, con la carga tiene una fuerte influencia en la eventual eficiencia contra el perfil de carga; cuando la caldera se trabaja con exceso de O₂ constante sobre el rango de cargas, la eficiencia pico real puede ocurrir algo abajo del pico de carga, pero el perfil de la eficiencia permanece casi "plano" sobre una gran porción del rango de cargas.

Por otra parte, cuando se incrementa el exceso de O₂ al reducirse la carga (una condición común en muchas calderas), la eficiencia disminuye mas rápidamente con la carga; en este caso, es ventajoso operar lo mas 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.

FIG. VIII-3.- CARTA DE PERDIDAS POR RADIACION (ABMA)



EJEMPLO:

Unidad garantizada para calor de salida máx. continuo = 400 millones BTU/Hr con 3 paredes enfriadas con agua.

Pérdidas a 400 = 0.33%

Pérdidas a 200 = 0.68%

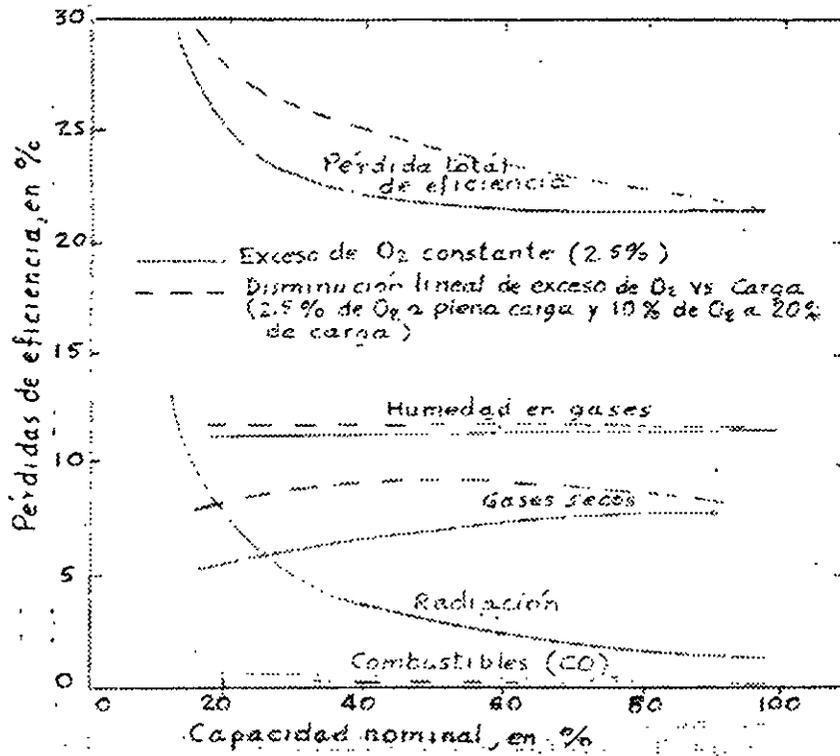


FIG. VIII-4.- VARIACION DE PERDIDA DE EFICIENCIA EN CALDERAS, CON CAMBIOS REGIMENES DE FUEGOS

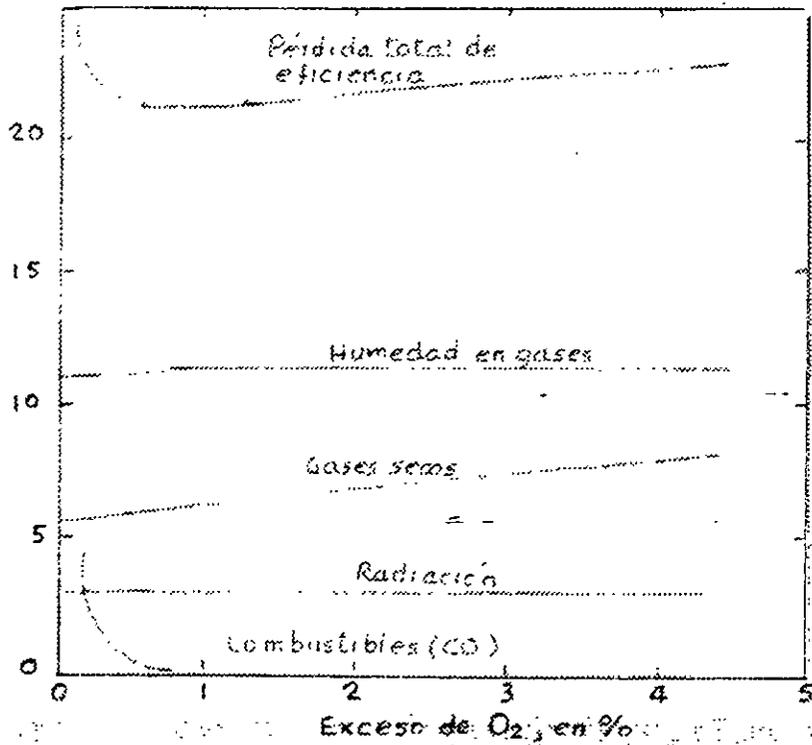


FIG. VIII-5.- VARIACION DE PERDIDA DE EFICIENCIA EN CALDERAS, CON CAMBIOS EN EL EXCESO DE O₂

5. METODOS DE CALCULO

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

- Método de entradas-salidas de calor.
- Método de pérdidas 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. Usando 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 debida 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:

$$\text{Eficiencia} = \eta (\%) = \frac{\text{salidas}}{\text{entradas}} \times 100$$

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

como:

$$\text{salidas} = \text{entradas} - \text{pérdidas}$$

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

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

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

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

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

Método de entradas y salidas:

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

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

$$\eta = \frac{0.85}{0.05} \times 10 = 81\% (-4.7\%)$$

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

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

Método de pérdidas:

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

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

$$\eta = 85\%$$

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

$$\eta = 100 - \frac{0.15}{0.05} \times 100 = 85.7\% \text{ (+0.8\%)}$$

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

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

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, como el mostrado en la Tabla VIII-6.

Este código ASME ha venido a ser el procedimiento "estándar" 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.

También existen formas de calcular la eficiencia aproximada de la Caldera con solo medir, el exceso de aire, el O₂ ó CO₂ y la temperatura de salida de gases, utilizando tablas como la mostrada en la Fig. VIII-6.

TABLA VIII- 6

**CALCULO DE LAS PERDIDAS DE CALOR POR LA CHIMENEA,
POR EL METODO CORTO DE ASME**

Para este método se requiere hacer cálculos separados de:

- Pérdidas de calor por gases secos
- Humedad en el combustible
- Humedad en los gases por Hidrógeno en el combustible

La suma de éstas tres pérdidas forman las pérdidas de calor por la chimenea.

CALCULOS

1. Pérdidas de calor por gases secos Pgs

$P_{gs} = P_1 \times 0.24 (T_g - T_a)$, en kcal/kg de combustible

en donde :

$$P_1 = \frac{11 \text{ CO}_2 + 8 \text{ O}_2 + 7 (\text{CO} + \text{N}_2)}{3 (\text{CO}_2 + \text{CO})} \times \left(\frac{\%C}{100} + \frac{\%S}{267} \right), \text{ en } \frac{\text{Kg gas seco}}{\text{Kg de combustible}}$$

T_g = Temperatura de gases a la salida, en °C

T_a = Temperatura de entrada del aire para la combustión, en °C

%C, %S = % en peso del Carbono y Azufre con el combustible (por análisis)

O_2 , CO_2 , CO , N_2 = % de gases en volumen.

2. Pérdidas de calor por combustión del Hidrógeno, Pch

$$P_{ch} = 9 \left(\frac{H_2}{100} \right) (h_g - h_a), \text{ en kcal/kg de combustible}$$

3. Pérdidas de calor por humedad en el combustible, Phc

$P_{hc} = \% \text{ de humedad } (h_g - h_a)$, en kcal/kg de combustible

en donde:

H_2 % de Hidrógeno en peso en el combustible

% de humedad = % de humedad en peso en el combustible

h_g = Entalpia del vapor de agua a 0.007 kg/cm^2 y a T_g

h_a = Entalpia del agua a T_a

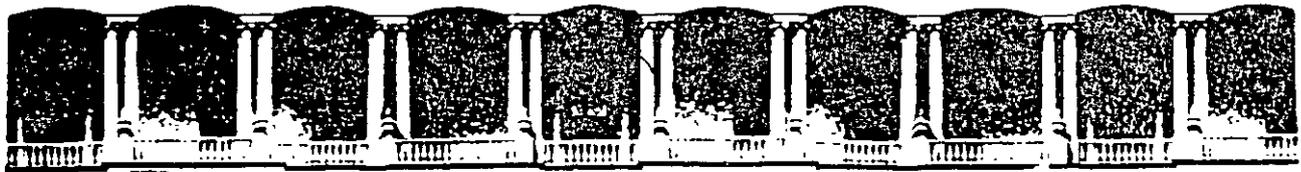
$$\text{Exceso de aire en \%} = 100 \frac{\text{O}_2 - \text{CO}/2}{0.2682 \text{ N}_2 - (\text{O}_2 - \text{CO}/2)}$$

FIG. VIII-6

**APPENDIX A
FUEL OIL No. 2
300°F to 450°F**

EXIT GAS HEAT LOSSES

%	%	%	NET STACK TEMPERATURE DEG F															
			EXCESS OXIGEN		FLUE GAS TEMPERATURE		COMBUSTION AIR TEMPERATURE											
AIR		CO ₂	300	310	320	330	340	350	360	370	380	390	400	410	420	430	440	450
0.0	0.0	15.7	11.5	11.7	11.9	12.1	12.2	12.4	12.6	12.8	12.9	13.1	13.3	13.5	13.7	13.8	14.0	14.2
2.3	0.5	15.3	11.6	11.8	12.0	12.2	12.4	12.6	12.7	12.9	13.1	13.3	13.5	13.7	13.8	14.0	14.2	14.4
4.6	1.0	15.0	11.8	12.0	12.1	12.3	12.5	12.7	12.9	13.1	13.3	13.5	13.6	13.8	14.0	14.2	14.4	14.6
7.1	1.5	14.6	11.9	12.1	12.3	12.5	12.7	12.9	13.1	13.3	13.4	13.6	13.8	14.0	14.2	14.4	14.6	14.8
9.8	2.0	14.2	12.1	12.2	12.4	12.6	12.8	13.0	13.2	13.4	13.6	13.8	14.0	14.2	14.4	14.6	14.8	15.0
12.5	2.5	13.8	12.2	12.4	12.6	12.8	13.0	13.2	13.4	13.6	13.8	14.0	14.2	14.4	14.6	14.8	15.0	15.2
15.5	3.0	13.5	12.4	12.6	12.8	13.0	13.2	13.4	13.6	13.8	14.0	14.2	14.4	14.6	14.8	15.1	15.3	15.5
18.5	3.5	13.1	12.5	12.7	13.0	13.2	13.4	13.6	13.8	14.0	14.2	14.4	14.7	14.9	15.1	15.3	15.5	15.7
21.8	4.0	12.7	12.7	12.9	13.1	13.4	13.6	13.8	14.0	14.2	14.5	14.7	14.9	15.1	15.3	15.6	15.8	16.0
25.3	4.5	12.3	12.9	13.1	13.4	13.6	13.8	14.0	14.2	14.5	14.7	14.9	15.1	15.4	15.6	15.8	16.0	16.3
29.0	5.0	12.0	13.1	13.3	13.6	13.8	14.0	14.3	14.5	14.7	15.0	15.2	15.4	15.6	15.9	16.1	16.3	16.6
32.9	5.5	11.6	13.3	13.6	13.8	14.0	14.3	14.5	14.7	15.0	15.2	15.5	15.7	15.9	16.2	16.4	16.7	16.9
37.0	6.0	11.2	13.5	13.8	14.0	14.3	14.5	14.8	15.0	15.3	15.5	15.8	16.0	16.3	16.5	16.7	17.0	17.2
41.5	6.5	10.8	13.8	14.0	14.3	14.6	14.8	15.1	15.3	15.6	15.8	16.1	16.3	16.6	16.8	17.1	17.4	17.6
46.2	7.0	10.5	14.1	14.3	14.6	14.8	15.1	15.4	15.6	15.9	16.2	16.4	16.7	16.9	17.2	17.5	17.7	18.0
51.4	7.5	10.1	14.3	14.6	14.9	15.2	15.4	15.7	16.0	16.2	16.5	16.8	17.1	17.3	17.6	17.9	18.1	18.4
56.9	8.0	9.7	14.6	14.9	15.2	15.5	15.8	16.1	16.3	16.6	16.9	17.2	17.5	17.7	18.0	18.3	18.6	18.9
62.8	8.5	9.3	15.0	15.3	15.6	15.8	16.1	16.4	16.7	17.0	17.3	17.6	17.9	18.2	18.5	18.8	19.1	19.4
69.2	9.0	9.0	15.3	15.6	15.9	16.2	16.5	16.8	17.2	17.5	17.8	18.1	18.4	18.7	19.0	19.3	19.6	19.9
76.2	9.5	8.6	15.7	16.0	16.3	16.7	17.0	17.3	17.6	17.9	18.3	18.6	18.9	19.2	19.5	19.8	20.2	20.5
83.8	10.0	8.2	16.1	16.5	16.8	17.1	17.5	17.8	18.1	18.5	18.8	19.1	19.4	19.8	20.1	20.4	20.8	21.1
92.1	10.5	7.9	16.6	16.9	17.3	17.6	18.0	18.3	18.7	19.0	19.4	19.7	20.1	20.4	20.8	21.1	21.5	21.8
101.2	11.0	7.5	17.1	17.5	17.8	18.2	18.6	18.9	19.3	19.6	20.0	20.4	20.7	21.1	21.5	21.8	22.2	22.6
111.3	11.5	7.1	17.7	18.0	18.4	18.8	19.2	19.6	20.0	20.3	20.7	21.1	21.5	21.9	22.2	22.6	23.0	23.4
122.5	12.0	6.7	18.3	18.7	19.1	19.5	19.9	20.3	20.7	21.1	21.5	21.9	22.3	22.7	23.1	23.5	23.9	24.3
134.9	12.5	6.4	19.0	19.4	19.8	20.3	20.7	21.1	21.5	22.0	22.4	22.8	23.2	23.7	24.1	24.5	24.9	25.4
148.9	13.0	6.0	19.8	20.2	20.7	21.2	21.6	22.0	22.5	22.9	23.4	23.8	24.3	24.7	25.2	25.6	26.1	26.5
164.7	13.5	5.6	20.6	21.2	21.6	22.1	22.6	23.1	23.5	24.0	24.5	25.0	25.5	25.9	26.4	26.9	27.4	27.9
182.7	14.0	5.2	21.7	22.2	22.7	23.2	23.7	24.2	24.8	25.3	25.8	26.3	26.8	27.3	27.8	28.4	28.9	29.4
203.4	14.5	4.9	22.8	23.4	23.9	24.5	25.0	25.6	26.2	26.7	27.3	27.8	28.4	28.9	29.5	30.0	30.6	31.2
227.5	15.0	4.5	24.2	24.8	25.4	26.0	26.6	27.2	27.8	28.4	29.0	29.6	30.2	30.8	31.4	32.0	32.6	33.2
255.8	15.5	4.1	25.8	26.5	27.1	27.8	28.4	29.1	29.7	30.4	31.0	31.7	32.3	33.0	33.7	34.3	35.0	35.6
289.5	16.0	3.7	27.7	28.5	29.2	29.9	30.6	31.3	32.0	32.8	33.5	34.2	34.9	35.6	36.4	37.1	37.8	38.5



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

CURSOS ABIERTOS

**CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN Y USO
EFICIENTE DE ENERGÍA EN CALDERAS**

TEMA :

RECUPERACIÓN DE CALOR

**ING. JUAN PELAYO ROJAS
PALACIO DE MINERÍA
SEPTIEMBRE 1999**

IX. RECUPERACION DE CALOR

1. CONCEPTOS GENERALES

El valor de la recuperación del calor de desecho esta en el hecho de que sustituye entradas adicionales de energía, reduciendo los costos totales de energía.

Los gases de salida de combustión de la caldera representan del 17% al 30% de oportunidades para inversiones de ahorros. La tecnología de recuperación de calor de desecho, incluye planteamientos prácticos y otros conceptos para la utilización de la energía recuperada.

El promedio de temperatura de los gases de salida de la Caldera es de unos 200°C y varía de 180°C a 350°C; salen a una temperatura más alta que la temperatura de vapor para que tenga lugar la transferencia de calor. En general, la aproximación de temperatura de salida se eleva de 25°C a 85°C desde baja carga hasta la máxima, aunque muchas pruebas han mostrado que éstos números pueden varia en forma muy amplia.

Un uso adecuado de la energía de desecho es crítico para cualquier proyecto de recuperación de calor de desecho porque no importa que tanta energía se pueda recuperar, porque lo único que ahorrará dinero es el uso real de la energía en las instalaciones para disminuir la cantidad de energía externa que se tenga que comprar. Los usos típicos de energía de calor de desecho son las siguientes:

- Calentamiento del agua de alimentación
- Calentamiento del agua de repuesto
- Pre-calentamiento del aire para combustión
- Calentamiento de proceso
- Agua caliente doméstica
- Generación de electricidad

Si el calor de desecho se puede utilizar en la propia caldera se tienen ventajas considerables porque el proceso se autocontrola; si la misma energía se utiliza en una planta o edificio, entonces la demanda puede variar en forma diferente a la operación típica de la caldera y se requieren controles adicionales.

Uno de los factores mas importantes que influyen en la recuperación de calor de los gases de escape es el problema de corrosión que acompaña al enfriamiento de los gases. Debido a que el punto de rocío del ácido sulfúrico es más alto que el punto de rocío del vapor de agua, los esfuerzos de recuperación de calor eventualmente deben competir con el problema del punto de rocío del ácido.

El punto de rocío del ácido es la temperatura a la cual se empieza a formar el ácido; esta temperatura varía con el contenido de azufre en el combustible. Para evitar el efecto corrosivo del ácido, la práctica tradicional ha sido la de limitar la temperatura de salida de gases a

175°C, aunque se han desarrollado ya materiales que pueden operar satisfactoriamente abajo del punto de rocío del ácido.

2. BASES PARA LA RECUPERACIÓN DE CALOR DE DESECHO

Los gases de combustión contienen tanto gases secos como humedad; la cantidad de humedad en los gases varía con la cantidad de hidrógeno (H) en el combustible: cada kg de H en el combustible se combina con oxígeno (O) para formar 9 kg de agua (aprox.). Esta agua está en estado sobrecalentado y contiene más de la mitad de la energía en la corriente de gases.

Los gases secos en los gases de salida están formados por la combustión de carbono (C) a bióxido de carbono (CO₂) más nitrógeno (N) que no interviene en el proceso de combustión y cualquier exceso de aire mayor a la cantidad necesaria para la combustión. La composición de H y C de los varios combustibles determinan las pérdidas de humedad y de gases secos.

Calor sensible Q_s : Es el calor que puede ser sentido con un termómetro u otro instrumento sensor de temperatura. La fórmula para la transferencia de calor es:

$Q_s = W C_p (T_2 - T_1)$, en kcal/h, en donde:

W = régimen de flujo en kg/h

C_p = calor específico, en kcal/kg °C.

T_2 = temperatura de la corriente, en °C

T_1 = temperatura de referencia, en °C

Calor latente Q_l . Es el calor requerido para cambio de fase, p.e., para cambiar un líquido a un vapor o viceversa, sin cambio en la temperatura. La fórmula para transferencia de calor latente es.

$Q_l = WH$, en kcal/h, en donde:

W = régimen de flujo, en kg/h

H = calor de evaporación (cambio de estado), en kcal/kg.

El tipo de combustible utilizado afecta al calor de desecho y recuperación en las formas siguientes:

- Los de mayor contenido de hidrógeno tienen más vapor de agua y mayores cantidades potenciales de pérdidas de calor latente.
- Las calderas que queman aceite combustible y representan a los mejores candidatos para recuperación de calor.
- El tipo de combustible también afecta la mantenibilidad y la vida de servicio de un sistema recuperador de calor.
- El gas natural es un combustible de combustión limpia que causa mínimos problemas de corrosión en los equipos o arquitectura recuperadores de calor.
- El combustóleo contiene cantidades variables de azufre, que lleva a problemas de corrosión ácida.

3. LA CONDENSACIÓN DE HUMEDAD DE LOS GASES DE COMBUSTION

La mayor limitación para incrementar las eficiencias de las calderas es la cantidad de energía unida en el calor latente, en la Fig. IX-1, se muestra la energía disponible en los productos de combustión para gas natural a diferentes niveles de exceso de aire conforme la temperatura baja de 315°C (600°F) al punto de condensación de los gases y recuperación completa del calor sensible y latente.

La condensación de los gases de combustión también es una función de la temperatura, así como del exceso de aire (Fig. IX-2). Después de que se alcanza la temperatura inicial de condensación el % de agua condensada depende de que se baje aún más la temperatura, que varía de 55°C a menos de 25°C.

Es posible obtener eficiencias de calderas mayores de 95% si se puede condensar la humedad en los gases de combustión; en la Fig. IX-2, se muestra como la energía recuperable aumenta dramáticamente con la condensación en los gases. La línea recta, característica de la recuperación de calor sensible se curva de 2% a 5% de incremento de eficiencia a 11% - 15% con la recuperación de calor latente.

4. CLASIFICACIÓN DE LOS EQUIPOS RECUPERADORES DE CALOR

Los equipos utilizados en los procesos de recuperación de calor de desecho han sido clasificados en

algunas industrias como regeneradores y recuperadores.

El término de regenerador se refiere al calentamiento y enfriamiento alternado de un medio, como placas, ladrillos u otro material absorbedor de calor de los gases de escape, que después de calentarse cede el calor al aire para combustión o procesos a través del mismo medio, manipulando las corrientes de aire y gases.

Los recuperadores se refieren al tipo de operación (estática) continua o unidad recuperadora de calor, utilizando una pared intermedia entre las corrientes caliente y fría.

No obstante lo anterior, en las plantas de calderas, es mas común referirse a los aparatos recuperadores de calor por su nombre (precalentadores, economizadores, etc.), en lugar de regeneradores o recuperadores.

- Los diferentes tipos de sistemas, equipos o aparatos recuperadores de calor pueden ser categorizados en la siguiente forma:

- Economizadores
- Precalentadores de aire
- Turbuladores (para calderas de tubos de humo)
- Cambiadores de calor por condensación de contacto indirecto
- Cambiadores de calor por condensación de contacto directo
- Tubos de calor
- Cambiador de calor tipo placas
- Rueda de calor

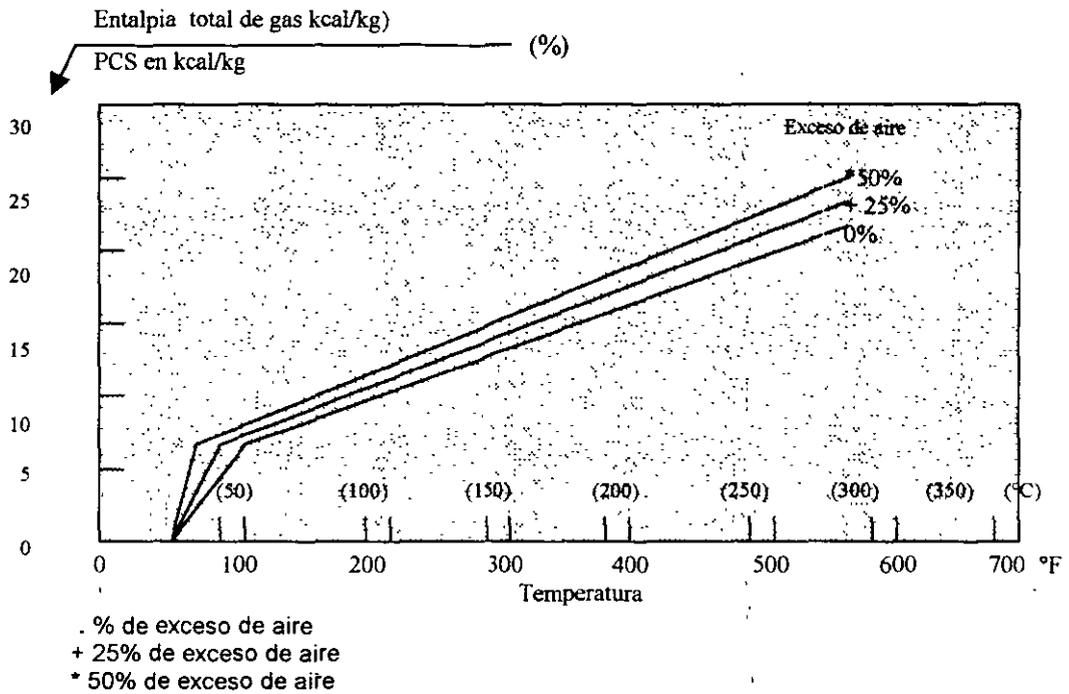


FIG. IX-1.-ENTALPIA DE GASES DE COMBUSTIÓN COMO % DEL PCS DE GAS NATURAL EN FUNCION DE LA TEMPERATURA Y DEL EXCESO DE AIRE

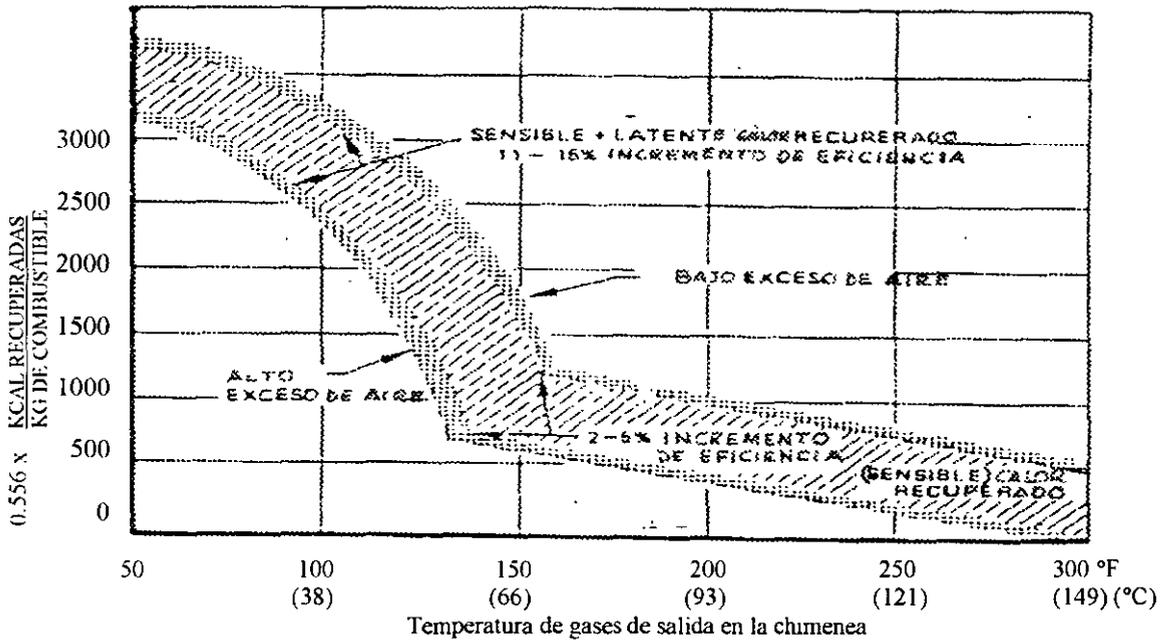


FIG. IX-2.- POTENCIAL DE RECUPERACIÓN DE CALOR EN CALDERAS DE GAS NATURAL POR REDUCCIÓN DE LA TEMPERATURA DE SALIDA DE GASES ABAJO DEL PUNTO DE CONDENSACIÓN. EL POTENCIAL DEPENDE DE LA RELACION DE HIDRÓGENO EN EL COMBUSTIBLE Y DEL EXCESO DE AIRE TÍPICAMENTE ES POSIBLE UN INCREMENTO EN LA EFICIENCIA DE 11 A 15%.

- Cambiador de calor tubular
- Anillo de recuperación de calor
- Bomba de calor

De estos aparatos, solo se describirán los dos primeros, que son los de mayor aplicación.

4.1. 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 económicamente en unidades de tan baja capacidad como de 11000 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 más baja de los gases de escape;
- Necesidades de mantenimiento.

Por lo general en unidades grandes con presiones de vapor de más 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 de 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 puede resultar en un ahorro de combustible hasta de 5%.

Cualquier mejoramiento acompañado por una disminución del exceso de aire del quemador con el precalentamiento de aire para la combustión ayuda a 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. IX-3.

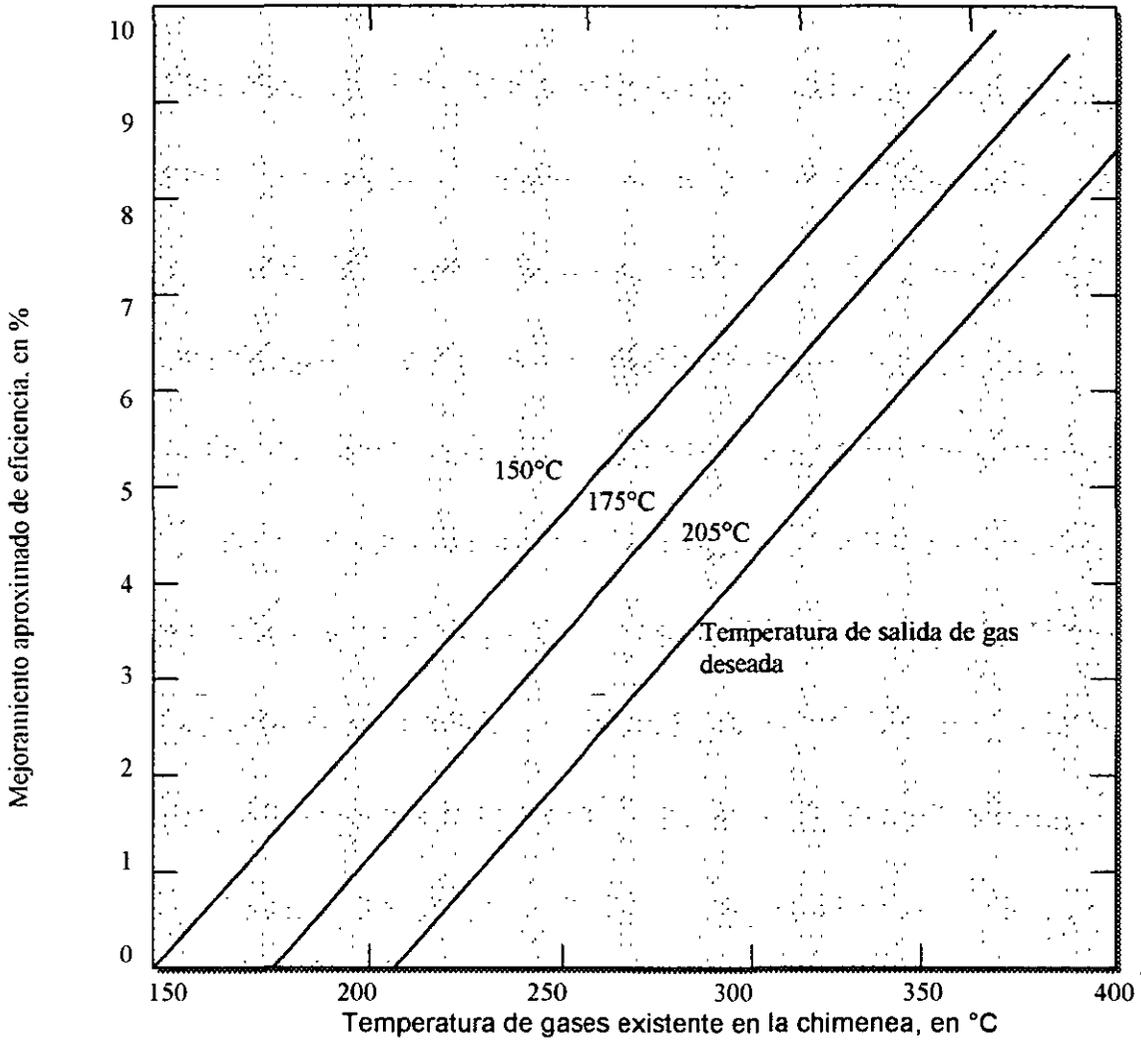


FIG.-IX-3 MEJORAMIENTO APROXIMADO DE EFICIENCIA CON DECREMENTO DE TEMPERATURA DE SALIDA DE GASES

Costos

El costo total de instalación de un precalentador de aire varía 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 de instalación; un reemplazo de superficie de calentamiento de extremo frío puede constar otro 10% del equipo.

De acuerdo con el medio de calentamiento, existen dos tipos básicos de precalentadores de aire:

- Precalentadores de aire con gases de combustión (regenerativo y tubular o recuperativo), mostrados en la Fig. IX-4.
- Precalentadores de aire con vapor (recuperativo)

Los precalentadores de aire regenerativos se emplean en casi todas las calderas modernas, de los cuales el más conocido es el Ljungstrom, mostrado en la Fig. IX-5, 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 de combustión.

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

Los elementos de calentamiento (canastas) se calientan por los gases de combustión cuando pasan a través del flujo de gases y ceden el calor al aire cuando pasan a través del flujo de aire. El eje del rotor puede ser horizontal o vertical, aunque se prefiere el segundo por facilidad de limpieza.

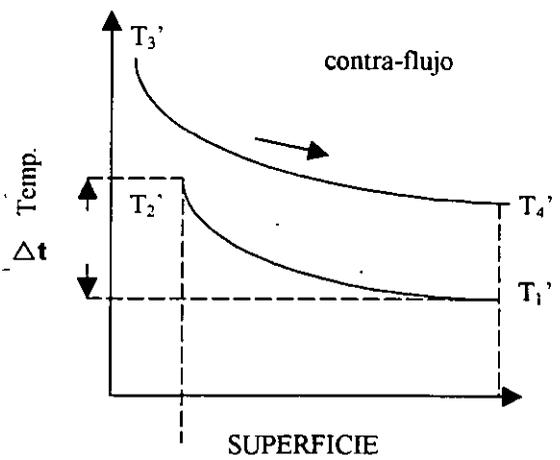
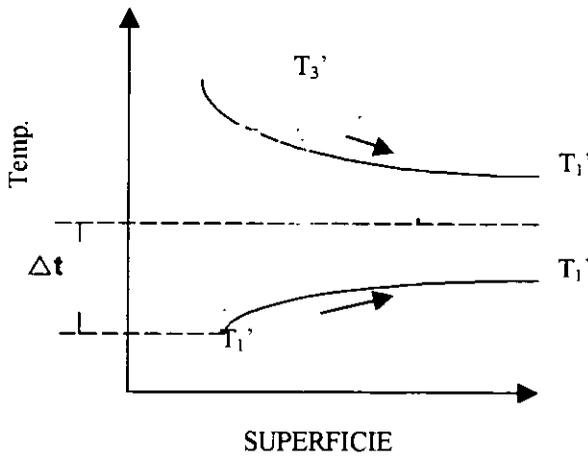
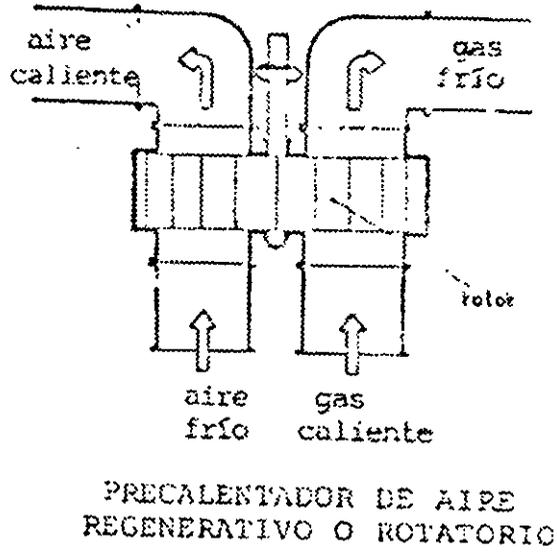
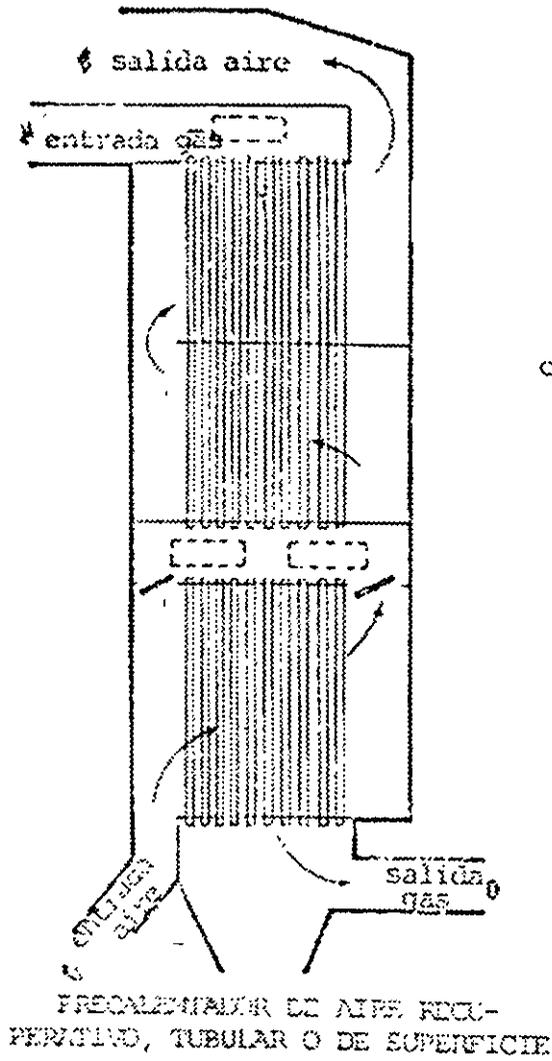


FIG. IX-4.- DIAGRAMAS DE TEMPERATURAS DE FLUIDOS EN PRECALENTADORES DE AIRE DE SUPERFICIE ($\Delta t' > \Delta t$)

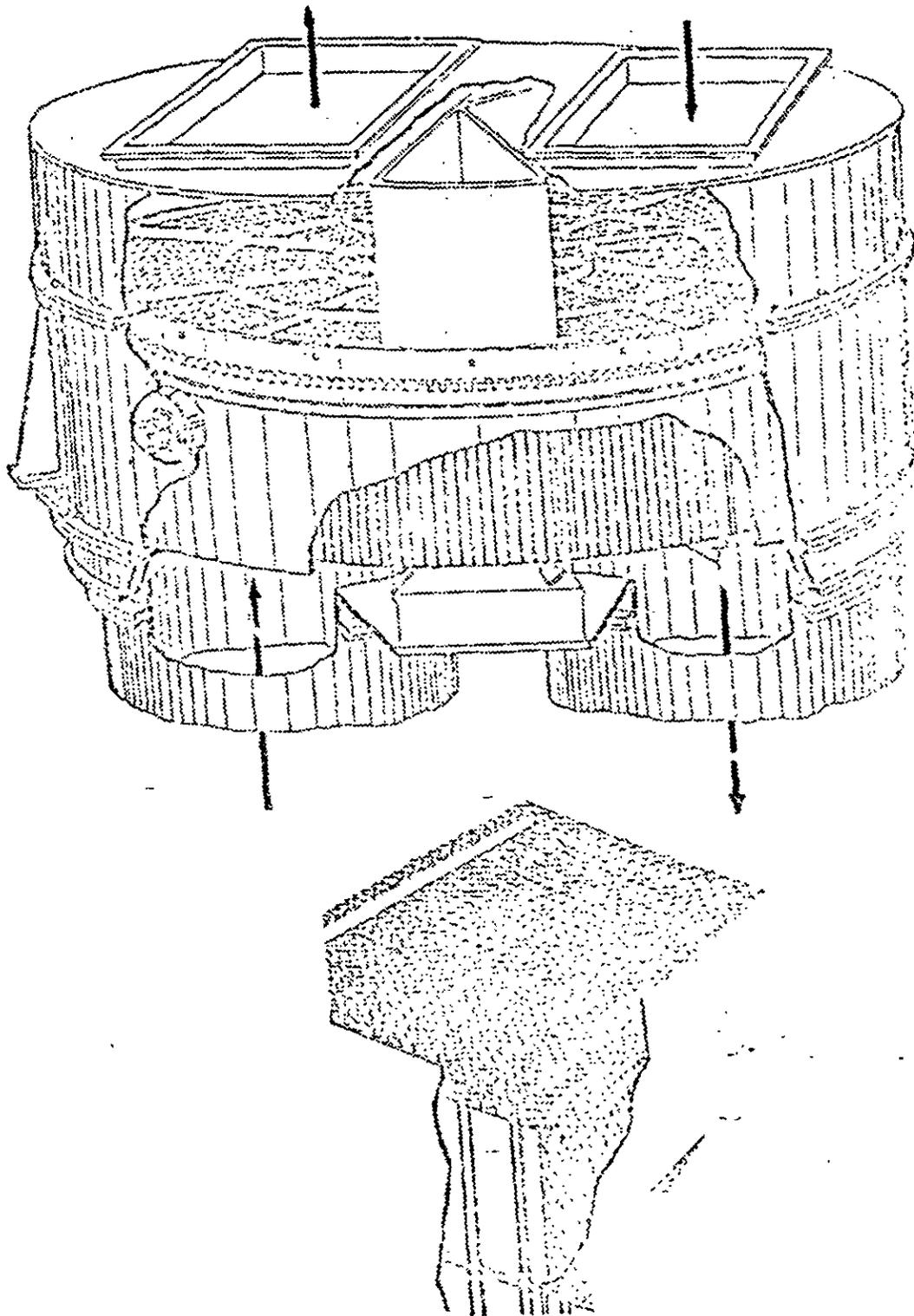


FIG. IX-5.- PRECALENTADOR DE ACEITE TIPO LJUNGSTRON

4.2 Economizadores

Un economizador es un arreglo de tubos de agua de alimentación localizado en el ducto de salida de gases, 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 para 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 diseños 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 23,00 kg de vapor/hora, un economizador es más 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.

Comportamiento

Un aumento en la temperatura del agua de alimentación de 6°C resulta en un ahorro de combustible de aproximadamente 1.0%. La cantidad práctica a la cual se puede incrementar la temperatura del agua de alimentación usando un economizador, está limitada por varios factores, como:

- temperatura de gases de combustión;
- presión de vapor;
- área de la superficie del economizador;
- características de corrosión de los gases de combustión.

El mejoramiento de la eficiencia obtenido con un economizador está reflejada por la temperatura de gases en la chimenea mas baja, y puede ser estimada con la gráfica (Ver Fig. IX-3)

La inter-relación entre la reducción de la temperatura de salida de gases y el incremento en la temperatura del agua de alimentación puede ser estimada sobre la siguiente base:

- tres (3) grados de decremento en la temperatura de los gases de combustión eleva un (1) grado la temperatura del agua de alimentación.

Existe una temperatura máxima de agua de alimentación a la salida del economizador que depende de la presión de operación de la caldera. El ahorro bruto anual de combustible puede estimarse utilizando:

- el mejoramiento de la eficiencia proyectada, el promedio de flujo de vapor y los costos del combustible;
- restando los cargos fijos y los incrementos de costos de operación se obtiene el ahorro neto anual estimado.

Costos

Los costos del equipo y de instalación de adaptaciones de un economizador a un generador de vapor existente varía para cada aplicación; los costos de capital están influenciados por factores como:

- arreglo de los tubos del economizador;
- comportamiento deseado;
- materiales y tamaños de tubos.

Los costos de instalación varían típicamente del 30 al 100% de los costos de capital, dependiendo de lo siguiente:

- espacio disponible;
- modificaciones de ductos;
- precalentamiento de agua de alimentación requerido;
- alteraciones de bombeo y tuberías;
- cambios del ventilador de aire debidos al incremento de las pérdidas de tiro.

Los costos de mantenimiento por lo general se limitan a limpieza interna y externa; los costos de reemplazo de

tubos pueden minimizarse por una selección apropiada de los materiales de tubos del economizador para unas condiciones dadas de gases de combustión.

Tamaño

Los regímenes de transferencia de calor son mas altos cuando la temperatura diferencial entre los gases de combustión y el agua de alimentación es mas grande.

Puesto que el agua de alimentación está a temperatura mas baja que el agua en los tubos de pasos convectivos de la caldera, la absorción de calor de los gases de combustión es potencialmente mas efectivo en el economizador que en las superficies convectivas de la caldera.

Las tendencias de diseño de calderas han hecho uso de la situación anterior incrementando la superficie del economizador con la correspondiente disminución en la superficie de la caldera; el área de la superficie de un economizador por lo general tiene los siguientes valores:

- 25 a 30% de la superficie de calentamiento de la caldera con precalentador de aire;
- 40 a 60% de la superficie de calentamiento de la caldera sin precalentador de aire.

El área de la superficie del economizador está limitada por el incremento de pérdidas de tiro y la diferencial de salida de temperatura entre los gases y el agua de alimentación.

Arreglos

Los economizadores pueden clasificarse como integrales o separados. Los economizadores integrales están arreglados en bancos de tubos horizontales o verticales localizados dentro de la cubierta de la caldera; los tubos verticales son similares aun banco de tubos de caldera y frecuentemente están conectados en ambos extremos con cabezales o domos. Los tubos horizontales se arreglan en espacios muy cercanos y en hileras alternadas.

El espaciado está limitado a un mínimo de 4.4 a 5 cm (1 ¾ a 2") para evitar la acumulación de ceniza y taponamiento del economizador, y mantener las pérdidas de tiro a menos de 10 cm (4") de columna de agua, los tubos horizontales tienen un arreglo de circuito continuo.

Los economizadores separados se localizan corriente abajo de cualquier región convectiva y fuera de la cubierta de la caldera, y por lo general se arreglan horizontalmente. Generalmente la adaptación de economizadores emplean economizadores separados.

Normalmente el flujo de agua en el economizador es de abajo hacia arriba a través de los tubos, permitiendo que cualquier vapor que pueda generarse salga por la parte superior.

Los pasos de gases de combustión son hacia abajo a contra-flujo del agua o cruzando los tubos en pasos múltiples o sencillos; el arreglo a contra-flujo se prefiere porque reduce

el área de la superficie requerida y resulta en pérdidas de tiro mas bajas.

Algunas veces se emplean derivaciones (by pass) y mamparas (baffles) para controlar las temperaturas de gases y de agua de alimentación.

Tubos

Por lo general los tubos de economizador son de acero o de hierro colado y van de 4.4 a 5 cm (1 ¾ a 2") de diámetro exterior. En aplicaciones de alta presión se emplean tubos de acero que ofrecen las siguientes ventajas:

- tubos mas delgados;
- espaciado mas cercano;
- conductividad mas alta;
- costo inicial mas bajo.

El hierro colado se usa en aplicaciones de baja presión, especialmente en donde se espera corrosión.

Algunas veces se usan diseños que combinan hierro colado y acero cuando se desea máxima resistencia a la corrosión tanto interna como externa.

Con frecuencia se usan tubos de superficie aumentada para incrementar la absorción de calor; el tipo de aumento y espaciamiento se determinan por las características del combustible y las previsiones de limpieza. Aletas cortas y con espaciado amplio se emplean con carbón y aceite residual, mientras que aletas largas con espaciamiento cercano se usan con gas natural y

otros combustibles limpios. Las ventajas de tubos con aletas sobre los tubos lisos incluyen:

- costo inicial mas bajo;
- resistencia contra la flexión;
- requerimientos reducidos de tubería.

Normalmente los tubos de superficie extendida se instalan en bancos horizontales en arreglo alternado.

Temperatura del agua a la salida del economizador

Por lo general la temperatura de salida del economizador se mantiene de 20 a 40°C abajo de la temperatura de saturación, para evitar vaporización, golpe de ariete de agua y choque térmico.

En ciertas aplicaciones se emplean economizadores evaporadores para producir parte del vapor; normalmente estos no se emplean en calderas industriales en donde se necesita alto repuesto de agua de alimentación.

En el caso de economizadores adaptados pueden tenerse alteraciones significativas en la temperatura del agua de alimentación con efecto perjudicial en la circulación del agua en la caldera. Usualmente las calderas industriales usan circulación natural del agua, en donde los cambios en la temperatura del agua de alimentación pueden producir una deficiencia en la circulación en algunos circuitos que impiden mantener el flujo suficiente para enfriamiento apropiado. Lo anterior puede requerir

modificaciones a los pasos de transferencia de calor de la caldera existente.

Corrosión interna

Los economizadores están sujetos a corrosión interna por oxígeno disuelto y baja concentración de ion hidróxido; conforme se incrementa la temperatura del agua de alimentación se expulsa el oxígeno de la solución y ataca la superficie interior los tubos.

Por lo anterior, el agua de alimentación se precalienta a 105°C usando un calentador desareador para remover el oxígeno disuelto. También se mantiene un pH entre 8 y 9 en el agua de alimentación recirculando agua de la caldera a la entrada del economizador.

Corrosión externa

Las consideraciones de corrosión exterior que se aplican son las mismas expuestas en la sección anterior de "precalentadores de aire". Puesto que la temperatura de metal del tubo esta muy cerca de la temperatura del agua de alimentación, ésta se mantiene a la entrada a 105°C o mayor de forma que la superficie de metal del tubo este arriba de la temperatura mínima de extremo frío. La temperatura de salida de gases de combustión debe estar al menos 45°C arriba de esa temperatura mínima de extremo frío para proporcionar suficiente transferencia de calor al agua de alimentación.

5. CONCLUSIONES

Debido a la calidad superior de transferencia de calor del agua, el precalentamiento del agua de alimentación es más eficiente y económico que precalentar el aire para la combustión, sin embargo, el aire siempre está disponible a temperatura ambiente con buen potencial para aceptar el calor de los gases de combustión.

Las calderas de tubos de humo, en general no están diseñadas para operar con aire para la combustión precalentado y podría ser impráctico intentar mejorar la eficiencia de la caldera con este tipo de sistema.

Con base en un número de evaluaciones generales considerando todos los factores involucrados que incluyen:

- Beneficios económicos
- Criterios de ingeniería
- Instalación y operación de sistemas de recuperación de calor de desecho

Los principales prospectos para recuperación de calor de desecho que se han desarrollado incluye a los tres sistemas primarios siguientes:

- El economizador convencional
- El cambiador de calor por condensación de contacto indirecto
- Recuperador de calor por condensación de gases de combustión por contacto directo.



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

CURSOS ABIERTOS

**CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN Y USO
EFICIENTE DE ENERGÍA EN CALDERAS**

TEMA :

**TÉCNICAS Y EQUIPOS DE MEDICIÓN DE PRODUCTOS DE
COMBUSTIÓN**

**ING. BERNARDO AGUILAR CALVO
PALACIO DE MINERÍA
SEPTIEMBRE 1999**

X. TÉCNICAS Y EQUIPOS DE MEDICIÓN DE PRODUCTOS DE COMBUSTIÓN (CONTAMINANTES)

1. LAS TÉCNICAS Y EQUIPOS MAS USUALES

Una de las mejores formas de reducir el combustible gastado es monitorear e incrementar la eficiencia de combustión. La cantidad de oxígeno y combustible que salen fuera de la chimenea puede ser medida en varias diferentes formas; éstas mediciones se facilitan por la nueva generación de analizadores basados en microprocesadores con sistemas de autodiagnóstico que son fáciles de calibrar y operar.

Para asegurar que se usa el analizador correcto para el trabajo, los ingenieros y operadores de calderas deben comprender tanto los mecanismos de la combustión como porque las cantidades de exceso de oxígeno y combustible que salen de una chimenea deben conservarse al mínimo.

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

DIOXIDO DE AZUFRE

- ✓ MEDICION POR FLUORESCENCIA
- ✓ MEDICION POR INFRARROJO
- ✓ NO DISPERSIVO
- ✓ CONDENSACION Y TITULACION
- ✓ VOLUMETRICA

TRIOXIDO DE AZUFRE

- ✓ ESPECTROMETRIA VISIBLE DE FLUJO
- ✓ CONTINUO POR DESPLAZAMIENTO
- ✓ MEDIDOR DE PUNTO DE ROCIO ACIDO
- ✓ METODO E.P.A.8

OXIGENO

- ✓ APARATO DE ORSAT
- ✓ METODO PARAMAGNÉTICO
- ✓ CELDA ELECTROQUÍMICA HUMEDA
- ✓ CELDA DE OXIDO DE CIRCONIO

MONOXIDO Y
DIOXIDO DE CARBONO

- ✓ APARATO DE ORSAT
- ✓ MEDICION POR INFRARROJO
- ✓ NO DISPERSIVO

PARTICULAS

- ✓ EQUIPO ISOCINETICO PARA MUESTREO DE PARTICULAS

COMBUSTIBLES (MONÓXIDO DE CARBONO E
HIDRÓGENO)

- ✓ CELDAS ELECTROQUÍMICAS HUMEDAS
- ✓ DETECTOR CATALITICO DE COMBUSTIBLES
- ✓ ABSORCIÓN INFRARROJA NO DISPERSIVA

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

2. BIÓXIDO DE AZUFRE (SO₂)

a) Medición por Florescencia

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

El principio de operación está ilustrado en la Fig. X-1. Por la cámara de medición y a través de un filtro se hacen pasar pulsaciones de luz ultravioleta; estas pulsaciones excitan a las moléculas de SO₂. Cuando las moléculas ya excitada regresan a su estado original, emiten una fluorescencia característica con intensidad linealmente proporcional a la concentración de SO₂ 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 SO₂, CO y CO₂.

La Fig. X-2, 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 SO₂.

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 SO₂.

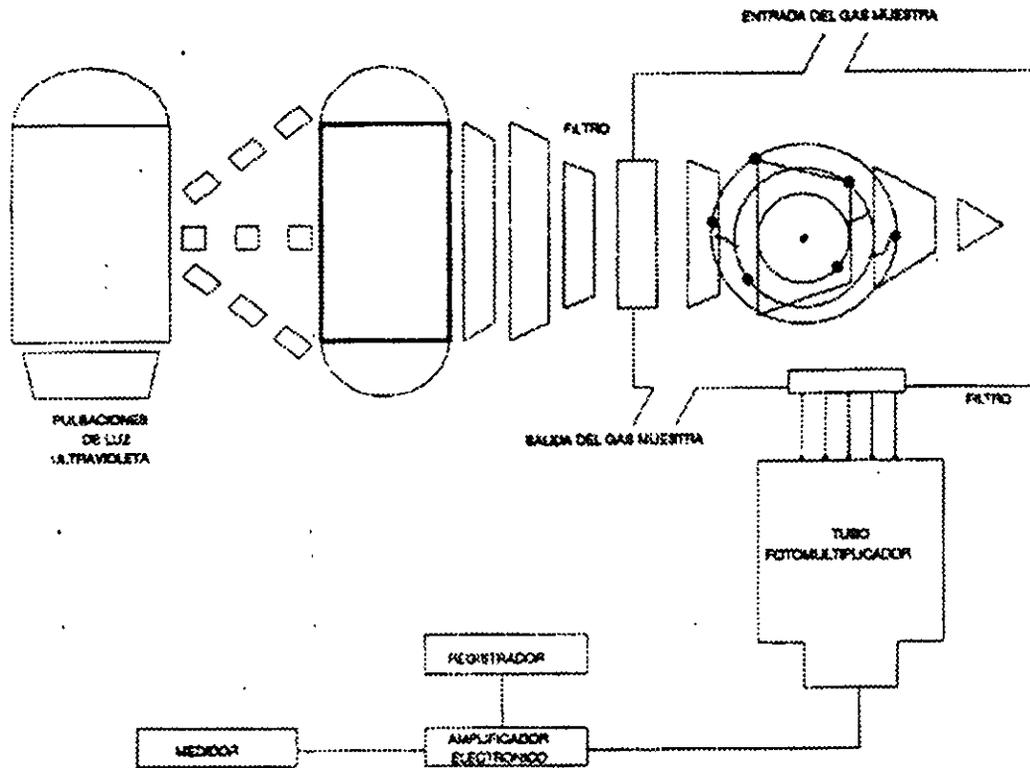


FIG. X-1.- PRINCIPIO DE OPERACION DEL MEDIDOR POR FLUORESCENCIA

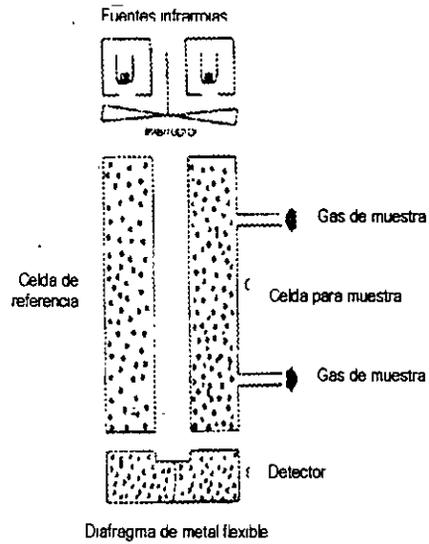


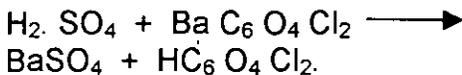
FIG. X-2.- ANALIZADOR INFRARROJO NO DISPERSIVO DE GAS

3. TRIOXIDO DE AZUFRE (SO₃)

a) Medición de Espectrometría visible de Flujo continuo por Desplazamiento

Principio de operación

El SO₃ contenido en los gases, es absorbido como iones de sulfato (SO₄), por contacto directo con una mezcla de isopropanol/agua ((CH₃)₂COH). con una relación de 4:1, la solución se hace pasar a través de un lecho poroso, el cual contiene cloranilato de bario, produciéndose la siguiente reacción:



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

Dado que la reacción anterior es estequiométrica, 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 SO₃ en el gas.

El isopropanol inhibe la oxidación del SO₂, el cual está invariablemente presente y reduce la solubilidad de los sulfatos de bario, los cuales se forman en las primeras etapas del proceso.

b) Medidor de Punto de Rocío Acido.

Principio de operación

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 está 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.

Descripción del equipo

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

La sonda de muestreo, que se introduce en el flujo de gases, contiene el detector de punto de rocío, un termopar y un par de electrodos dentro de la superficie de detección; esta superficie de detección es enfriada 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.

c) Método EPA 8.

En el método 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_3 , contenido en la muestra. Posteriormente pasa por una solución de peróxido de hidrógeno y agua, donde el SO_2 es oxidado hasta ácido sulfúrico. La cantidad de sulfatos presentes en ambas soluciones se determina por titulación volumétrica usando una solución valorada de bario y torino como indicador. Estas cantidades junto con el volumen de gases muestreado (medido en el medidor volumétrico) permite conocer las concentraciones de SO_2 y SO_3 en los gases de combustión.

4. OXIGENO (O_2)

a) Aparato Orsat.

Principio de operación

La figura siguiente X-3, muestra un aparato de Orsat típico. El principio de operación se basa en hacer burbujear un volumen conocido de muestra en una solución capaz de absorber selectivamente el componente que se desea cuantificar;

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

Es uno de los primeros métodos manuales usados que aún se emplea en la actualidad en una muestra que debe ser acondicionada (limpiada, secada y enfriada) y que se pasa a través de una serie de pipetas, cada una de las cuales contiene un reactivo químico separado.

Cada reactivo absorbe un químico diferente del gas, por lo general Oxígeno, monóxido de carbono y bióxido de carbono. Conforme el gas pasa a través de cada pipeta se mide su volumen y cualquier cambio en la medición indica la cantidad que fue absorbida de un gas particular. Las principales desventajas de usar la prueba Orsat son las siguientes:

- Es un trabajo lento y tedioso
- Su precisión depende de la habilidad del operador, y la pureza de los reactivos
- Solo se mide pequeñas muestras y se requiere mucho tiempo para volver a analizar una nueva muestra, perdiendo información de la dinámica real de la combustión de los sistemas de operación.
- Todos los datos tienen que ser registrados manualmente ya que no hay.

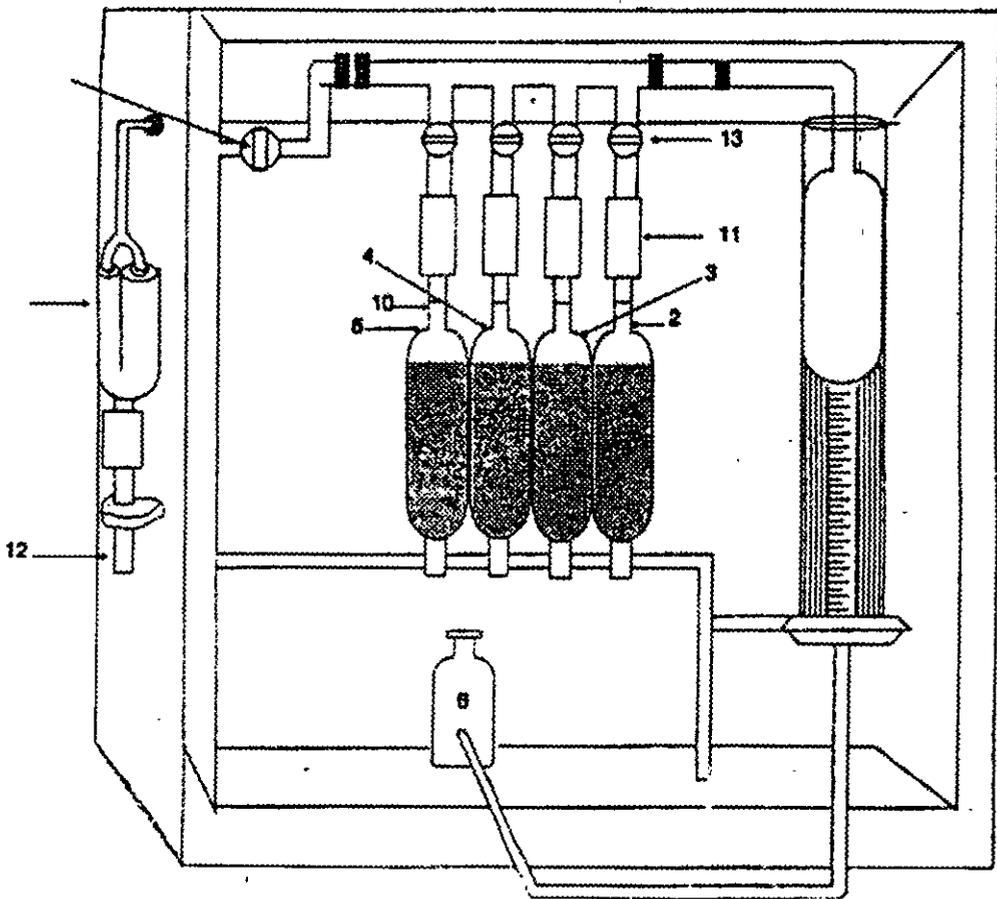
Debido a estos inconvenientes se han desarrollado dispositivos simples menos complejos que usan el proceso de absorción química, como por ejemplo el Bacharach Fyrite.

b) 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.



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

FIG. X-3.- APARATO DE ORSAT

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 este es una función lineal de la susceptibilidad magnética del volumen de gas muestreado, la cual a su vez es proporcional a la concentración de O_2 del gas analizado.

c) Celdas electroquímicas húmedas

Estas celdas usan dos electrodos en contacto con un electrolito acuoso a través del cual se pasan los gases que contienen oxígeno; este oxígeno en el gas entra en reacción química en donde cuatro electrones de cada molécula de oxígeno libera iones hidróxidos en el electrolito hacia un cátodo. A su vez, estos iones hidróxidos reaccionan con un ánodo de plomo o cadmio con la subsecuente liberación de cuatro electrones a un circuito externo. El flujo neto de electrones crea una corriente eléctrica que es proporcional a la cantidad de oxígeno pasando a través de la celda.

Las celdas húmedas requieren acondicionamiento de la muestra de gases antes de que pueda ser liberada hacia la celda, sin un enfriamiento y limpieza, la membrana de la celda rápidamente se recubre y cesa su función. También deben ser almacenadas en contenedores sellados al aire puesto que cualquier oxígeno, no de la muestra de gases causa que se oxide el ánodo.

d) Celdas de Oxido de Circonio

Las celdas de óxido de zirconio se han convertido en los últimos años en el sensor de oxígeno más común para monitorear los gases de combustión. Este sensor se desarrolló a mediados de los 1960's con el programa espacial de los EUA y debido a su inherente habilidad para hacer mediciones en caliente de gases sucios sin acondicionamiento de la muestra se aceptó rápidamente por la industria.

El corazón del elemento sensor es un tubo cerrado o disco hecho de óxido de zirconio cerámico estabilizado con un óxido de itrio o calcio; cubiertas porosas de platino en el interior y exterior sirven como electrodos. A altas temperaturas (arriba de 650°C), las moléculas de oxígeno que entran en contacto con el platino toman cuatro electrones y se vuelven iones de oxígeno muy móviles; conforme la concentración de oxígeno es igual en cada lado de la celda no hay movimiento de iones a través del zirconio.

Cuando los dos electrodos están en contacto con gases que tienen diferentes presiones parciales de oxígeno, los iones se mueven del área de presión más alta a la de más baja, creando una diferencia en el voltaje entre los electrodos.

Cuando la presión parcial de un gas (por lo general aire) se conoce, la corriente eléctrica creada es una medida de la presión y contenido de oxígeno del otro gas. En forma de ecuación, la variación de voltaje es igual a una constante predeterminada multiplicada por el logaritmo de la

relación de los dos diferentes presiones parciales de oxígeno.

La constante está basada en la temperatura de la celda de zirconio, leyes de los gases y valores de electrones libres; la celda produce cero voltaje cuando hay aire en ambos lados. Bajo otras condiciones, este voltaje se incrementa conforme la concentración de oxígeno de la muestra disminuye.

Una de las principales ventajas de la celda de óxido de zirconio es que opera a altas temperaturas lo cual significa que no es necesario enfriar o secar la muestra de gases antes de ser analizada. La mayoría de las celdas de zirconio hacen mediciones directas en o cerca de la chimenea con la única protección de un filtro para mantener la ceniza fuera de la cámara de muestreo; a diferencia de la celda electroquímica húmeda, la celda de óxido de zirconio tiene virtualmente una vida ilimitada sin cubierta.

5. MONÓXIDO Y BIÓXIDO DE CARBONO

Los métodos de Orsat y de Infrarrojo no dispersivo fueron descritos anteriormente.

6. 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 construida 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 Pilot 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: (Fig. X-4)

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

Vo se calcula con:

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

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 (m^3)
 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.

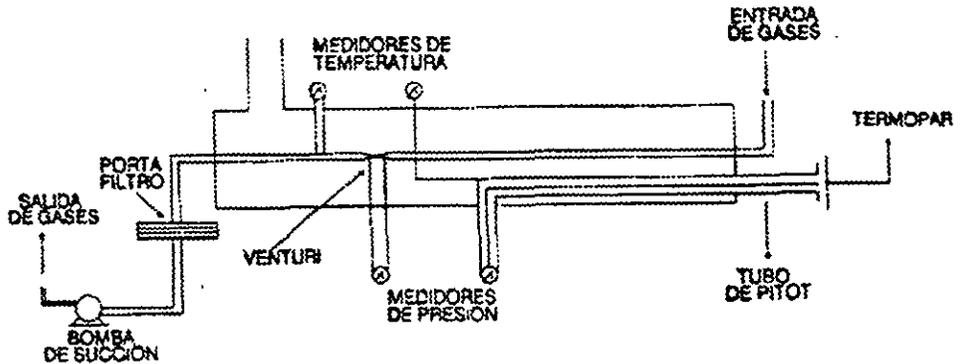


FIG. X-4.- ANALIZADOR DE PARTICULAS

Ventajas y Desventajas de las Técnicas de Medición

técnicas de medición de productos de combustión descritas.

A continuación se presentan algunas de las ventajas y desventajas de las

TECNICAS	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Medición por Fluorescencia. Analizador de SO ₂ .	Respuesta rápida y continua. No presenta interferencias de otros compuestos.	Sólo maneja rangos pequeños menores a 500 ppm.
Medición por Infrarrojo no Dispersivo. Analizadores de CO, CO ₂ y SO ₂ .	Determinación continua del componente de interés en una mezcla. No presenta interferencias, opera en el rango de 0-10000 ppm.	Requiere de un sistema de filtrado y acondicionamiento de los gases a analizar.
Medición por Condensación y Titulación Volumétrica.	Preciso y simple.	Forma indirecta de determinación, se realiza en forma puntual.
Medición por Espectrometría visible de flujo continuo por desplazamiento. Analizador de SO ₃ .	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.

Método E.P.A. 8	Muy preciso. Reconocido por la E.P.A.	Método indirecto, la determinación es puntual.
Aparato de Orsat Medición de CO, CO ₂ y O ₂ .	De fácil manejo.	Método 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 Isocinético para muestreo de Partículas.	Se toma una muestra representativa tanto de la cantidad como de la calidad de las partículas	Medición puntual.

7. MEDICION DE COMBUSTIBLE EN GASES DE COMBUSTION

Hay normalmente tres métodos en uso para medir los combustibles como monóxido de carbón e hidrógeno en los gases de combustión, que incluyen.

- Celdas electroquímicas húmedas
- Absorción infrarroja no dispersiva
- Detectores catalíticos de combustibles

Los dos primeros métodos fueron ya descritos anteriormente, y el tercero de ellos se describirá a continuación.

Detector catalítico de combustibles. Los detectores catalíticos son de amplio uso para detectar gases combustibles en el aire en áreas cerradas como minas; recientemente versiones de estos detectores se han puesto en uso en aplicaciones de gases combustibles.

En un sensor catalítico, el oxígeno y combustible se llevan juntos a quemar a temperaturas debajo de su punto normal de reacción de más de 540°C; esto se hace poniéndolos en contacto con un elemento catalítico. En el caso de gases de combustión

este catalito por lo general es el platino que es mantenido a una temperatura de cerca de 200°C.

El detector en si mismo consiste de dos elementos de resistencia empujando dentro de la muestra la corriente del gas de combustión, uno de los elementos, el activo, es cubierto con el platino catalítico mientras que el otro elemento, el de referencia, es recubierto con una unión inerte.

- Cuando el sensor se caliente a más de 200°C, causa que cualquier oxígeno y combustibles en los gases se quemen cuando entren en contacto con el platino; esto agrega calor al elemento activo y cambia su resistencia eléctrica. La diferencia entre la resistencia de los dos elementos es directamente proporcional a la cantidad de combustibles en la muestra de gases de combustión pasando a través del sensor.

La calidad de los analizadores de combustibles en los gases de combustión con rangos de escala completa son tan sensitivos como de 0 a 2000 ppm., usa elementos de resistencia de película delgada que

están ataviados con laser y equipados con computadora para alta precisión. Algunos modelos están también disponibles con microprocesadores para añadir precisión y conveniencia.

Varios modelos de analizadores de oxígeno convectivos y extractivo y acoplado cerca incorporan sensores catalíticos de combustible, proporcionando tanto mediciones de oxígeno y combustible por la misma unidad.

8. ANALIZADORES DE OXIGENO

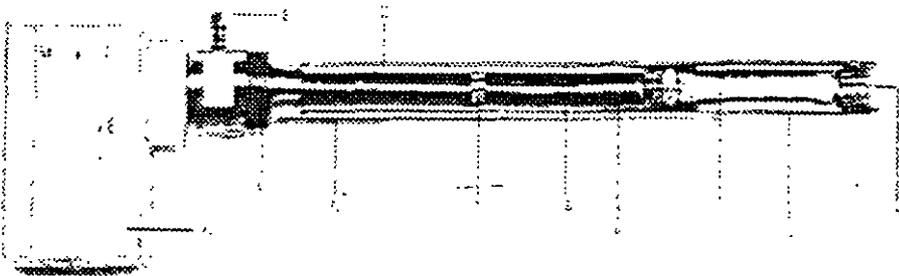
Tanto el análisis con sensor paramagnético como con celda electroquímica húmeda requieren acondicionamiento de la muestra para limpiar, enfriar y secar los gases de combustión antes de hacer la medición; la prueba de Orsat no puede usarse para análisis continuo en línea de gases de combustión. La celda de óxido de circonio es el único método de análisis continuo que puede ser realizado directamente en la chimenea sin la necesidad de acondicionar la muestra.

Así como hay diferentes métodos de determinar la cantidad de oxígeno en una muestra de gases de combustión, también hay tres diferentes arreglos por los cuales las unidades sensoras se llevan a contacto con gases en la chimenea para medir el oxígeno; estos tipos de analizadores son los siguientes:

- En el sitio
- Convectivo
- Extractivo acoplado cerca.

Hay un cuarto tipo, el analizador extractivo, que trabaja lejos de la chimenea, pero que las muestras necesitan ser enfriadas, limpiadas y secadas antes de poder ser probadas.

Analizador en el sitio. Como su nombre lo indica, este analizador se coloca directamente en el flujo de los gases de combustión; la celda de óxido de zirconio se localiza en el extremo de una probeta de acero inoxidable de 23 cm a 275 cm (9" a 9') de longitud, dependiendo de la aplicación. (Ver Fig. X-5)



- | | | |
|-------------------------------|--|---|
| a) Caja de unión | e) Protección externa de tubo | h) Calentador/termopar de CO ₂ |
| b) Conexión para calibración | f) Arañas soporte | i) CO ₂ con camisa aislante |
| c) Conexión para brida | g) Puntas de celda de óxido de zirconio (CO ₂) | j) Funda cerámica |
| d) Estructura interna de tubo | | k) Pantalla protectora |

FIG. X-5.- ANALIZADOR DE OXIGENO EN SITIO

Un elemento de calentamiento, junto con un termopar, controla la temperatura de la celda para asegurar su operación apropiada; se puede colocar un apartador de flama adelante de la celda para prevenir que el óxido de circonio se caliente por la ignición de cualquier combustible en la chimenea. Los gases de combustión se difunden en la apertura de la probeta y entran en contacto con el óxido de circonio.

El voltaje creado por la diferencia en la presión del oxígeno se lleva por un cable a la unidad de control en donde se cambia a una señal de salida adecuada para un controlador o registrador automático.

El diseño compacto de un analizador en sitio lo hace adecuado para muchas aplicaciones industriales; con la adición de un filtro, los sensores en sitio pueden usarse en pruebas en ambientes tan sucios como molinos de cemento y calderas de recuperación. Existen algunas desventajas en su aplicación, por ejemplo:

- Puesto que estas unidades se localizan directamente en la chimenea, no se pueden usar en aplicaciones donde las temperaturas son mayores de 680°C; en éstas circunstancias, puede ser mas aplicable una unidad convectiva a una acoplada cerca.
- En modelos antiguos es difícil su servicio; cuando paran de funcionar deben sacarse completamente de línea y enviarse al fabricante para reparación.

Las unidades en sitio nuevas emplean una construcción modular, y la unidad interna que incluye la celda, el horno y el termopar, puede ser removida para inspección y reparación en el sitio; las partes pueden ser desatornilladas y reemplazadas en minutos, en lugar de semanas o meses que se necesitan para reparación en fabrica.

Estos nuevos modelos también tienen controles basados en microprocesador que hacen las calibraciones, mantenimientos y reparaciones mas fáciles. Una sonda electrónica en el sitio puede ser calibrada con un push button en contraste con la tediosa tarea de ajuste manual del sistema analógico antiguo susceptible de fallas.

El mantenimiento y reparación de estos nuevos sistemas se hacen aún mas fácilmente por un sistema de autodiagnóstico que a través de un código digital indica que está mal y que necesita ser arreglado o reemplazado.

Analizador convectivo (modelo híbrido). Este tipo de analizador usa la propiedad física de convección para mover la muestra de gas de combustión a la celda de óxido de circonio localizada justo afuera de la pared del proceso; como el aire caliente se eleva, la celda sensora de oxígeno se coloca arriba del nivel de la tubería de entrada de gas. Conforme el gas en la cercanía de la celda se caliente éste se eleva y sale de la carcasa de la celda y es reemplazado por el gas que es sacado de la cámara del filtro y dentro de la tubería de entrada. El gas que sale se enfría y así regresa a

la cámara del filtro a través de un anillo continuo (Fig. X-6). El gas del proceso se difunde continuamente y sale de la cámara del filtro.

La temperatura entre los gases puede diferir tanto como 700°C en el interior de la carcasa de la celda cuando pasa a la celda de circonio y 200°C en la salida del retorno del anillo donde la diferencial de temperatura se ajusta al flujo de convección.

El área de entrada del analizador convectivo esta rodeada por un filtro; esto lo hace ideal para usarse en aplicaciones de alto particulado como carbón, cemento, desechos de incineradores y calderas de recuperación.

Puesto que los gases se difunden a través del filtro y se llevan al analizador por convección, la fuerza sobre el gas de proceso no es suficientemente grande para "jalar" partículas no deseadas a través del filtro y al interior de la celda.

La sonda convectiva puede usarse en temperaturas hasta de 1550°C y su única limitación es la entrada de la longitud de la sonda que tiene un máximo de 122 cm (48"). Al igual que en las del sitio los nuevos modelos de unidades convectivas están disponibles con controladores basados en microprocesadores para ayudar a la calibración y mantenimiento, todas las partes de trabajo están localizadas fuera de la chimenea de forma que la mayoría de las reparaciones pueden hacerse en el sitio.

Analizador extractivo acoplado cerca. A diferencia de las sondas en el sitio y convectivas, una sonda extractiva acoplada cerca usa la fuerza de un aspirador para jalar la muestra de gases de combustión al analizador, el sensor se localiza justo afuera de la pared del proceso y se conecta a la sonda que empuja a la corriente de gases. (Fig. X-7)

Los gases de combustión se llevan al área de calentamiento de muestras por el aspirador que crea un vacío al forzar el aire fuera del otro extremo del anillo. Los gases de combustión entran a la tubería para llenar el vacío y cerca del 5% es elevado al hogar u horno y la celda, por medio del mismo proceso de convección usado en el analizador convectivo.

Puesto que el sensor se localiza cerca de la chimenea y esta caliente, no se necesita acondicionar la muestra, como una consecuencia por usar la fuerza de llevar las muestras al anillo analizador la unidad extractiva acoplada cerca debe ser usada en aplicaciones de combustión relativamente limpia como el gas natural y algunos aceites de grado ligero. Este tipo de sensor de la respuesta mas rápida a los cambios de proceso.

No hay límites prácticos en la longitud de la sonda y el analizador puede ser usado en temperaturas hasta de 1750°C; igual que con los otros dos analizadores descritos, los nuevos modelos de unidades extractivas acopladas cerca están disponibles con controladores basados en microprocesadores.

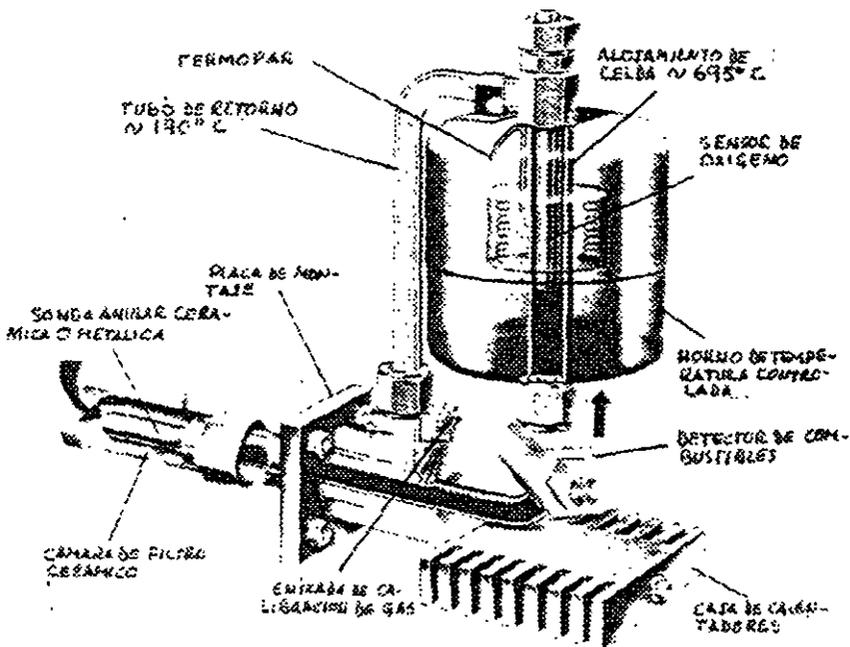


FIG. X-6.- ANALIZADOR CONVECTIVO

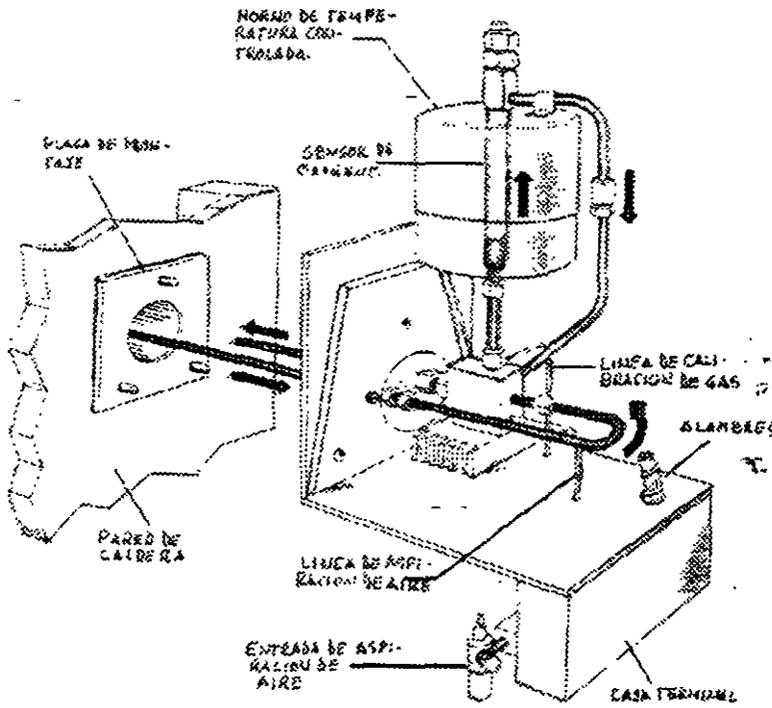


FIG. X-7.- ANALIZADOR EXTRACTIVO ACOPLADO CERCA

Analizadores extractivos. Por lo general los analizadores extractivos no se consideran unidades sensoras montadas en la chimenea; esto se debe a que en un número de unidades, el gas se extrae tan lejos como 15 a 30 m de la chimenea para análisis. Una vez que la muestra de gas llega al analizador deberá ser acondicionada (enfriada, limpiada y secada) antes de que sea probada por un sensor de Orsat, oxígeno paramagnético, celda electroquímica húmeda o celda de óxido de circonio.

9. ELECCIÓN DEL SISTEMA DE ANALISIS

La elección del sistema de análisis de gases de combustión debe basarse en las necesidades específicas de aplicación, p.e., el operador de una caldera de recuperación de recursos no necesita estar preocupado acerca de la eficiencia de combustible (es basura o lodo) como acerca de la cantidad de monóxido de carbono liberado al aire. Por otra parte, el operador de una planta de potencia que quema carbón pulverizado debe preocuparse por la medición tanto del oxígeno como del combustible en un ambiente de chimenea sucia

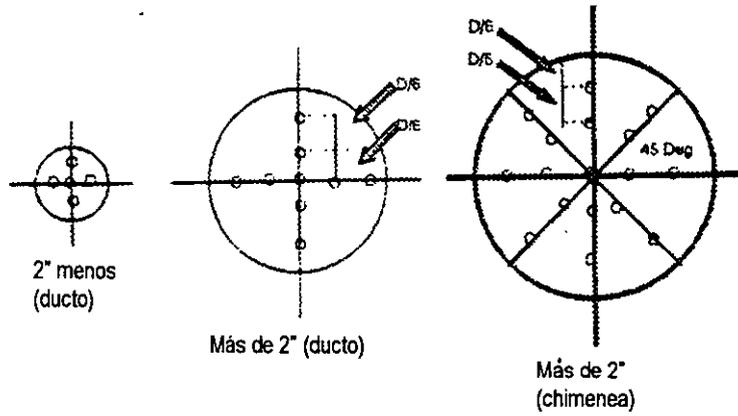
Para ayudar en la selección del sistema de análisis a continuación se presentan las ventajas y desventajas de varios de estos sistemas.

10. LOS PUNTOS DE MEDICION

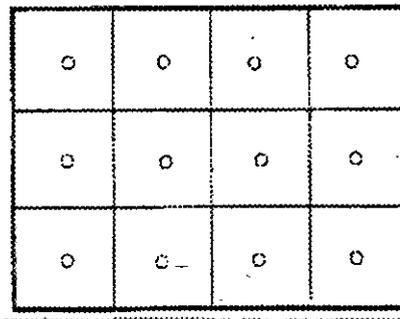
El análisis del gas de combustión y su temperatura debe ser representativo de las condiciones reales para asegurar precisión en los resultados.

Puesto que la temperatura, concentraciones de gas y velocidades en un ducto son raramente uniformes a través de cualquier sección transversal del ducto, es necesario completar las condiciones promedio o determinar las localizaciones para las sondas de muestras que representen las condiciones promedio.

En la Fig. X-8, se sugieren las localizaciones transversales para ductos circulares y rectangulares.



a) Ductos regulares



b) Ducto rectangular

FIG. X-8.- PUNTOS DE MEDICION EN DUCTOS CIRCULARES Y RECTANGULARES



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

CURSOS ABIERTOS

**CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN Y USO
EFICIENTE DE ENERGÍA EN CALDERAS**

TEMA :

LOS EFECTOS DE LOS CONTAMINANTES (GASEOSOS)

**ING. BERNARDO AGUILAR CALVO
PALACIO DE MINERÍA
SEPTIEMBRE 1999**

XI. LOS EFECTOS DE LOS CONTAMINANTES (GASEOSOS)

1. LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE O ATMOSFÉRICA

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 o hidrocarbonos
- 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 (niebla o humo) 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 proceso.

En éste trabajo el enfoque se hará sobre el último tipo, que contribuyen con cerca del 20% de la contaminación total del aire, y también lo referente a la contaminación formada durante la generación de electricidad.

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

- Los humanos;
- 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:

- Climá;
- 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, este trabajo se concentrarán en algunos de los mas comunes:

- CO – monóxido de carbono
- SO_x – óxidos de azufre
- NO_x – óxidos de nitrógeno y compuestos relacionados hidrocarburos o hidrocarbonos
- O₃ – ozono partículas

- Partículas de materia
- Dióxido de azufre
- Oxidos de nitrógeno
- Monóxido de carbono
- Hidrocarburos
- Oxidantes

2. LOS CONTAMINANTES

2.1 General

Los gases de escape de todos los dispositivos de combustión contienen una variedad de subproductos, algunos de los cuales se consideran contaminantes ambientales.

Algunos de dichos contaminantes son inmediatamente tóxicos ellos mismos, mientras que otros tienen riesgos indirectos a la salud debido a su habilidad para reaccionar con otros contaminantes en el aire para formar mas compuestos peligrosos, y además también difieren de la forma en que se originan en los procesos de combustión.

Algunos de los contaminantes están mas relacionados con la composición del mismo combustible, mientras que otros dependen de las características del proceso real de quemado de combustible y como tales, son sensibles a las variables de diseño y operación de los dispositivos de combustión.

En el presente, se han identificado los seis mayores contaminantes y se han establecido las normas de emisión para proteger la salud y bienestar del público; estos seis contaminantes son los siguientes:

A continuación se incluye una breve descripción de estas sustancias incluyendo:

- Los principales efectos sobre la salud
- Su formación en los sistemas de combustión de la caldera
- Métodos usados normalmente para limitar sus emisiones por las chimeneas de las calderas.

Esta información debe estar incluida en el manual de calderas para familiarizar a los operadores y a otros con los principales aspectos de los contaminantes de la combustión.

Con frecuencia las regulaciones de emisiones o criterios de operación relacionados con contaminantes son impuestos, pero los operadores de dispositivos de combustión no son advertidas de las preocupaciones ambientales y de la salud.

2.2 partículas de materia

Las partículas de materia, son porciones no gaseosas de las salidas de combustión, consistentes en todo el material sólido y líquido (excepto gotas de agua) suspendido en los gases de escape, y por lo general puede ser definido como:

“Cualquier material que no pasaría a través de un filtro muy fino”

Las partículas que se originan en los procesos de combustión pueden variar en tamaño de submicrones (menos de 10^{-6} m) de diámetro a mayores de 1 mm (10^{-3}). Las partículas más grandes no viajan lejos en la atmósfera y por lo general caen al suelo cerca de la fuente.

Las partículas pequeñas que pueden hacer el volumen de las partículas de materia, pueden permanecer en la atmósfera por largos periodos de tiempo y contribuir a la niebla o bruma y obscurecer la visibilidad en un rango largo. Estas partículas finas son potencialmente las más peligrosas a la salud, puesto que fácilmente son llevadas dentro de los pequeños pasajes al tracto respiratorio durante la respiración normal.

Las partículas de materia pueden estar compuestas por una variedad amplia de materiales, incluyendo combustible no quemado, compuestos de azufre, carbón, constituyentes de ceniza en el combustible (incluyendo muchos metales tóxicos) y aún aerosoles no combustibles, polvo que entra al sistema de combustión con el aire para la combustión.

Muchos de estos materiales se identifican por sí mismos como peligrosos para la salud y cuando se dispersan en el aire en finas partículas pueden ser inhaladas y después absorbidas en el cuerpo; las altas concentraciones de partículas de materia en el aire inhalado puede tener más efectos directos a la salud por irritación o bloqueo de las superficies del tracto respiratorio pueden llevar a temporal o

permanente deterioro de la respiración y daño físico. La ingestión oral de partículas de materia también es posible de partículas que caen en la vegetación y vegetales comestibles.

La cantidad y composición de partículas generadas en las calderas están influenciadas por varios factores, incluyendo:

- El tipo de combustible quemado
- El modo de operación de la caldera
- Las características de los quemadores y el horno

Los diseño de quemadores y modos de operación que tienen a promover la combustión eficiente por lo general reducen la fracción de material combustible en las partículas. Desde el punto de vista de la operación de una caldera es deseable minimizar estos materiales derivados del combustible, puesto que representan energía de combustible disponible desechada y puede llevar a problemas de depósitos internos en el hogar o humo en la chimenea objetable.}

El quemador y la relación aire/combustible es uno de los parámetros más importantes de operación que pueden influir en la cantidad de material de partículas de combustible generada. El gas natural y la mayoría de los aceites combustibles se referencian como combustibles de "combustión limpia", primariamente debido a su baja tendencia a formar residuos de combustible sólido (humo, hollín,

carbón, etc.) y su bajo contenido de ceniza.

Por comparación, algunos aceites pesados y la mayoría de los combustibles de carbón contienen cantidades sustanciales de ceniza que subsecuentemente forman el volumen materia de partículas no-combustibles generada en el hogar. Para el caso del carbón, la ceniza puede ser mayor del 40% del peso total de combustible quemado, la prevención de su acumulación en las superficies internas de la caldera es una consideración mayor en el diseño de la caldera:

En algunos diseños de calderas, la mayoría de la ceniza del carbón permanece en los gases de escape que dejan la caldera, pero el uso de varios dispositivos de control de partículas permiten bajar las concentraciones emitidas por la chimenea; los dispositivos normales emplean varias técnicas para remover las partículas de los gases de escape, que incluyen filtración, separación mecánica y precipitación electrostática. Muchos diseños han probado ser capaces de remover más del 99% de las partículas y son también aplicables a las calderas de aceite combustible en donde se requiere el control de partículas.

2.3 Bióxido de Azufre (SO₂)

El SO₂ es un gas no inflamable, y sin color que puede ser "probado" en concentraciones de menos de 1 ppm en el aire; en concentraciones altas tienen un olor irritante y picante.}

El SO₂ se forma durante el proceso de combustión cuando el azufre (S)

contenido en el combustible se combina con el oxígeno (O₂) del aire de combustión.

El trióxido de azufre (SO₃) es otro óxido de azufre que también se forma igual que el SO₂. Este, junto con el SO₃ comprenden el total de óxidos de azufre que por lo general se conocen como "SOx". El SO₃ no es mayor del 3 al 5% del total de SOx generados en la caldera.

Con excepción de los componentes de azufre presentes en la materia de partículas, todo el azufre contenido inicialmente en el combustible se convierte a SO₂ y SO₃. Antes de salir de la chimenea, el SO₃ se combina con la humedad en los gases de escape para formar ácido sulfúrico (H₂ SO₄) que se condensa en las partículas o permanece suspendido en los gases de escape en la forma de niebla.

- En la atmósfera, una parte del SO₂ se convierte a SO₃ que similarmente forma ácido sulfúrico por la combinación con la humedad del aire; el SO₃ puede también formar otros compuestos de azufre como los sulfatos. Los sulfatos y la niebla ácida:

- Pueden contribuir significativamente a reducir la visibilidad en la atmósfera
- Causan corrosión a los materiales expuestos al aire
- Causan daños a la vegetación
- Causan efectos a la salud y están primariamente relacionado a irritación del tracto respiratorio temporales o permanentes e incluyen constricción de los

pasajes de pulmones y daños a las superficies de los pulmones

- Causa otros efectos mayores ambientales.

La cantidad de SO_x generada en la caldera es primariamente dependiente de la cantidad de azufre en el combustible y no es afectada por las condiciones de operación o diseño de la caldera. La regulación de la cantidad de azufre permitida en el combustible es un método primario de controlar las emisiones de SO_x. Las lavadoras de gases de chimenea que remueven el SO₂ de los gases de escape de la combustión pueden también ser efectivas en donde se usen combustibles con "alto azufre".

2.4 Óxidos de Nitrógeno (NO_x)

El óxido nítrico (NO) y el bióxido de nitrógeno (NO₂) son dos formas de óxidos de nitrógeno generados por los procesos de combustión de las calderas; juntos estos compuesto se conocen como óxidos totales de nitrógeno o simplemente "NO_x".

El NO es un gas sin color, sin olor y no se considera como una amenaza directa a la salud a concentraciones encontradas en la atmósfera, el NO₂ es una sustancia considerablemente mas dañina. A pesar que el NO₂ comprende típicamente 5% o menos del NO_x emitido por las chimeneas de las de calderas, una fracción grande del NO se convierte a NO₂ en la atmósfera.

El NO₂ es un gas de color amarillo-café que puede afectar la visibilidad de la atmósfera; también tiene un olor dulce, picante que puede ser detectado a concentraciones a veces

alcanzada en el aire contaminantes. En concentraciones mucho mas altas (100 ppm) el NO₂ puede ser fatal cuando se inhala; exposiciones prolongadas a concentraciones mucho mas bajas puede causar daños acumulativos en el pulmón y males respiratorios.

El NO_x se forma espontáneamente durante el proceso de combustión cuando el oxígeno y el nitrógeno están presentes a altas temperaturas; los tres ingredientes (oxígeno, nitrógeno y alta temperatura) son elementos esenciales del proceso de combustión y por lo tanto es muy difícil prevenir la formación de NO_x.

El nitrógeno esta presente en el aire para la combustión y también en el combustible; la minimización del contenido de nitrógeno en el combustible puede reducir el NO_x pero no es una practica normal en el planteamiento de control de NO_x. La mayoría de las técnicas de reducción de NO_x normalmente aplicadas a Calderas efectivas son:

- Bajas las temperaturas pico de flama en el hogar
- Reducir la disponibilidad de oxígeno en la flama
- Una combinación de las anteriores.

Estas técnicas incluyen:

- Operación con bajo exceso de aire
- Combustión rica en combustible (gradual)
- Recirculación de gases

Mientras que estos planteamientos limitan la formación de NO_x en el horno, se pueden desarrollar futuras técnicas que "laven" el NO_x de los gases de escape antes de que entren a la chimenea. Los procesos de desulfurización de combustibles y otros tratamientos de "limpieza" de combustible pueden tener algunos beneficios asociados en la reducción del contenido de nitrógeno en el combustible.

2.5 Monóxido de Carbono (CO)

El CO es un producto de la combustión incompleta y su concentración en los gases de escape de la caldera por lo general es sensitiva a las condiciones de operación, p.e., se pueden tener altas emisiones de CO por:

- Ajuste inapropiado de quemadores
- Partes deterioradas del quemador
- Insuficiente aire para la combustión

Con frecuencia las mediciones de CO en la chimenea se usan como un indicador de las condiciones de operación.

El CO es un gas invisible, sin olor y sin sabor; la exposición a gases conteniendo CO produce el bien conocido "envenamiento con CO" que puede ser fatal.

El CO emitido por las chimeneas de calderas se dispersa en la atmósfera y junto con el CO de otras fuentes por lo general no llega a concentraciones suficientemente altas para producir efectos inmediatos a la salud (una

excepción puede ser cerca de tráfico de alta densidad de automóviles), sin embargo, es preocupante que largas exposiciones a estas concentraciones puedan causar eventuales problemas de salud.

2.6 Hidrocarburos

Igual que el CO, los hidrocarburos son indicativos de combustión incompleta o ineficiente que pueden ser eliminados de los gases de chimenea de la caldera por una operación apropiada del equipo de quemado de combustible, sin embargo, estrictamente hablando, los hidrocarburos no pueden ser enteramente eliminados y casi siempre estarán presentes trazas de cantidades de compuestos de hidrocarburos no importa de cómo se opere la caldera.

Debido a la enorme variedad de compuestos de hidrocarburos involucrados y sus desconocidos efectos sobre la salud de algunos de ellos aún en cantidades muy grandes, es difícil evaluar su impacto ambiental. Algunos de estos hidrocarburos se asemejan a componentes reales en el combustible y correctamente se conocen como "combustible sin quemar", pero otros son formas enteramente modificadas generadas en reacciones químicas complejas durante el proceso de combustión.

Es bien conocido que los hidrocarburos contaminantes del aire son ingredientes importantes en la formación del smog (niebla-humo) fotoquímico, que bajo ciertas condiciones atmosféricas pueden ser transformados en otros derivados que

son potencialmente más peligrosos. Algunas de las manifestaciones del smog como la irritación de los ojos y del tracto respiratorio son en parte asociados directamente con los hidrocarburos y sus derivados.

2.7 Oxidantes

El término oxidante por lo general se aplica a sustancias conectadas con el oxígeno que toman parte en las reacciones químicas complejas en atmósferas contaminadas; éstas se conocen como reacciones fotoquímicas, que con frecuencia se intensifican con la presencia de la luz del sol, involucran como los principales ingredientes a:

- Oxidos de nitrógeno (NO_x)
- Sustancias orgánicas reactivas, incluyendo hidrocarburos y sus derivados.

Estos reaccionan para formar nuevos compuestos incluyendo al ozono (O₃) y al PAN (peroxy acil nitrato) que por lo general se consideran los mayores oxidantes en la contaminación fotoquímica del aire (smog). El término oxidante algunas veces también se usa para incluir los reactivos químicos originales NO_x, hidrocarburos y otros.

Mientras que el ozono y el PAN no se generan directamente en la caldera, el principal ingrediente o precursor (NO_x) lo suministra en parte los gases de escape de la caldera. Reduciendo las emisiones de estos compuestos de las calderas y de todas las otras fuentes de automóviles (automóviles, aviones, etc.), sus subproductos fotoquímicos,

los oxidantes, pueden ser reducidos. Los oxidantes fotoquímicos producen:

- Efectos adversos sobre la materia vegetal que puede afectar el crecimiento.
- Efectos adversos en la cantidad y calidad de las cosechas agrícolas y otros productos de plantas.
- Deterioro de varios materiales (especialmente el hule), atribuido principalmente a la presencia del ozono.
- Efectos adversos en la salud humana.

Un efecto mayor en los humanos es la irritación de los ojos; en cantidades más altas que las típicamente encontradas en atmósferas contaminadas, los oxidantes tienen un efecto irritante en el tracto respiratorio produciendo tos y sofocamiento.

Otros efectos laterales pueden ser el dolor de cabeza y la fatiga; en bajas concentraciones en atmósferas contaminadas, los efectos aparecen menos definidos. Algunas veces, el agravamiento de males respiratorios existentes como el asma, se atribuyen a los oxidantes.

3. EFECTOS SOBRE LOS HUMANOS

3.1 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.

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

$2C + O_2 \rightarrow 2 CO$ 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 ciertos 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 estándar de calidad del aire de 9 ppm a una exposición de 8 horas.

El transporte de O₂ en el torrente sanguíneo se afecta claramente a 75% de carboxihemoglobina, generado a niveles de 30 ppm de CO o mayores, esto 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 cigarrillos puede crear hasta 15% 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.

Los óxidos de azufre son tóxicos al cuerpo humano, especialmente si la persona tiene males respiratorios previos como enfisemas 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 estos 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

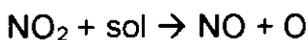
nitrógeno pueden tener varias consecuencias serias.

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 contaminantes del aire; muchos de ellos son posiblemente arcinogénicos 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:



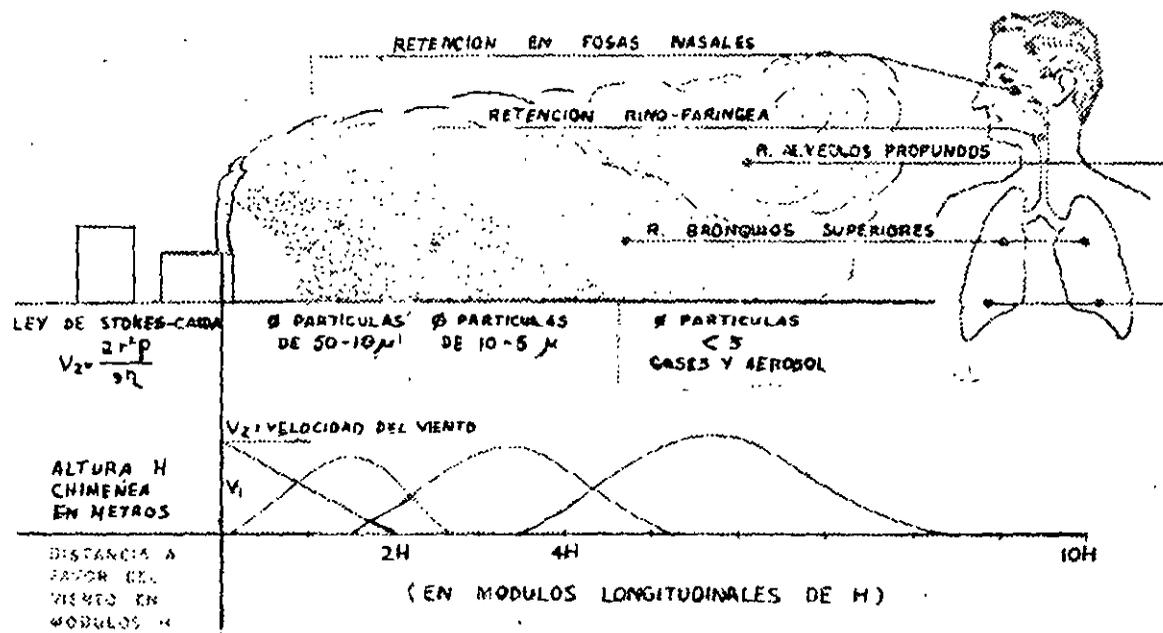
El ozono:

- Agrava el asma, enfisema 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 partículas tienen varios efectos adversos, dependiendo de su tamaño:

- Debajo de 0.1 μm (micras), el mayor efecto se relaciona con la modificación del tiempo, este es el tamaño mas 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 mas grande a la visibilidad;
- Entre 1 y 5 μm, hay una deposición máxima en los pulmones durante la inhalación; (Fig. XI-1)
- 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.

FIG. XI-1.- DISTRIBUCIÓN DE CONTAMINANTES DE PLUMA DE HUMO



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 mas 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 enfisema.

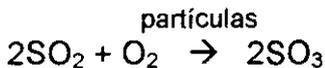
Aunque la mayoría de los efectos perjudiciales a la salud son causados por las partículas inhaladas que son suficientemente pequeños para penetrar hondo en los pulmones, evidencias recientes han mostrado que éstos depósitos en el sistema superior respiratorio puede también llevar a problemas de salud.

Hay muchos grupos de interés público renuentes a avenencias cuando consideran la salud humana, con mucha justificación; ha habido situaciones cuándo 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 (2500 - 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 SO_2 ; un gran % del SO_2 en la atmósfera se debe directa o indirectamente a fuentes naturales (volcanes, decaimiento de vegetación, brisa e mar, etc.). Este SO_2 que se genera naturalmente, sin embargo se dispersa sobre el mundo en tal forma que nunca llega a niveles

peligrosos, las contribuciones del SO_2 por el hombre (SO_2 antropogénico) tiende a concentrarse en áreas industriales y urbanas y pueden elevarse a niveles peligrosos.

El SO_2 en el aire, frecuentemente con partículas actuando como catalizadores, puede convertirse a SO_3 :



Las superficies de las partículas pueden proporcionar un sitio para la reacción para que ocurra la formación de SO_3 , este SO_3 puede reaccionar fácilmente con el vapor de agua para producir ácido sulfúrico (H_2SO_4), 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 amoníaco (NH_3) para producir sulfato de amoníaco sólido ($\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ perjudicial para la salud.

El H_2SO_4 en el aire lava donde quiera 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 (HNO_3); a finales de los 1970's la lluvia ácida fue declarada como posiblemente "el problema ambiental mas severo del siglo".

3.2 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 μm 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 NO_2 (un gas), absorbe luz azul, causando que el aire aparezca amarillo o gris rojizo. Las funciones 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 (debajo 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.

3.3 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 más juicios; éstos juicios, son preferentemente femeninos puestos 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 se 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.

4. EFECTOS 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 un 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 delgado de aves predatorias consumidoras de pescado; éstos huevos de cascarones mas delgado se rompen antes de incubar por lo que se pierden éstas crías.

5. EFECTOS 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.

ESO₂ 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.

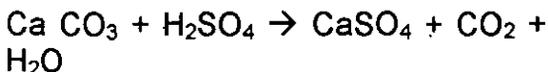
El O₃, igual que el SO₂ blanquea las células de las plantas, siendo las coníferas particularmente susceptibles; inicialmente el daño se observa en el final de la hoja.

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.

6. EFECTOS SOBRE LOS MATERIALES

Uno de los más 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 Ca CO₃ 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 causando mas daños a las rutinas griegas y romanas que el causado en los 2000 años previos.

El H_2SO_4 también reacciona con materiales como metales, hule plástico y algunos tipos de telas, arruinándolos parcial o totalmente.

El NO_2 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_2 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.

7. EFECTOS Y CAMBIOS METEOROLÓGICOS

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 coloca en pequeñas gotas usando una partícula con el núcleo. Estas pequeñas gotas se juntan inicialmente y forma 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 CO_2 en la atmósfera; este CO_2 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 CO_2 atmosférico actúa como un cristal en un invernadero. La luz visible penetra la capa de CO_2 y es degrada 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 más

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 a incrementar las nubes en grandes altitudes evitando que algunos rayos del sol lleguen a las superficies 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 esta 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 océanos 100 m ó más, sería devastador porque la mayoría de la población vive en elevaciones de 300 m ó menos.

El impacto más 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.

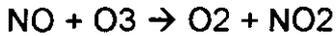
A la fecha, no hay evidencia de calentamiento o enfriamiento global; datos de temperatura han sido colectados por la serie TIROS-N de satélites de tiempo. La primera década de información (de 1979 a 1988) ha sido analizada y revela que no hay tendencias de temperatura a largo plazo. Las lecturas de satélites muestran mucha variabilidad de mes a mes y de año a año, refutando la percepción popular de que la atmósfera de la tierra se esta 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 CO_2 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 O_3 es muy importante para la vida en nuestro planeta, porque esta 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 O_3 ha sido potencialmente asociada con un

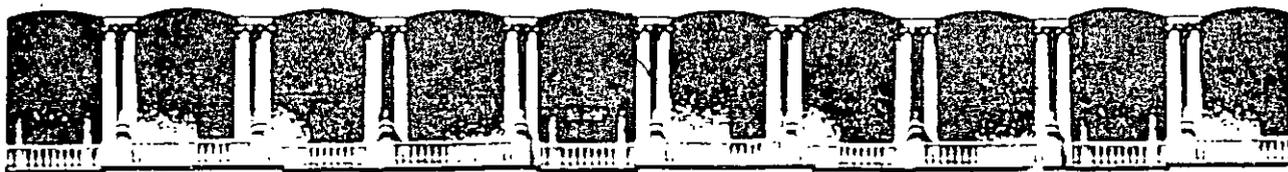
número de contaminantes, los óxidos de nitrógeno pueden reaccionar con el CO₃:



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 acordó 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.



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

CURSOS ABIERTOS

**CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN Y USO
EFICIENTE DE ENERGÍA EN CALDERAS**

TEMA :

CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

**ING. BERNARDO AGUILAR CALVO
PALACIO DE MINERÍA
SEPTIEMBRE 1999**

XII. CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

1. FORMAS Y EQUIPOS DE CONTROL

El control de la contaminación atmosférica puede lograrse en alguna de las siguientes formas: (Fig. XII-1)

- El contaminante potencial puede controlarse en la fuente por medio de alguna técnica;
- En algunas ocasiones es posible diluir el contaminante, de forma que su concentración ya no sea dañina.

La disolución es posible si se toma en cuenta que la mayoría de las fuentes contaminantes antropogénicas son solo un pequeño porcentaje (aproximadamente 10%) del total presente en la atmósfera. Para el control de la contaminación en la fuente, el método más efectivo, si es posible implementarlo, es la no-generación del contaminante o al menos minimizar la cantidad; esto puede lograrse por:

- cambios en la materia prima
- condiciones de operación
- tipo de equipo
- cambios drásticos en el proceso

Con frecuencia este tipo de acción puede ser más económico que instalar gran cantidad de equipo muy costoso para remover los contaminantes formados. Si no se puede prevenir la formación del contaminante, entonces se requiere equipo que destruya, encubra, neutralice o atrape el contaminante:

- Algunos contaminantes pueden ser destruidos por combustión o acción catalítica;
- En el encubrimiento de olores, simplemente se hace que un contaminante de mal olor no se detecte por medio de la superposición de otro olor (preferiblemente agradable);
- La naturalización de un contaminante también se utiliza en olores: se mezclan dos olores cancelándose uno a otro. Ni este ni el anterior método remueven el contaminante;
- La recolección de contaminantes antes de que lleguen a la atmósfera es el método más comúnmente usado para reducir las emisiones al aire.

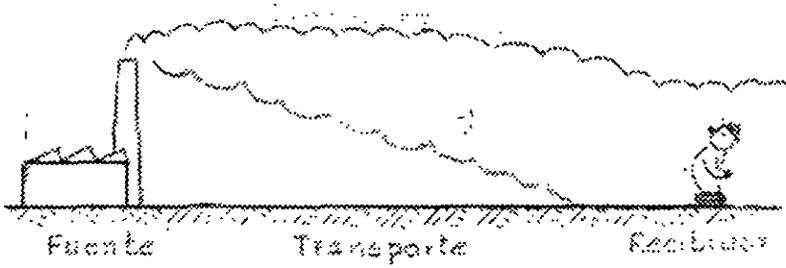
El tipo particular de equipo de control de la contaminación del aire depende de la naturaleza del contaminante como:

- tamaño
- forma
- densidad
- pegajosidad
- propiedades eléctricas
- peligrosidad

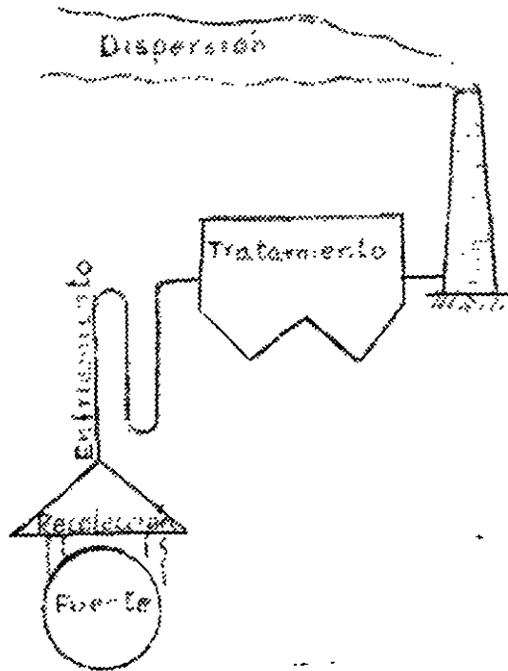
También depende de otros factores como por ejemplo:

- Temperatura;
- Contenido de humedad;
- Cantidad;
- Factores económicos varios.

El transporte del contaminante se determina por las condiciones atmosféricas



LAS TRES PARTES INVOLUCRADAS EN UN PROBLEMA DE CONTAMINACIÓN ATMOSFERICA



PUNTOS DE POSIBLE CONTROL DE CONTAMINACIÓN ATMOSFERICA

FIG. XII-1.- CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFERICA

La mayoría del equipo de recolección se diseña para manejar partículas; algunos pueden también tratar simultáneamente otros tipos de contaminantes, y algunos métodos de tratamiento son mejores para emisiones sin partículas. Hay varios tipos generales de equipos se usan para manejar la variedad de emisiones que existen:

- Los que colectan partículas como:
 - a) Colectores mecánicos secos
 - b) Colectores de tela o tejido
 - c) Lavadoras húmedas
 - d) Precipitadores electrostáticos
- Incineradores de humos, gases o vapores que destruyen el contaminante;
- Técnicas que pueden absorber o adsorber especialmente contaminantes volátiles;
- Chimeneas altas que actúan como técnica de dilución.

Entre cada uno de los tipos generales de equipo para controlar contaminantes existen muchas variaciones. Las eficiencias típicas de los equipos de remoción de partículas se muestran en la Fig. XII-2. Con relación a las técnicas de adsorción y absorción, se tienen las siguientes definiciones:

- Adsorción = penetración superficial de un gas o de un líquido en un sólido.
- Absorción = atracción de un cuerpo y retención entre sus moléculas las de otro en estado líquido o gaseoso, por ejemplo, la esponja absorbe agua.

2. PRINCIPIOS FÍSICOS

En términos de recolección de partículas hay varios principios físicos que se emplean en la operación de los varios tipos de colectores:

- Asentamiento por gravedad. Cuando se disminuye la velocidad de la corriente de aire con partículas, muchas de éstas (especialmente las más pesadas) se asientan en el fondo del colector;
- Fuerzas inerciales. Cuando se cambia de dirección a una corriente de aire con partículas, estas tienen la tendencia, debido a su momentum, a continuar en línea recta colisionándose con las paredes y asentándose en el fondo del colector;
- Filtración. La corriente de aire con partículas se pasa a través de un material poroso en donde se retienen las partículas y sale al aire limpio;
- Atracción electrostática. Cuando las partículas están cargadas electrostáticamente son atraídas hacia objetos de carga contraria y se sacan de la corriente de aire. Cuando las partículas hacen contacto físico se neutralizan y caen al fondo del colector;
- Agrandamiento de partículas. Cuando el polvo de partículas se pasa a través de un spray de agua se forma un particulado (un aglomerado en gotas de agua). El mayor peso de este aglomerado permite que se separe de la corriente de aire; una gran cantidad de agua virtualmente lava las partículas de la corriente de aire.

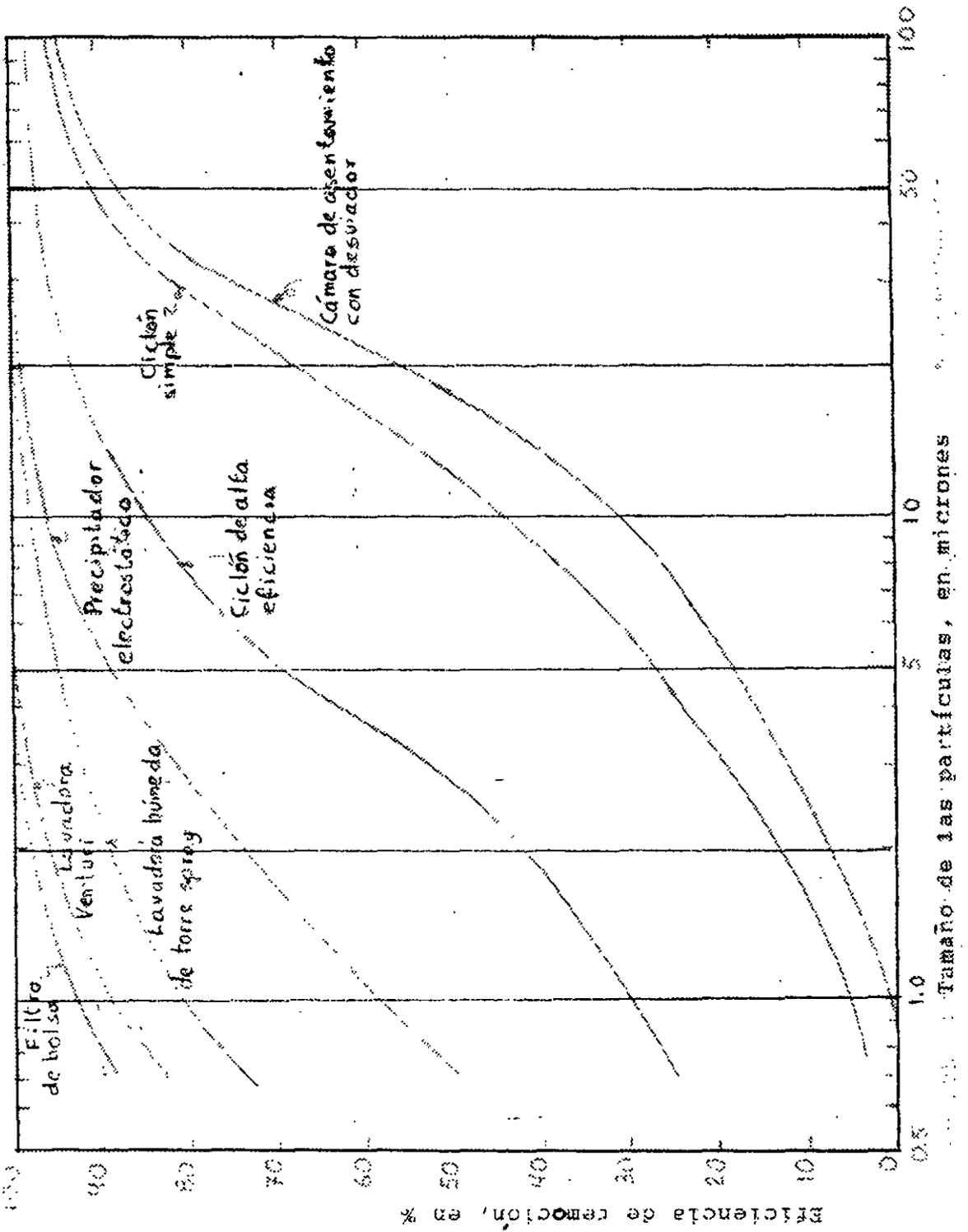


FIG. XII-2.- COMPARACIÓN DE EFICIENCIAS DE EQUIPOS DE REMOCIÓN DE PARTÍCULAS

Todos los métodos de recolección emplean uno o más de los principios anteriores en su operación; la eficiencia de recolección tiende a corresponder al tamaño de las partículas. Las mayores y más pesadas son removidas mucho más eficientemente por todas las técnicas. Los varios dispositivos de recolección varían en su eficiencia y en la naturaleza de los contaminantes: en general los más simples, menos intensivos de energía son menos eficientes, haciéndolos adecuados principalmente para partículas grandes y densas. Las partículas más finas y otros tipos de contaminantes del aire requieren dispositivos de recolección más sofisticados.

3. COLECTORES MECÁNICOS SECOS

Los colectores mecánicos secos proveen una técnica factible si se trata de casos que incluyan:

- Solo la remoción de partículas;
- Que la cantidad de partículas sea pequeña o moderada;
- Que preferiblemente las partículas sean bastante grandes.

Con frecuencia un colector mecánico seco se pone corriente arribá de un colector más eficiente para remover las partículas más voluminosas y pesadas, y entonces incrementar la eficiencia total y reducir el mantenimiento del sistema.

Estos tipos de colectores requieren un consumo mínimo de potencia y no experimentan corrosión a menos que

incidan en ellos nieblas corrosivas, pero las emisiones higroscópicas y calientes pueden presentar problemas, además que el equipo es grande y muy voluminoso.

Cámaras de asentamiento por gravedad.

Las cámaras de asentamiento por gravedad, mostrada en la Fig. XII-3, son los tipos de colectores de partículas más antiguos y más simples; por medio de ésta técnica las partículas entre 40 y 100 μm (micras) de diámetro son fácilmente recolectadas. La eficiencia de estos colectores de partículas es muy mala en polvo fino (polvo de menos de 10 μm de diámetro) y disminuye conforme aumenta la carga; éstos colectores tienen varias características como las siguientes:

- Tamaño físico muy grande;
- Bajo costo y confiables;
- Poco costo de operación y mantenimiento.

Colectores de recirculación con mamparas.

La adición de mamparas o deflectores a las cámaras de asentamiento por gravedad, como se muestra en la Fig. XII-4, aumenta la eficiencia de recolección; el aire entrante hace un cambio de dirección abrupto hacia la salida, y este cambio permite que las partículas de polvo más grandes escapen de la corriente de aire (debido a su momentum) y se asienten más fácilmente en el fondo del colector.

El tamaño físico del colector con mamparas es menor que las cámaras de asentamiento por gravedad simples, y son más eficientes aún a

cargas altas; algunas de sus características son las siguientes:

- Pueden coleccionar partículas entre 10 y 50 μm de diámetro;
- Sus costos instalación y mantenimiento son bajos;
- Tienen alta Confiabilidad.

suficientemente efectivos para actuar como colectores únicos en un proceso industrial; para cumplir con las regulaciones de control de emisiones siempre debe instalarse un colector más eficiente corriente abajo; por lo que el colector con mamparas sirve como pre-limpiador.

A pesar de su incremento de eficiencia, estos colectores no son

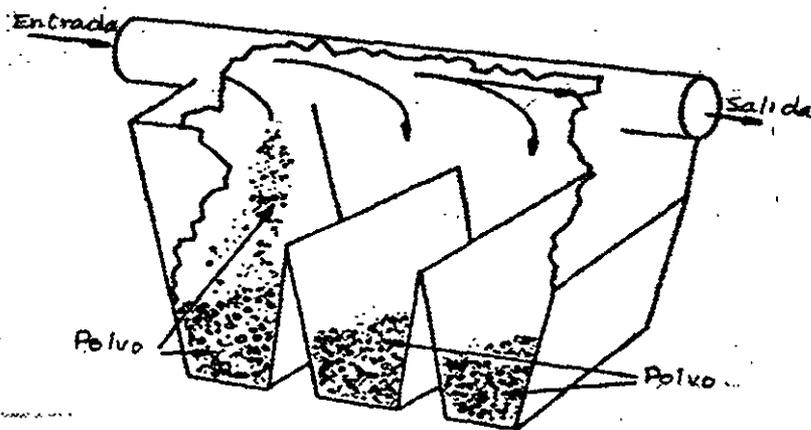


FIG. XII-3.- CAMARA DE ASENTAMIENTO POR GRAVEDAD

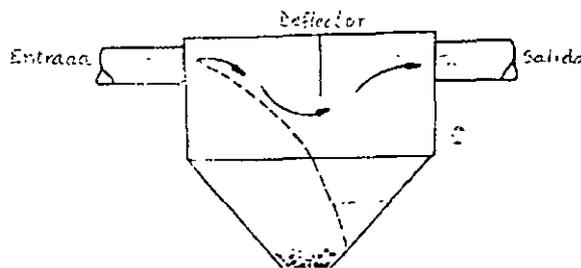


FIG. XII-4 CAMARA DE ASENTAMIENTO POR GRAVEDAD CON DEFLECTOR

4. CICLONES

Los ciclones, mostrados en la Fig. 5, operan con el principio de fuerza centrífuga.

Conforme el gas entra al colector de forma cilíndrica, toma un paso helicoidal, y la inercia de las partículas que lleva chocan con las paredes de donde caen a la tolva en el fondo; el gas limpio se eleva cerca del centro y sale por la parte superior.

Algunas de las características del colector ciclónico son las siguientes:

- Son simples y confiables;
- Tienen bajo costo inicial;
- Facilidad de mantenimiento;
- Capabilidad a alta temperatura;
- Son eficiente en partículas de 15 a 50 μm , y menos eficientes en partículas más pequeñas de 10 μm .

En contraste con las cámaras de asentamiento por gravedad, los ciclones son más eficientes con cargas pesadas debido al incremento de interacción entre partículas.

Ciclones múltiples. La fuerza centrífuga f de las partículas está dada por la siguiente ecuación:

$$f = \frac{m v^2}{r}, \text{ en donde:}$$

m = masa de la partícula
 v = velocidad de la partícula
 r = radio de paso
 (aproximadamente al del ciclón)

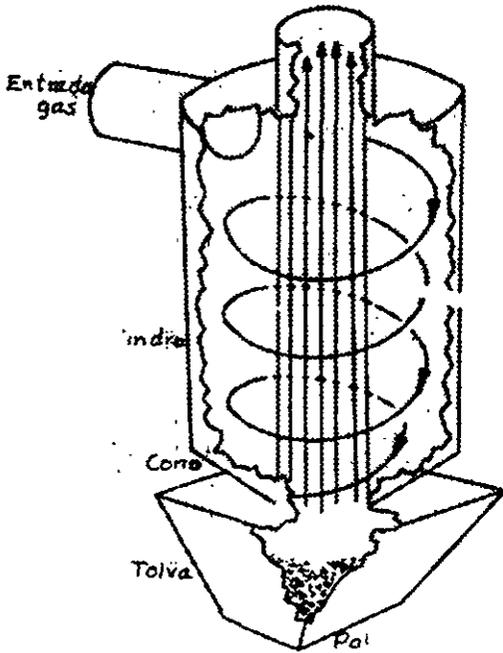
Puede observarse que la eficiencia de colección (f) se incrementa con la

disminución del radio del colector; de acuerdo con lo anterior, un banco de ciclones (Fig. XII-5) con alimentación paralela puede ser usado más efectivamente, que uno sencillo de diámetro más grande. Con los ciclones múltiples se pueden coleccionar partículas más pequeñas, típicamente de 5 a 20 μm de diámetro.

Otras modificaciones de ciclones. Si se adicionan aletas o persianas a lo largo del eje del colector ciclón se puede incrementar la eficiencia, especialmente para partículas de cuarzo, y mientras más cerrado sea el espaciado más alta es la eficiencia. Estas aletas sufren mucha corrosión y abrasión.

Un eductor de finos, que es una salida pequeña que empieza en la parte alta del ciclón y con espiral hacia abajo alrededor de la salida, puede agregarse para remover algo de las partículas muy finas que son arrastradas hacia arriba por el supuesto aire limpio que se descarga; ésta adición aumenta la eficiencia de colección sin incrementar los costos de operación.

Precipitadores dinámicos. Los precipitadores dinámicos mostrados en la Fig. XII-5, también operan bajo el principio de fuerza centrífuga; estos son realmente una combinación de un ventilador centrífugo especialmente diseñado y un colector de polvo.



CICLON

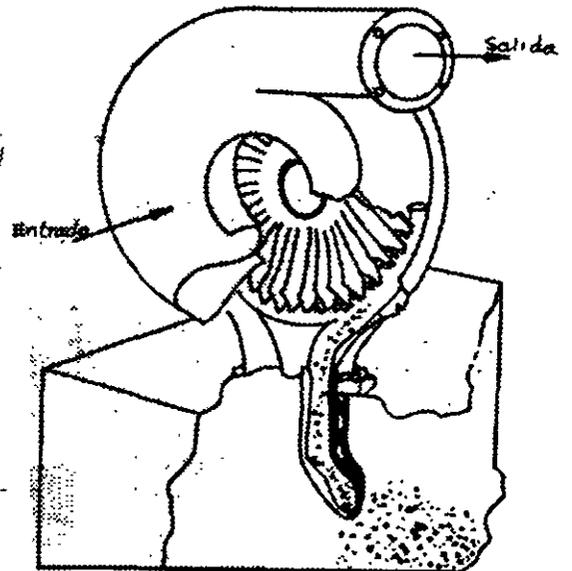
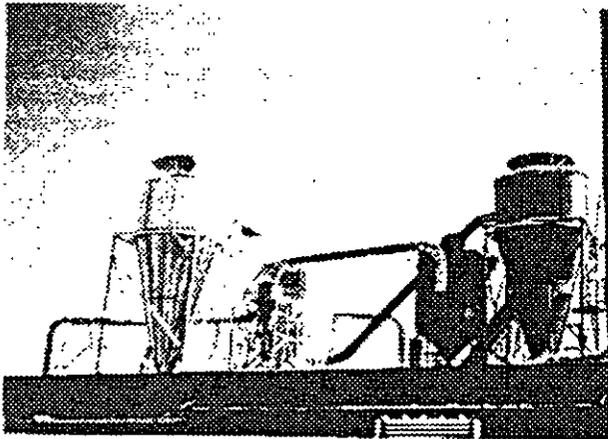
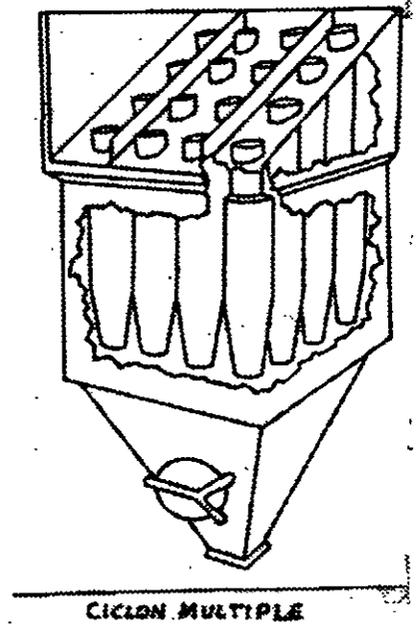


FIG. XII-5.- COLECTORES DE PARTICULAS CICLONICOS O DE FUERZA CENTRIFUGA

La fuerza centrífuga generada por las aspas rotatorias empujan las partículas en la corriente de aire hacia la punta de las aspas, de donde se extraen en una corriente concentrada; algunas características de éste equipo son las siguientes:

- No es adecuado para materiales pegajosos o fibrosos, debido a la tendencia de los sólidos a pegarse en los alabes o aspas;
- Es muy eficiente aún en partículas de 5 a 20 μm de diámetro.

5. COLECTORES DE TEJIDOS

Los colectores de tejido, mostrados en la Fig. XII-6, proveen un método muy eficiente para coleccionar partículas, aún las de menos de 0.5 μm de diámetro; todos los tipos operan bajo el principio de atrapar el polvo en uno de los lados del tejido, lado del gas sucio, mientras permite el paso del mismo aire a través de los intersticios del tejido.

Conforme se colecciona polvo en un lado del tejido el colector se vuelve más eficiente debido a que la capa de polvo (torta o costra del filtro) es aún más eficiente como colector que la tela; ésta costra del filtro bloquea los intersticios más grandes del tejido, los cuales son típicamente de cerca de 100 μm de diámetro, y así ayuda a capturar las partículas más finas de polvo.

Los tejidos deben limpiarse frecuentemente, o bien eventualmente no serían capaces de pasar gas a través de ellos.

El método particular de limpieza elegido de una base para la clasificación de tipos de colectores de tejido; los tres métodos posibles de limpieza son:

- Intermitente;
- Periódico;
- Continuo.

La limpieza intermitente requiere que se pare totalmente el colector con cierta frecuencia para quitar la costra de polvo de la bolsa o envoltorio del tejido; durante el periodo de paro no se coleccionan partículas. La frecuencia de limpieza requerida depende de:

- La carga de polvo;
- Del tipo de tejido usado.

Los colectores de tejido tipo periódico son en realidad una serie de tipos intermitentes conectados por cabezales de entrada y de salida, estando constituidos típicamente por tres secciones. Las secciones se pueden alternar para pararse cada 30 minutos, con 2 minutos de limpieza; normalmente el paro se cicla automáticamente.

Los tipos continuo son inicialmente más caros, pero son capaces de manejar cargas pesadas de polvo; por lo general se emplean tejidos fieltro para este tipo de colector debido a que su limpieza continua previene el desarrollo de cualquier costra de polvo significativa.

Los fieltros son más eficientes que los tejidos tramados en la retención de partículas muy finas. Existen varios métodos disponibles para la limpieza de tejidos, que incluyen las siguientes posibilidades:

- Sacudida manual o con potencia. (Figs. XII-6). En este caso el saco del tejido se suspende de un soporte flexible, y cuando se desea quitar la costra del tejido de la superficie interior del saco simplemente se sacude este. La costra de polvo unida se rompe y cae a la tolva de fondo;
- Chorro de aire. (Figs. XII-6). En este método se sopla con una corriente de aire de alta velocidad dentro de la bolsa colectora en dirección opuesta al flujo normal de aire, con lo cual se desalojan las partículas de la superficie exterior y entonces caen a la tolva de polvos;
- Anillo de sopladors. (Figs. XII-6). El anillo de soplado viajero consiste de un anillo hueco delgado que circunda la bolsa de tejido; el proceso consiste en soplar dentro del anillo una corriente de aire a velocidad relativamente alta para que el aire salga por una serie de pequeños agujeros localizados en la parte interna del anillo conforme el anillo viaja lentamente hacia arriba y hacia abajo por el exterior de las bolsas desprende las partículas que caen a la tolva del fondo.

5.1 Tipos de Tejidos

Se emplean muchos tipos diferentes de tejidos en los colectores,

dependiendo de las condiciones particulares; algunos de estos tipos son los siguientes.

- Los tejidos originales fueron el algodón y la lana, que antes de 1946 eran los únicos disponibles, y aún en la actualidad el algodón es el más usado. El algodón y la lana están limitados a una temperatura por abajo de 93°C (200°F);
- Los nylon o poliamidas se empezaron a usar después de la segunda guerra mundial. Tienen muy buena resistencia a la abrasión;
- Los acrílicos se empezaron a emplear en 1953. Tienen buena resistencia a las nieblas ácidas y pueden operar a temperaturas más altas;
- El uso de poliésteres se inició en 1955. Tienen buena estabilidad a alta temperatura y mejor resistencia a la abrasión que los acrílicos; de los sintéticos, los poliésteres son los más usados;
- La fibra de vidrio se introdujo en 1956 y es el único tejido que puede usarse arriba de 260°C (500°F), sin embargo, tiene baja resistencia a la abrasión y no puede ser sacudido mecánicamente porque se rompen las fibras;
- El uso del teflón (politetrafluoroetileno, o PTFE) y del nomex (poli-m-fenileno isotalamida) se inició en 1964. El teflón tiene buena resistencia a altas temperaturas (260°C) y es resistente al ácido, pero tiene el más bajo coeficiente de fricción de todos los materiales, es decir que las partículas pueden pasar a través del tejido cuando no se desea que lo hagan. El teflón tiene

también mala estabilidad dimensional, baja resistencia a la abrasión y su costo es muy alto.

- El nomex, usado primariamente en la industria minera, tienen buena resistencia a las altas temperaturas (200°C) y razonable resistencia a la abrasión, pero deben mantenerse niveles bajos de azufre, y su costo también es muy alto.

Los tipos de tejidos anteriores pueden estar en las dos formas principales siguientes:

- Tejido tramado. Puede ser como tafetán, sarga, satín, o bien como hilaza torcida, etc.;
- Tejido fieltro. Son más caros y no pueden hacerse de algodón o fibra de vidrio.

A mediados de los 1980's disminuyó el uso de bolsas colectoras, pero a los finales de nuevo aumentó la demanda debido principalmente a la adición de fibras a utilizarse en nuevas aplicaciones de alta temperatura (480°C) como la recuperación de cenizas volantes de combustores de lechos fluidizados y el atrapamiento de polvos en regenerados catalíticos. Fig. XII-7

El nextel 312, una fibra de alumina/boro/sílice, se pudo tramar, formar malla o trenzar para producir un tejido muy similar en apariencia a la fibra de vidrio; éste material se ha probado satisfactoriamente en laboratorios hasta 1150°C. En el campo ha tenido una eficiencia de 99.995% en la remoción de partículas de calderas que queman carbón a temperaturas de 450 a 480°C.

Un tejido de membrana expandida de teflón laminado a un sustrato de poliéster o fibra de vidrio, conocido como Gore-Tex que se usa en el lado de alimentación de bolsas, es capaz de filtración eficiente de inmediato sin que sea necesario esperar la formación de la costra; la eficiencia es mayor de 99.9% con partículas de 0.3 µm de diámetro. Otros nuevos tejidos incluyen a los basados en una fibra aromática poliamida y otras hechas de fibras de sulfuro de polipropileno (P84). El precio de los diferentes tejidos varía significativamente y depende de factores como tamaño de la casa de bolsas, acabado de la superficie y localización del sitio, estimándose como costos relativos los siguientes, considerando la fibra de vidrio tramada como 1:

Poliéster -----	0,75
Teflón -----	6-8
Gore-tex en fibra de vidrio -----	5-8
P84 -----	3-4
Ryton -----	1,5-2
Nomex -----	1-2
Fibra de vidrio tramada -----	1

En adición al desarrollo de nuevas fibras y tejidos, los fabricantes de equipo han refinado los diseños de casas de bolsas para proveer:

- Rangos más amplios de operación;
- Eficiencias más altas;
- Caídas de presión más bajas;
- Vida útil más larga.

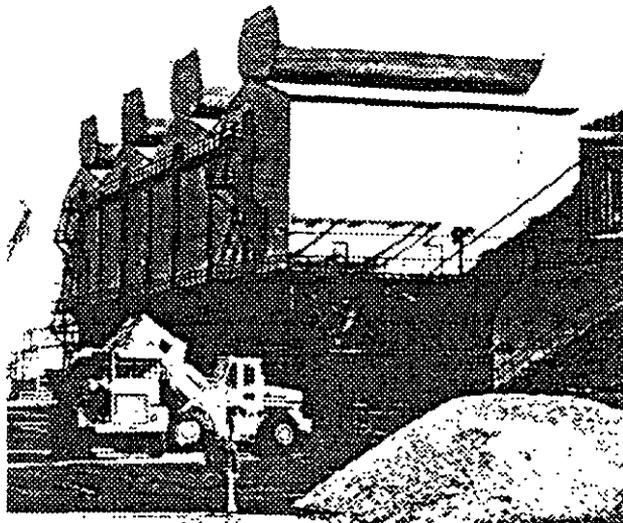
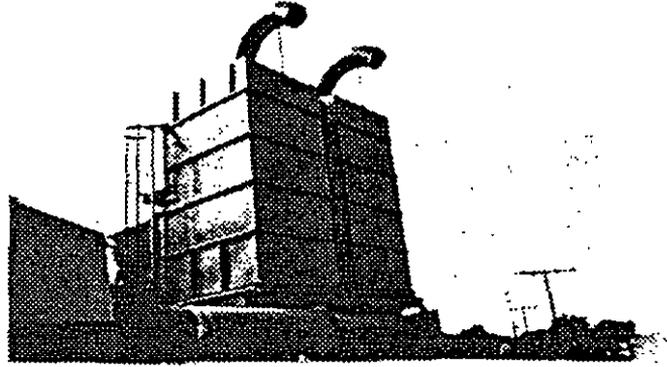


FIG. XII-7.- INSTALACIONES DE BOLSAS COLECTORAS DE TEJIDO

Un diseño de filtro que ha dado buenos resultados es el filtro cartucho o de pliegos; los filtros cartucho se usaron originalmente... como dispositivos de pre-filtración en las entradas de turbinas de gas, pero ahora su uso se ha extendido como colectores de polvo en la industria de proceso.

Los filtros cartucho contienen filtros en pliegos que originalmente eran de papel, razón por la que se consideraron frágiles, sin embargo, ahora hay disponibles filtros de otros

tejidos como Nomex o Poliester; estos filtros cartucho tienen las siguientes características:

- Son dispositivos relativamente pequeños;
- No son caros;
- Se cambian fácilmente;
- Están limitados a bajas cargas de polvo;
- Con frecuencia su operación es a baja temperatura.

6. LAVADORAS HÚMEDAS

Las lavadoras húmedas usan una corriente de agua para incrementar la eficiencia de colección; las partículas sólidas interactúan con esta corriente de agua y se remueven como emulsión o en solución. Si no se toman precauciones adecuadas este método puede dar problemas de contaminación de agua; en general los colectores húmedos enfrían y lavan la corriente de aire.

Debido al uso de agua, la temperatura y contenido de humedad permisibles de la corriente de aire no están limitados; para aumentar su versatilidad, es posible emplear otros líquidos diferentes al agua que pueden neutralizar la naturaleza corrosiva de muchos contaminantes del aire, como el SO_2 .

Una ventaja adicional de las lavadoras húmedas es la minimización de cualquier riesgo de explosión por las mezclas de polvo seco y aire; varias explosiones muy costosas de este tipo han ocurrido, especialmente en molinos de granos.

Otras ventajas incluyen una amplia variedad de tipos de lavadoras para ajustarse a las diferentes situaciones y un costo bajo inicial relativo. Las desventajas de las lavadoras húmedas incluyen las siguientes:

- Alto costo de operación, especialmente en sistemas de alta eficiencia;
- Posibles fallas mecánicas debidas a la acumulación de polvo, erosión y corrosión;

- Tratamiento requerido para los líquidos lavadores y la disposición de lodos;
- Presencia de pluma blanca muy visible, causada por el vapor descargado a la atmósfera. Aunque la pluma no es dañina, puede ser peligrosa para automovilistas y otro tipo de tráfico si ocurre una inversión de temperatura creando una zona densa de niebla.

La corrosión es el problema potencial mayor en las lavadoras húmedas; para minimizar este problema, se construye de varios materiales como aceros inoxidables y otros materiales resistentes a la corrosión o bien recubiertos con plástico o hule; hay dos tipos principales de lavadoras húmedas:

- De baja energía;
- De alta energía o venturi.

Existen muchas variedades de cada uno de los tipos, algunos de los cuales se describen a continuación:

6.1 Lavadoras de Baja Energía

Cámaras spray. Uno de los tipos más simples de lavadoras húmedas es una cámara de asentamiento por gravedad con spray, como se muestra en la Fig. XII-8.

En este colector de partículas al entrar el gas sucio disminuye su velocidad por el rápido aumento de volumen al entrar a la cámara principal y simultáneamente el gas pega con el spray de agua, lo cual genera mucha turbulencia. En esta etapa, muchas de las partículas

grandes se asientan por gravedad, inercia y fuerza centrífuga; las resultantes partículas grandes pueden asentarse fácil y totalmente.

presión producen más y más finas gotas de agua y más turbulencia con lo que se tiene mejor eficiencia de recolección.

Mientras más se mezclan, es más probable que se asienten las partículas finas; los sprays de alta

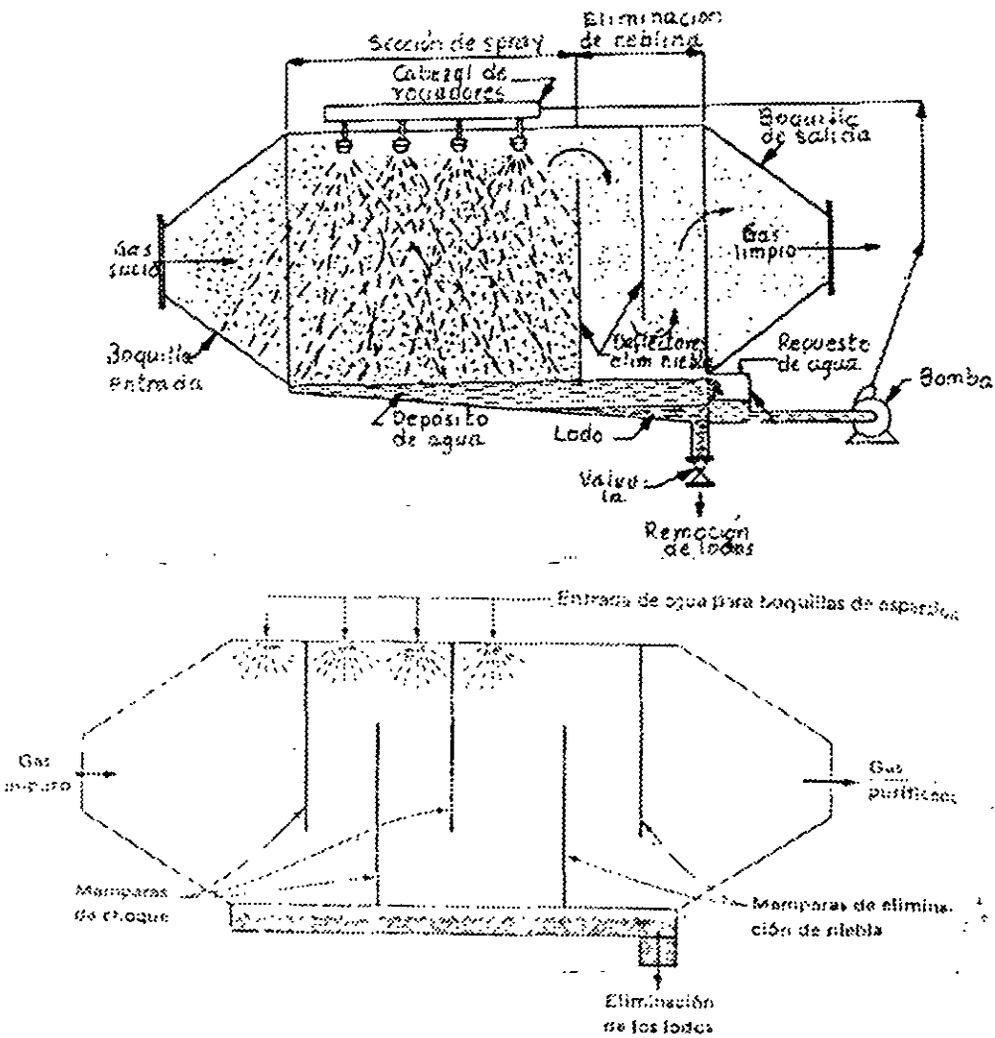


FIG. XII-8.- ESQUEMAS DE LAVADORAS HUMEDAS

El polvo que no se asienta en la cámara principal, que por lo general son las partículas más pequeñas, viajan junto con la corriente de aire a la sección de eliminación de llovizna o niebla; las mamparas o deflectores en esta sección cambian la dirección del flujo de aire incrementado más los efectos de inercia y gravedad, y forzando aún más a las gotas para que se asienten en el fondo. La adición de mamparas en la sección de spray puede también incrementar la eficiencia de recolección.

El agua requerida para este tipo de proceso puede después reciclarse (por ejemplo filtración) o bien descargarse, el efluente a piletas de asentamiento y utilizar agua nueva para la lavadora; esto último solo es práctico si la planta se localiza cerca de una fuente de agua como un lago o un río.

Torres de sprays. Las torres de sprays pueden ser de alguno de los siguientes dos tipos:

- Torres abiertas de spray
- Torres empacadas de spray

Las torres abiertas de spray, son mejores para partículas de coque con diámetros mayores de 10 μm , como las de calcinación de las pirritas de hierro en la etapa de producción de acero; éstas torres son buenas para cargas pesadas de partículas.

Una modificación del tipo de torre abierta de spray requiere que el spray de agua se dirija hacia arriba, y puede necesitar uno o más deflectores o mamparas, que consisten de una placa perforada con

cientos de pequeños agujeros/ m^2 y mojados con una capa delgada de agua. Parcialmente a través de estos agujeros está una pequeña placa de choque; el polvo y el spray de agua viajan hacia arriba a través de los agujeros de la mampara en donde la capa de líquido se atomiza parcialmente en gotas de aproximadamente 10 μm . Estas gotas tan pequeñas son muy eficientes en la recolección de polvo fino; las gotas de agua-polvo pegan en la placa de choque, se asientan y drenan hacia afuera en el fondo.

Una torre empacada, consiste de una serie de camas o lechos de contacto a través de los cuales fluyen los gases y líquidos ya sea a contra-flujo o a flujo cruzado; puesto que el paso de flujo de gases es largo y el área de la superficie mojada es grande, hay mucha oportunidad de que el polvo sea capturado ya sea por la superficie mojada o por el propio flujo de agua.

El colector tipo torre empacada típicamente tiene poca capacidad de manejo de sólidos lo que, no es adecuado para cargas grandes de polvo, sin embargo, sí es adecuado para enfriamiento y absorción de gases; una aplicación típica es la absorción de compuestos fluorinados.

Cargas grandes de polvo se pueden manejar si el material de empaque consiste de esferas flotantes.

Es una "lavadora de lecho fluidizado", el régimen de flujo de gas es suficiente para mantener las esferas suspendidas y en movimiento constante; este movimiento evita el

taponamiento del lecho y el posible desarrollo de canales particulares de flujo de aire que puede disminuir la eficiencia de recolección.

Otros tipos. Otras posibilidades de lavadoras de baja energía incluyen las siguientes:

- Tipos ciclónicos, basados en la fuerza centrífuga;
- Lecho inundado, similar en operación al lecho fluidizado, pero con régimen más bajo de flujo de gas y por lo tanto con menos movimiento y sin suspensión del material de empaque;
- De orificio o tobera sumergida, en donde el gas sucio hace contacto con la hoja de agua en un pasaje restringido.

Estos tipos de colectores son bastante eficientes, de 85 a 95%, en un tamaño mínimo de partículas de 2 a 5 μm .

6.2 Lavadoras de alta energía

Las lavadoras húmedas de alta energía, lavadoras venturi, con más eficientes que las variedades de baja energía.

En las lavadoras venturi, el gas sucio y el líquido lavador se mueven a velocidades muy altas (de 150 a 700 kph), generando mucha turbulencia y mezclado, con lo que se obtiene buena eficiencia de recolección. Existen dos tipos básicos de lavadoras venturi:

- **Secas**, que realmente no son secas: la primera sección, en donde el gas sucio entra, se

concentra y se acelera por el estrechamiento de la vía de paso, que es seca, pero conforme el gas para a través del área restringida, ésta se inunda por un spray de agua transversal;

- **Húmedas**, en donde ambas secciones del colector son húmedas; el spray de agua contacta al polvo tan pronto como entra al colector y se mezclan inmediatamente. Una ventaja de éste mezclado inmediato es que permite la recolección de los gases más calientes.

Con las lavadoras venturi hay muchas variaciones de como se inyectan el agua y el gas, y como se remueven los vapores y los lodos. Las lavadoras de disco inundado, inyectan el agua vía un disco que puede ajustarse para variar el flujo de aire y obtener la máxima eficiencia de recolección; un chorro lavador libera el agua a alta presión para aspirar el gas sucio y así trabaja bien para remover los vapores y los gases absorbidos fácilmente. Es posible tener venturis múltiples en paralelo.

Las lavadoras venturi son muy eficientes, más del 99%, en partículas tan pequeñas como de 0.5 μm , por lo que se utilizan en donde el tamaño de las partículas es de 1 μm o menos, por ejemplo:

- La industria del acero para partículas finas;
- Para nieblas ácidas;
- Polvo de cal y de carbón.

En los sistemas de alta energía, mientras más grande sea la caída de

presión del agua, se tienen costos de operación más altos.

7. PRECIPITADORES ELECTROSTÁTICOS

Los precipitadores electrostáticos son un tipo de colector muy versátil y eficiente, que pueden operar sobre los 540°C (1000°F) y pueden usarse para:

- Partículas secas;
- Humos;
- Nieblas o vapores.

Los precipitadores electrostáticos operan sobre la base de atracción electrostática; el gas sucio se canaliza entre dos electrodos a alto voltaje de (40,000 a 50,000 volts), un electrodo de descarga y un electrodo colector aterrizado.

El alto voltaje negativo causa que se emitan electrones del electrodo de descarga; éstos electrones colisionan con las moléculas de gas que los rodean ionizándolas. Las moléculas negativas de gas migran al electrodo positivo aterrizado y al hacerlo colisionan con el polvo o niebla de partículas entrantes y les transfieren su carga negativa.

Enseguida el polvo o niebla de partículas negativas migran al electrodo aterrizado en donde son neutralizadas; la niebla se sigue, pero las partículas de polvo se adhieren a la placa. Conforme se forma más capa de polvo en el electrodo colector, disminuye la eficiencia de neutralización del electrodo debido a la presencia del polvo aislante,

haciendo necesario golpear con cierta frecuencia con martillos la placa, o bien vibrarla para evitar mayor formación de polvo y mantener la operación del precipitador. En esta forma, las partículas secas caen al fondo de la tolva para su remoción.

Normalmente un precipitador tiene más de un conjunto de electrodos, y pueden colectar el polvo en diferentes compartimientos. Los precipitadores recolectan partículas secas muy finas; la eficiencia η varía con el diámetro de las partículas y con varios parámetros operativos, estimándose de acuerdo con la siguiente ecuación empírica:

$$\eta = 1 \exp \left[\frac{- A Vd}{Q} \right] \text{ en donde:}$$

A= área de recolección de los electrodos, en m²

Q= régimen de flujo volumétrico de gas, en m³/s

Vd= velocidad de la corriente, en m/s

La velocidad de la corriente es la velocidad de las partículas en el electrodo colector, suponiéndose que es de 0.5 veces el diámetro de las partículas cuando se expresan en μm , teniendo valores típicos de 0.03 a 0.2 m/s. Algunas características de los precipitadores electrostáticos incluyen las siguientes:

- Muy alta eficiencia, mayor de 99.9%;
- Buenos para sustancias calientes y/o corrosivas;
- Inversión inicial, alta, que puede hacer que prefieran otras técnicas de recolección;

- Bajos costos de operación y mantenimiento, comparados con otros colectores de alta eficiencia.

La conductividad del polvo es un factor limitante en el uso de precipitadores. La resistencia de la capa de polvo que se desarrolla, la "resistividad del polvo", esta en el rango de 10^7 a $10^{11} \Omega/\text{cm}$.

Si el polvo tiene una resistencia demasiado baja, puede re-entrar a la corriente de aire por su facilidad de transferir su carga a la placa.

Si la resistencia es demasiado alta, puede tener una tendencia muy grande a adherirse y a aislar el electrodo colector, lo cual puede reducir el potencial efectivo a través de los electrodos y posiblemente dar lugar a descargas de chispas, revirtiendo la ionización, y causando también la re-entrada del polvo a la corriente de aire.

La resistencia del polvo como el generado por carbón de bajo azufre puede reducirse con la adición intencional en la corriente de aire de alguna sustancia como:

- Humedad
- Amoniaco
- Nieblas Ácidas
- SO_3

Las descargas de chispas, con la subsecuente disminución en la eficiencia de recolección, también pueden ser causada por cargas de polvo demasiado altas, por lo que equipo no debe operarse arriba de su capacidad de diseño. Otro problema es que el precipitador se caliente

demasiado y se incendie quemándose el acero y destruyéndose totalmente el precipitador. Normalmente el mantenimiento no es caro, y los problemas típicos son:

- Fallas en los electrodos de descarga;
- Mal funcionamiento de golpeadores;
- Fallas en los rectificadores.

Aunque el polvo colectado en la tolva es en teoría eléctricamente neutro, en la realidad tiene alguna carga residual como en una planta de cemento en donde observaron que el tipo de carga varia con las condiciones del clima. Esta carga residual y su mutua repulsión de las partículas estimulan el taponamiento de la tolva. Hay dos tipos de precipitadores electrostáticos:

- De Placas
- De Tubos

Los tipos de placas son las más comunes y por lo general se usan en polvo seco, y consisten de una serie de placas colectores planas con alambres de descarga de alto voltaje suspendidos entre ellas.

Las placas colectoras de tierra son de 0.91 a 2.74 m de largo y 3 a 11 m de alto, y están agrupados unidas dentro de una cubierta completamente cerrada y son suspendidas independientemente y golpeadas para limpieza.

Los alambres de descarga están aislados eléctricamente del resto del sistema; por lo general consisten de resorte de alambre de acero de calibre 12, reforzado en los dos extremos para buen contacto eléctrico y resistencia al desgaste.

Los colectores electrostáticos tipo tubo son mejores para aerosoles, lodos o nieblas líquidas; por lo general se usan como electrodos colectores un número de tubos aterrizados agrupados unidos en una cubierta cilíndrica bajo una placa cabezal, y dentro de cada tubo se suspendan los alambres. Los desechos líquidos son guiados por los tubos conforme corren por el sistema; hay una variación amplia en costos de capital y de operación que dependen de las aplicaciones.

8. INCINERADORES DE VAPORES, GASES, HUMOS, NIEBLAS

Los incineradores de gases se usan principalmente para remover olores, aunque también tienen posibilidades para controlar algo de hidrocarburos y sustancias fotoquímicas activas. Hay tres métodos de incineración de gases:

- Incineración por flama directa
- Incineración térmica
- Incineración catalítica.

Por lo general la incineración con flama directa se usa cuando el material de desecho puede arder fácilmente cuando se mezcla con aire; si la corriente de aire sucio no contiene suficientes elementos combustibles para mantener la

combustión, se pueden agregar pequeñas cantidades de gas natural y aire para incrementar la combustibilidad. Esta mezcla puede quemarse en un simple incinerador de flama tipo acampanado.

Un ejemplo de gas adecuado para incineración es el cianamido de hidrógeno (HCN); este gas es extremadamente venenoso, sin color, desarrollado cuando los cianamidos son tratados con ácido y usados en la producción, por ejemplo de nylon. La incineración destruye la toxicidad produciendo un producto (CO_2 , N_2 y H_2O) que puede ser liberado a la atmósfera; la temperatura típica alcanzada es de cerca de 1400°C .

En las refinerías de petróleo y plantas petroquímicas, el incinerador o mechero por lo general está dirigido hacia arriba y opera en espacio abierto produciendo una luz brillante y ruido significativo.

En otras situaciones el quemador puede ser dirigido horizontalmente y/o puede quemarse en sitios cerrados. En general, la incineración directa con flama es el método más simple de incineración. Con mucha frecuencia la corriente de gas sucio no contiene suficiente combustible para sostener una flama sin la adición de una cantidad grande de combustible. En este caso puede usarse un quemador de gas para calentar la corriente de aire de 550 a 850°C ; a esta temperatura los vapores sufren degradación térmica, y por lo general la corriente de gases tiene un tiempo de residencia en el quemador, de aproximadamente 0.5 segundos.

La incineración catalítica emplea típicamente catalizadores de platino o paladio para:

- La descomposición de solventes de pintura
- Olores de litografías
- Preparación de alimentos
- Otros procesos similares.

Con frecuencia se dispersa en la superficie el metal catalizador en un soporte de alúmina en la forma de una malla de alambre, varillas de hojas delgadas, pastillas esféricas, cilíndricas o de panal. La forma del soporte permite una área de contacto grande entre la corriente de gas y el catalizador; por lo general la reacciones catalíticas son entre 300 y 550°C.

Cuando se usa incineración catalítica es necesario tomar precauciones para que los gases de desecho no tengan catalizadores tóxicos; materiales como fósforo, silicio, plomo, hierro, vanadio y arsénico, tienden a envenenar muchos catalizadores destruyendo su función.

9. TÉCNICAS DE SORPCIÓN

Los materiales volátiles y olores pueden también removerse de los efluentes por absorción en los líquidos y absorción en la superficie de los sólidos. La adsorción con frecuencia emplea materiales como:

- Carbón activado
- Sílica gel
- Alúmina

Todas estas sustancias sólidas tienen una relación muy grande de

superficie a volumen. Por lo general el proceso de adsorción se usa para remover compuestos orgánicos volátiles de carbono (OVC), aunque también es adecuado para materiales que soportan azufre y mercurio.

La capacidad adsortiva de un sólido depende tanto de las propiedades de sólido y de los orgánicos, como de factores como la temperatura y presión; por lo general la capacidad adsortiva se incrementa con:

- El peso molecular del material adsorbido
- El grado de los ciclos
- Su polaridad

Por otra parte, la absorción típicamente utiliza agua o bien un líquido orgánico como aceite mineral o hidrocarburos de bajo-volatil; la absorción ocurre siempre que la concentración de las especies orgánicas en el líquido es menor que la concentración de equilibrio, es decir, la cantidad del sistema como de los parámetros operativos específicos.

Las técnicas de absorción pueden ser usadas en conjunto con cámaras de spray, torres empacadas y lavadoras venturi para mejorar la eficiencia de remoción de sustancias volátiles; la máxima absorción ocurre:

- A bajas temperaturas
- Usando áreas con superficies de contacto grandes
- Con altas relaciones de líquido a gas
- Con corrientes gaseosas concentradas.

Para concentraciones a la entrada de 5000mg/1, se pueden alcanzar eficiencias de remoción mayores de 98%.

10. CHIMENEAS ALTAS

El objetivo de las chimeneas altas no es el de reducir los contaminantes sino solo de difundirlos, y por lo general se trata de SO₂; como consecuencia, los resultados obtenidos con esta técnica son mixtos, por ejemplo:

- Dispersando el SO₂ se minimiza su concentración en la densidad inmediata de la fuente, lo cual es benéfico debido a sus efectos tóxicos innatos;
- Dispersando el SO₂ sobre una gran área también incrementa su tiempo de residencia en la atmósfera, llevando potencialmente a un incremento en la deposición de ácido a muchos kilómetros de distancia.

El SO₂ y el NO_x emitidos directamente de la chimenea se les conoce como "gases precursores", y que en presencia del sol y otros catalizadores atmosféricos se convierten lentamente a "formadores de ácidos", y éstos son partículas sólidas que contienen iones de SO₄⁻ y NO₃⁻.

Cuando los formadores de ácidos se combinan con humedad, forman H₂SO₄ y HNO₃; la deposición ácida es una combinación de "caída-seca" (gases precursores y formadores de ácidos) y "caída-húmeda" (ácidos).

Aunque parece no haber una correlación directa entre el régimen de emisión o altura de la chimenea y el impacto de la lluvia ácida viento abajo es una buena práctica de ingeniería, diseñar una chimenea para solo una moderada dispersión de contaminantes; como una regla empírica, las chimeneas deben tener una altura de 2¹/₂ veces la altura del edificio vecino más alto.

Estudios recientes indican que las chimeneas parecen no ser tan efectivos en la dispersión de contaminantes como se piensa, reportándose que las masas de aire a 100m son mucho más estables que lo supuesto, lo que significa que los efluentes se mezclan y dispersan menos que lo proyectado.

Aún si la información anterior, con frecuencia las chimeneas tienen que ser tan altas que algún otro método de control puede resultar más barato (\$5.5 x 10⁵ dólares, 380m de altura en 1972).

11. PROCESO DE CONTROL DE LOS CONTAMINANTES

11.1 Contaminantes gaseosos

El control de los gases puede lograrse por alguna de las siguientes formas:

- Remoción del gas contaminante de la corriente de gases de escape.
- Un cambio químico en el contaminante
- Un cambio en el proceso que produce el contaminante.

Los métodos o equipos utilizados para lograr lo anterior son los siguientes:

- Lavadoras Húmedas. Remueven el gas contaminante disolviéndolo en el agua; también puede inyectarse un químico en el agua de la lavadora que reaccione con el contaminante. Esta es la base para la mayoría de las técnicas de remoción de SO₂
- Adsorción. Es útil cuando es posible llevar al contaminante un contacto con un adsorbente eficiente como el carbón activado, y es efectivo para muchos contaminantes orgánicos.
- Incineración o quemado (flaring). Se usa cuando un contaminante orgánico puede oxidarse a CO₂ y agua.
- Combustión catalítica. Es una variación de la incineración en donde la temperatura de la reacción por el uso de un catalizador que media la reacción.

11.2 Oxidos de nitrógeno (NOx)

Los óxidos de nitrógeno de la combustión son un contribuyente importante de la contaminación del aire.

Las lavadoras húmedas, especialmente con una solución lavadora alcalina, absorben NO₂, sin embargo este método no es factible solo para control de NO₂ como en las plantas de potencia que queman aceite cuando el lavado no es factible, un método moderadamente efectivo es la combustión fuera estequiométrica; este método controla la formación de NO limitando

la cantidad de aire (oxígeno) en el proceso de combustión justo un poco más que el necesario para quemar el combustible de hidrocarburos, por ejemplo en el quemado de gas natural.



El nitrógeno en el aire usado para la combustión compete con el gas natural por el oxígeno en la reacción competitiva.



La relación estequiométrica del oxígeno necesario en la combustión del gas natural es:

32 gr. de O₂/16 gr. de CH₄

Si el aire usado para la combustión provee oxígeno en ligero exceso a esta relación, virtualmente todo el oxígeno se combina con el combustible en lugar que con el nitrógeno en el aire.

En la práctica la combustión casi-estequiométrica se logra ajustando el flujo de aire a la cámara de combustión de forma junto a la desaparición de cualquier pluma visible persistente.

Típicamente por cada 1% de disminución del exceso de O₂, los niveles de NO_x se reducen de 20 a 100 ppm.

11.3 Oxidos de azufre (SOx)

La mayor fuente de óxidos de azufre es la combustión de aceites residuales del petróleo y carbón. Las opciones y técnicas para reducir las emisiones de óxidos de azufre son las siguientes:

- Cambio a combustible de bajo azufre. Por ejemplo gas natural o gasóleo.
- Desulfurización del combustible (carbón, combustóleo). El azufre en el carbón puede estar ligado tanto inorgánicamente (pirita de hierro, F_eS_2) como orgánicamente.

La pirita puede removerse pulverizando el carbón y lavándolo con una solución detergente.

El azufre ligado orgánicamente puede removerse lavando el carbón con una solución ácida muy concentrada. Los métodos preferidos son:

- i. Gasificación del carbón que produce gas de calidad para tubería
- ii. Extracción con solvente que produce combustible líquido de bajo azufre.

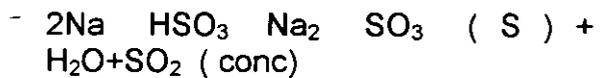
- Chimeneas altas. Es un método equivocado, aunque localmente económico para controlar el SO_2 dispersándolo; ésta opción empleada en Gran Bretaña es en parte responsable de la lluvia ácida en Escandinavia.

- Desulfurización de gases de combustión. Es la última opción para reducir la emisión de SO_x ; se han empleado muchos sistemas y en el presente, hay mucha investigación para hacer los procesos más eficientes.

En los últimos años los métodos se desarrollaron para atrapar el SO_2 como sulfitos en lugar de sulfatos; la ventaja de éste método es que el material absorbido para regenerarlo de forma que se mitigan los problemas de disposición de desechos. Un método típico de control de sulfito es una lavadora simple de álcali, cuyas reacciones son:



El sulfito de sodio se regenera luego por calentamiento del bisulfito:



El SO_2 concentrado se recupera para usarse industrialmente, por ejemplo, en la fabricación de pulpa y papel o de ácido sulfúrico.

11.4 Orgánicos volátiles y olores

Los compuestos volátiles orgánicos y los olores se controlan a través de la oxidación por incineración o por combustión catalítica.

12. **NORMATIVIDAD**

12.1 **Objetivo y contenido**

La normatividad que regula las emisiones a la atmósfera está establecida en la Norma Oficial Mexicana (NOF-085-ECOL-1994) 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, bióxidos 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.

El contenido de la NOM-085-ECOL-1994 es el siguiente:

1. Objeto
2. Campo de Aplicación
3. Referencias
4. Definiciones
5. Especificaciones
6. Requisitos y Condiciones para la Operación de los Equipos de Combustión
7. Vigilancia
8. Sanciones
9. Vigencia

Se excluye a la aplicación de esta NOM a lo siguiente:

- Equipos domésticos de calentamiento de agua
- Equipos de calefacción
- Estufas de casas habitación

- Estufas de escuelas
- Estufas de hospitales
- Estufas de centros recreativos
- Estufas de industrias cuando se utilicen en áreas de servicio de personal
- Equipos y sistemas de combustión que no rebasen los 5CC
- Equipos y sistemas de combustión mayores de 5CC y menores de 20 CC que utilicen gas natural como combustible
- Quemadores industriales de campo
- Sistemas de regeneración de desintegración catalítica
- Plantas recuperadoras de azufre
- Proceso de calentamiento directo que producen SO₂ adicional al proveniente del combustible.

12.2 **Especificaciones**

En la Tabla 5 de la NOM-085 se establecen los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de:

- Humos
- Partículas suspendidas totales
- Oxidos de Nitrógeno (No_x)
- Bióxido de Azufre (SO₂)

En el caso de dos o más ductos de descarga que usen en forma independiente o en conjunto combustibles fósiles sólidos, líquidos o gaseosos pueden optar por lo siguiente:

- Sujetarse a los valores de la Tabla 5, o bien
- Ponderar las emisiones de acuerdo a la ecuación 1 de la NOM-085 y de la combinación de combustibles

de la Tabla 1 de la misma NOM-085

El resultado anterior debe cumplir con el nivel máximo promedio permisible, que resulta de:

- La ponderación de los niveles máximos permisibles de la Tabla 5 utilizando la ecuación 2 de la NOM-085.
- Usar la ecuación 3 de la misma NOM, como alternativa en donde los equipos no cuentan individualmente con medición y registro de alimentación de combustible.

En el caso de equipos de combustión igual o mayores de 43,000 MJ/h se deben respaldar las emisiones de SO₂ con certificados de emisión que se asignan con base en los niveles de la Tabla 2 (de la NOM-085) y no deben sobrepasar los niveles de emisión ponderada de la Tabla 5.

Los combustibles distribuidos en México deben ser de las características necesarias para cumplir con la NOM-085-ECOL-1994 y en las facturas se debe certificar el contenido de S (Azufre) en % en peso (de combustibles sólidos y líquidos). La emisión de SO₂ a la atmósfera se calcula en base al consumo mensual de combustible y al S certificado por el proveedor. Para verificación (y/o sanción) el nivel de emisión se calcula de acuerdo con la ecuación 4 y la Tabla 3.

Para los combustibles no incluidos en la Tabla 3, el factor de emisión se calcula de acuerdo con la ecuación 5.

Los equipos de calefacción industrial deben realizar la medición de emisiones en noviembre y febrero de cada año.

12.3 Requisitos y condiciones para la operación

Independientemente de la capacidad se debe llevar una bitácora de operación y mantenimiento (OPM), que debe tener como mínimo:

a) Control de Operación:

- Fecha
- Turno
- Hora del informe
- Presión de vapor
- Temperatura de salida de gases
- Temperatura del agua de alimentación
- Temperatura y presión de combustible
- Calor de humo
- Purga de fondo
- Purga de nivel
- Disparo de válvula de seguridad
- Consumo de combustible

b) Controles de:

- Presión
- Bomba de agua de alimentación
- Paro y arranque
- Disparo por falla de flama:

c) Control de Emisiones Contaminantes

- Eficiencia
- Temperatura de gases
- Exceso de aire
- O₂
- CO₂
- Opacidad de humo

- Datos de combustible empleado según certificado
- Análisis de emisiones según Tabla 6
- Densidad de humo
- Partículas (PST)
- SO₂ (bióxido de Azufre)
- No_x (óxido de Nitrógeno)

La frecuencia y métodos de medición y análisis de emisión están indicados en la Tabla 6, para equipos mayores de 5 CC: (excepto los iguales o menores de 20 CC que utilicen gas natural)

Los niveles de emisión máximos permisibles de la Tabla 6 sólo pueden rebasarse en los casos de operación de:

- Arranques
- Soplados

Para las certificaciones de emisiones se deben seguir las NMX correspondientes. Cuando en una chimenea descarguen varias corrientes gaseosas, la medición de emisiones debe hacerse por separado.

Cuando no se encuentre con las especificaciones de la capacidad nominal, esta puede determinarse con la ecuación 6.

Cuando se usen simultánea o alternadamente dos o más combustibles sólidos, líquidos o gaseosos, la capacidad nominal del equipo, se determina de acuerdo con la ecuación 7.

En zonas críticas donde no se tengan combustibles de calidad ecológica

establecidas en la NOM respectivas, el INE suspenderá la aplicación de los niveles máximos permisibles de SO₂ y partículas de las Tablas 2 y 5, y se aplicarán los valores de la Tabla 4.

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; 5º fracciones I y VIII, 6º, último párrafo, 8º, fracciones I y VII, 36, 37, 111, fracción Y, del 161 al 169, 171 y 173 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente; 7º 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

CONSIDERANDO

-Que esta Norma Oficial Mexicana fue 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 fue 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 atendió a las opiniones de los sectores involucrados, se determinó revisar y modificar la Norma Oficial Mexicana NOM-085-ECOL-1994.

ECUACIÓN 1

$$E_{pc} = \frac{E_{c1} C_1 + E_{c2} C_2 + \dots + E_{cn} C_n}{C_1 + C_2 + \dots + C_n}$$

donde:

E_{pc} = Emisión ponderada en base al consumo energético horario expresada en Kg/10⁶ MJ

E_{cn} = Emisión de contaminante determinado en cada equipo de combustión expresada en Kg/10⁶ MJ

C_n = Consumo energético horario de cada tipo 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

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

LEP= Nivel Máximo Permissible por fuente fija expresada en Kg/10⁶ MJ, ppm V o mg/m³, según el caso.

LE_n = Nivel Máximo Permissible de Emisión de Contaminantes para el equipo de combustión y, seleccionado de las tablas 4 ó 5 en función del tipo de combustible, expresado en Kg/10⁶ MJ, ppm V o mg/m³, 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

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

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 existente 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

c 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)			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	Combustóleo 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	Combustóleo 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 (186 659)	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 (186 659)	1100 (975 12)	2100 (1864 2)	2600 (2306 35)	180 (144 557)	300 (191 439)	400 (255 941)	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 (173 75)	2600 (2440 19)	160 (107 311)	280 (187 815)	400 (268 158)	30
	Líquidos	NA	70 (23 661)	325 (110 418)	500 (169 89)	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)	

TABLA 4
1994 AL 31 DE DICIEMBRE DE 1997

C 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)			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	Combustóleo 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	Combustóleo 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 (186 659)	1100 (975 12)	2100 (1864 2)	2600 (2306 35)	220 (140 532)	300 (191 678)	400 (255 941)	50
	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 (166 659)	1100 (975 12)	2100 (1864 2)	2600 (2306 35)	180 (144 557)	300 (191 439)	400 (255 941)	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 (173 75)	2600 (2440 19)	160 (107 311)	280 (187 615)	400 (288 158)	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)	

TABLA 5
1° ENERO DE 1998 EN ADELANTE

CAPACIDAD DEL EQUIPO DE COMBUSTION MJ/h	TIPO DE COMBUSTIBLE EMPLEADO	DENSIDAD DE HMMQ	PARTICULAS (PST) mg/m ³ (kg/10 ⁶ MJ) (1) (2)			DIOXIDO DE AZUFRE ppm V (kg/10 ⁶ MJ) (1) (2)			OXIDOS DE NITROGENO ppm V (kg/10 ⁶ MJ) (1) (3)			EXCESO DE AIRE DE COMBUSTION % volumen (5)
		Número de mancha u opacidad	ZMCM	ZC (3)	RP	ZMCM	ZC (3)	RP	ZMCM	ZC (4)	RP	
De 176.6 a 706.0	Combustible o gasóleo	3	NA	NA	NA	550 (487.56)	1,100 (975.12)	2,200 (1950.24)	NA	NA	NA	50
	Otros líquidos	2	NA	NA	NA	550 (487.56)	1,100 (975.12)	2,200 (1950.24)	NA	NA	NA	
Mayor de 706.0 a 5,250	Combustible o gasóleo	3	NA	NA	NA	550 (487.56)	1,100 (975.12)	2,200 (1950.24)	NA	NA	NA	50
	Otros Líquidos	2	NA	NA	NA	550 (487.56)	1,100 (975.12)	2,200 (1950.24)	NA	NA	NA	
	Gasosos	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
Mayor de 5,250 a 43,000	Líquidos	NA	75 (25.334)	350 (118.743)	450 (152.721)	550 (487.56)	1,100 (975.12)	2,200 (1950.24)	190 (121.173)	190 (121.173)	375 (239)	40
	Gasosos	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	190 (118.154)	190 (118.154)	375 (229.201)	
Mayor de 43,000 a 110,000	Líquidos	NA	60 (20.315)	300 (101.814)	400 (135.752)	550 (487.56)	1,100 (975.12)	2,200 (1950.24)	110 (70.266)	110 (70.266)	375 (239)	30
	Gasosos	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	110 (67.159)	110 (67.159)	375 (229.201)	
Mayores de 110,000	Sólidos	NA	60 (21.51)	250 (89.625)	350 (128.475)	550 (515.24)	1100 (1032.48)	2200 (1950.24)	110 (73.851)	110 (73.851)	375 (251.428)	25
	Líquidos	NA	50 (20.315)	250 (84.845)	350 (118.783)	550 (487.56)	1100 (975.12)	2200 (1950.24)	110 (70.266)	110 (70.266)	375 (239)	
	Gasosos	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	110 (67.159)	110 (67.159)	375 (229.201)	

Notas y significados de siglas en Anexo 2.

TABLA 6
MEDICIÓN Y ANALISIS DE GASES DE COMBUSTIÓN

CAPACIDAD DEL EQUIPO DE COMBUSTIÓN MJ/h	PARÁMETRO	FRECUENCIA MÍNIMA DE MEDICIÓN	TIPO DE EVALUACIÓN (1)	TIPO DE COMBUSTIBLE
De 176.5 A 5,250	Densidad de humo CO ₂ , CO, O ₂ , N ₂ SO ₂	1 vez cada 3 meses 1 vez cada 3 meses 1 vez cada 3 meses	Puntual (3 muestras); Mancha de hollín Puntual (3 muestras) Medición indirecta a través de certificados de calidad de combustibles que emita el proveedor.	Líquido y gas Líquido y gas Líquido Líquido
Mayor de 5,250 A 43,000	Partículas Suspendidas totales NO _x SO ₂ CO ₂ , CO, O ₂ , N ₂	Una vez por año Una vez por año Una vez por año Diario	Isocinético (mínimo durante 60 min.); 2 muestras definitivas. Continuo (3); quimiluminiscencia o equivalente Medición indirecta a través de certificados de calidad de combustibles que emita el proveedor Puntual (3 muestras) o equivalente	Líquido y gas Líquido Líquido y gas Líquido Líquido y gas
Mayor de 43,000 A 110,000	Partículas Suspendidas totales NO _x SO ₂ CO ₂ , CO, O ₂ , N ₂	Una vez por año 1 vez cada 6 meses Una vez por año Una vez por turno	Isocinético (mínimo durante 60 min.); 2 muestras definitivas. Continuo (3); quimiluminiscencia o equivalente Medición indirecta a través de certificados de calidad de combustibles que emita el proveedor Puntual (3 muestras) o equivalente	Líquido Líquido y gas Líquido Líquido y gas
Mayores De 110,000	Partículas Suspendidas totales NO _x O ₂ SO ₂ CO ₂ , CO, O ₂ , N ₂	1 vez cada 6 mese permanente (2) Permanente Una vez por año Una vez por turno	Isocinético (mínimo durante 60 min), 2 muestras definitivas. Continuo (3), quimiluminiscencia o equivalente Continua: campo magnético o equivalente, con registrador como mínimo o equivalente Medición indirecta a través de certificados de calidad de combustibles que emita el proveedor Puntual (3 muestras) o equivalente.	Sólido, líquido Sólido, líquido y gas Líquido y gas Sólido, líquido Líquido y gas



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

CURSOS ABIERTOS

**CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN Y USO
EFICIENTE DE ENERGÍA EN CALDERAS**

TEMA :

BIBLIOGRAFÍA

**PALACIO DE MINERÍA
SEPTIEMBRE 1999**

BIBLIOGRAFÍA

CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN Y USO EFICIENTE DE LA ENERGÍA EN CALDERAS

1. Steam
The Babcock E Wilcox Co.
2. Combustion Engineering
Combustion Engineering
3. Boilers
C.A. Shields
Mc Graw – Hill
4. Modern Power Station Practice
Central Electricity Generating Board (CEGB)
Pergamon Press
5. Calcul Thermique Des Chaudières
F. Nuber y K. Nuber
Dunod
6. Steam Boilers Operation
James Jackson
Prentice – Hall
7. Criterios de Diseño de Plantas Termoeléctricas
M. Aguilar
Limusa
8. Efficient Boiler
Operations Sourcebook
F. William Payne
Edit. The Fairmont Press
9. Combustion Efficiency Tables
Harry R. Taplin, Jr.
Edit. Prentice – Hall