

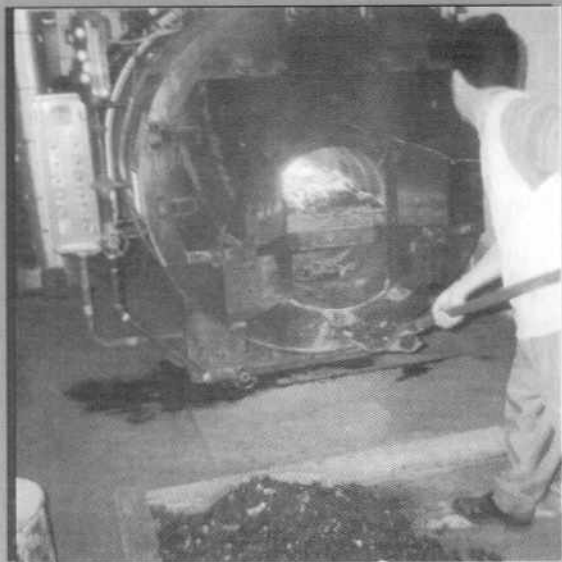
# CALDERAS A CARBON



**ECOCARBON**

EMPRESA COLOMBIANA DE CARBON LTDA.

# CALDERAS A CARBÓN



**EGOCARBON**

EMPRESA COLOMBIANA DE CARBÓN LTDA

© Ecocarbón  
© Universidad Pontificia Bolivariana

CALDERAS A CARBÓN, 1998

ISBN: 958-696-017-X

**Coordinación General**

ECOCARBÓN LTDA.

Gerencia para el Desarrollo de la Industria del Carbón

División Promoción de Mercados

**Centro de Investigación para el Desarrollo Integral - CIDI**

- Universidad Pontificia Bolivariana

**Rector de la Universidad**

Pbro. Gonzalo Restrepo Restrepo

**Dirección Técnica:**

*Grupo de Energía y Termodinámica*

*Universidad Pontificia Bolivariana*

Farid Chejne Janna

Alan Hill B.

Erika Arenas C.

Magdalena Giraldo

Jorge Hinestrosa

Raúl Quiceno

Alejandro Rivera

Juan Carlos Rojas

**Asesores:**

Juan David Pérez

Dario Posada

Diego Jaramillo

Ramiro Giraldo

**Diseño y Diagramación:**

D.G. Ana Milena Gómez C.

Editorial Universidad Pontificia Bolivariana

Impreso en Medellín - Colombia

1998

Editorial Universidad Pontificia Bolivariana

E-mail editupb@janua.upb.edu.co

Telefax: 413 30 11

A.A. 56006

## CONTENIDO

PRESENTACIÓN .....	7
1. DEFINICIÓN DE CALDERAS .....	9
1.1 CLASIFICACIÓN DE LAS CALDERAS .....	11
1.1.1 Calderas pirotubulares .....	11
1.1.1.1 Calderas pirotubulares de cámara trasera seca y húmeda .....	11
1.1.1.2 Calderas pirotubulares de parrilla viajante interna .....	12
1.1.1.3 Calderas pirotubulares de parrilla viajante externa .....	12
1.1.2 Calderas acuotubulares: .....	12
1.1.2.1 Calderas acuotubulares de tubos rectos .....	14
1.1.2.2 Calderas acuotubulares de tubos curvados .....	14
1.2 SISTEMA DE VAPOR .....	15
1.3 PARÁMETROS DE OPERACIÓN Y CONTROL EN LAS CALDERAS .....	15
1.3.1 Indicador de nivel .....	16
1.3.2 Control de nivel (M'Donnell) .....	16
1.3.3 Medidores de flujo .....	18
1.3.4 Medidores de temperatura (Termómetros) .....	18
1.3.5 Medidores de presión (Manómetros) .....	18
1.4 REGULACIÓN Y CONTROL .....	19
2. CARBÓN .....	21
2.1 FORMACIÓN .....	21
2.2 CLASIFICACIÓN .....	21
2.3 ANÁLISIS .....	23
2.3.1 Análisis próximo .....	23
2.3.1.1 Humedad .....	24
2.3.1.2 Material volátil .....	24
2.3.1.3 Cenizas .....	25
2.3.1.4 Carbono fijo .....	25
2.3.1.5 Poder calorífico .....	27
2.3.2 Análisis último .....	28

2.3.2.1	Carbono .....	29
2.3.2.2	Hidrógeno .....	29
2.3.2.3	Nitrógeno .....	29
2.3.2.4	Azufre .....	30
2.3.2.5	Oxígeno .....	30
2.4	PROPIEDADES FÍSICAS .....	30
2.5	PROPIEDADES PARA LA COMBUSTIÓN .....	30
2.5.1	Índice de hinchamiento .....	30
2.5.2	Efecto de las cenizas .....	32
2.5.3	Tamaño de partículas y temperaturas .....	32
2.5.4	Capacidad de aglomeración. ....	33
2.6	PROPIEDADES DEL CARBÓN PARA PULVERIZARLO. ....	33
2.6.1	Índice de molienda Hardgrove .....	34
2.6.2	Humedad .....	34
2.6.3	Grado de finura .....	34
2.6.4	Abrasividad .....	34
2.7	MUESTREO DEL CARBÓN .....	34
2.7.1	Muestreo en bandas transportadoras .....	35
2.7.2	Muestreo de volquetas, camiones o vagones .....	36
2.7.3	Muestreo de pilas. ....	36
2.7.4	Procedimiento para la toma de muestras de producción .....	36
2.8	MANEJO Y TRANSPORTE DEL CARBÓN .....	38
2.9	CONSIDERACIONES SOBRE EL ALMACENAMIENTO DE CARBONES .....	39
3.	COMBUSTIÓN DE CARBONES .....	41
3.1	COMPORTAMIENTO DEL CARBÓN DURANTE EL CALENTAMIENTO .....	44
3.2	DESCRIPCIÓN CUALITATIVA DEL PROCESO DE LA COMBUSTIÓN DE CARBONES. ....	46
3.3	REACCIONES DE COMBUSTIÓN Y REQUERIMIENTOS DE AIRE .....	49
3.4	CÁLCULO DEL EXCESO DE AIRE (e) .....	51
3.5	INQUEMADOS GENERADOS EN EL PROCESO DE LA COMBUSTIÓN. ....	53

3.6	DETERMINACIÓN DE LOS PRODUCTOS DE COMBUSTIÓN A PARTIR DE LOS RESULTADOS DEL ANÁLISIS ÚLTIMO .....	55
4.	QUEMADORES DE CARBÓN .....	65
4.1	Preparación y Alimentación del carbón. ....	66
4.1.1	Trituración del carbón. ....	66
4.1.2	Molienda fina del carbón. ....	67
4.1.3	Alimentación del carbón. ....	69
4.1	Sistemas de combustión de carbón .....	73
4.2.1	Combustores de lecho fijo o móvil .....	73
4.2.2.	Combustores de lecho pulverizado .....	76
4.2.3	Combustores de lecho fluidizado .....	78
4.3	Suministro y distribución de aire. ....	80
4.4	SISTEMAS DE EVACUACIÓN DE LAS CENIZAS. ....	82
4.4.1	Evacuación hidráulica. ....	82
4.4.2	Evacuación por deshollinador o motor impulsor. ....	83
4.4.3	Evacuación neumática. ....	83
4.4.4	Evacuación por válvula rotativa. ....	83
5.	CÁLCULO DE EFICIENCIA .....	85
5.1	CÁLCULO DE LA ENERGÍA DEL COMBUSTIBLE. ....	86
5.2	CÁLCULO DE LA ENERGÍA DEL VAPOR. ....	87
5.3	CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS DE ENERGÍA. ....	87
5.3.1	Cálculo de las pérdidas en gases de chimenea. ....	90
5.3.2	Cálculo de las pérdidas por paredes. ....	93
5.3.3	Cálculo de las pérdidas por inquemados. (Ei) .....	94
6.	ASPECTOS ENERGÉTICOS .....	99
6.1	POSIBILIDADES DE REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS .....	99
6.2	EVALUACIÓN DE LAS PÉRDIDAS Y AHORROS DE ENERGÍA .....	102

6.2.1	Reducción de pérdidas por gases de combustión .....	103
6.2.2	Reducción de pérdidas por inquemados. ....	104
6.2.3.	Reducción de pérdidas por purgas excesivas .....	105
6.2.4	Reducción de pérdidas por las paredes. ....	106
6.2.5	Pérdidas por baja carga de operación. ....	107
6.2.6	Pérdidas debido a una inadecuada elección de la presión de la caldera. ....	107
6.3	Programa de Mantenimiento .....	108
6.3.1	Limpeza de las superficies de calefacción. ....	108
6.3.2	Mantenimiento de las zonas de agua de las calderas .....	109
7.	ASPECTOS AMBIENTALES .....	111
7.1	EMISIONES DURANTE LA COMBUSTIÓN DEL CARBÓN .....	111
7.1.1	Emisiones de partículas .....	111
7.1.2	Emisiones de óxidos de azufre .....	112
7.1.3	Emisiones de óxidos de nitrógeno .....	113
7.1.4	Emisiones de Compuestos Orgánicos Volátiles Y CO .....	114
7.2	CONTROL DE LAS EMISIONES .....	115
7.2.1	Precombustión limpia del carbón .....	115
7.2.2	Combustión limpia del carbón .....	117
7.2.3	Postcombustión limpia del carbón .....	118
7.2.4	Manejo de los residuos sólidos. ....	122
7.3	LEGISLACIÓN AMBIENTAL .....	125
7.3.1	Material particulado. ....	125
7.3.2	Óxidos de azufre. ....	128
7.3.3	Óxidos de nitrógeno. ....	130
7.4	MUESTREOS ISOCINÉTICOS .....	130
	BIBLIOGRAFÍA .....	133
	LISTADO DE FIGURAS Y TABLAS .....	135
	ANEXO: FACTORES DE CONVERSIÓN .....	139

## PRESENTACIÓN

**E**COCARBÓN, empresa industrial y comercial del Estado que tiene bajo su responsabilidad fortalecer la industria del carbón en el orden nacional, viene desarrollando el Servicio de Asistencia Técnica para grandes, medianos y pequeños consumidores, en cumplimiento del Programa de Atención a consumidoras actuales que se ejecuta desde 1995 en todo el país.

El programa en mención constituye un instrumento tendiente a mejorar los procesos asociados con el uso del carbón y se estructuró con base en los resultados del Estudio de Caracterización de consumidores, realizado por la Gerencia para el Desarrollo de la Industria del Carbón, los cuales permitieron determinar, entre otros, la necesidad de reforzar el conocimiento de la utilización apropiada del carbón.

Para atender este aspecto, ECOCARBÓN tiene en operación el Servicio de Asistencia Técnica al consumidor de carbón, cuyos objetivos, alcance y operación en las áreas tecnológicas, ambiental y comercial están de conformidad con las características específicas de cada sector y nivel de consumo.

En cumplimiento del Servicio de Asistencia Técnica Específica, dirigido a medianos y pequeños consumidores, hemos editado esta guía técnica ilustrada que esperamos contribuya a enriquecer la información técnica sobre manejo y operación eficiente de Calderas industriales a carbón, en procura de afianzar la competitividad técnica, económica y ambiental del carbón; estabilizar los niveles de consumo y propiciar su uso eficiente y limpio.

La guía CALDERAS A CARBÓN resume importante material teórico práctico sobre aspectos básicos de calderas, naturaleza del carbón, combustión de carbones, quemadores a carbón para calderas, cálculo de

eficiencias de calderas, aspectos energéticos en calderas y aspectos ambientales; presentados en siete capítulos conceptualizados, diseñados y elaborados por el Grupo de Energía y Termodinámica de la Universidad Pontificia Bolivariana, bajo la dirección del Programa de Atención a Consumidores Actuales que ejecuta la División de Promoción de Mercados.

Aspiramos a que el lector pueda obtener el mejor provecho de esta guía en el propósito de contribuir a mejorar los diferentes procesos y operaciones asociados con la utilización del carbón e instalaciones de combustión en los diferentes subsectores consumidores de este importante recurso energético en nuestro país.

## DEFINICIÓN DE CALDERAS

**L**as calderas son equipos que se utilizan para generar vapor a partir de una fuente de calor. En la industria, generalmente el calor proviene de la energía química almacenada por los combustibles fósiles, como carbón, hidrocarburos, gases combustibles, etc., la cual se libera al reaccionar éstos con el oxígeno.

Toda caldera se compone de cinco partes principales: el hogar, el quemador, las zonas de circulación de los gases, las zonas del fluido térmico (agua) y la chimenea.

El hogar está constituido por dos elementos: la cámara de combustión y el cenicero. En la primera se libera el calor por la reacción exotérmica ( $C+O_2 \longrightarrow CO_2$ ), produciendo gases calientes. En el segundo se recogen los residuos de la combustión. En la zona de circulación de gases se realiza la transmisión de calor al agua; de acuerdo al tipo de caldera, la circulación de los gases se realiza por dentro o por fuera de los tubos.

El flujo de calor, que se origina al quemar el combustible, se transfiere mediante tres mecanismos: radiación, convección, y conducción. La radiación es la transferencia de calor directa en forma de energía radiante, procedente de la incandescencia del combustible o de las llamas a los tubos y al cuerpo de la caldera. La convección es la transferencia de calor entre una superficie sólida y un líquido o gas adyacente que está en movimiento. La convección natural se debe a las diferencias de densidad que provienen del diferencial de temperatura. La convección forzada es causada por una fuerza mecánica, aplicada para impartir movimiento al fluido. La conducción es la transferencia de calor de un cuerpo a otro cuando se encuentran en contacto físico, pero sin un desplazamiento apreciable de las partículas dentro de dicho cuerpo.

La transferencia de calor en el interior de la caldera se ve afectada por la temperatura de la llama y los productos de la combustión, por la acumulación de escorias, cenizas volantes u hollín en las superficies en contacto con el fuego, por la conductibilidad del metal, por la acumulación de incrustaciones o sedimentos en las superficies en contacto con el agua y por la turbulencia y movimiento del vapor y el agua. Se considera que por cada 50°F (10°C) de aumento en la temperatura de los gases evacuados por la chimenea, la eficiencia de la caldera rebaja 1%.

Normalmente la capacidad de una caldera se expresa en términos de Boiler Horsepower (BHP) para calderas de tamaños medios. Calderas relativamente grandes indican su capacidad de producción en lb/h de vapor o en kg/h de vapor. Un BHP equivale a 33465 BTU/h, lo cual significa evaporar 34.5 lb/h de agua saturada a 212 °F (100 °C) y una atmósfera de presión. Para condiciones diferentes

$$mv = \frac{BHP * 33465}{hv - hf}$$

Donde:

hv = Entalpía del vapor en BTU/Lb.

hf = Entalpía del agua de alimentación en BTU/Lb.

mv = Flujo de vapor generado en Lb/h.

El quemador es el componente que se encarga de manejar la combustión. Para el carbón hay tres tipos de quemadores fundamentales: de parrilla, pulverización y lecho fluidizado. Cada sistema cuenta con gran variedad de arreglos debido a la forma de alimentar el carbón. La selección del quemador de carbón depende de variables tales como el tipo de caldera, capacidad, tamaño, calidad del carbón, costos, mantenimiento, consumos de energía, etc.

## 1.1 CLASIFICACIÓN DE LAS CALDERAS

De acuerdo a la circulación del agua, por fuera o por dentro de los tubos, las calderas se clasifican en piro-tubulares y acuotubulares.

### 1.1.1 Calderas piro-tubulares:

En este tipo de calderas el gas caliente de la combustión circula a través del interior de los tubos sumergidos en el agua (ver figura 1). Usualmente son calderas de menos de 1000 BHP, utilizadas generalmente en procesos donde la demanda de vapor es baja.

Las calderas piro-tubulares tienen la ventaja de almacenar un gran volumen de agua, lo que permite compensar los efectos de repentinas fluctuaciones en la demanda de vapor. Sin embargo, el tiempo que necesita para alcanzar la presión de trabajo, partiendo de un arranque en frío, es considerablemente mayor que el requerido por una caldera acuotubular.

Las calderas piro-tubulares se subdividen en: cámara trasera seca, húmeda, parrilla viajera interna y parrilla viajera externa.

#### 1.1.1.1 Calderas piro-tubulares de cámara trasera seca y húmeda

Las calderas de cámara trasera seca se caracterizan por tener un material refractario en la parte posterior del hogar; usualmente se utilizan para combustibles líquidos y gaseosos. Son de dos o tres pasos de gases y tienen una liberación térmica volumétrica del orden de 150000 BTU/ft<sup>3</sup>-hr.

Las calderas de cámara trasera húmeda son enfriadas por agua, con el objetivo de evitar recalentamientos en el hogar. Sus características son iguales a las de cámara trasera seca.

1.1.1.2 Calderas piro-tubulares de parrilla viajante interna  
Este tipo de calderas posee dentro de la cámara de combustión una parrilla viajera, encargada del avance del carbón admitido en una de sus extremidades, para luego ser evacuadas las escorias por el otro extremo, asegurando así el desplazamiento de la capa de combustible durante el desarrollo de la combustión. La altura de la capa depende de la densidad del combustible, de su homogeneidad y de su composición.

1.1.1.3 Calderas piro-tubulares de parrilla viajante externa  
Este tipo de calderas tiene la posibilidad de quemar a diferencia del carbón, otros combustibles como maderas, aceite #6 o gas natural. La parrilla se encuentra ubicada en la parte inferior del cuerpo, y en la parte frontal se sitúa el hogar, formado por los cabezales y las paredes aletadas.

### **1.1.2 Calderas acuotubulares:**

En este tipo de calderas el agua y el vapor circulan por el interior de los tubos, trasladándose por el exterior los gases calientes de la combustión (ver figura 2).

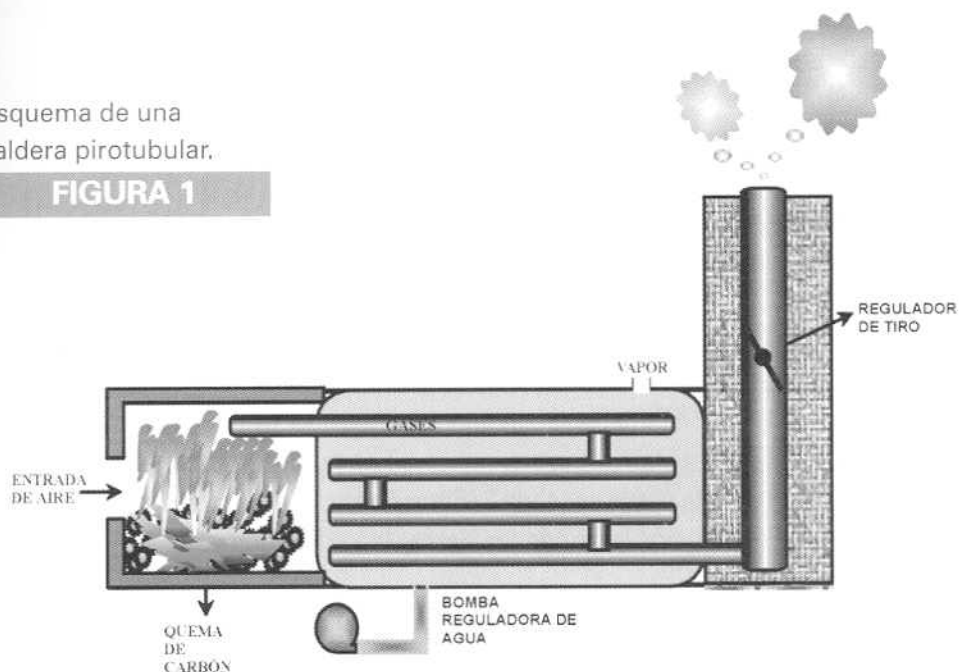
Se utilizan cuando se requieren presiones superiores a 300 psig y altas capacidades. Sus principales aplicaciones se refieren a altas demandas de vapor y sistemas de generación de energía eléctrica.

Las calderas acuotubulares se diseñan para soportar mayores presiones que las calderas piro-tubulares. Los elementos sometidos a presión, principalmente domos y cabezales, se pueden construir de chapas de acero de un mayor espesor.

Se presentan para variados diseños de alta eficiencia. El hogar, que es la zona de radiación más alta, se puede convertir en "paredes de agua" que captan la mayor parte del calor liberado por el combustible, produciendo a su vez el porcentaje más alto de vapor.

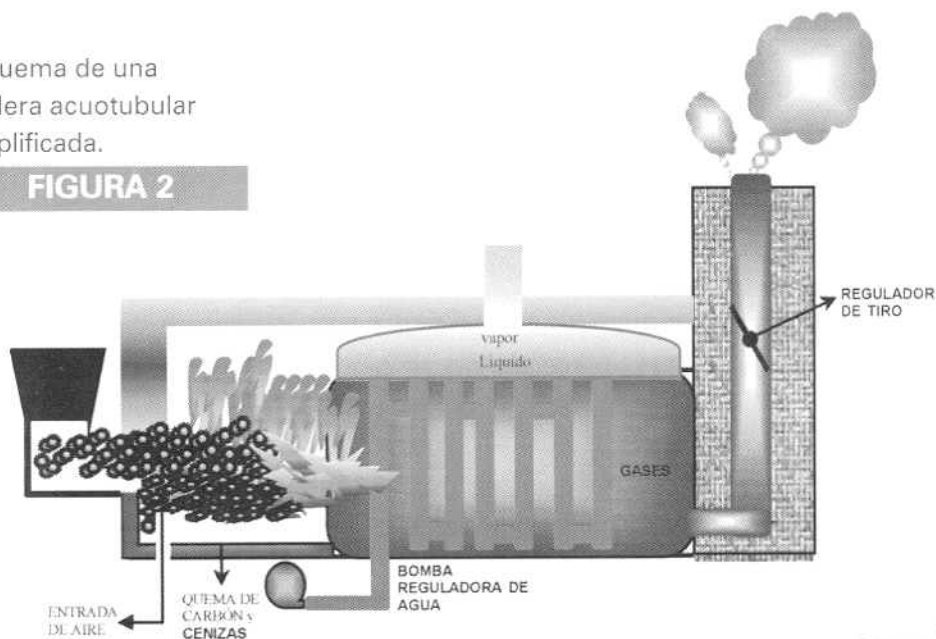
Esquema de una caldera pirotubular.

**FIGURA 1**



Esquema de una caldera acuotubular simplificada.

**FIGURA 2**



Los domos son los tambores que reciben el agua de alimentación y en los cuales se efectúa la separación de la mezcla vapor – líquido de manera natural. Los cabezales son contenedores de agua secundarias, de menor tamaño que los domos, los cuales colectan el agua en los extremos de los tubos y se encargan de distribuir el vapor y el líquido al interior de la caldera.

Las calderas acuotubulares se subdividen en tubos rectos y tubos de acero.

#### 1.1.2.1 Calderas acuotubulares de tubos rectos

Este tipo de caldera es adaptable a diferentes combustibles, como carbón, gas, aceites combustibles, bagazo o leña. Tienen una producción limitada de 4536 kg/h de vapor por cada 355mm de ancho de la caldera. Con el fin de facilitar la circulación de los gases, los tubos deben tener una inclinación de 5° a 10°.

#### 1.1.2.2 Calderas acuotubulares de tubos curvados

Este tipo de calderas ofrece mayor economía en su fabricación y operación que las de tubos rectos, trabajan con mayor capacidad de evaporación y entregan vapor más seco. Los elementos primordiales de los cuales se compone están formados por domos y cabezales interconectados por medio de tubos curvados, colocados de manera que rodeen el hogar de la caldera.

Los métodos de combustión empleados incluyen quemadores de aceite y gas, así como alimentadores mecánicos de combustibles sólidos. Se emplea carbón pulverizado o triturado como material de combustión para capacidades de 45360 kg/h de vapor.

Por lo general, en sistemas de energía se pueden seleccionar, dentro de los límites establecidos por demandas de vapor, calderas piro-tubulares de baja presión hasta acuotubulares de mayor generación. En la figura 3 se presenta una relación entre la potencia de combustión y el consumo de carbón de los diferentes tipos de calderas de vapor.

## 1.2 SISTEMA DE VAPOR

El vapor es un recurso energético secundario, apto para transportar energía y transferirla en varios procesos simultáneamente, de una manera eficiente.

En la figura 4 se ilustra un sistema de vapor, el cual consta de tres partes básicas: generación, distribución y consumo.

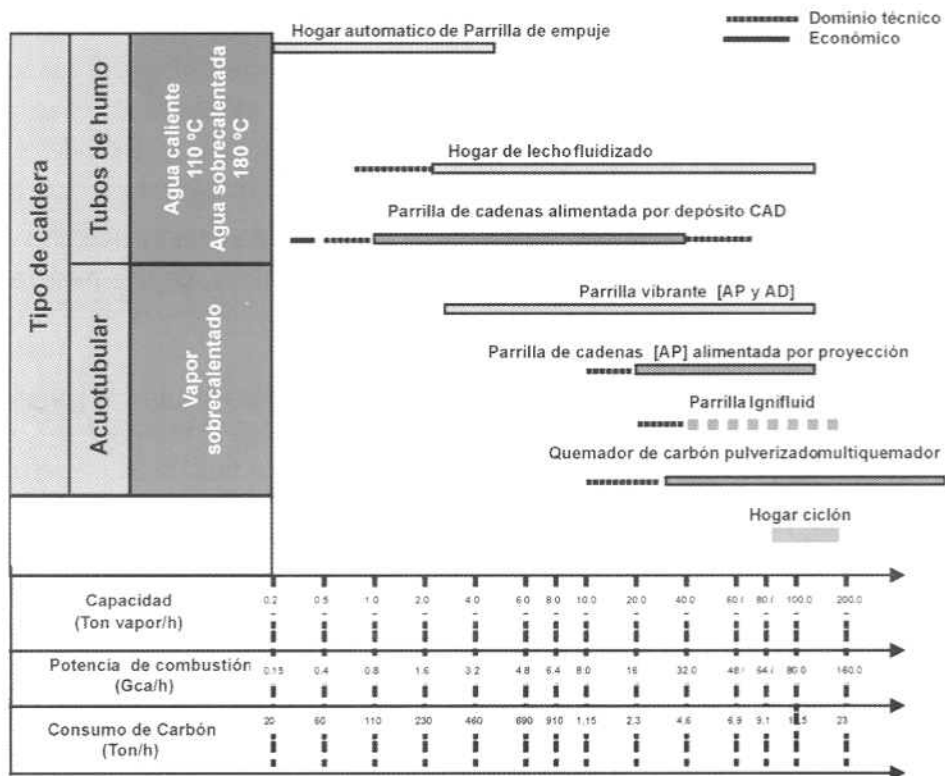
El objetivo final en los sistemas de generación de vapor es el aprovechamiento óptimo de un recurso primario como los combustibles en procesos industriales y en la generación de energía eléctrica.

## 1.3 PARÁMETROS DE OPERACIÓN Y CONTROL EN LAS CALDERAS

En la operación de las calderas se deben vigilar y controlar continua y efectivamente el flujo del aire de entrada al hogar, el agua, el combustible requerido y el vapor, con el fin de garantizar un buen funcionamiento con una producción permanente de vapor a una presión constante, tal como lo requieren los procesos dentro de la planta.

Para tal fin se cuenta con instrumentos y equipos que miden y controlan este funcionamiento, empezando por un simple manómetro para medir y vigilar la presión interna de la caldera, hasta los actuales sistemas de control digital (electrónicos).

A continuación se describen los elementos más simples que deben existir en la caldera para garantizar un adecuado control de operación, así como las pautas de manejo requeridas para su correcta interpretación.



----- Dominio técnico  
 ————— Dominio Económico

### 1.3.1 Indicador de nivel

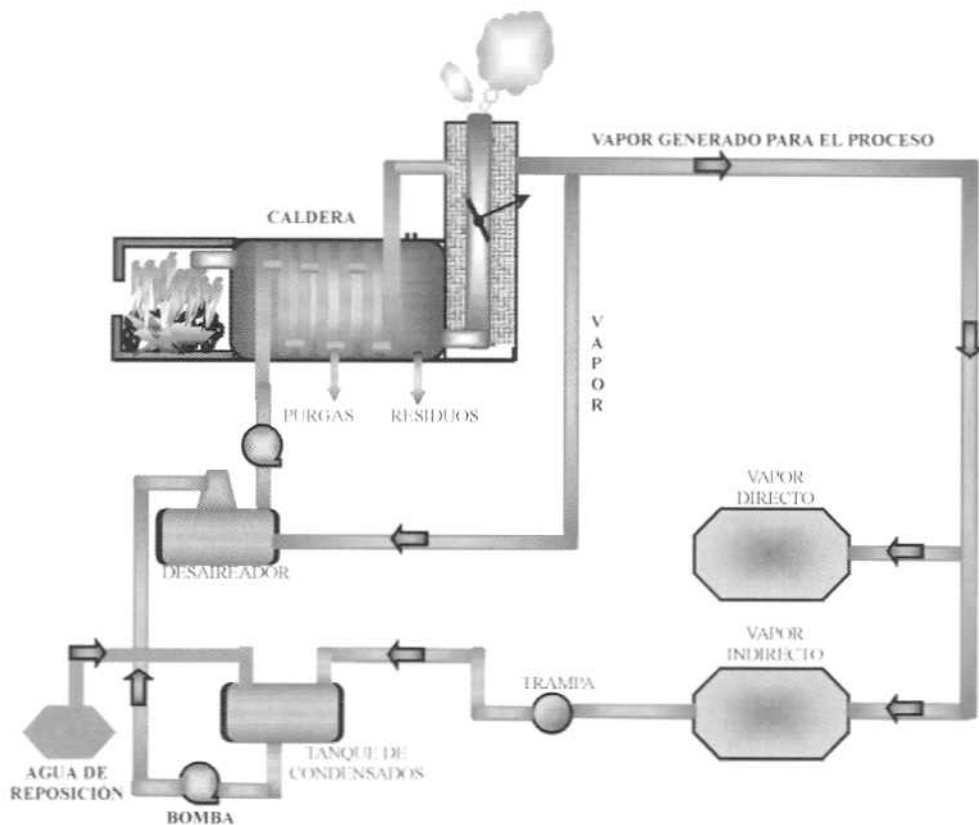
La medición y control de nivel de líquidos dentro de cualquier recipiente cerrado es de vital importancia para el control de alimentación. Un simple indicador visual de nivel (normalmente vidrio) es un indicativo de las condiciones de funcionamiento. Los indicadores deben contar con una excelente iluminación y un fácil acceso para el operador. De igual manera, se deben tener indicadores que muestren los niveles máximos y mínimos permitidos en el equipo.

### 1.3.2 Control de nivel (M'Donnell)

Permite controlar los niveles de los líquidos a través de flotadores conectados al recipiente, los cuales accionan interruptores de

Clasificación de las calderas de acuerdo con la potencia de combustión y el consumo de carbón.

**FIGURA 3**



Esquema ilustrativo de un sistema de distribución del vapor.

**FIGURA 4**

arranque o parada de la bomba de agua para mantener los niveles máximos o mínimos recomendados para el recipiente. Deben tener señalados los puntos normales, máximo y mínimo en el visor de columna. El nivel nunca debe descender del punto mínimo. Si esto sucede es probable que los tubos de la caldera queden descubiertos, perdiendo así su refrigeración, lo que puede ocasionar graves daños a la caldera. Además tiene como función importante accionar una alarma que indica la caída peligrosa del nivel del agua y desconectar el suministro de aire de combustión en el caso de quemado de carbón. Si hay parrilla viajera, ésta se detiene.

### **1.3.3 Medidores de flujo**

La cantidad de flujo o gasto de un líquido puede medirse con equipos que indican la cantidad de flujo que pasa en determinado tiempo; están normalmente ubicados en las tuberías de entrada de agua, en los tanques de alimentación o a la salida de la tubería de vapor. Con estos medidores se puede estimar la necesidad de aumentar o disminuir la cantidad de vapor que debe producirse para los procesos de la planta y, muchas veces, para integrar en determinado tiempo la producción total de vapor.

### **1.3.4 Medidores de temperatura (Termómetros)**

Existen diferentes tipos de medidores de temperatura (bimetálicos, capilares, termopares, etc.), los cuales reportan las condiciones de calor existentes en el interior del recinto que se quiere medir. Normalmente están representados en escalas de grados centígrados ( $^{\circ}\text{C}$ ) o grados fahrenheit ( $^{\circ}\text{F}$ ). Estos medidores indican las restricciones de temperatura que puede tener la caldera o las necesidades de ciertas condiciones exigidas en los procesos de la planta. Para la selección de los termómetros se debe tener en cuenta el punto de trabajo de éstos. Por ejemplo, si se va a medir una temperatura de  $100^{\circ}\text{C}$ , el termómetro correcto debe tener escala entre 0 y  $300^{\circ}\text{C}$ . Normalmente están ubicados en el tanque de agua donde se reciben los condensados, a la salida del vapor y a la salida de los gases (en la chimenea).

### **1.3.5 Medidores de presión (Manómetros)**

Los más usados son los manómetros, tipo bourdón, los cuales reportan la diferencia de presión entre el interior del recipiente medido y la atmósfera. Estos medidores exigen un control permanente para evitar que se superen las condiciones de diseño de la caldera. Los manómetros deben ubicarse a la salida de la bomba de agua, a la salida del vapor y a la

entrada del quemador (tanto para el aire como para el combustible líquido o gaseoso).

#### **1.4 REGULACIÓN Y CONTROL**

En toda instalación de generación de vapor se plantean dos exigencias importantes: la seguridad del manejo de combustibles y fluidos calientes a presión y el funcionamiento con alto rendimiento.

Para responder adecuadamente a las dos exigencias se requiere conocer simultáneamente las variables involucradas en el funcionamiento de cada unidad. Las más importantes son: nivel de agua, mezcla aire - combustible (la cantidad de aire es directamente proporcional a la cantidad de combustible) y la evacuación de los gases.

Hay que ajustar los equipos y sistemas para que trabajen dando los valores teóricos de los parámetros de funcionamiento, durante la puesta en marcha y cuando se modifique el régimen de marcha.

El objetivo primordial de los controles es medir durante el funcionamiento el valor real de los diferentes parámetros que de forma natural se desvían de su valor teórico por diversas causas; comparar los valores reales con los teóricos para determinar el valor y el sentido de la desviación; reajustar los equipos o sistemas para conseguir que la diferencia entre los valores reales y los teóricos sea mínima, todo ello de forma automática, rápida y estable. Los controles ejecutan las tareas que son imposibles hacer manualmente, evitando el error humano.

Para cumplir las operaciones anteriores, en los generadores de vapor se debe regular la presión y la temperatura del vapor, la relación aire/

combustible, el nivel de agua de la caldera, el tiro en el hogar y la temperatura del agua de alimentación.

Existe una serie de parámetros auxiliares y de seguridad que se deben supervisar en las calderas, como lo son: la temperatura y la presión del combustible, la temperatura de los gases y el del aire de combustión, la presión y las características del agua de alimentación, la presión del agua a la temperatura de operación, la presión del aire de combustión y la presión en la caldera. Si estos parámetros se encuentran fuera de su valor límite, se debe producir una alarma o suspender la operación.

**CARBÓN**

**E**l carbón es un combustible orgánico no homogéneo, el cual se originó a partir de los restos en descomposición de materia vegetal. Es el combustible fósil más utilizado en la generación de vapor, por su amplia disponibilidad y bajo costo. Provee más de un cuarto de las necesidades energéticas del mundo, y sus reservas exceden a las reservas disponibles de gas y petróleo.

El carbón varía ampliamente su composición. Estas diferencias en el rango se deben a los diferentes agentes que intervienen en el proceso de formación o carbonificación.

Los materiales orgánicos producen calor cuando se oxidan y la materia mineral permanece como un residuo llamado cenizas. El char o coque es la masa residual con alto contenido de carbono, poco oxígeno e hidrógeno y que contiene aún algo de nitrógeno, azufre y la mayor parte de la materia mineral que queda después de la liberación de los volátiles presentes en el carbón.

**2.1 FORMACIÓN**

El precursor del carbón fue la turba. Ésta se formó mediante la acción bacteriana y química sobre los desechos de plantas. Las acciones subsiguientes del calor, la presión y otros fenómenos físicos transformaron la turba en las diversas clases de carbón que se conocen en la actualidad. El desarrollo evolutivo de la flora, el clima y la posición geográfica y estructural de la región son los factores que afectan la formación de la turba y, por lo tanto, del carbón.

**2.2 CLASIFICACIÓN**

Algunas propiedades de los carbones han sido propuestas como base para realizar una clasificación. Entre ellas se incluyen la composición, la capacidad

calorífica, la estructura, criterios físicos tales como el tamaño o la apariencia y la reacción durante su uso o cuando se expone a condiciones específicas.

La más común de estas clasificaciones es la establecida por la American Society of Testing Materials ( ASTM ), la cual se basa en el contenido de carbono fijo y el poder calorífico, calculado para una base libre de material mineral. Los carbones de categoría más baja se clasifican según su poder calorífico, sobre una base húmeda libre de material mineral. El índice de aglomeración se utiliza para establecer diferencias entre grupos adyacentes.

La categoría o rango designa el estado alcanzado por un carbón en el curso de la carbonificación: aumenta cuando incrementa la cantidad de carbono fijo y disminuye la cantidad de material volátil y humedad. Los rangos del carbón van desde lignitos, que contienen 30% de carbono fijo,

**TABLA 1 - Clasificación de carbones según el rango**

CLASE	GRUPO	CARBONO FIJO <sup>1</sup> %	PODER CALORÍFICO <sup>2</sup> (cal/gr)
ANTRACITA	Meta-antracita	> 98	
	Antracita	92 - 98	
	Semi-Antracita	86 - 92	
BITUMINOSO	Bituminoso Bajo Volátil	78 - 86	
	Bituminoso Medio Volátil	69 - 78	
	Bituminoso Alto Volátil A	< 69	7780
	Bituminoso Alto Volátil B	< 69	7220 - 7780
	Bituminoso Alto Volátil C	< 69	6380 - 7220
SUB-BITUMINOSO	Sub-Bituminoso A	< 69	5380 - 6380
	Sub-Bituminoso B	< 69	5280 - 5830
	Sub-Bituminoso C	< 69	4610 - 5280
LIGNITO	Lignito A	< 69	3500 -4610
	Lignito B	< 69	3500

<sup>1</sup> Base seca libre de cenizas - <sup>2</sup> Base húmeda libre de cenizas

pasando luego a sub-bituminosos, posteriormente bituminosos y finalmente antracitas, que contienen alrededor de 92%. La tabla 1 contiene los datos de la clasificación de los principales tipos de carbón según el rango.

Dentro de los tipos de carbones se pueden diferenciar los carbones térmicos y metalúrgicos. Los térmicos se utilizan para generar calor en procesos industriales, y se clasifican comercialmente por su poder calorífico, cantidad de carbono, ceniza, humedad y azufre. Los carbones metalúrgicos son utilizados para reducción de minerales en procesos metalúrgicos y se clasifican comercialmente por su capacidad aglomerante, su contenido de material volátil, ceniza y azufre.

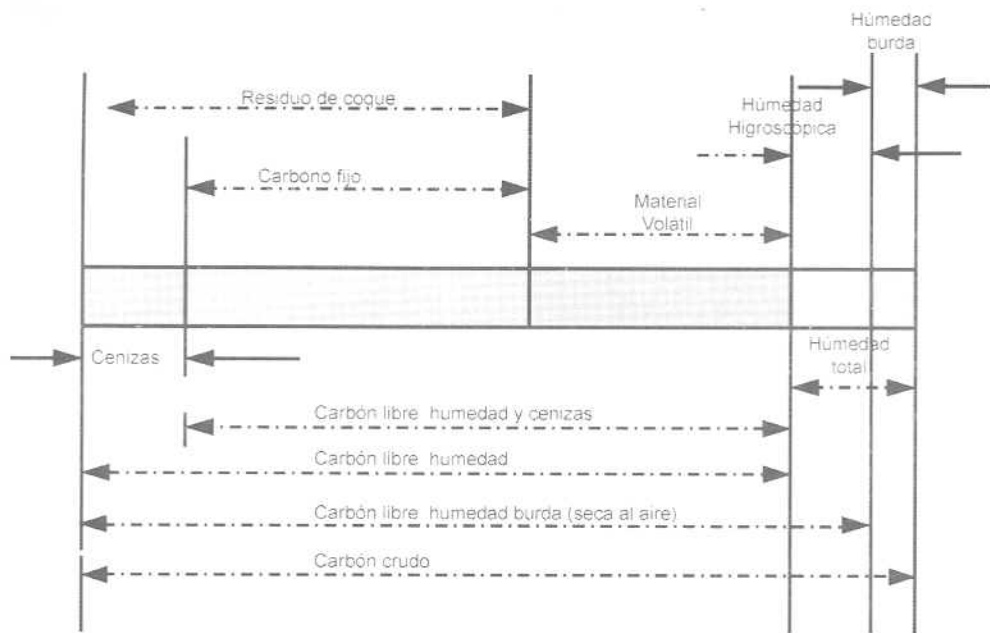
## **2.3 ANÁLISIS**

Con el análisis se evalúan las características físicas, químicas y petrográficas del carbón. Es necesario, para evitar problemas en su manejo y tratamiento, reducir los posibles daños en los equipos, disminuir el impacto ambiental, planear y controlar la exploración y determinar los tipos de carbones que se adapten mejor a las necesidades de usos industriales y tecnológicos.

Generalmente se utilizan dos tipos de análisis para el carbón (ver figura 5): el análisis próximo y el análisis último, ambos expresados en porcentaje en peso. Para el manejo, interpretación y utilización de los carbones es necesario relacionar el análisis de un carbón a un estado o base determinada, libre de sustancias incombustibles, tales como agua y material mineral.

### **2.3.1 Análisis próximo**

El análisis próximo identifica el grado de carbonificación. Da información del comportamiento durante el calentamiento, es decir, cuánto del car-



bón permanece fijo y cuánto se transforma en materiales volátiles. Además, se reportan datos de humedad, contenido de cenizas y poder calorífico.

### 2.3.1.1 Humedad

Existen varias formas de humedad en el carbón: total, superficial, residual y de equilibrio (ver figura 5). La humedad superficial se pierde cuando el carbón se seca al aire; la humedad residual es aquella que contiene un carbón seco a la atmósfera del laboratorio y que se pierde a la temperatura de 106 °C; la humedad de equilibrio es la cantidad de humedad que un carbón puede retener a 30 °C y una humedad relativa entre 96 y 97 %. La humedad total es la suma de la residual y la superficial. En la figura 6 se ilustra el método usado para determinar la humedad.

### 2.3.1.2 Material volátil

El material volátil es la porción que se separa como gas cuando el carbón es calentado. Está compuesto por hidrocarburos y otros gases resultantes de la descomposición y destilación. En

Representación de la composición del carbón y la denominación de sus componentes.

**FIGURA 5**



la figura 7 se ilustra la metodología utilizada para determinar el material volátil.

### 2.3.1.3 Cenizas

La ceniza es el material mineral no combustible, cuya proporción depende del tipo de explotación del carbón en la mina. La metodología para su determinación se esquematiza en la figura 8

Metodología para la determinación de humedad total.

**FIGURA 6**

### 2.3.1.4 Carbono fijo

El carbono fijo de un carbón se incrementa con el rango. Es la parte de la muestra que no es volátil y que se oxida en estado sólido exento de volátiles. El carbono fijo se encuentra en el

OCURRENCIA	→	Agua, H <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> S, CH <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , aromáticos, compuestos orgánicos, oxigenados y sulfurados, alquitranes. Todos estos compuestos son productos de descomposición y no se encuentran como tales en el carbón
NORMA	→	ASTM D3175 - 89 a
PRINCIPIO DEL MÉTODO	→	Calentamiento rápido de 1 gr. de muestra a 950 °C durante 7 minutos en condiciones controladas
USOS	→	Parámetro de clasificación Escogencia del equipo adecuado para la combustión de carbones

OCURRENCIA	→	La ceniza proviene de la materia mineral del carbón que en las condiciones de incineración sufre algunos cambios: pérdida de agua de hidratación, descomposición de carbonatos, pirritas, fijación del SO <sub>3</sub> desprendido.
NORMA	→	ASTM D3174 - 93
PRINCIPIO DEL MÉTODO	→	Determinar el peso del residuo de la combustión de 1 gr de carbón, a 750 °C, con circulación de aire, hasta peso constante
USOS	→	Evaluación del contenido de materia mineral, cálculo de valores analíticos en base libre de ceniza, preparación del carbón, escogencia de equipos, escogencia del método de lavado, contratos comerciales, parámetro importante en los procesos de combustión y residuos, determinación de que se van a generar.

7. Metodología para la determinación de material volátil.

8. Metodología para la determinación de cenizas.

**FIGURA 7 Y 8**

residuo de coque o char, luego de determinada la materia volátil; si a este residuo se le quitan las cenizas se obtiene el carbono fijo. El porcentaje de carbono fijo no se obtiene pesando el residuo sino por diferencia, una vez conocidas la humedad, las cenizas y el material volátil.

#### 2.3.1.5 Poder calorífico

El poder calorífico del carbón es la energía total liberada durante el proceso de la combustión, partiendo de reactivos (carbón + aire) en condiciones de 298K y 1 atmósfera de presión, utilizando relaciones estequiométricas de los reactivos. Esta cantidad de energía es la máxima posible que puede generar un determinado carbón (ver tabla 2).

**TABLA 2**  
**Poder calorífico superior promedio de algunos carbones colombianos**

REGIÓN	Poder Calorífico Superior Kcal/Kgr	Btu/Lb
Antioquia y Antiguo Caldas	6061	10910
Valle del Cauca, sector Yumbo - Suárez	5369	9663
Boyacá, área Sogamoso - Jericó	6889	12401
Cundinamarca, proyecto Termoyumbo IV	7330	13194
Cesar, área La Jagua	6981	12566
Cerrejón, Zona Central	6778	12200
Córdoba, La Escondida - San Jorge	4544	8180
Norte de Santander, Fm. Carbonera	6646	11963

Fuente: ECOCARBÓN.

La energía total liberada puede darse de dos maneras: una de ellas se denomina poder calorífico superior, y se refiere a la máxima energía posible liberada cuando el agua generada por la combustión y la del combustible sale del reactor en forma líquida. Cuando el agua sale en forma de vapor es porque parte del total de energía del combustible se gastó en vaporizarla y por lo tanto se habla de poder calorífico inferior o energía neta posible a entregar por el combustible. Existen unas fórmulas teóricas que permiten el cálculo del poder calorífico superior e inferior con base en el análisis último del carbón (fórmula de Dulong):

$$\text{PCS} = 80.8 [\%C] + 344 \left[ \%H - \frac{\%O}{8} \right] + 22.2 [\%S] \frac{\text{Kcal}}{\text{Kgcarbón}}$$

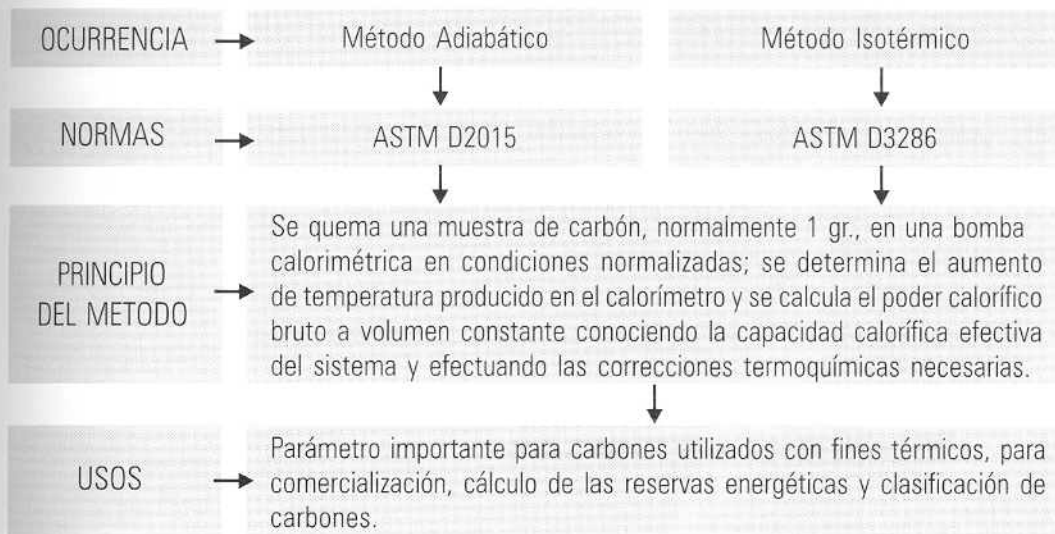
$$\text{PCI} = \text{PCS} - 5.85 \left( 9 * \frac{\%H}{100} + \frac{\% \text{ HUMEDAD}}{100} \right) \frac{\text{Kcal}}{\text{Kgcarbón}}$$

Donde %C, %H, %O, %S, son los porcentajes máxicos del análisis último.

El poder calorífico del carbón está afectado negativamente por varios factores, como la humedad y las cenizas, y positivamente se ve favorecido si el contenido de hidrógeno es alto. En la figura 9 se ilustra el método utilizado para determinar el poder calorífico superior del carbón.

### 2.3.2 Análisis último

El análisis último proporciona información acerca del contenido de cada elemento que compone el carbón, tales como carbono, hidrógeno, oxígeno, azufre y nitrógeno; se utiliza para calcular los requerimientos de aire para la combustión. El carbono, hidrógeno, oxígeno y azufre también se encuentran en los minerales del carbón, en carbonatos, hidratos y sulfatos, respectivamente. El contenido de carbono, hidrógeno y oxígeno de un carbón depende del grado de carbonificación.



### 2.3.2.1 Carbono

Forma compuestos orgánicos aromáticos y alifáticos. Su valor se utiliza para el cálculo de balances térmicos. El análisis de carbono incluye el carbono fijo y el contenido de carbono en los volátiles. En la combustión completa, todo el carbono se transforma en  $\text{CO}_2$ .

### 2.3.2.2 Hidrógeno

Se encuentra presente en el carbón formando compuestos orgánicos aromáticos y alifáticos, en los hidratos y los silicatos; y en la humedad disminuye con el grado de carbonificación. Todo el hidrógeno presente en el carbón se oxida a  $\text{H}_2\text{O}$ , y se presenta como vapor en los gases de combustión.

### 2.3.2.3 Nitrógeno

Se presenta en el carbón formando compuestos orgánicos estables. Se debe conocer su porcentaje para evaluar el impacto ambiental generado por cada tipo de carbón.

Esquema ilustrativo para la determinación del poder calorífico bruto del carbón.

**FIGURA 9**

#### 2.3.2.4 Azufre

Se encuentra formando parte constitutiva de los minerales y como compuesto orgánico.

#### 2.3.2.5 Oxígeno

Se le encuentra combinado orgánicamente y en compuestos inorgánicos, tales como agua, silicatos, carbonatos, óxidos y sulfatos. Se calcula por diferencia. El contenido de oxígeno sirve como una medida del rango del carbón. Carbones de bajo rango contienen mayor proporción de oxígeno que carbones de alto rango.

En la tabla 3 se presentan valores de análisis próximo y último de algunos carbones nacionales.

## 2.4 PROPIEDADES FÍSICAS

Dentro de las propiedades físicas de mayor relevancia se tienen la conductividad térmica, el calor específico medio, la porosidad, el índice de hinchamiento, la densidad de masa, la cual varía según la densidad relativa, la distribución de tamaños y el contenido de humedad. Estas propiedades varían según el carbón, inclusive entre los del mismo rango, y dependen en gran parte de la composición y el contenido de humedad, y se determinan experimentalmente por métodos estándar de análisis.

## 2.5 PROPIEDADES PARA LA COMBUSTIÓN

Las propiedades de los carbones que se deben tener en cuenta para la combustión son el índice de hinchamiento, las cenizas, el tamaño de las partículas, la temperatura y la capacidad de aglomeración.

### 2.5.1 Índice de hinchamiento

Proporciona un índice de las características de coquización de un carbón. Indica la tendencia del carbón a inflarse cuando se oxida o se gasifica en

**TABLA 3**  
**Composición promedio para diferentes carbones colombianos**

		REGION							
		ANTIOQUIA Y ANTIGUO CALDAS	VALLE DEL CAUCA(1)	BOYACÁ (2)	CUNDINA MARCA (3)	CESAR (4)	CERREJÓN (5)	CÓRDOBA, (6)	NORTE DE SANTANDER (7)
ANALISIS PROXIMO	% HUMEDAD DE EQUILIBRIO	10.1	2.09	5.19	3.91	7.31	8.2	17	3
	% CENIZAS	9.12	30.49	11.55	10.19	5.28	8.3	17	16.35
	% MATERIAL VOLÁTIL	37.97	27.29	35.36	28.38	35.6	34	33.7	35.73
	% CARBONO FIJO	42.81	40.15	47.89	57.52	51.81	49.5	32.3	44.92
ANALISIS ULTIMO	% C	66.07	60.89	66.41	79.33	72.56	66.9	47.9	77.64
	% H	4.93	4.55	5.04	5.03	5.47	3.8	4.8	6.12
	% N	1.46	1.15	1.5	1.69	1.64	1.3	1.2	1.69
	% O	12.77	3.83	10.19	4.77	8.02	10.8	10.6	5.65
	% S	0.63	2.7	1.4	0.84	0.62	0.66	1.5	0.82

Fuente: ECOCARBÓN.

(1) Sector Yumbo - Suárez • (2) Sector Sogamoso - Jericó • (3) Proyecto Termo Yumbo IV • (4) Sector de La Jagua • (5) Zona Central • (6) Sector La Escondida - San Jorge • (7) FM - Carbonera.

un lecho fijo o fluidizado. El hinchamiento lo causa la resistencia ofrecida a la liberación del gas a través de los macroporos y fisuras de las partículas de carbón y los intersticios entre partículas. La obstrucción de estos pasajes es causada por la plasticidad adquirida por el carbón. Carbones con un índice de hinchamiento superior a 4 no son deseables para procesos de combustión.

## **2.5.2 Efecto de las cenizas**

La presencia de cenizas puede tener varios efectos sobre la combustión de carbón. En primer lugar, las cenizas proporcionan un medio para la transferencia de calor por radiación cuando es consumido el carbono. Además, algunos minerales en el carbón tienen efectos catalíticos aumentando la reactividad del char, particularmente a bajas temperaturas. La materia mineral forma una barrera al paso del reactante, especialmente hacia el final de la quema es posible que grandes cantidades de material mineral impidan la combustión del carbono remanente.

Carbones con una baja temperatura de fusión de las cenizas pueden presentar problemas para la utilización porque se ve favorecida la formación de escorias y el depósito de éstas en las superficies de transferencia de calor disminuye la eficiencia de los equipos. Una fusión completa de las cenizas acelera el desgaste por abrasión de las parrillas y afecta la distribución homogénea del aire.

Un ligero ablandamiento de las cenizas puede ser favorable a la combustión porque quedan pocos inquemados sólidos; sin embargo, puede entorpecer el paso del aire hacia las partículas incrementando el porcentaje de inquemados en las escorias. La formación de escorias relativamente sólidas presentes al final de las parrillas da lugar a dificultades en la evacuación de las mismas.

## **2.5.3 Tamaño de partículas y temperaturas**

El tamaño de las partículas es la característica que distingue los diferentes procesos de combustión de carbón. Para combustores de lecho fijo o móvil se usan tamaños entre 5 - 50 mm; para lecho fluidizado, entre 1 - 5 mm; y para carbón pulverizado, diámetros menores a 100 mm.

El tamaño de las partículas determina qué fenómeno controla la combustión. Para partículas grandes o temperaturas altas, el fenómeno que pre-

domina es la difusión del oxígeno hacia el char. Debido a que los carbones de bajo rango son más reactivos que los de alto rango, estos últimos se muelen más finos para lograr 100% de conversión en el mismo tiempo de residencia en la caldera o en el horno. Para partículas más pequeñas o temperaturas bajas, la difusión en los poros y la reacción química son los fenómenos más importantes, particularmente cuando las temperaturas son bajas.

El punto de ignición es la temperatura a la cual el carbón comienza a oxidarse sin llama; depende del rango del carbón, aumentando con el mismo, y de la granulometría.

#### **2.5.4 Capacidad de aglomeración.**

La capacidad de aglomeración de algunos carbones y su opuesto, la capacidad de permanecer libres durante la combustión, es importante para seleccionar el carbón con el cual se debe operar un equipo o viceversa. Los carbones con capacidad de aglomerarse, cuando se calientan, pasan a un estado plástico, se funden y forman grandes masas de semicoque difíciles de romper que limitan el flujo de aire en el interior del lecho, denominados carbones coquizables. Los carbones que permanecen libres no se fusionan o si se fusionan se rompen fácilmente, lo que facilita la homogeneidad del flujo de aire en el lecho, denominados carbones térmicos.

### **2.6 PROPIEDADES DEL CARBÓN PARA PULVERIZARLO.**

Calderas con una capacidad mayor de 100.000 libras de vapor por hora, utilizan carbón pulverizado. A continuación se enuncian algunas propiedades importantes que se deben tener en cuenta para pulverizar un carbón.

### **2.6.1 Índice de molienda Hardgrove**

El índice de molienda hardgrove caracteriza el trabajo que se necesita para llevar una muestra de un carbón a una granulometría fina, indica la facilidad con la cual el carbón puede ser pulverizado. Este índice es un parámetro de comparación y es mayor para carbones de bajo rango, como el lignito, y menor para carbones de alto rango, como la antracita. Este índice no se debe confundir con la dureza del carbón, y varía con otros constituyentes, tales como la humedad.

### **2.6.2 Humedad**

La humedad de equilibrio y la humedad superficial afectan el proceso de pulverización, ya que favorece la aglomeración de finos y reduce la capacidad de secado generada al pulverizar un carbón.

### **2.6.3 Grado de finura**

El grado de finura requerido para la combustión de carbón pulverizado depende del contenido de material volátil. Carbones con bajo contenido de volátiles, alto rango, se deben pulverizar con un grado de finura superior a los carbones de bajo rango, puesto que menos combustible se destila y se pierde como gas y mayor cantidad se debe quemar como carbono fijo.

### **2.6.4 Abrasividad**

La abrasividad indica el grado de abrasión del carbón. Los materiales inorgánicos presentes en el carbón son altamente abrasivos, característica que se debe tener en cuenta dentro del proceso de pulverizado.

## **2.7 MUESTREO DEL CARBÓN**

El objetivo de un muestreo de carbón es obtener una cantidad parcial representativa de una unidad de muestreo o lote, de forma tal que la

distribución y proporción de las variables físicas, químicas y petrográficas sean equivalentes. Para muchos propósitos, a la muestra se le reduce el tamaño de partícula y la masa. Este proceso se denomina preparación.

Antes de emprender un programa de muestreo, se deben definir el material, la cantidad a ser muestreada, los análisis requeridos, la precisión requerida y la logística necesaria durante la operación.

Un muestreo adecuado permite evaluar o conocer, entre otros, los siguientes resultados: caracterizar física, química, petrográfica y tecnológicamente los carbones; conocer la variabilidad de los diferentes parámetros de calidad analizados; planificar las etapas de desarrollo y producción de proyectos mineros; definir usos industriales y tecnológicos; realizar contratos de compraventa e identificar problemas de tipo ambiental durante la producción, manejo, procesos de beneficio y utilización.

El muestreo puede ser manual o mecánico y puede realizarse en bandas transportadoras, en volquetas o camiones, en vagones, o en pilas.

A continuación se enumeran, en forma general, los principales tipos de muestreo de producción:

### **2.7.1 Muestreo en bandas transportadoras**

Es el sistema de muestreo más confiable, ya sea en banda estacionaria o en movimiento, siendo el primero el más preciso, razón por la cual se utiliza como método de referencia para verificar cualquier otro método. Los incrementos se pueden tomar a mano, con dispositivos especiales, (palas, canastas o separadores) o automáticamente.

### **2.7.2 Muestreo de volquetas, camiones o vagones**

Éste se utiliza para propósitos de control de calidad y las muestras no pueden ser usadas para investigación científica. Cuando se muestrea antes del descargue se debe remover previamente una capa de por lo menos 30 cms eligiendo los lugares en puntos espaciados, regularmente en zig-zag. Cuando se muestrea durante el descargue, la muestra debe abarcar todo el ancho del material en movimiento o por lo menos se debe tomar en tres lugares del ancho total.

Cuando se muestrea después del descargue los incrementos se deben tomar a diferentes alturas del talud formado, siguiendo en espiral.

### **2.7.3 Muestreo de pilas.**

Son muestras voluminosas de carbón triturado, que se toman desde una pila de almacenamiento. Pueden consistir de carbón de un solo manto o de varios mantos, carbón lavado o carbón crudo. La calidad de la pila es importante cuando se requieran muestras frescas.

### **2.7.4 Procedimiento para la toma de muestras de producción**

A continuación se resumen algunas normas de muestreo ISO y ASTM y se presentan algunas consideraciones prácticas que se deben tener en cuenta cuando se muestrea carbón de producción, o sea, aquel extraído del manto por operaciones mineras. Para cualquier información adicional, se deben consultar las normas ISO 1975 - 1988 (E) o ASTM D-2234.

Antes de tomar la muestra se debe decidir el tamaño requerido para los diferentes ensayos. Las muestras deben ser representativas de la mayor cantidad de carbón producido y con un mínimo de 12 incrementos cada una. El número de incrementos para muestrear carbón hasta 1000 toneladas se presenta en la tabla 4.

**TABLA 4 - Número de incrementos para suministros de hasta 1000 ton. según normas ISO**

ESTADO DEL CARBÓN	CARBÓN LAVADO	CARBÓN SIN LAVAR
Bandas transportadoras y similares	16	32
Vagones, volquetas y barcazas	24	48
Barcos y pilas	32	64

Por lo general, durante el programa de caracterización se muestrea carbón sin lavar y no se recomienda realizarlo en pilas. Cuando se muestrea en un sistema de transporte continuo (vagones, volquetas, etc.), se recomienda tomar, por lo menos, tres incrementos por cada unidad de transporte.

Para suministro de más de 1000 toneladas y menores de 10000, se debe multiplicar el número de incrementos por el factor:

$$N2 = N1 \sqrt{\text{Suministro (Toneladas)} / 1000}$$

Donde: N1 es el número de incrementos específicos en la tabla 4 y N2 es el número de incrementos requeridos.

Por ejemplo, para muestrear 4000 toneladas de carbón sin lavar, en una banda transportadora, el número mínimo de incrementos será de 64.

Otro procedimiento para suministros de más de 1000 toneladas es dividir el suministro en sub-lotes, para luego tomar incrementos que conformen una muestra por cada sub-lote.

En el caso de pilas mayores de 10000 toneladas, se deberá dividir la pila en sub-lotes menores a 10000 toneladas y utilizar el proceso descrito.

El tamaño mínimo de los incrementos, o sea, el peso mínimo de cada incremento, se obtiene de las expresiones:

$P = 0.60 D$  Cuando  $D < 150$  mm y

$P = 10$  Kgs Cuando  $D > 150$  mm

Donde P es el peso mínimo de cada incremento en kilogramos; P debe ser siempre mayor de 0.5 Kgs. Y D es el tamaño tope del carbón en milímetros (95% del material tiene un tamaño igual o menor). Por ejemplo, para carbón de 2" (50.8 mm), el peso mínimo de los incrementos deber ser 3.05 kgs. Para tamaños de partículas mayores de 150 mm se recomienda tomar incrementos de peso mayor o igual a 10 kgs.

Cuando se muestrean líneas continuas de producción, como bandas transportadoras, o cuando se muestrea con dispositivos, como cucharas, tubos o palas, el tamaño de éstos debe ser por lo menos 2.5 veces mayor que el tamaño tope del carbón.

El principal error en el muestreo consiste en tomar incrementos en lugares no representativos, por ejemplo, de un solo lado del vagón, volqueta, pila, etc.; no alcanzar toda la profundidad en las pilas o usar dispositivos de muestreo que no tengan capacidad para coleccionar carbones de gran tamaño.

## **2.8 MANEJO Y TRANSPORTE DEL CARBÓN**

Muchos carbones son cuidadosamente preparados y tamizados para cumplir con los requerimientos de utilización específica. Con el fin de realizar la total valoración técnica y económica del carbón, se deberían efectuar todos los esfuerzos para asegurar que tales propiedades sean protegidas al momento del uso. En la práctica, esto es virtualmente imposible debido a que el carbón usualmente tiene que ser transportado por diferentes medios de un lugar a otro, y antes de usarlo es frecuente su almacenamiento en pilas por varios períodos de tiempo.

Dependiendo de la localización geográfica, el carbón puede estar sometido a altas y bajas temperaturas ambientales y a grandes fluctuaciones en la humedad relativa. En climas muy calientes, la combustión espontánea puede ser un problema.

## **2.9 CONSIDERACIONES SOBRE EL ALMACENAMIENTO DE CARBONES**

La exposición del carbón a condiciones atmosféricas prevalecientes (humedad y temperatura) puede causar un deterioro en su calidad y una reducción en su valor económico. Este proceso está influenciado por la tasa y grado de reducción de tamaño de partícula. Este y otros procesos pueden llegar a cambiar el contenido de humedad, para producir varios efectos por la oxidación del carbón y el desarrollo de la combustión espontánea.

Cuando se trata de almacenar carbón durante mucho tiempo, el espesor de las pilas debe adaptarse de acuerdo con el tipo de carbón, así por ejemplo: los carbones bajos en volátiles se pueden apilar a alturas ilimitadas; los carbones con materia volátil entre 25 y 40 % pueden apilarse a alturas entre 6 y 8 m. como máximo y los lignitos a alturas menores de 6 m. Una compresión del carbón después del almacenaje, reduce el riesgo de autoinflamación.

La combustión espontánea origina cambios en las propiedades físicas y químicas de las pilas de carbón, particularmente en la vecindad de los focos calientes, y si no se controla puede destruir grandes cantidades.

Para minimizar el riesgo de oxidación espontánea del carbón almacenado en pilas se tienen las siguientes sugerencias:

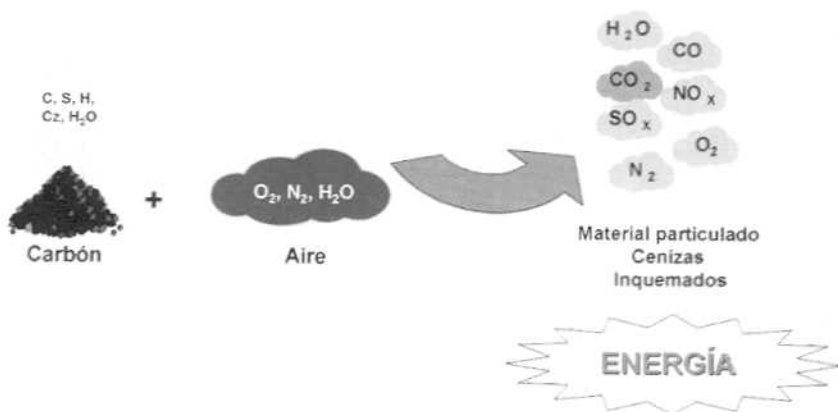
- El terreno sobre el cual descansan las pilas debe estar bien nivelado, firme y drenado.
- Exponer el carbón al menor transporte posible.
- Una altura menor de las pilas disminuye el peligro de combustión, porque el calor se disipa más fácilmente.
- Utilizar el carbón tan pronto como sea posible.
- Es conveniente almacenar bajo el agua ciertos tipos de carbón de baja temperatura de inflamación.
- Evitar el almacenaje en silos cerrados puesto que el carbón emite gases que al mezclarlos con el aire pueden producir incendios y explosiones.
- La cara de la pila que enfrenta el viento se debe apisonar para evitar focos de autocombustión.
- Los carbones de distinta procedencia se deben apilar por separado, procurando evitar el almacenamiento de finos (de 0 a 1 mm) de carbones de bajo rango y durante mucho tiempo (máximo 4 semanas).
- El carbón no debe exponerse a radiación calorífica prolongada, como por ejemplo al lado de una caldera u horno.

En caso de presentarse un incendio es difícil extinguirlo; el único método seguro de extinción es el de esparcir el montón de carbón, irrigándolo simultáneamente con agua. La irrigación con agua, sin esparcir simultáneamente el montón, tiene un efecto insignificante, puesto que una cantidad de agua insuficiente actúa como propagadora del fuego. En recintos cerrados, la irrigación con agua es peligrosa y puede dar lugar a explosiones de vapor.

## COMBUSTIÓN DE CARBONES

La combustión es el cambio químico de ciertos elementos de un combustible con el oxígeno del aire, controlada de tal manera que se genera energía térmica útil. Los principales elementos constituyentes del combustible son carbono elemental (C), hidrógeno (H), agua ( $H_2O$ ), cenizas ( $C_z$ ) y otros compuestos.

En el proceso de la combustión, los elementos y compuestos se transforman en dióxido de carbono ( $CO_2$ ), vapor de agua ( $H_2O$ ) y en otros compuestos no deseables debido a su impacto nocivo sobre el medio ambiente y los materiales de los equipos. Estos compuestos son monóxido de carbono (CO), óxidos de azufre ( $SO_x$ ), óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ), partículas de combustibles no oxidados y cenizas (ver figura 10).



Esquema ilustrativo del proceso de la combustión.

**FIGURA 10**

El oxígeno se toma del aire, con la composición que se presenta en la tabla 5. Sin embargo, para efectos prácticos de cálculos en combustión, se asume que el aire contiene en volumen un 79% de nitrógeno ( $N_2$ ) y un 21% de oxígeno ( $O_2$ ), equivalentes a un 63,7% y 23,3% en masa, con un peso molecular de 28.9 Kg/Kmol.

**TABLA 5 - Composición del aire seco**

	% Volumen	P.M.
Nitrógeno	78.09	28.016
Oxígeno	20.95	32.000
Agua	0.93	39.944
Dióxido de Carbono	0.03	44.944
Otros	< 0,003	—

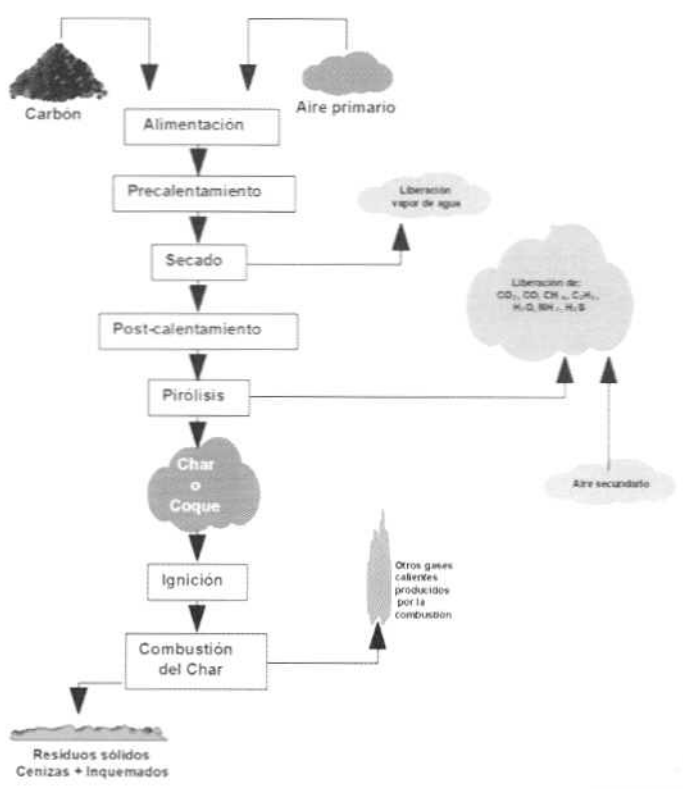
En condiciones ideales, el proceso de la combustión ocurre con proporciones exactas de aire y combustible, la cual se denomina cantidades estequiométricas o cantidades teóricas de aire. Sin embargo, en la práctica, como no es posible esta condición, se utilizan cantidades superiores a la estequiométrica, utilizándose aire en exceso para aproximarse más a una combustión completa. De lo contrario, se forman productos intermedios, como el CO, inquemados sólidos e hidrocarburos ( $C_xH_y$ ), los cuales aún son combustibles y nocivos para la salud de los seres vivos y el ambiente. La cantidad de exceso de aire depende del tipo de combustible (carbón, crudo, gas, etc.).

El proceso de la combustión de sólidos como el carbón es complejo y lleva consigo una serie de etapas que se deben realizar en forma correcta para liberar la energía química almacenada sin perjudicar el medio ambiente. Estas etapas (ver figura 11) son secado (extracción de agua del carbón), pirólisis o destilación (liberación de compuestos volátiles presentes en el carbón en forma de  $CO_2$ , CO,  $CH_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $NH_3$ ,  $H_2S$  y otros), combustión del Char o coque, combustión de algunos de los compuestos volátiles que aún son combustibles, tales como CO,  $CH_4$ ,  $C_2H_6$  y extracción de la cenizas o compuestos inertes del carbón.

Tres condiciones son indispensables para una buena combustión:

- 1- Aire suficiente para la mezcla.
- 2- Mezcla rica aire-combustible. La relación está en proporción directa. Para cada Kg de carbón se requiere cierta cantidad de kg de aire (ver tabla 7).
- 3- Alta temperatura en el horno u hogar.

Debido a la separación del material volátil de la estructura sólida, se requieren dos tipos de aire. Uno denominado aire primario, el cual atraviesa y acompaña la partícula de carbón, unido a éste para facilitar la



Esquema ilustrativo de las diferentes etapas de la combustión de carbones.

**FIGURA 11**

transferencia de oxígeno al interior de las partículas y producirse la combustión del char o coque. El otro, denominado aire secundario, se requiere para la combustión de los volátiles en una zona que normalmente se ubica en la parte superior del lecho de carbón o del hogar de la caldera o del horno.

En el proceso de la combustión del material sólido se presentan fenómenos físicos adicionales, como la transferencia de oxígeno a la superficie del carbón, difusión o transporte en el interior de la partícula y la reacción propiamente dicha. Estos fenómenos retardan el proceso y dependen del tamaño de partícula. Por lo anterior, las partículas de carbón pequeñas reaccionan con mayor facilidad que las de mayor tamaño. Otro aspecto importante está relacionado con la ignición del char o coque; ésta se origina a partir de la energía recibida de la combustión de los volátiles. Por lo tanto, un carbón con alto contenido de volátiles es de fácil ignición, y cuando posee poco material volátil, ella se dificulta.

Dependiendo del tamaño, se oxida en parrillas, donde la distribución granulométrica debe ser la siguiente: <6mm el 5%, entre 6 y 12 mm el 10%, entre 12 y 20 mm el 35%, entre 20 y 25 mm el 35% y entre 25 y 38 mm el 15%, o en quemadores de carbón pulverizado y en equipos de lecho fluidizado, donde el tamaño debe al menos de un 55 a 75% pasar la malla 200.

### **3.1 COMPORTAMIENTO DEL CARBÓN DURANTE EL CALENTAMIENTO**

Un aumento de la temperatura genera transformaciones químicas y físicas del carbón: las químicas producen gases, vapores condensables y un residuo sólido compuesto casi únicamente por carbono. Las físicas producen efectos en su grado de plasticidad; las partículas forman una masa esférica compacta, la cual se hincha y luego se resolidifica formando un cuerpo sólido coherente con estructura porosa, llamado coque o char según el grado de plasticidad alcanzado.

Los procesos químicos son muy dependientes de la velocidad con la cual se calientan las partículas y de la temperatura.

A temperaturas menores de 200°C y, especialmente, a presión baja se libera el agua y existe una devolatilización menor. Posteriormente ocurre la ignición, la cual se presenta cuando la tasa de generación de calor es igual a la tasa de pérdida de calor. Alrededor de los 300°C se inicia la desvolatilización, se producen alquitranes e hidrocarburos gaseosos, CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O y HCN. Estos productos reaccionan con el oxígeno en los alrededores de las partículas incrementando la temperatura. Algunos aspectos de este proceso incluyen: liberación de volátiles del carbón, condensación y repolimerización de alquitranes en los poros del char, craqueo de los hidrocarburos, condensación de hidrocarburos gaseosos, oxidación de especies gaseosas hacia productos de combustión y producción de óxidos de nitrógeno y de azufre.

La reacción exotérmica de oxidación del char libera energía hacia la partícula y el gas que se encuentra en las vecindades de la superficie. Por otra parte, la oxidación de los productos iniciales (ej.,  $\text{CO} + \text{O} \rightarrow \text{CO}_2$ ) causan liberación adicional de calor en los alrededores de las partículas. El tiempo requerido para el consumo del char es una parte importante del proceso de reacción del carbón.

El paso controlante de la reacción de oxidación puede ser química (adsorción del reactante, reacción y desorción de productos) o difusión gaseosa (difusión de los reactantes o productos a través de los poros). Varios investigadores han postulado la existencia de diferentes zonas de temperatura o regímenes que determinan la resistencia controlante. En la zona I, que ocurre a bajas temperaturas o para partículas muy pequeñas, la reacción química es la etapa controlante. La zona II se caracteriza porque la controlan la reacción química y la difusión a través de los poros.

La zona III ocurre a altas temperaturas; el fenómeno controlante es la transferencia de masa.

Es importante anotar que la tasa de reacción no sólo se afecta por la temperatura. Otras variables como la concentración de reactantes, la composición del material alimentado, el área superficial interna y externa y la presencia de impurezas catalíticas también afectan la reactividad del char o coque.

### **3.2 DESCRIPCIÓN CUALITATIVA DEL PROCESO DE LA COMBUSTIÓN DE CARBONES.**

El carbón con granulometría pequeña, finos hasta 5 mm, se oxida como partículas independientes, suspendidas en aire en los quemadores de lecho fluidizado. En estos equipos, las partículas pasan por las diferentes etapas que se ilustran en la figura 12 (precalentamiento, secado, poscalentamiento, pirólisis o gasificación, combustión del coque o char y de los gases de pirólisis) a una alta velocidad de transformación debido a la alta tasa de transferencia de masa y energía, lo cual facilita la liberación de los volátiles, el transporte de oxígeno y su fácil ignición. Por lo tanto, se garantiza una combustión casi completa, con una pequeña producción de inquemados sólidos y gaseosos.

En la figura 12 se presenta un esquema de la combustión de carbón pulverizado, indicándose en ella las zonas donde se realizan las diferentes etapas del proceso. También se ilustra el suministro de aire primario y secundario. Normalmente el aire primario y el de transporte de carbón se utiliza para la combustión del coque o char y el secundario para la combustión de los gases liberados durante la pirólisis.

El carbón también se puede quemar en capas dispuestas sobre parrillas fijas o móviles donde cada partícula, con una granulometría entre 6 y 38 mm, no sólo está en contacto con el aire sino también con otras partículas vecinas.

Esquema ilustrativo de la combustión de carbón pulverizado.

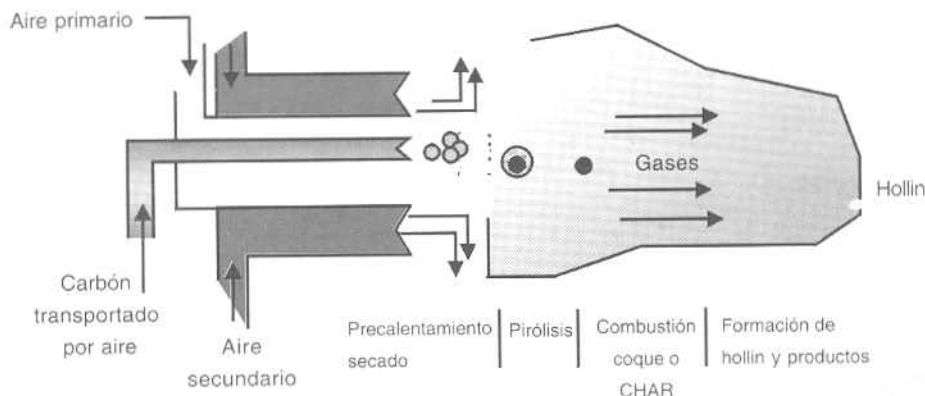
**FIGURA 12**

La combustión del carbón en lechos sobre parrillas está influenciada por el flujo de aire que lo atraviesa, por la altura de la capa y por sus características fisicoquímicas. Por lo general, la presión del aire bajo la parrilla puede estar entre 2 y 4 pulgadas de agua, según su tipo, garantizando la penetración en lechos gruesos.

El aire primario atraviesa el lecho y es responsable de mantener los frentes de inflamación (liberación de volátiles) y el frente de combustión en las posiciones óptimas para una adecuada práctica de combustión en parrilla (ver figura 13).

El aire secundario entra por encima de la capa de carbón y se utiliza para la combustión de los gases combustibles productos de la pirólisis y gasificación del carbón en el lecho. A veces se llama "de sobrefuego", el cual garantiza más eficiencia en la combustión.

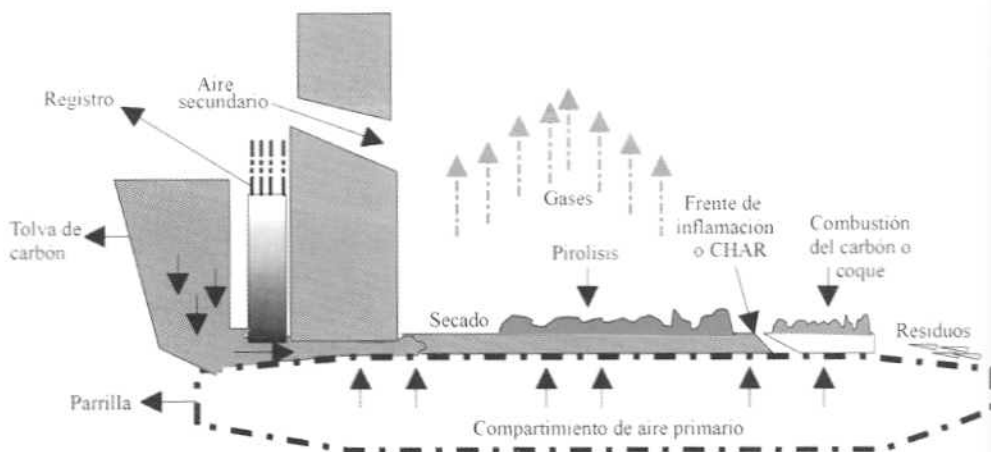
En estos quemadores, la superficie de la capa se calienta bajo el efecto de la radiación térmica de la bóveda y de las llamas vecinas y también por radiación y conducción a partir de la parte adyacente ya inflamada del



lecho. Luego, el carbón se seca y posteriormente sufre una pirólisis durante la cual se desprende el material volátil; éstas se inflaman en la superficie de la capa y se constituyen en el frente o plano de inflamación, el cual se extiende, en principio, linealmente sobre toda la amplitud o ancho de la parrilla.

El plano de inflamación se refiere a la superficie del carbón en proceso de devolatilización. El lecho de carbón localizado por encima del plano de inflamación se considera devolatilizado completamente.

La inflamación iniciada en la superficie se propaga lentamente a una velocidad con dirección perpendicular a la parrilla y luego en contra corriente al flujo de aire primario, hasta que alcanza la superficie de la parrilla, la cual se desplaza a otra velocidad horizontal diferente a la anterior. Se recomienda que la velocidad horizontal de la parrilla no sea mayor que la velocidad vertical de frente de inflamación.



Esquema ilustrativo de un hogar de parrilla

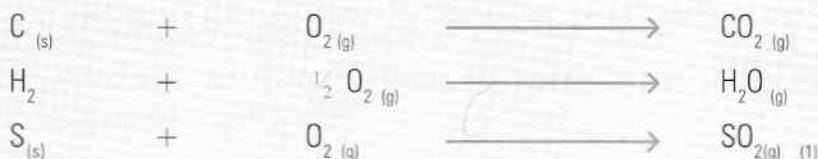
**FIGURA 13**

### 3.3 REACCIONES DE COMBUSTIÓN Y REQUERIMIENTOS DE AIRE

Las reacciones globales de la combustión de carbones se presentan en la tabla 6. Ellas corresponden a las reacciones estequiométricas completas, con las cuales se forman productos finales como el agua ( $H_2O$ ) y los dióxidos de carbono ( $CO_2$ ) y de azufre ( $SO_2$ ). El aire requerido es para suplir la cantidad de primario y secundario.

El oxígeno mínimo requerido para la reacción del carbono (C), del hidrógeno ( $H_2$ ) y del azufre (S) para formar completamente  $CO_2$ ,  $H_2O$  y  $SO_2$ , de acuerdo con las reacciones de la tabla 6, representa el oxígeno estequiométrico o teórico. Éste se utiliza para calcular la cantidad de aire mínima necesaria o aire estequiométrico y la relación aire combustible teórica ( $\lambda$ ). Valores típicos de estas cantidades se presentan en la tabla 7.

**TABLA 6 - Reacciones globales en la combustión de carbones**



(1) Esta reacción se dará en el proceso si no se captura el azufre (S) antes de quemar.

A continuación se ilustra un ejemplo que permite el cálculo de la relación aire combustible estequiométrico ( $\lambda$ ). Suponga que poseemos un carbón cuyo análisis último es 60% de C, 10% de H, 15% de O, 1% de S, 5% de cenizas ( $C_c$ ) y 9% de  $H_2O$ . Estos valores porcentuales divididos por 100 significan fracciones másicas, o sea, Kg del elemento i por cada Kg de carbón.

**TABLA 7 - Relación aire combustible para diferentes carbones colombianos**

REGIÓN	RELACIÓN AIRE-COMBUSTIBLE EN KgAIRE/KgCARBÓN, (*)	RELACIÓN AIRE-COMBUSTIBLE EN m <sup>3</sup> (n) /KgCARBÓN
Antioquia y Antioquia	8.73	11.29
Valle del Cauca, sector Yumbo - Suárez	8.48	10.97
Boyacá, área Sogamoso - Jericó	8.95	11.58
Cundinamarca, proyecto Termoyumbo IV	10.64	13.75
Cesar, área La Jagua	9.86	12.76
Cerrejón, Zona Central	8.53	11.02
Córdoba, La Escondida - San Jorge	6.74	8.71
Norte de Santander, Fm. Carbonera	10.78	13.94

Fuente: Grupo de Energía y Termodinámica de la Universidad Pontificia Bolivariana.

El cálculo de ( $\lambda$ ) se hace considerando las reacciones de la tabla 3.2 y la oxidación del azufre (S) a  $SO_2$ , así:

De la reacción de oxidación del carbono se desprende que cada Kg. de carbono (C) requiere 3.66 Kg de oxígeno (32/12), o sea, 0,6 Kg de C/kg carbón requerirá:

$$i) \quad 0,6 \frac{\text{kg de Carbono}}{\text{kg carbón}} * 2,66 \frac{\text{kg Oxígeno}}{\text{kg de Carbono}} * \frac{1 \text{ kg aire}}{0,233 \text{ kg de } O_2} = 6,87 \frac{\text{kg aire}}{\text{kg carbón}}$$

ii) De manera similar para el H:

$$0,1 \frac{\text{kg de Hidrógeno}}{\text{kg carbón}} * 8 \frac{\text{kg Oxígeno}}{\text{kg de Hidrógeno}} * \frac{1 \text{ kg aire}}{0,233 \text{ kg de } O_2} = 3,43 \frac{\text{kg aire}}{\text{kg carbón}}$$

iii) De manera similar para el S:

$$0,01 \frac{\text{kg de Azufre}}{\text{kg carbón}} * 1 \frac{\text{kg Oxígeno}}{\text{kg de Azufre}} * \frac{1 \text{ kg aire}}{0,233 \text{ kg de O}_2} = 0,04 \frac{\text{kg aire}}{\text{kg carbón}}$$

iv) El oxígeno presente en el combustible será un aporte y, por lo tanto, no lo requerirá del aire:

$$0,15 \frac{\text{kg de Oxígeno}}{\text{kg carbón}} * \frac{1 \text{ kg aire}}{0,233 \text{ kg de O}_2} = 0,64 \frac{\text{kg aire}}{\text{kg carbón}}$$

v) Por último, el cálculo de la relación aire combustible estequiométrico será:

$$\lambda = \text{I) + II) + III) - IV) = 9,70 \frac{1 \text{ kg aire}}{\text{kg carbón}}$$

La cantidad real de aire requerido para una adecuada combustión debe ser superior a la calculada en el procedimiento descrito anteriormente. Normalmente se utiliza un exceso de aire (e) entre 15 y 25% para la quema de carbón pulverizado, entre un 20 y un 30% para la quema en parrilla móvil (partículas inferiores a 2,5 cm) y entre 30 y 45% para la combustión de carbón en parrilla fija (donde las partículas pueden ser superiores a los 2,5 cm).

Empíricamente, para cálculo rápido se puede obtener el aire teórico a nivel del mar ( $\delta = 0.75 \text{ lb/Ft}^3$ ), aplicando la norma de que, para cada 100 Btu de poder calorífico de cualquier combustible, es necesario 1 Ft<sup>3</sup> de aire.

### 3.4 CÁLCULO DEL EXCESO DE AIRE (e)

El exceso de aire evita la formación de inquemados sólidos y gaseosos (CO e Hidrocarburos). Sin embargo, el exceso no puede ser grande, pues-

to que se pierde mucha energía del carbón en calentar el nitrógeno del aire que luego se escapa al medio ambiente sin su aprovechamiento.

Para calcular el exceso de aire (e) se utiliza el análisis de los gases productos de la combustión, los cuales se miden en el ducto después del hogar de la caldera o del horno.

La fórmula para calcular el exceso, con base en el análisis de gases, es:

$$e = \frac{3,76 (y_{O_2} - 1/2y_{CO}) * 100}{1 - y_{CO_2} - y_{SO_2} - 4,76y_{O_2} + 0,88 y_{CO}}$$

Donde los  $Y_i$  son las fracciones volumétricas base seca reportada del análisis de gases.

Una vez conocido el valor de "e", se calcula la cantidad de aire realmente utilizada (Rar) en el proceso de la combustión, así:

$$Rar = (1 + e) \lambda \left[ \frac{\text{kg aire}}{\text{kg carbón}} \right]$$

En consecuencia, el flujo de aire en Kg/s ( $m_a$ ) se calcula utilizando el consumo de carbón ( $m_c$ ), dado en Kg/s, así:

$$m_a = (1 + e) \lambda m_c$$

Del balance de masa global se puede calcular el flujo de gases generados en la combustión, así:

$$m_g = m_c + (1 + w)m_a - m_r$$

Donde  $m_g$  es el flujo de gases totales, dado en Kg/s; W es la humedad absoluta del aire, en Kg agua/kg aire seco;  $m_r$  es el flujo de residuos compuestos por cenizas e inquemados (o carbón aún sin quemar)

### 3.5 INQUEMADOS GENERADOS EN EL PROCESO DE LA COMBUSTIÓN.

En un proceso inadecuado de combustión se obtienen productos intermedios, como monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos, que aún son combustibles y también se presenta en los residuos sólidos carbón sin quemar denominado inquemado.

Problemas operacionales, como la deficiencia de oxígeno para la combustión, distribución granulométrica inapropiada del carbón antes de alimentarse, tecnologías inapropiadas, como la combustión en parrilla fija con alimentación manual y el tipo de carbón, pueden generar esta clase de inquemados.

La generación de estos inquemados resta potencial energético al proceso de la combustión. Problemas de impacto ambiental dificultan la utilidad de las cenizas y provoca altos consumos de energía.

Los inquemados sólidos están presentes en el material particulado que se escapa en chimeneas y en los residuos que se recogen debajo de la parrilla, en el piso del hogar, en los ciclones y en los filtros de talegas. Se caracterizan por contener carbón (C), hidrógeno (H), azufre (S) y otros. Los inquemados gaseosos y líquidos se caracterizan por poseer productos intermedios de las reacciones de combustión, como el monóxido de carbón (CO) y los hidrocarburos, como el  $C_xH_y$ .

Para cuantificar los inquemados sólidos se recomienda hacer un análisis próximo o último a los residuos. Si se hace el análisis próximo a los residuos, los inquemados se calculan así:

$$\% \text{ inquemados} = 100 - (\text{cenizas} + \text{humedad de los residuos})$$

Si se realiza el análisis último, se puede determinar la cantidad de carbono (C), hidrógeno (H) y azufre (S) sin quemar, así:

Carbono sin quemar:

$$\frac{\%C_R}{100} * m_R$$

Hidrógeno sin quemar:

$$\frac{\%H_R}{100} * m_R$$

Azufre sin quemar:

$$\frac{\%S_R}{100} * m_R$$

Donde  $\%C_R$ ,  $\%S_R$ ,  $\%H_R$ , corresponden al análisis último de los residuos;  $m_R$  es la cantidad de residuos generado en Kg/s. o en ton/día.

A veces es muy difícil hacer una medición exacta de los inquemados, especialmente en carbón pulverizado, porque muchas partículas pequeñas, menores de 10  $\mu$ m, se escapan por las chimeneas.

Sólo cuando hay colectores de talegas, y se analizan por aparte las porciones de cenizas recogidas en cada tolva (hogar, colectores mecánicos y de talegas), es posible aproximarse bastante a la realidad. Por debajo de un 4% de inquemados en las cenizas se considera bueno.

### 3.6 DETERMINACIÓN DE LOS PRODUCTOS DE COMBUSTIÓN A PARTIR DE LOS RESULTADOS DEL ANÁLISIS ÚLTIMO

A continuación se presenta una metodología y un ejemplo práctico para calcular los requerimientos de aire estequiométrico en condiciones de combustión completa o incompleta. Para el empleo de la metodología se parte de disponer del análisis último del carbón (ver tabla 8).

**TABLA 8 - Análisis último de un carbón**

Carbono ( C ):	59.4%
Azufre ( S ):	0.80 %
Hidrógeno ( H ):	3.70 %
Nitrógeno ( N ):	1.00 %
Oxígeno ( O ):	7.40 %
Humedad ( w ):	12.9 %
Cenizas ( C <sub>2</sub> ):	14.8 %

La tabla 9 es un formato en el cual se escriben las fracciones de cada uno de los elementos anteriores. En ella se encuentran los factores para cada elemento, los cuales, al multiplicarse por su fracción el oxígeno requerido de cada producto, dan como resultado el volumen de cada gas de la combustión, en las unidades de m<sup>3</sup>(n)/Kg de carbón.

Los factores se calcularon con las ecuaciones básicas de combustión ilustradas en la tabla 5. Estos factores se convirtieron a base volumétrica mediante la densidad del elemento correspondiente.

**TABLA 9 - Formato para el cálculo de requerimiento de oxígeno y gases generados**

Análisis Kg/Kg	Factor	O <sub>2</sub> m <sup>3</sup> (n)/Kg	Factor	CO <sub>2</sub> m <sup>3</sup> (n)/Kg	Factor	SO <sub>2</sub> m <sup>3</sup> (n)/Kg	Factor	H <sub>2</sub> O m <sup>3</sup> (n)/Kg	Factor	N <sub>2</sub> m <sup>3</sup> (n)
C= 0,594	1,864	1,1072	1,854	1,1013						
S=0,008	0,698	0,0006			0,682	0,0005				
H= 0,037	5,553	0,2055					11,111	0,4111		
N= 0,010	0,400	0,004							0,800	0,008
O= 0,074	-0,700	0,0518								
w=0,129							1,243	0,1603		
A= 0,148										
Σ=1,000	O <sub>2min</sub>	1,2655	V <sub>CO2</sub>	1,1013	V <sub>SO2</sub>	0,0005	V <sub>H2O</sub>	0,5714	V <sub>N2</sub>	0,008

Posteriormente se procede a llenar la tabla 10 de acuerdo con la metodología de cálculo presentada en ella, con la cual se pueden hallar los flujos de gases respectivos y los porcentajes de humedad (X'''), de óxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

En la tabla 10 se presenta un formato para el cálculo de flujos de aire y de gases y de otros parámetros involucrados en el proceso de la combustión. También se presentan los resultados del ejemplo práctico. Éstos corresponden a los números tabulados en la penúltima columna de la tabla 10.

En donde: L: cantidad de aire real utilizado en la combustión. L<sub>min</sub>: cantidad de aire teórico que se requiere para quemar el combustible en una combustión completamente. V<sub>GT min</sub>: cantidad teórica de gases secos de combustión cuando el combustible es quemado con L<sub>min</sub>. λv: relación volumen de aire a Kg. de carbón. X': fracción másica del contenido de agua en los gases de combustión. X''' = contenido porcentual de hu-

**TABLA 10 - Formato para el cálculo de flujo de aire, de gases y otros parámetros**

$L_{\min}$	$\frac{O_{2\min}}{0,2094}$	6,043	$m^3(n)/Kg$
$V_{Gt \min}$	$V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{S_2} - O_{2\min} \times \frac{0,7810}{0,2094}$	5,83	$m^3(n)/Kg$
$CO_2 \max$	$\frac{V_{CO_2}}{V_{Gt\min}} * 100$	18,89	%
$SO_2 \max$	$\frac{V_{SO_2}}{V_{Gt\min}} * 10^6$	85,77	ppm
$V_{Gt}$	$\frac{V_{CO_2}}{CO_{2(m)}}$	9,18	$m^3(n)/Kg$
$\lambda v$	$\frac{V_{Gt} - V_{Gt \min}}{L_{\min}} + 1$	1,55	$m^3(n)/Kg$
$L$	$\lambda * L_{\min}$	9,35	
$v'_{H_2O}$	$v_{H_2O} + W\lambda * L_{\min}$	0,66	$m^3(n)/Kg$
$V_{Gt}$	$v_{Gt} + v'_{H_2O}$	9,85	$m^3(n)/Kg$
$SO_2$	$\frac{V_{SO_2}}{V_{Gt}} * 10^6$	54,47	ppm

$CO_{2(m)}^*$	$CO_{2max} \left(1 - \frac{O_2}{20,94}\right)$	12,00	%
$O_2$	$\frac{CO_{2max} - CO_{2(m)}}{CO_{2max}} \times 20,94$	7,64	%
$X'$	$\frac{v'_{H_2O} \times 0,804}{V_{Gt}}$	0,0578	$\frac{kg}{kg}$
$X''$	$\frac{v'_{H_2O}}{V_{Gt}} \times 100$	7,2	%
$\rho_{to}$	$CO_2 \times 1,977 + O_2 \times 1,429 + (1 - CO_2 - O_2) \times 1,251$	1,3517	$\frac{kg}{m^3 nt}$
$\rho_{fo}$	$\frac{\rho_{to} + X'}{1 + \frac{X'}{0,804}}$	1,315	$\frac{kg}{m^3 nf}$

\*Valor medido a partir del análisis de los gases.

medad.  $\rho_{to}$ : densidad promedio de los gases de combustión en base seca. ( $\rho_{to}$ : en base húmeda),  $CO_{2(max)}$  y  $SO_{2(max)}$  representan las máximas concentraciones de dióxido de carbono y azufre respectivamente si la combustión se diera completa y sin exceso de aire.

En el caso de presentarse una combustión incompleta, se procede a calcular el CO en los gases de combustión, realizando la siguiente metodología:

Se parte de los porcentajes de inquemados, los cuales se reparten para este ejemplo en un 80 % de escoria (esc) y 20 % cenizas volantes  $C_{vo}$  (ver tabla 11).

**TABLA 11 - Análisis de C en la escoria y cenizas y del CO y CO2 en los gases**

C en la escoria: (C escoria)	6 %
C en la ceniza:	15 %
CO en gases de combustión:	1 %
CO <sub>2</sub> en gases de combustión:	13 %

Poder calorífico del CO: 4300 Btu/lb

Con los porcentajes que se presentan en la tabla 11 se procede a calcular la cantidad de carbón que no se ha oxidado (C inq – escoria) en la escoria.

$$C_{\text{inq-escoria}} = \frac{\% \frac{C_z}{100} + \% \frac{\text{esc}}{100} + \% \frac{\text{Cescoria}}{100}}{1 - \% \frac{\text{Cescoria}}{100}}$$

$$C_{\text{inq-escoria}} = \frac{0,148 \times 0,8 \times 0,06}{1 - 0,06}$$

En conclusión: el carbono perdido en la escoria es = 0.76%

Similarmente para el carbono en las cenizas:

$$C_{\text{inq-cenizas}} = \frac{\% \frac{C_z}{100} * \% \frac{C_{vo}}{100} * \% \frac{\text{Ccenizas}}{100}}{1 - \% \frac{\text{Ccenizas}}{100}}$$

$$C_{\text{inq-cenizas}} = \frac{0,148 \times 0,2 \times 0,15}{1 - 0,15}$$

En consecuencia, el carbono perdido en las cenizas volantes es = 0.52%

Por lo tanto, el total de carbono perdido es  $C_{\text{total perdido}} = 0,0128 \text{ kg/kg}_{\text{combustible}}$

Cantidad real de carbono quemado =  $\% C_{\text{combustible}} - \% C_{\text{total perdido}}$

Cantidad real de carbono quemado =  $0,594 - 0,0128 = 0,5812 \text{ kg/kg}_{\text{combustible}}$

Con respecto a los inquemados gaseosos, se procede así:

Fracción de  $\text{CO}_2$  en el total de carbono presente en los gases de combustión:

$$\frac{C_{\text{CO}_2}}{C_{\text{TOTAL}}} = \frac{\% \text{CO}_2}{\% \text{CO}_2 + \% \text{CO}} = \frac{13}{13 + 1} = 0,92857$$

Fracción de CO en el total de carbono presente en los gases de combustión:

$$\frac{C_{\text{CO}}}{C_{\text{TOTAL}}} = \frac{\% \text{CO}}{\% \text{CO}_2 + \% \text{CO}} = \frac{1}{13 + 1} = 0,071428$$

Cantidad real de  $\text{CO}_2$  producido =  $( 0,5812 \text{ kg/kg}_{\text{combustible}} ) \times ( 0,92857 )$

$$\text{CO}_2 = 0,5399 \text{ kg}_{\text{CO}_2} / \text{kg}_{\text{combustible}}$$

Cantidad real de CO producido = ( 0,5812 kg/kg<sub>combustible</sub> ) x ( 0,071428 )

$$CO = 0,0415 \text{ kg}_{CO} / \text{kg}_{combustible}$$

Ahora se deben corregir los datos hallados en la tabla anterior de acuerdo con la metodología que se ilustra en las tablas 12 y 13.

**TABLA 12 - Calidad real de oxígeno requerido para la combustión**

Elemento	Producto	Factor <sub>combustión</sub> / x Fracción /	Oxígeno requerido m <sup>3</sup> (n) O <sub>2</sub> /kg <sub>comb.</sub>
C	CO <sub>2</sub>	1,864 x 0,5399	1,0064
C	CO	0,927 x 0,0415	0,0385
S	SO <sub>2</sub>	0,698 x 0,0080	0,0056
H	H <sub>2</sub> O	5,553 x 0,037	0,2055
N	NO	0,400 x 0,010	0,0040
O	O <sub>2</sub>	-0,700 x 0,074	-0,0518
TOTAL			1,2082

**TABLA 13 - Cantidad real de productos de combustión**

Producto	Factor <sub>combustión</sub> / Fracción /	V <sub>producto</sub> / M <sup>3</sup> (n)/kg <sub>comb.</sub>
CO <sub>2</sub>	1,854 x 0,5399	1,0010
CO	1,865 x 0,0415	0,0774
SO <sub>2</sub>	0,682 x 0,0080	0,0055
N <sub>2</sub>	0,800 x 0,010	0,0080
H <sub>2</sub> O	11,111 x 0,037 + 1,243 ' 0,129	0,5715

El nuevo flujo de aire estequiométrico requerido

$$L_{\min} = \frac{O_{2\min}}{0,2094} = \frac{1,2082}{0,2094} = 5,7698 \frac{\text{m}^3(\text{n})}{\text{kg}}$$

El flujo de gases será:

$$V_{G_{\min}} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{S}_2} + O_{2\min} = \frac{0,7810}{0,2094} = 5,5976 \frac{\text{m}^3(\text{n})}{\text{kg}}$$

$$V_{G_t} = \frac{V_{G_t}}{\text{CO}_{2\max}} = \frac{1,0010}{0,13} = 7,7 \frac{\text{m}^3(\text{n})}{\text{kg}}$$

$$\lambda_V = \frac{V_{G_t} - V_{G_{\min}}}{L_{\min}} + 1 = 1,3644$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{H}_2\text{O}} + W * \lambda_V * L_{\min} = 0,5715 + 0,008 + 1,3644 + 5,7698 = 0,63 \frac{\text{m}^3(\text{n})}{\text{kg}}$$

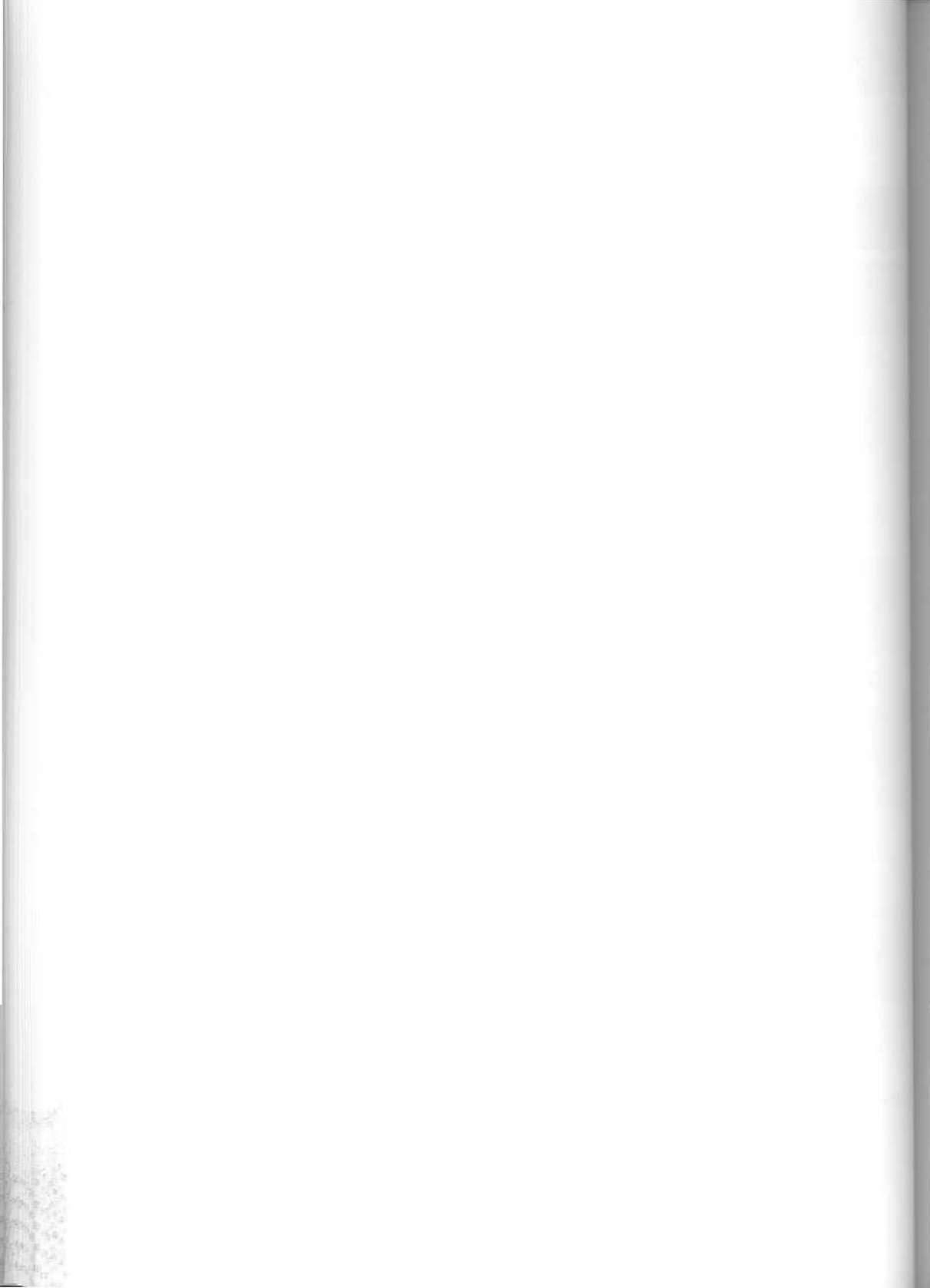
$$V_{G_t} = V_{G_t} + V_{\text{H}_2\text{O}} = 7,70 + 0,6345 = 8,3345 \frac{\text{m}^3(\text{n})}{\text{kg}}$$

De esta forma, la comparación entre las variables involucradas en la combustión, cuando ésta es incompleta o completa, se resume en la siguiente tabla:

Se puede apreciar en la tabla 14 que, cuando la combustión es incompleta, los requerimientos de aire y flujo de gases son menores.

**TABLA 14 - Resultados comparativos entre la combustión completa e incompleta**

VARIABLE	TIPO DE COMBUSTIÓN		
	INCOMPLETA	COMPLETA	
$O_{2\ min}$	$\frac{m^3n}{kg}$	1,02082	1,2705
$L_{\ min}$	$\frac{m^3(n)}{kg}$	5,7698	6,0673
$V_{G\ min}$	$\frac{m^3(n)}{kg}$	5,5976	5,8534
$CO_{2\ max}$	%		18,81
$V_{Gt}$	$\frac{m^3(n)}{kg}$	7,700	8,4715
$\lambda v$	$\frac{m^3(n)}{kg}$	1,3644	1,4315
$V_{H_2O}$	$\frac{m^3(n)}{kg}$	0,6345	0,6409
$V_{Gt}$	$\frac{m^3(n)}{kg}$	8,3345	9,1124



## QUEMADORES DE CARBÓN

**E**n las calderas que utilizan carbón, éste se puede quemar sobre parrilla con alimentación manual o automática y en forma pulverizada.

En el caso de los quemadores sobre parrilla alimentados manualmente, la eficiencia de este tipo de quemador depende, en gran parte, de la experiencia de la persona encargada de su funcionamiento. Para esto, el operador debe alimentar un carbón de tamaño adecuado evitando los finos, alimentar el carbón regularmente, manipular los dampers o compuertas para evitar la entrada de grandes excesos de aire y mantener el lecho a una altura adecuada y uniforme con llamas abundantes sobre toda el área.

El diseño de las parrillas y la tasa de combustión depende de la cantidad y la calidad del combustible que se va a quemar, puesto que mientras más difícil de quemar sea el combustible más baja será la tasa de combustión. El tamaño de las partículas, la cantidad y composición de las partículas también influyen en la combustión. Para carbones antracíticos y lignitos, la tasa de combustión es del orden de 130 kg/m<sup>2</sup>h y 190 kg/m<sup>2</sup>h, respectivamente. Para basuras está entre 250 y 350 kg/m<sup>2</sup>h.

En cuanto al volumen del hogar, sus dimensiones se calculan con base en la tasa de liberación de calor que puede variar desde 25000 hasta 50000 Btu/hr ft<sup>3</sup> (258,7 hasta 517,4 kW/m<sup>3</sup>)

4

Las dimensiones de las parrillas se calculan con base en la tasa de liberación de calor, la cual puede variar desde 200000 Btu/hr ft<sup>2</sup> (630,9 kW/m<sup>2</sup>) para quemadores pequeños de retorta simple hasta 1000000 Btu/hr ft<sup>2</sup> (3154,4 kW/m<sup>2</sup>) para quemadores grandes de alimentación de carga superior (spreader stoker) en los cuales parte del carbón se quema en suspensión.

En los quemadores sobre parrilla alimentados automáticamente es posible consumir menos cantidad de carbón que en los de alimentación manual, siempre y cuando el sistema alimentador se ajuste frecuentemente con base en la calidad del carbón que se utiliza (contenido de cenizas).

En los quemadores de carbón pulverizado, el carbón es mezclado con aire primario, el cual lo transporta al quemador. Posteriormente, cuando se ha alcanzado la ignición, se inyecta el aire secundario. En este tipo de quemadores es importante que el tamaño de las partículas sea el mínimo posible sin afectar el costo de molienda. En general, se considera que el tamaño es adecuado cuando un 80% del carbón pasa por un tamiz de malla 200 y un 98% por uno de malla 50.

En los quemadores de lecho fluidizado, partículas pequeñas de carbón se encuentran suspendidas por aire fluidizante que también sirve como agente oxidante.

## **4.1 PREPARACIÓN Y ALIMENTACIÓN DEL CARBÓN.**

Antes de la alimentación del carbón a los quemadores, éste debe pasar a través de un proceso de preparación en el cual se busca principalmente obtener una granulometría adecuada para el proceso de combustión. Esta granulometría depende de la calidad del carbón y del tipo de quemador. Además, en el caso de carbón para pulverización, se debe secar para permitir la pulverización con aire caliente, así como la separación de materiales dañinos como rocas y metales.

### **4.1.1 Trituración del carbón.**

Este procedimiento se efectúa principalmente cuando el carbón va a ser almacenado por largos períodos de tiempo. Esto con el fin de aumentar la compactación y evitar la autoignición del combustible.

En el caso de la combustión sobre parrilla también se pueden emplear máquinas trituradoras para reducir el tamaño del carbón a la granulometría adecuada para la combustión y por lo tanto reducir la cantidad de inquemados. Cuando el carbón se reduce a una granulometría fina (pulverizado o lecho fluidizado) se debe triturar antes de pasar al proceso de molienda en el cual se obtiene el tamaño deseado.

Existen diferentes tipos de trituradores, siendo los más utilizados el de martillo y el de rodillos. El triturador de martillo consiste en una carcaza con un rotor en el cual está dispuesta una serie de martillos. El carbón se alimenta por la parte superior de la carcaza, y el impacto directo de los martillos reduce su tamaño. Un enrejado cilíndrico se coloca debajo del rotor para descargar el producto. El grado de reducción depende del tipo de martillo, de la velocidad del rotor y del tamaño del enrejado. El triturador de rodillos puede ser liso o dentado. El carbón es triturado por la compresión entre los rodillos o entre el rodillo y una placa. El tamaño de las partículas del producto depende del espacio entre los rodillos y la capacidad del equipo. Otros tipos de trituradores son los de mandíbulas, de disco y de conos.

#### **4.1.2 Molienda fina del carbón.**

Este procedimiento se emplea para obtener un carbón con una granulometría fina, malla 100 ó 200. Adicionalmente ayuda a reducir el contenido de humedad para facilitar el transporte y la dosificación. El grado de secado que se puede obtener depende de las humedades de entrada y salida del carbón. La temperatura en el molino no debe ser superior a 80°C para evitar la ignición.

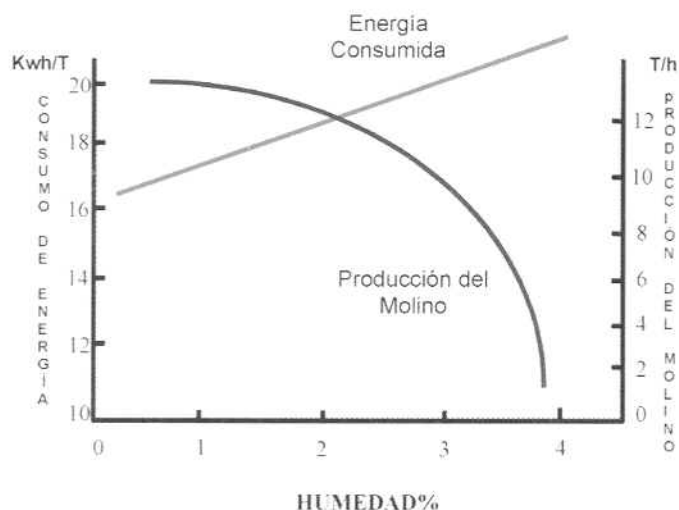
La humedad del carbón tiene gran influencia sobre la producción del molino, ya que con incrementos del 1% al 3% de humedad la producción

desciende aproximadamente un 40%, aumentando el consumo de energía un 10% para la misma granulometría (figura 14).

Fundamentalmente se utilizan dos sistemas para manipular el carbón molido: el primero es el de almacenamiento previo a la combustión, donde el combustible pulverizado se almacena en una tolva y se quema a medida que se necesita. El segundo sistema es el de combustión directa, donde cada molino entrega al quemador el combustible pulverizado con la suficiente cantidad de aire para mantener el polvo en suspensión y quemar las materias volátiles.

En general, cuanto más pulverizado queda el carbón, mejor es su combustión debido a que el área expuesta al aire es máxima. Existen siempre unos límites de finura desde el punto de vista del grado de pulverización contra el costo de la energía eléctrica invertida en este proceso.

En la figura 15 se reflejan los consumos específicos en kwh por tonelada de carbón molido para los tres tipos de molinos más usados: el tubular, el de resortes y el de impactos, observándose que el mínimo consumo específico corresponde al molino de resortes.



Dependencia de la producción del molino y el consumo específico de energía, en función de la humedad del carbón.

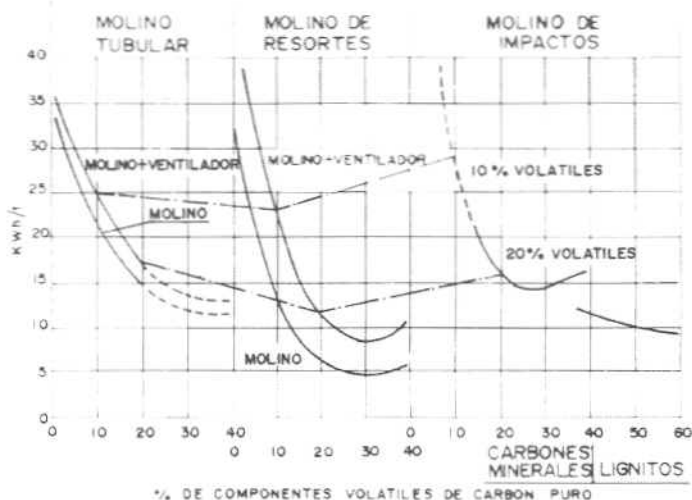
Fuente: Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía, IDAE

**FIGURA 14**

## 4.1.3 Alimentación del carbón.

La alimentación del carbón a las parrillas se puede realizar en forma manual o en forma automática. En la alimentación manual, la eficiencia depende principalmente de la experiencia del operador, quien debe alimentar el tamaño de carbón apropiado evitando partículas muy gruesas o muy finas para reducir los inquemados. En el ítem 4.2 se indican las granulometrías según el tipo de quemador. También debe distribuir uniformemente el carbón sobre la parrilla para evitar la formación de zonas calientes, lo cual puede afectar la parrilla. Adicionalmente debe alimentar regularmente el carbón evitando lechos muy gruesos y controlar las entradas de aire evitando excesos altos o suministro en defecto que conducen a una combustión ineficiente.

Los sistemas de alimentación automática son más eficientes que los sistemas manuales puesto que se puede ejercer un mayor control



Consumo específico de energía en molienda de acuerdo con el tipo de carbón y el tipo de molino.

**FIGURA 15**

Fuente: Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía, IDAE.

sobre el flujo de carbón. Uno de los mecanismos más utilizados es el tornillo sin fin, en el cual el carbón se mueve a lo largo de una tubería o canal mediante un impulsor rotatorio en forma de hélice para alimentarlo por debajo de la parrilla a la cámara de combustión. Para la selección del tamaño del tornillo es importante conocer la granulometría del carbón; la velocidad depende de la cantidad de carbón que se desee alimentar.

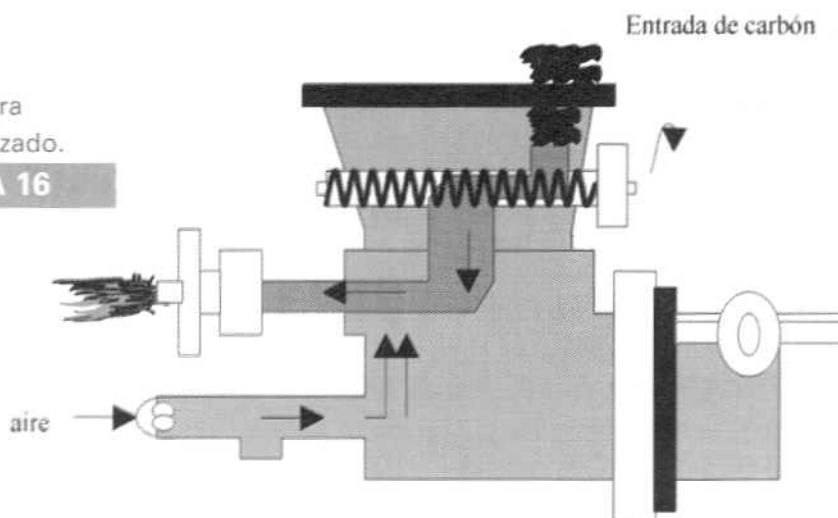
El tornillo sin fin también se puede utilizar para carbón pulverizado. En este caso, el carbón cae al tornillo desde una caja, equipada con un agitador, para ser luego alimentado a un compartimiento donde se mezcla con el aire primario. Posteriormente el aire primario transporta el carbón al quemador. En la figura 16 se presenta un sistema de alimentación con tornillo. El sistema de alimentación con tornillo sin fin también se utiliza para combustores de lecho fluidizado.

Otros tipos de alimentadores que se usan para carbón fino (lecho fluidizado y carbón pulverizado) y grueso son el de mesa, el de banda o correa y el alimentador por impulsor. El alimentador de mesa consiste en una mesa o disco rotatorio sobre la cual se alimenta el carbón. La rotación del disco lleva el carbón hasta una hoja raspadora que lo retira hacia la zona de combustión. La tasa de alimentación está determinada por la velocidad de la mesa. En este tipo de alimentador se requiere un control sobre el tamaño y la humedad del carbón para garantizar un funcionamiento continuo.

El alimentador de correa utiliza una banda que rueda sobre rodillos. Esta banda recibe por un extremo el carbón y por el otro extremo lo descarga. El control de la rata de alimentación se realiza variando la velocidad de los rodillos. Este sistema se puede utilizar en aplicaciones volumétricas y gravimétricas, siendo este último el más usado en los casos en los cuales se requiere una medición precisa de la cantidad de carbón que llega a los quemadores. En la figura 17 se presenta un esquema de un sistema de alimentación con banda.

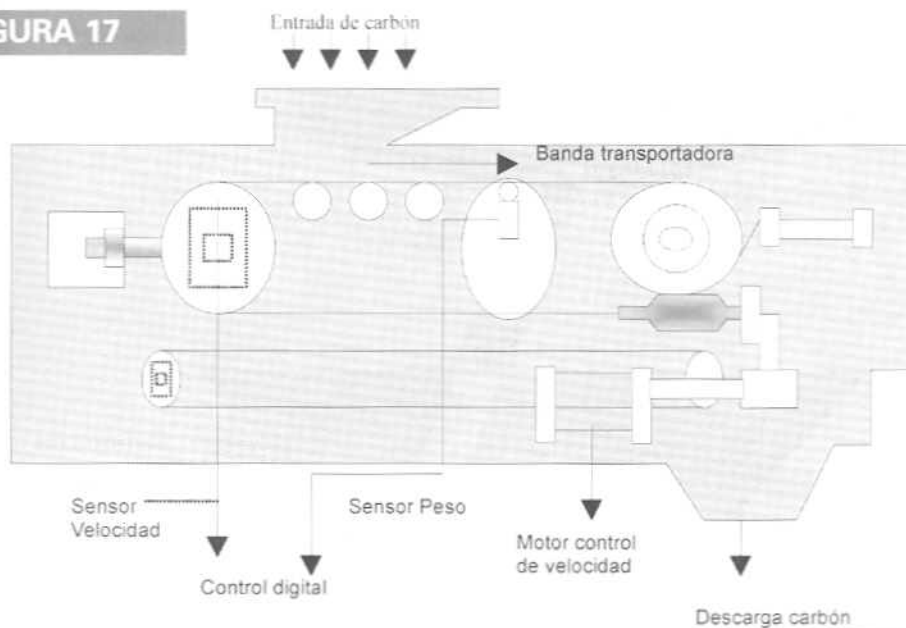
Sistema de alimentación con tornillo para carbón pulverizado.

**FIGURA 16**



Alimentación de carbón con banda.

**FIGURA 17**

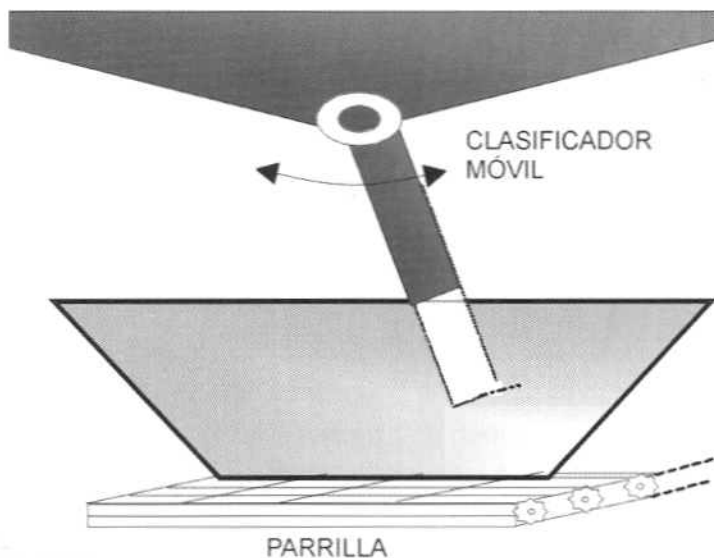


En el alimentador por impulsor, el combustible se evacua de la tolva y se transporta hasta la parrilla por uno o varios impulsores (eyectores). El flujo se regula, según el caso, por la velocidad de los eyectores o por su carrera.

El carbón también se puede alimentar por gravedad donde el combustible, contenido en una tolva, reposa sobre la parrilla. Una cortina permite regular la altura de la capa. La parrilla arrastra el combustible. El flujo lo regula a la altura de la capa y la velocidad de la parrilla.

En la combustión de carbón sobre parrilla es importante una alimentación uniforme sobre la amplitud de la parrilla. Ésta tiene gran influencia sobre la homogeneidad de la capa y por consiguiente sobre la combustión.

Para garantizar una granulometría homogénea sobre toda la parrilla, se utilizan distribuidores con clasificadores como el tipo taylor y el clasificador móvil que consiste en un ducto, a través del cual se alimenta el carbón que se balancea uniformemente sobre la parrilla (figura 18).



Sistema de alimentación de carbón por gravedad con clasificador móvil.

**FIGURA 18**

## 4.1 SISTEMAS DE COMBUSTIÓN DE CARBÓN

Los procesos de combustión se clasifican de acuerdo con el tipo de lecho en combustores de lecho fijo o móvil (parrillas), de lecho fluidizado y de lecho suspendido.

### 4.2.1 Combustores de lecho fijo o móvil

Las parrillas son los equipos más utilizados en Colombia para la combustión de carbón. Pueden ser de alimentación manual o automática. En este último caso se clasifican de acuerdo con el tipo de alimentador en quemadores de alimentación de carga por debajo, transversal y superior. En el primer tipo están los de retorta simple, los cuales trabajan mejor con carbones bituminosos y antracitas, y los de retortas múltiples, que funcionan mejor con carbones con un contenido de materia volátil entre 20 y 30%, de cenizas entre 6 y 8% y una temperatura alta de ablandamiento de las cenizas. En la figura 19 se presenta un esquema de estos quemadores.

El alimentador de carga transversal, como los de parrilla de cadena (figura 20), parrilla de barra o parrilla de desplazamiento inclinado, utiliza lechos hasta de 20 cm. Esta profundidad es regulada por una compuerta bajo la

Quemador de parrilla fija y alimentación por debajo.

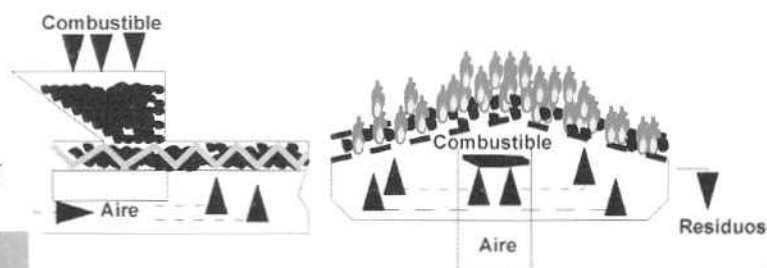
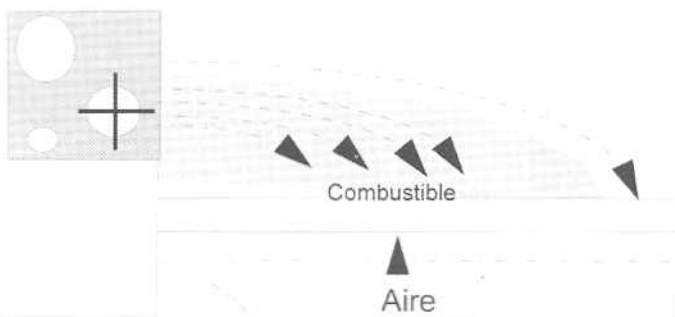
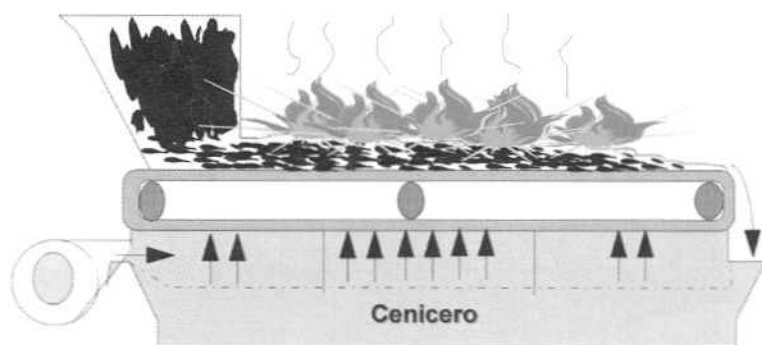


FIGURA 19

cual pasa el carbón antes de entrar al hogar; la parrilla se va moviendo a través del hogar y el aire de combustión pasa a través de la parrilla. Las cenizas residuales se descargan continuamente a medida que la parrilla rota. Los quemadores de parrilla viajera pueden quemar cualquier tipo de carbón, excepto los bituminosos coquizables.

El alimentador de carga superior, dentro del cual están los del tipo spreader stoker, combina los principios de combustión en suspensión y en lecho. El mecanismo alimentador proyecta continuamente el combustible hacia el hogar sobre un lecho de combustible encendido. Las partículas más finas se queman en suspensión, mientras que las más gruesas caen y se queman sobre la parrilla (figura 21). Este tipo de sistemas proporcionan una respuesta rápida a los cambios en la demanda de vapor. Algunas veces,



20. Quemador de parrilla viajera.  
21. Quemador tipo Spreader Stoker.

**FIGURA 20 Y 21**

cuando hay abundancia de finos, es necesario reinyectar las cenizas con alto porcentaje de inquemados sobre el lecho incandescente para procurar combustión completa.

En estos sistemas, las parrillas pueden ser del tipo volcable (dumping grate), descarga de las cenizas por tandas, en las cuales el espesor del lecho varía desde cero, cuando se ha limpiado la parrilla, hasta 10 cm o más, justo antes de la limpieza de la parrilla. La parrilla se divide por secciones, de tal forma que cada sección puede ser limpiada, al volcar la parrilla, independientemente de la otra. El spreader stoker también puede ser de parrilla viajera con descarga continua del carbón.

En la tabla 15 se presenta el tipo de carbón, la granulometría y la capacidad de generación para los diferentes tipos de quemadores de lecho fijo y móvil.

En los quemadores de carga superior, para que exista una tasa de quema y un espesor de lecho uniformes se debe tener un buen balance entre la cantidad de partículas finas y gruesas.

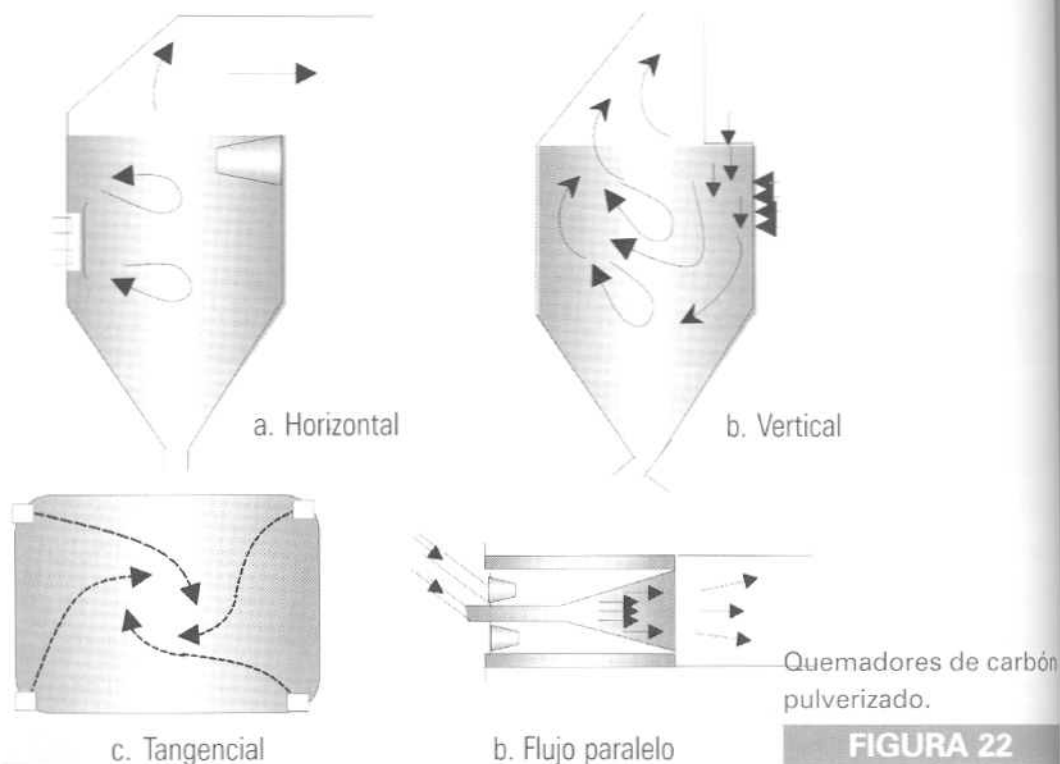
**TABLA 15 - Carbón, granulometría y capacidad de generación de parrillas fijas y móviles**

Quemador	Tipo de carbón	Granulometría [pulgadas]	Generación de vapor [lb/hr]
Retorta simple	Bituminosos y antracitas	1 - 1 ½	5000 - 50000
Retorta múltiple	No aglomerante	2	40000 - 300000
Parrilla de carga transversal	Todo tipo excepto aglomerante bituminoso	1	10000 - 300000
Parrilla de carga superior	Todo tipo de carbón	¼ - 1 ½	10000 - 300000

### 4.2.2. Combustores de lecho pulverizado

Las calderas de carbón pulverizado se utilizan principalmente en centrales de generación eléctrica con calderas con una capacidad superior a 45000 kg/h (100000 lb/hr). El carbón se reduce a partículas muy finas (polvo), las cuales se transportan por una corriente de aire primario hacia el interior del hogar. El carbón se enciende a medida que la mezcla carbón-aire entra al hogar, donde se une al aire de combustión secundario, el cual se calienta hasta temperaturas entre 260 y 425°C. En la figura 22 se presentan los diferentes tipos de quemadores de carbón pulverizado.

La velocidad de inyección del carbón es el factor limitante en el uso de estos quemadores. Si la velocidad es demasiado alta, el carbón se puede inyectar demasiado lejos en el interior del hogar antes de que ocurra la



**FIGURA 22**

ignición. Si, por el contrario, la velocidad es muy baja, existe la posibilidad que la llama retroceda al quemador o que el carbón se deposite en este y en los ductos de suministro.

En la combustión del carbón pulverizado se distinguen dos procesos muy relacionados entre sí: el encendido o ignición y la combustión. Se ha comprobado que las condiciones en las cuales se desarrolla el proceso de encendido influyen notablemente en la marcha de la combustión. Debe también existir buena turbulencia para asegurar una buena mezcla aire-carbón. La llama debe formarse de tal forma que sea bien concentrada en el centro del hogar, dando muy buena radiación y evitando tocar directamente las partes metálicas para no degradarlas.

En la elección del dispositivo de combustión se debe tener en cuenta las dos condiciones siguientes: formación de llama estable con una distancia mínima de encendido y realización de una combustión rápida para reducir la longitud de la llama.

Para que se cumpla la primera condición es necesario tener en cuenta que la inflamabilidad de las partículas de carbón está determinada por la irradiación producida por la llama y el efecto de los gases que circulan parcialmente quemados en la llama. Como el primer efecto puede ser más pequeño que el segundo, es más interesante potenciar este último para aumentar la estabilidad de una llama de carbón.

Una proporción alta de aire primario tiende a disminuir la temperatura de la mezcla y por tanto a perjudicar la combustión; así mismo, el aire secundario tiende a retrasar el encendido. Por lo anterior, se deduce que un buen dispositivo de combustión debe reunir las siguientes condiciones: mantener una proporción de aire primario mínimo, retrasar la mezcla con

el aire secundario hasta que se estabilice el encendido y aumentar al máximo la recirculación de gases.

La velocidad de la mezcla influye considerablemente en el mecanismo de ignición y sobre la combustión, determinando el volumen, la forma de la llama y la cantidad de residuos sólidos no quemados. Adicionalmente, la velocidad de la mezcla controla la concentración de oxígeno en la superficie de las partículas de carbono, por lo cual para facilitar la combustión se debe aumentar dicha velocidad.

Una velocidad excesiva implica una disminución de la temperatura y como consecuencia una moderación de la combustión. Por lo tanto, es necesario aumentar la temperatura de la mezcla a unos 1500-1600°C y retrasar la entrada de aire secundario unas décimas de segundo.

También ejercen una notable influencia las características del carbón, sobre todo la granulometría, así como el contenido de materias volátiles, cenizas y su punto de fusión. Se recomienda la siguiente distribución granulométrica: 80% menor que malla 200, 96.5% menor que malla 100 y 99.5 menor que malla 50.

En algunos casos, debido al alto consumo de energía eléctrica en los trituradores y pulverizadores, se trabaja con un tamaño de partícula 70% menor que malla 200.

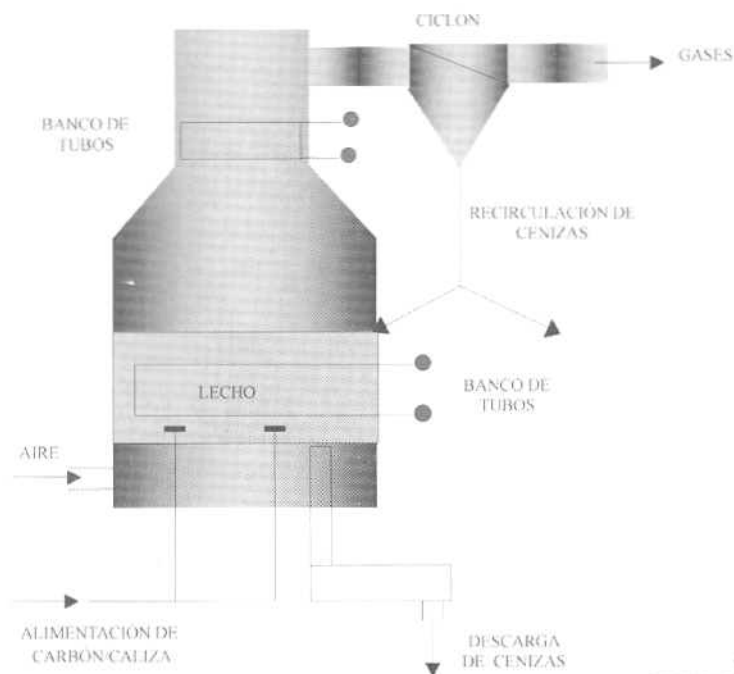
#### **4.2.3 Combustores de lecho fluidizado**

En los combustores de lecho fluidizado (figura 23), el combustible se quema en un lecho de partículas incombustibles suspendidas por un gas fluidizante. Este gas es generalmente el aire de combustión y los productos gaseosos de combustión. En aplicaciones en las cuales se requiere la captura de azufre, se usa carbonato de calcio como absorbente y forma parte del lecho. La temperatura del lecho se mantiene alrededor de los 840 °C debido a que es la temperatura apropiada para el proceso de captura del azufre y el control de emisiones de  $\text{NO}_x$ . La zona de radiación

directa es mayor que en las calderas convencionales. Existen dos tipos básicos de sistemas de combustión en lecho fluidizado: lecho burbujeante y lecho circulante.

El equipo de lecho burbujeante funciona a bajas velocidades y con partículas gruesas (1000 mmm). El lecho es denso, con una concentración uniforme de sólidos. Se llama lecho burbujeante porque el aire en exceso que se requiere para fluidizar el lecho pasa a través de éste en forma de burbujas

Los sistemas de lecho circulante trabajan a altas velocidades y con partículas finas (100- 300 mmm). El lecho es difuso y no presenta una super-



Combustor de lecho fluidizado.

**FIGURA 23**

ficie definida como el lecho burbujeante. Se denomina lecho circulante debido a que es necesario mantener material circulando desde el combustor hacia el sistema de reciclo de partículas y de éste hacia el combustor.

### **4.3 SUMINISTRO Y DISTRIBUCIÓN DE AIRE.**

En los sistemas de combustión de carbón, y en general de cualquier combustible, el suministro de aire es uno de los parámetros que deben ser objeto de mayor atención. El suministro de aire depende del tipo de quemador, de las características del combustible y del exceso de aire que se requiere en el proceso.

En los quemadores de parrilla generalmente se utiliza aire primario, que ingresa por debajo de la parrilla (figura 19), y aire secundario o de sobrefuego, que ingresa a la cámara de combustión por encima del carbón que se está consumiendo. Este aire secundario ayuda a eliminar el humo y a mejorar la eficiencia de combustión al mezclarse con los gases inquemados. La cantidad de aire de sobrefuego debe estar entre un 5 y 15 por ciento de la cantidad total de aire necesario para la combustión.

*La alimentación uniforme del carbón evita una mala distribución del aire en el fuego, lo cual incrementaría la cantidad de inquemados y/o el arrastre de partículas con los gases ocasionando problemas de sobrecalentamiento en la parrilla y en otras partes del quemador.*

*Para las parrillas viajeras, la distribución del aire también depende de la zona del proceso de combustión: secado, pirólisis, combustión del char y formación y enfriamiento de las cenizas (figura 20). En este caso, el aire bajo la parrilla es admitido en un ducto distribuidor o tambor y la distribución se realiza a través de compartimientos del tambor o a través de aberturas situadas sobre la parte superior de éste.*

En los quemadores de carbón pulverizado, el carbón se mezcla con la mínima cantidad de aire primario para asegurar la ignición. Posteriormente

ficie definida como el lecho burbujeante. Se denomina lecho circulante debido a que es necesario mantener material circulando desde el combustor hacia el sistema de reciclo de partículas y de éste hacia el combustor.

### **4.3 SUMINISTRO Y DISTRIBUCIÓN DE AIRE.**

En los sistemas de combustión de carbón, y en general de cualquier combustible, el suministro de aire es uno de los parámetros que deben ser objeto de mayor atención. El suministro de aire depende del tipo de quemador, de las características del combustible y del exceso de aire que se requiere en el proceso.

En los quemadores de parrilla generalmente se utiliza aire primario, que ingresa por debajo de la parrilla (figura 19), y aire secundario o de sobrefuego, que ingresa a la cámara de combustión por encima del carbón que se está consumiendo. Este aire secundario ayuda a eliminar el humo y a mejorar la eficiencia de combustión al mezclarse con los gases inquemados. La cantidad de aire de sobrefuego debe estar entre un 5 y 15 por ciento de la cantidad total de aire necesario para la combustión.

La alimentación uniforme del carbón evita una mala distribución del aire en el fuego, lo cual incrementaría la cantidad de inquemados y/o el arrastre de partículas con los gases ocasionando problemas de sobrecalentamiento en la parrilla y en otras partes del quemador.

Para las parrillas viajeras, la distribución del aire también depende de la zona del proceso de combustión: secado, pirólisis, combustión del char y formación y enfriamiento de las cenizas (figura 20). En este caso, el aire bajo la parrilla es admitido en un ducto distribuidor o tambor y la distribución se realiza a través de compartimientos del tambor o a través de aberturas situadas sobre la parte superior de éste.

En los quemadores de carbón pulverizado, el carbón se mezcla con la mínima cantidad de aire primario para asegurar la ignición. Posteriormente

te, cuando se ha alcanzado la ignición se inyecta el aire secundario. Para lograr una rápida ignición o encendido del carbón se utiliza entre el 25% y el 35% del total del aire de combustión como aire primario.

En los sistemas de lecho fluidizado, el aire es alimentado por la parte inferior del lecho a través de un distribuidor que permite una adecuada distribución de éste y controlar la fluidización. La cantidad de aire debe ser la necesaria para asegurar la fluidización de las partículas del lecho y la combustión.

La regulación del flujo de aire y gases en el interior de las calderas es realizada por el tiro. Éste tiene por objeto hacer llegar el aire al combustible, obligar a los gases de combustión a recorrer la cámara y los diferentes conductos de la caldera y a evacuar los gases.

Al quemar un combustible, el hogar de la caldera se llena de productos de la combustión, que son gases neutros, es decir, que ya no son aptos para seguir oxidando el combustible. Es necesario eliminar esta atmósfera gaseosa neutra y hacer penetrar aire nuevo que permita que la combustión prosiga; esto se consigue con el tiro.

El gas que se encuentra en el hogar a elevada temperatura, con menor densidad que el aire, tiene tendencia a ascender. En esta forma, el gas se dirige por los conductos de humo hasta la chimenea, y el lugar que el gas va dejando tras de sí en el hogar es ocupado por el aire que penetra en el mismo, estableciéndose una corriente que recibe el nombre de tiro. El tiro puede ser natural, forzado o mixto.

En el tiro natural, el recorrido de los gases no es ayudado por equipo alguno. En este caso, el tiro depende de las dimensiones de la chimenea y del calor liberado por la combustión.

En el tiro artificial, el recorrido de los gases se realiza con la ayuda de ventiladores. Éstos pueden ser de tiro forzado: toman el aire de la atmósfera y lo descargan en el hogar; o de tiro inducido: descargan los gases en la atmósfera.

En general, los ventiladores más utilizados en la industria son los del tipo centrífugo, los cuales a su vez se clasifican en ventiladores de paletas curvadas hacia adelante, paletas rectas o radiales, paletas curvadas hacia atrás o paletas doblemente curvadas.

El funcionamiento de un ventilador se puede caracterizar mediante un conjunto de curvas que relacionan la presión, la potencia y el rendimiento con el caudal. Todas las leyes de los ventiladores se basan en la consideración fundamental de un rendimiento constante. Algunas de estas leyes son: el caudal es directamente proporcional a la velocidad; la presión es proporcional al cuadrado de la velocidad; la potencia es proporcional al cubo de la velocidad.

La energía consumida por los ventiladores, tanto de tiro forzado como de tiro inducido, se puede regular según la demanda de cada momento; esto se efectúa mediante la variación del caudal utilizando alguno de los tres procedimientos siguientes: compuertas o dampers a la salida, compuertas a la entrada o variando la velocidad del motor.

#### **4.4 SISTEMAS DE EVACUACIÓN DE LAS CENIZAS.**

Las cenizas producidas durante la combustión se pueden evacuar hidráulica o mecánicamente.

##### **4.4.1 Evacuación hidráulica.**

En la evacuación hidráulica, las cenizas caen en un canal y son arrastradas por un aspersor de agua a alta presión hasta una piscina de decantación.

#### **4.4.2 Evacuación por deshollinador o motor impulsor.**

En la evacuación por deshollinador o motor impulsor, las cenizas caen en un cangilón y un botón impulsor las comprime. Ellas caen luego por desbordamiento sobre el transportador. La impermeabilidad es obtenida mediante un sello de agua.

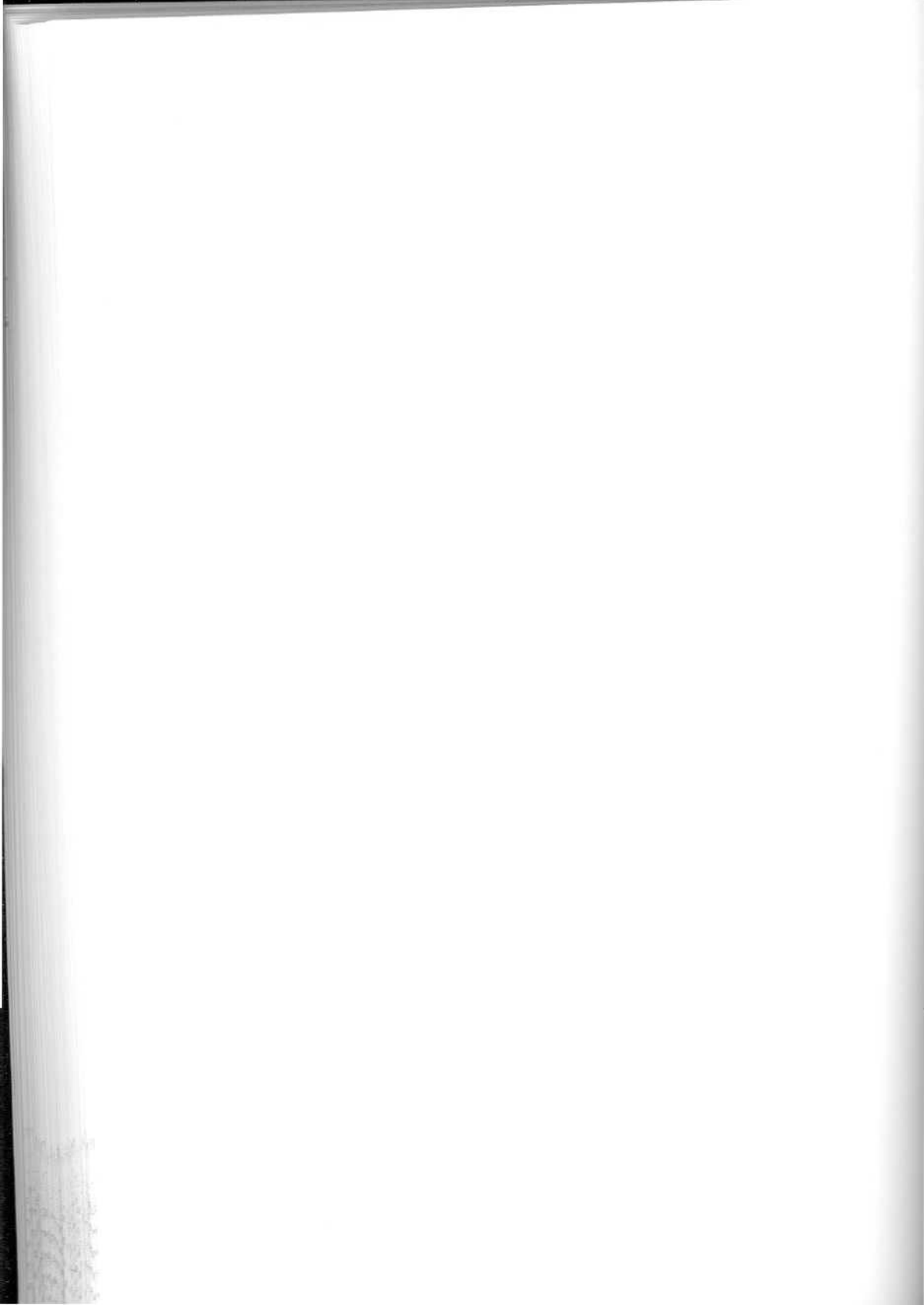
#### **4.4.3 Evacuación neumática.**

Se hace a partir de un equipo que produce una succión alta que arrastra las cenizas a un depósito para luego ser descargadas a camiones que las llevan al lugar de disposición final.

#### **4.4.4 Evacuación por válvula rotativa.**

El sistema de evacuación por válvula rotativa sirve para fragmentar las cenizas y obtener impermeabilidad entre el hogar y la evacuación.

Además de los sistemas anteriores, existen los equipos de control ambiental, tales como ciclones y precipitadores, que retienen cenizas finas o volantes. La descripción y funcionamiento de estos equipos se presentará en el capítulo 7.



## CÁLCULO DE EFICIENCIA

**E**l estado energético de la caldera se puede diagnosticar conociendo su eficiencia ( $\eta$ ). Ésta cuantifica la porción de la energía del combustible transferida para generar vapor y se define como la relación entre el flujo de energía útil entregada al vapor ( $E_v$ ) y el flujo de energía aportada por el combustible ( $E_c$ ):

$$\eta = \frac{E_v * 100\%}{E_c}$$

Este cálculo de la eficiencia se denomina método directo. También se puede hallar la eficiencia utilizando el cálculo de las pérdidas totales (P) o método indirecto, así:

$$\eta = \left( 1 - \frac{P}{E_c} \right) * 100\%$$

La energía aportada por el combustible es para generar el vapor (Energía útil entregada al vapor,  $E_v$ ) y para suplir las pérdidas en chimenea, por paredes, por inquemados, etc. (pérdidas totales P), o sea:

$$E_c = E_v + P$$

La eficiencia en calderas con base en carbón puede variar desde valores bajos del orden del 60% para calderas con alimentación manual hasta de más del 90% de eficiencia para calderas de carbón pulverizado y lecho fluidizado.

## 5.1 CÁLCULO DE LA ENERGÍA DEL COMBUSTIBLE.

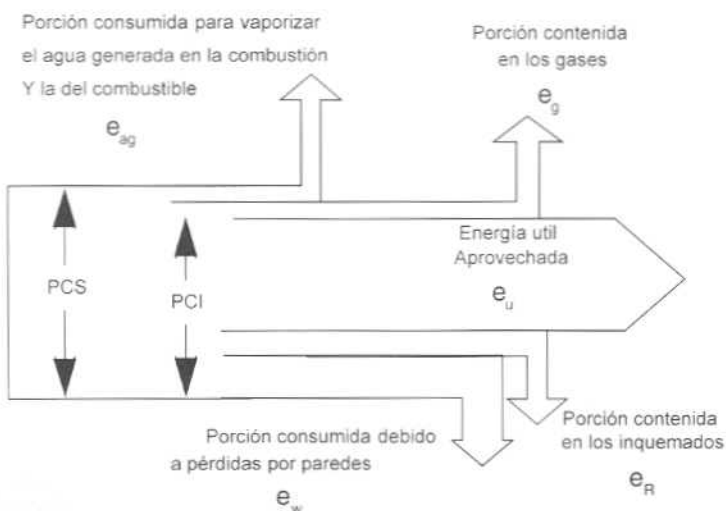
El cálculo de la energía aportada por el combustible se puede apreciar en la figura 24, donde se puede deducir que del total de la energía contenida en cada Kg de combustible (poder calorífico superior, P.C.S.), una parte se gasta en vaporizar el agua producida por la combustión del hidrógeno y queda la energía neta o poder calorífico inferior. De ésta, una parte es energía útil para el proceso deseado (generación de vapor, calentamiento, cocción, etc.), la otra porción son pérdidas. Las unidades en energía se expresan en KJ/Kg carbón.

La energía aportada por el combustible, dada en Kw, se puede calcular con base en el poder calorífico superior. Éste es el más utilizado debido a que es el valor que se reporta en el análisis de laboratorio:

$$E_c = m_c * PCS$$

Con base en el poder calorífico inferior:

$$E_c = m_c * PCI$$



Distribución cualitativa de la energía aportada por el combustible.

**FIGURA 24**

Por supuesto que serán dos valores diferentes y cada cual calculará la energía del combustible a criterio personal.

En la anterior ecuación, el flujo de combustible se expresa en Kg/s, el PCS o PCI se tomará en KJ/Kg.

## 5.2 CÁLCULO DE LA ENERGÍA DEL VAPOR.

Con respecto a la energía de vapor, expresada en Kw, se puede calcular así:

$$E_v = m_v \left[ \left( 1 - \frac{\%P_v}{100} \right) h_v - h_f \right]$$

Donde el flujo de vapor ( $m_v$ ) se da en Kg/s, la entalpía del vapor ( $h_v$ ) en KJ/Kg y la entalpía del agua líquida a las condiciones de entrada a la caldera  $h_f$  en KJ/Kg. y el  $\%P_v$  es el porcentaje de purga de la caldera.

En la tabla 16 se presentan algunos valores de  $h_v$  y  $h_f$  para diferentes condiciones. La entalpía del vapor ( $h_v$ ) corresponde a la del vapor saturado a la presión que se indica en la tabla 16 y la entalpía del líquido corresponde a la presión y temperatura indicada en la misma tabla.

## 5.3 CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS DE ENERGÍA.

Las pérdidas de energía en la caldera se deducen del balance de masa y energía, el cual se debe realizar a un volumen de control como el que se ilustra en la figura 25.

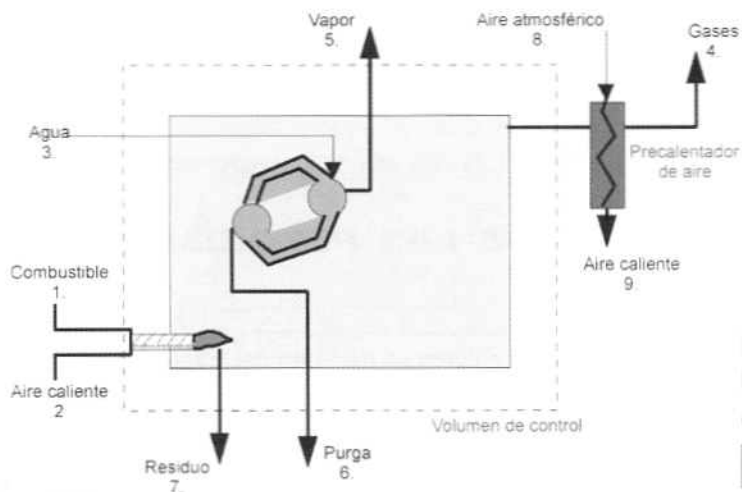
**TABLA 16 - Valores de entalpía de vapor saturado y del agua líquida**

Presión (Psig)	Temperatura (°C)	Entalpía del vapor saturado $h_v$ (sat) KJ/Kg saturación con base en la presión	Entalpía del agua líquida (KJ/Kg)
80	25	2760	105.47
100	25	2769	105.6
120	25	2775	105.72
150	25	2783	105.92
180	25	2789	106.11

Pat: 1 atm

El análisis energético empieza con la recolección de datos en los puntos señalados en la figura 25. En la tabla 17 se indica, para cada punto, las principales variables o parámetros que se deben medir o calcular para realizar el balance de masa y energía.

Las pérdidas de energía se deben al flujo de energía contenida en los gases que se escapan por la chimenea ( $E_g$ ), a la que se pierde por paredes ( $E_w$ ),



Esquema que muestra las entradas y salidas de una caldera.

**FIGURA 25**

**TABLA 17 - Recolección de datos en los puntos estratégicos que se ilustran en la figura 25**

PUNTO DE MUESTREO	DATOS A REGISTRAR
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flujo de combustible próximo al fogueo. • Temperatura del combustible</li> <li>• Poder calorífico superior del combustible. • Composición</li> </ul> Tipo Análisis último o inmediato Volátiles Carbón fijo Cenizas Azufre Humedad
2 y 9	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Presión atmosférica • Temperatura de entrada del aire • Humedad absoluta</li> </ul>
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flujo de vapor + flujo de purgas de alimentación que se calcula del balance</li> <li>• Temperatura de entrada del agua de alimentación.</li> </ul>
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flujo de gases en chimeneas. • Temperatura de los gases. • Composición: % en volumen</li> </ul> % CO <sub>2</sub> % CO % O <sub>2</sub> % N <sub>2</sub> % SO <sub>2</sub> % SO <sub>3</sub> % H <sub>2</sub> O Material particulado.
5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flujo de vapor medido o sale del balance de energía. • Presión del vapor.</li> <li>• Temperatura del vapor.</li> </ul>
6	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flujo de purgas. • Temperatura de las purgas.</li> </ul>
7	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flujo de residuo • Análisis último o inmediato • Volátiles • Carbono fijo</li> <li>• Humedad • Cenizas • Temperatura</li> </ul>
8	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura de aire</li> </ul>

debido a los inquemados ( $E_i$ ) y a la energía perdida por purgas. ( $E_p$ ), o sea:

$$P = E_g + E_w + E_i + E_p$$

### 5.3.1 Cálculo de las pérdidas en gases de chimenea.

Las pérdidas totales en calderas dependen del combustible y de su alimentación, entre otras. En condiciones inadecuadas de operación pueden alcanzar un valor cercano al 30% del total de energía aportada por el combustible. En otras condiciones más adecuadas son del orden del 10% o menos.

Para el cálculo exacto de las pérdidas en gases por chimenea se aplica la fórmula:

$$e_g = [V_{CO_2} C_{p_{CO_2}} + V_{O_2} C_{p_{O_2}} + V_{N_2} C_{p_{N_2}} + V_{SO_2} C_{p_{SO_2}}] * (T_g - T_a)$$

En esta fórmula, las unidades de  $e_g$  se dan en KJ/Kg de combustible. Si se desea el valor en flujo de energía ( $E_g$ ) se debe multiplicar el valor de  $e_g$  por el flujo de carbón utilizado ( $m_c$ ):

$$E_g = e_g * m_c$$

Si incluimos la humedad, la energía en gases húmedos ( $E_{gh}$ ) será

$$E_{gh} = [e_g + V_{H_2O} * h_{H_2O}] m_c$$

En esta fórmula no se ha tenido en cuenta la energía contenida en el CO, la cual es despreciable. En ella,  $V_i$  el flujo volumétrico de cada gas  $i$ , en  $m^3(n)/Kg$  combustible,  $C_{pi}$  es el calor específico promedio de cada gas  $i$ , en  $KJ/m^3(n)/^{\circ}C$ . Ver tabla 18; es la entalpía del vapor de agua a la temperatura del gas ( $T_g$ ) y a la presión parcial de vapor correspondiente, se puede aproximar a un valor de 2400 KJ/Kg.  $T_g$  es la temperatura del gas en chimenea y  $T_a$  es la temperatura ambiente.

**TABLA 18 - Valores de cp promedio entre 273K y la temperatura  $T_g$  en KJ/Nm<sup>3</sup> °c**

K	$T_g$ °C	$C_p$ , KJ / Nm <sup>3</sup> K				
		O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>
373	100	0.2904	0.4151	0.3240	0.3752	0.4160
473	200	0.3084	0.4393	0.3060	0.3777	0.4264
573	300	0.3203	0.4572	0.3089	0.3807	0.4363
673	400	0.3288	0.4716	0.3111	0.3841	0.4466
773	500	0.3353	0.4839	0.3133	0.3878	0.4563
873	600	0.3404	0.4947	0.3155	0.3920	0.4657
973	700	0.3446	0.5046	0.3178	0.3905	0.4749

A manera de ejemplo se calcularán las pérdidas en gases para el caso ilustrativo en el apartado 3.5. Los flujos volumétricos por cada Kg. de combustible se toman de la tabla 9 y con base en ella se procederá a calcular la energía perdida en gases que escapan por chimenea a 200 °C. En la tabla 19 se ilustra el resultado teniendo en cuenta la ecuación dada para la pérdida de gases.

**TABLA 19 - Valores del flujo de gases, capacidad calorífica y pérdidas en gases**

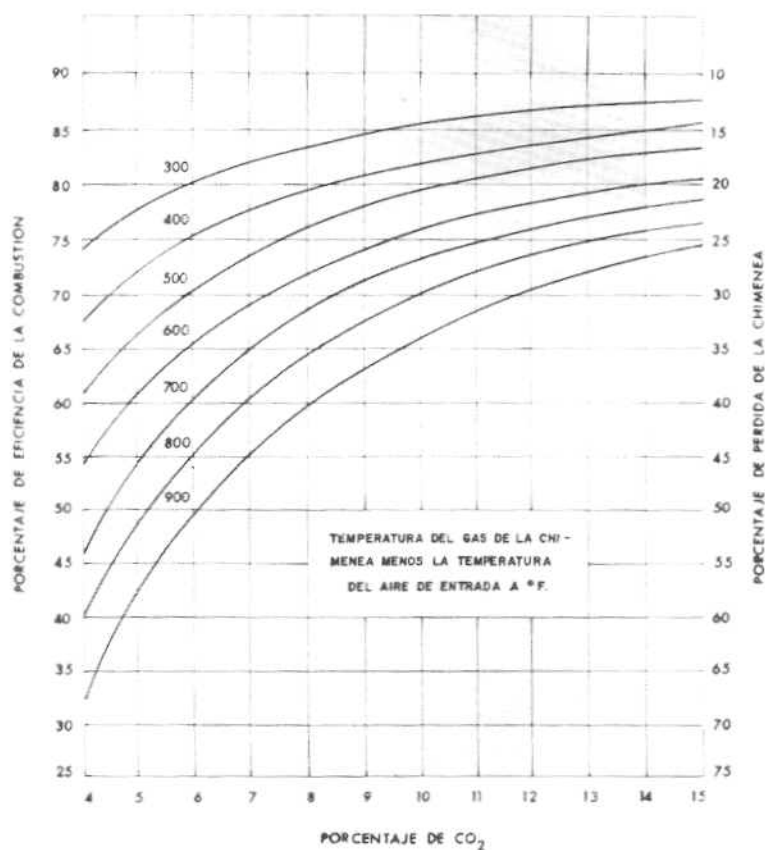
GAS	$V_1$ [m <sup>3</sup> (n)/Kg. combustible]	$C_{pt}$ [KJ/m <sup>3</sup> (n)°K]	$V_1 C_{pt} (T - T_{ref})$
N <sub>2</sub>	7.29996	0.3060	390.9
CO <sub>2</sub>	1.1013	0.4393	84.7
SO <sub>2</sub>	0.0005	0.4262	0.04
O <sub>2</sub>	0.7013	0.3084	37.9
Pérdidas energía en gases secos, en KJ/Kg combustible			517.54

$T = 200$  °C,  $T_{ref} = 25$  °C

Para incluir la energía en el vapor de agua se procede así:

$$e_g = 517.54 + 0.0578 * 2400 = 640.7 \text{ KJ/Kg combustible}$$

Un cálculo rápido de las pérdidas por gases en chimeneas se puede hacer mediante el gráfico que se presenta en la figura 26. En esta figura se puede deducir el porcentaje de pérdidas por chimeneas con base en el porcentaje de  $\text{CO}_2$  en los gases y en la temperatura de salida de los gases. V.g. Gases saliendo a  $300^\circ\text{F}$  ( $149^\circ\text{C}$ ) con una concentración de



Relación de la eficiencia de la combustión y de los porcentajes de pérdida en la chimenea y el porcentaje de  $\text{CO}_2$  y la temperatura de la chimenea.

**FIGURA 26**

CO<sub>2</sub> del 9,5 % en peso y base seca. Representa una pérdida de 15% de la energía aportada por el combustible.

**5.3.2 Cálculo de las pérdidas por paredes.**

Las pérdidas por paredes se dan debido a la diferencia de temperatura entre las paredes de un equipo y su medio circundante; se presenta una pérdida por transferencia de calor por convección y radiación.

Estas pérdidas se calculan así:

$$E_w = h A (T_w - T_a)$$

En donde:

- E<sub>w</sub> = Energía perdida por paredes, en Kw.
- A = Área total del equipo expuesta a transferencia de calor, en m<sup>2</sup>.
- T<sub>w</sub> = Temperatura de pared, en °C.
- T<sub>a</sub> = Temperatura ambiente, en °C.
- h = Coeficiente total de transferencia de calor. (Ver tabla 20)

v.g. Si la superficie externa de 50 m<sup>2</sup> de una caldera cilíndrica posee una temperatura de 150 °C, la temperatura ambiente es de 25 °C, las pérdidas por paredes serán:

$$E_w = \frac{19.9 * 50 * 125}{1000} = 124.4 \text{ Kw}$$

Si el equipo a analizar es una caldera, las pérdidas por radiación y convección en paredes se calcula con base en gráficos experimentales.

**TABLA 20 - Valores aproximados de los coeficientes de transferencia de calor total (h) para varias diferencias de temperatura entre la pared y el medio que rodea el equipo, válido para materiales con emisividad de 0.95**

DIFERENCIA DE TEMPERATURA (°C)	PARED HORIZONTAL CALIENTE ARRIBA h (w/m <sup>2</sup> C)	PARED HORIZONTAL CALIENTE ABAJO h (w/m <sup>2</sup> C)	PARED CILÍNDRICA VERTICAL h (w/m <sup>2</sup> C)	PARED CILÍNDRICA HORIZONTAL h (w/m <sup>2</sup> C)
25	10.5	7.8	10.1	10.3
75	14.6	10.0	13.5	13.7
125	18.0	12.4	16.6	19.9
175	21.5	15.1	19.9	20.3
225	25.2	18.3	23.5	24.0
275	29.4	22.0	27.6	28.0
325	34.1	26.1	32.2	32.6
375	38.3	30.9	37.2	37.8
425	45.0	36.3	43.0	43.4

En la figura 27 se observa que una caldera con una capacidad de generación de 100 t/h, operando a un 60% de su carga, presenta una pérdida del 1.6% del total aportado por el combustible.

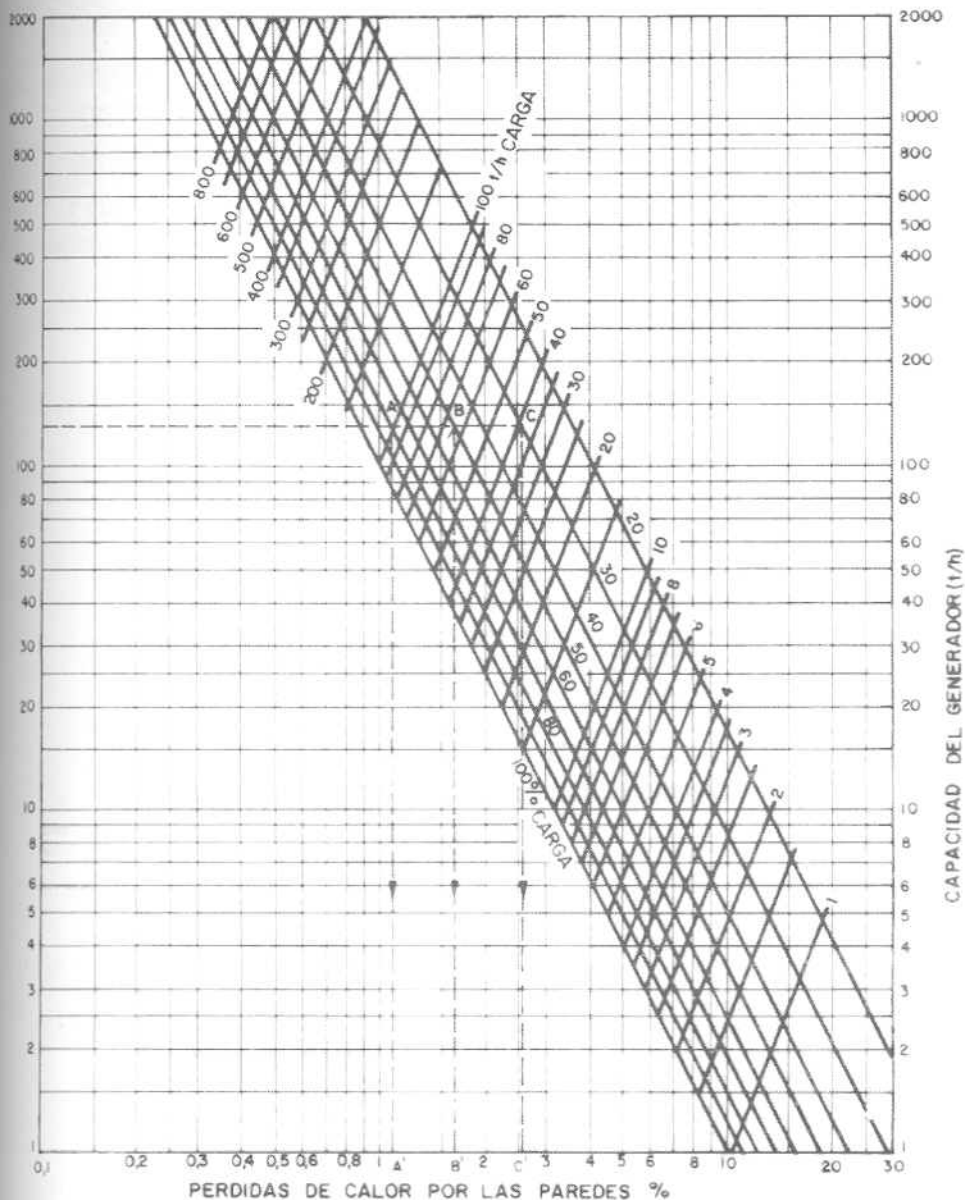
### 5.3.3 Cálculo de las pérdidas por inquemados. (E<sub>i</sub>)

La presencia de inquemados en los productos de la combustión representa una porción de combustible no quemado, por lo tanto es energía que no transfirió al proceso.

En la tabla 21 se presenta la energía perdida por cada elemento presente en los residuos.

Gráfico para calcular el porcentaje de pérdidas de energía por paredes.

**FIGURA 27**



**TABLA 21 - Pérdida de energía por presencia de carbono, hidrógeno y monóxido de carbono en los residuos**

ELEMENTO PRESENTE EN LOS RESIDUOS Y EN LOS GASES	PÉRDIDA DE ENERGÍA	
	Kcal/Kg ELEMENTO	KJ/Kg DE ELEMENTO
Combustible sin variar	6000	29080
Carbono	7834	32762
Hidrógeno	28899	120798
CO (Inquemado Gaseoso)	2415,6	10092,2

Además de esta pérdida de energía por inquemados, se presenta otra pérdida que está asociada con el calor sensible de los residuos y/o cenizas. Éstas se pueden estimar así:

$$E_{RE} = m_{re} C_{re} (T_s - T_a)$$

Donde  $E_{RE}$  son las pérdidas de energía en residuos y/o cenizas, en KW;  $m_{re}$  es el flujo de residuos, en Kg/s;  $T_s$  es la temperatura de salida del residuo, en °C; y  $C_{re}$  es el calor específico de los residuos generados, en KJ/Kg°C.

En consecuencia, la energía total perdida asociada a los inquemados será calculada así, si se tiene el análisis último de los residuos:

$$E_i = m_C * 32762 + m_H * 120798 + m_{CO} * 10092.2 + E_{RE}$$

También se puede calcular la energía perdida por inquemados con base en el análisis próximo de la siguiente forma:

$$E_i = m_{CSV} * 29080 + m_{CO} * 10092.2 + E_{RE}$$

Donde:

- $m_c$  = Flujo de carbono en los residuos.  
 $m_H$  = Flujo de hidrógeno en los residuos.  
 $m_{CO}$  = Flujo de CO en los gases  
 $m_{CSV}$  = Flujo de combustible sin quemar en los residuos, el cual se calcula a partir del contenido de carbono fijo y de material volátil en los residuos:

(Carbono fijo en residuos + Material volátil en residuos) \* flujos de residuos

Para cálculos rápidos, este tipo de pérdidas se desprecia por ser bajo su valor con respecto a las otras pérdidas.



## ASPECTOS ENERGÉTICOS

**S**e considera en este apartado los principales aspectos a tener en cuenta para ahorrar energía en calderas. Para lograr este objetivo se debe precisar los focos vulnerables donde se presentan pérdidas de energía.

Las principales actividades que se deben tener en cuenta para reducir el consumo de energía en calderas están relacionadas con:

- Medir la temperatura de los gases en la chimenea.
- Analizar el porcentaje de inquemados en cenizas y escorias.
- Analizar el porcentaje de oxígeno en los gases, lo cual es un indicativo del exceso de aire de combustión.
- Medir la temperatura de paredes.
- Examinar la calidad del vapor por arrastre de agua.
- Vigilar el caudal de purgas continua y de fondo.
- Cuantificar las paradas por averías o por otras causas.
- Controlar la calidad (granulometría, humedad, cenizas) del combustible.
- Chequear las fugas de vapor.
- Distribuir uniformemente el carbón y/o aire en la zona de combustión.
- Revisar los detectores de llama de los quemadores, los cuales se deben mantener limpios.

### 6.1 POSIBILIDADES DE REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS

Es posible disminuir el consumo de energía y, por lo tanto, el de combustible implementando las siguientes acciones:

- Mantener los niveles de exceso de aire en los valores mínimos posibles y mediante un sistema de control de combustión adecuado. Con el ahorro de energía, al reducir el exceso de aire desde un 80% a un 40%, se espera una economía del 3% del consumo de carbón. Para este efecto se debe medir la composición de los gases, en especial el porcentaje de oxígeno.

En la tabla 22 se aprecia el exceso de aire recomendado dependiendo del tipo de quemador.

**TABLA 22 - Equipos de combustión de carbón y exceso de aire recomendado**

EQUIPO	EXCESO DE AIRE RECOMENDADO
Carbón pulverizado en hogar con paredes de agua	5 - 15
Parrilla con alimentador tipo rociador	30 - 60
Parrilla móvil	25 - 50
Parrilla fija con alimentación automática por la parte inferior	30 - 50

- Mantener limpios los tubos de las calderas para evitar incrustaciones o formaciones de depósitos en los tubos por hollín o por impurezas del agua. Las pérdidas de energía debido a las incrustaciones puede alcanzar hasta un 7% del total de energía aportada por el combustible. Por lo tanto, si se lleva a cabo un programa adecuado de mantenimiento, estas pérdidas pueden disminuir. El registro de temperaturas de los diferentes pasos de los gases ayuda a detectar condiciones de limpieza para óptima eficiencia.
- Procurar la mejor combustión manteniendo los quemadores bien ajustados para una relación constante aire combustible, con el exceso

de aire apenas necesario y distribuir en forma uniforme el combustible sobre la parrilla.

- Regular el tiro del hogar a un nivel bajo que garantice la evacuación de los gases, que apenas contrarreste las caídas de presión a través de la caldera y que dé mejor residencia de calor en todas las superficies de intercambio.
- Comprobar si la velocidad de combustión es la correcta para el ventilador existente, pues puede ocurrir que el ventilador no sea capaz de suministrar más aire y por lo tanto sea necesario disminuir la cantidad de combustible.
- Mantener la llama en tal forma que no toque directamente las tuberías, ni de agua ni de los sobrecalentadores, para evitar daños en éstas.
- Procurar siempre el buen estado de pulverizadores, atomizadores, parrillas, etc., así como su calibración más conveniente.
- Mantener buen sello en toda la caldera para evitar infiltraciones de aire que aumenten el exceso de éste. Las infiltraciones se pueden detectar con una vela observando los puntos en los cuales la llama de la vela es absorbida por el tiro del hogar. Cuidar el aislamiento térmico para evitar radiación excesiva al exterior.
- Reducir las pérdidas en los gases intercambiando el calor, bien sea al agua de alimentación y/o al aire de combustión, cuidando de no bajar demasiado la temperatura por debajo del punto de rocío del ácido sulfúrico.
- Es ideal la instalación de controles automáticos de combustión y de tiro, manteniéndolos calibrados.

- Hacer un buen tratamiento del agua de alimentación, buen control por análisis frecuente del agua y purgar en forma regular. Es importante notar que en el aislamiento causado por las incrustaciones hay muchas pérdidas de calor.
- Los combustibles se deben almacenar en tal forma que estén protegidos contra humedad excesiva, pues evaporar ésta consume más combustible y por consiguiente reduce la eficiencia.
- En lo posible, recuperar condensados para regresarlos a la caldera; se ahorra calor y químicos del tratamiento interno del agua.
- Evitar el sobredimensionamiento en la caldera para no tener demasiados arranques y paradas, especialmente en calderas automáticas.

## 6.2 EVALUACIÓN DE LAS PÉRDIDAS Y AHORROS DE ENERGÍA

En la tabla 23 se presenta un estimativo de la participación porcentual de las pérdidas más importantes en una caldera. Cuando una de éstas está por encima de los valores tabulados indica que se está dando una operación incorrecta. Este porcentaje está referido a la cantidad total de energía que entra a la caldera con el combustible.

**TABLA 23 - Rango de variación de las pérdidas de calor**

TIPO DE PÉRDIDAS	PORCENTAJE DE PÉRDIDAS
Inquemados sólidos	4%
Inquemados gaseosos (CO + H <sub>2</sub> )	Hasta 0.1%
Gases de combustión	10 - 18%
Purgas	0.4 - 1 % (el 11% con agua muy mala)
Paredes	0.5 - 2% (a plena carga)

A continuación se indica un conjunto de posibles acciones que sirven para reducir cada una de las principales pérdidas.

### **6.2.1 Reducción de pérdidas por gases de combustión**

La principal pérdida de energía en los gases de combustión la produce la temperatura con la cual salen por la chimenea. La temperatura de los gases debe estar 50°C por encima de la temperatura del vapor. Por cada 20 - 22 °C sobre la temperatura óptima del flujo de gases significa una pérdida de energía del 1%. La temperatura mínima posible o temperatura óptima con la cual se deben evacuar los gases productos de la combustión se refiere a aquel valor por encima del punto de rocío ácido y, por supuesto, por encima de la temperatura del proceso.

El punto de rocío se refiere a la temperatura a la cual los gases de combustión se saturan con el agua presente en ellos. Por lo tanto, si la temperatura de los gases se disminuye por debajo del punto de rocío, se presentará condensación de ácido sulfúrico, el cual ataca las superficies metálicas. Normalmente esta temperatura es del orden de 120 a 150°C, dependiendo de la humedad y contenido de azufre en el combustible.

Con respecto a la temperatura de proceso, ésta se refiere a la máxima temperatura con la cual se debe generar un producto; v.gr., si se genera vapor saturado a 100 psig, su temperatura será de 170°C. En consecuencia, se recomienda que la temperatura de los gases que salen de la caldera sea aproximadamente 50°C superior a dicha temperatura.

En los casos en los cuales la temperatura de los procesos es alta (v.gr. generación de vapor a alta presión, calentamiento de obra cerámica, etc.), los gases escaparán también a alta temperatura; de ahí la importancia

de recuperar su energía para el precalentamiento del aire de combustión o el precalentamiento del agua o como aire caliente para secaderos.

Si la temperatura de salida de los gases es superior a los valores antes mencionados, se recomienda limpiar las superficies de intercambio, controlar el exceso de aire en los valores mínimos o usar precalentadores de aire o del agua para ahorrar energía.

En grandes unidades (mayor de 400 psig), generalmente se utiliza precalentamiento de aire y/o economizador (precalentamiento de agua). Para pequeñas unidades, generalmente se prefiere usar economizadores.

Por cada 10°F de aumento en la temperatura del agua de alimentación de la caldera, su eficiencia se mejora en 1%. Por cada 20°C de precalentamiento del aire por encima de la temperatura ambiente, se puede obtener un ahorro del 1% del consumo de carbón.

Otra causa de pérdida de energía con los gases es el exceso de aire. Por cada 1% de oxígeno, lo cual equivale a un 5% de exceso de aire, en el análisis de los gases se tiene una pérdida de energía de 0.5%.

### **6.2.2 Reducción de pérdidas por inquemados.**

Cuando la pérdida por inquemados alcanza un valor demasiado elevado, superior al 4%, se pueden establecer las siguientes actuaciones.

Cuando se usa carbón pulverizado, se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Aumentar la turbulencia del aire secundario
- Aumentar la finura de molienda.
- Retroalimentar al hogar las cenizas volantes recogidas en el electrofiltro.

- Soplar los tubos del hogar y recubrir con refractarios la zona de encendido.

Cuando se usa carbón en parrillas se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Ajustar la velocidad de la parrilla y la altura de la capa de carbón.
- Aumentar la longitud de la bóveda delantera de secado.
- Utilizar la técnica de aspiración delantera para mejorar el secado.
- Controlar la granulometría y calidad del carbón.

En el último punto, especialmente para parrillas viajeras que normalmente queman carbones bituminosos con 10% de humedad y entre 9 y 12% de cenizas, se consiguen liberaciones de calor de 500.000 btu/pie<sup>2</sup>-hr. Cuando la humedad y cenizas suben hasta el 20%, la liberación de calor cae hasta 425.000 Btu/pie<sup>2</sup>-hr y para antracitas hasta 400.000 Btu/pie<sup>2</sup>-hr. Si el porcentaje de finos supera más de un 1% a través de una malla 200, la liberación de calor cae hasta 325.000 Btu/pie<sup>2</sup>-hr. Controlando la calidad y granulometría se puede ahorrar hasta un 5% de energía.

En general conviene también comprobar la regulación y el control de la combustión para asegurar que la fuente de inquemados no está ligada con la regulación del tiro y de la relación aire-combustible. Adicionalmente se debe revisar el estado de los quemadores, ventiladores y el hogar.

### **6.2.3. Reducción de pérdidas por purgas excesivas.**

Si se detecta un valor excesivo de pérdidas de purgas, superior al 1%, se debe analizar si las pérdidas por purgas se deben a la mala calidad del agua o a un exceso en el flujo de la purga. En cualquier caso, las medidas que se deben tomar son:

- Racionalización del ciclo de purgas.
- Mejora de la calidad del agua de alimentación, llegando a la desmineralización total si fuera necesario.
- Recuperación del calor de purgas mediante una evaporización tipo flash y precalentamiento del agua de alimentación con las purgas.

En la tabla 24 se presentan las pérdidas de eficiencia en la caldera debido al porcentaje de purgas.

**TABLA 24 - Relación entre la pérdida de eficiencia y el porcentaje de purga**

% Purga	PRESIÓN (Psig)			
	200	400	600	800
	% Pérdida de eficiencia			
10	3.3	4.0	4.5	5.1
5	1.7	2.0	2.2	2.5
2	0.7	0.8	0.9	1.0

Se recomienda aprovechar el calor sensible de las purgas cuando éstas corresponden a un flujo considerable de energía. Se pueden lograr ahorros hasta del 1% de energía.

#### **6.2.4 Reducción de pérdidas por las paredes.**

Incrementar el espesor del aislamiento de las paredes de la caldera o de ductos puede ahorrar energía, pero tomar esta decisión requiere de un análisis costo-beneficio. La mejor oportunidad de mejorar el aislamiento es durante una revisión total de la unidad o cuando definitivamente el aislamiento está en muy malas condiciones.

### **6.2.5 Pérdidas por baja carga de operación.**

Un aspecto importante y difícil de evaluar, pero que puede estar generando altas pérdidas de energía y consecuentemente de dinero, es la de los picos altos y bajos de carga. Para dar solución a esta situación se pueden efectuar algunos cambios:

- Disminuir los picos de carga elaborando un buen plan de demanda y suministro de calor.
- Reemplazar los controles on/off de la caldera por controles de trabajo continuo.
- Ajustar los quemadores de las calderas a la máxima demanda de calor.

### **6.2.6 Pérdidas debido a una inadecuada elección de la presión de la caldera.**

Existen casos en los cuales la caldera puede estar operando a una presión mayor que la necesaria. Se puede reducir lentamente la presión en la caldera hasta un punto donde la cantidad de vapor producida es suficiente para los requerimientos de la planta.

Disminuyendo la presión de operación de la caldera se conseguirá lo siguiente:

- Más baja temperatura de gases debido a una mejor transferencia de calor.
- Disminución de pérdidas de calor de la caldera y tuberías.

- Disminución de pérdidas por escapes de vapor a menor presión.
- Se puede afectar la circulación de la caldera.
- Se tendrá que hacer ajustes en el sistema de purgas para que la demanda de vapor sea mínima.

Si hay más de una caldera disponible, se debe considerar la posibilidad de trabajar con una de ellas a una presión tan baja como lo exija el proceso. Existe un ahorro potencial de 1% de energía por cada 70 psig de reducción de presión.

## **6.3 PROGRAMA DE MANTENIMIENTO**

El buen mantenimiento de una caldera asegura que ésta opere con un mínimo de paradas costosas y sea más eficiente. Existen procedimientos para realizar el mantenimiento de todos los componentes de la caldera; aunque se hace énfasis en el mantenimiento de las superficies de calefacción y de las zonas de agua debido a que éste influye notablemente en la eficiencia de las calderas.

### **6.3.1 Limpieza de las superficies de calefacción.**

Durante el funcionamiento de una caldera se depositan sobre sus tubos (exteriormente, si es una caldera acuotubular e interiormente, si es piro-tubular) hollín y cenizas, y como estas sustancias son malas conductoras del calor deben eliminarse. Por lo tanto, se deben eliminar los depósitos de hollín y de ceniza volante con relativa frecuencia. El tiempo entre dos limpiezas consecutivas depende del combustible quemado.

En las calderas acuotubulares, si los depósitos son recientes y no han tenido tiempo de coquizar y formar una capa adherente y fuerte, pueden eliminarse por medio de los sopladores de hollín.

En las calderas pirotubulares, que están desprovistas de sopladores de hollín convencionales, el hollín coqueiza en el interior de los tubos y deben emplearse cepillos o rascadores que se adaptan especialmente para limpiar tubos de humo.

### **6.3.2 Mantenimiento de las zonas de agua de las calderas**

Las zonas de agua de una caldera, interior de los tubos en los acuotubulares y exterior en las pirotubulares, deben mantenerse limpias y libres de incrustaciones, aceites, sedimentos y otras materias extrañas. Estas incrustaciones se deben a la precipitación de ciertas sales disueltas en el agua, cuando la concentración de las mismas, debido a la constante evaporación, resulta mayor que su solubilidad.

Los efectos perjudiciales de las incrustaciones son:

- Disminuyen el coeficiente global de transmisión de calor gas-agua, con el consiguiente aumento del consumo de combustible.
- Producen fallos de tubos (fugas). La gran mayoría de los fallos de tubos, excepto los causados por niveles alto o bajo, se produce por depósitos o sedimentos en la zona de agua.

Para eliminar las incrustaciones se utilizan procedimientos químicos (lavado ácido con un inhibidor) y medios mecánicos.



## ASPECTOS AMBIENTALES

**D**urante la combustión del carbón se producen componentes gaseosos, los cuales se consideran contaminantes. Entre éstos se incluyen el monóxido de carbono (producto de una combustión incompleta), el dióxido de carbono (uno de los gases causante del efecto invernadero), el dióxido de azufre  $\text{SO}_2$  y los óxidos de nitrógeno  $\text{NO}_x$ . Estas emisiones contribuyen a la formación y deposición de la lluvia ácida. Las mayores consecuencias de la deposición ácida son los daños causados a la vida acuática, el daño en bosques y el acelerado deterioro de las estructuras construidas por el hombre debido a la corrosión.

Otras de las emisiones provenientes de la combustión del carbón están asociadas con la parte no combustible del mismo, la cual da origen a la formación de un residuo sólido. La mayor parte de estos residuos es una porción pesada, que permanece en la cámara de combustión y se conocen como cenizas de fondo. La porción fina de las cenizas es conocida como "cenizas volantes"; éstas son emitidas al aire en el flujo de gases de combustión.

### 7.1 EMISIONES DURANTE LA COMBUSTIÓN DEL CARBÓN

Como se mencionó antes, las mayores emisiones provenientes de la combustión del carbón son las partículas, los óxidos de azufre y los óxidos de nitrógeno; además de algunos combustibles inquemados, incluyendo numerosos compuestos orgánicos y monóxido de carbono, los cuales son emitidos durante la operación normal de los equipos de combustión.

#### 7.1.1 Emisiones de partículas

Los niveles de emisión son funciones complejas de la configuración del quemador, de la operación de la caldera y de las propiedades del carbón.

En las unidades que utilizan carbón pulverizado y ciclones con extracción de las cenizas de fondo vía húmeda, la cantidad de cenizas que dejan las calderas o los hornos es menor que en las unidades con extracción vía seca, ya que algunas de las cenizas se funden y se colectan en las paredes del hogar para ser drenadas desde el fondo del hogar en forma de lodos.

Un método para aumentar la eficiencia de las calderas o los hornos y disminuir la emisión de estas partículas es reinyectar las cenizas colectadas en los equipos de control (usualmente ciclones). Esta práctica puede incrementar la carga de partículas al interior de la caldera o del horno y disminuir las recogidas en los colectores mecánicos. Las cenizas volantes también se pueden reinyectar desde los calentadores de aire y economizadores sin aumentar considerablemente la carga de cenizas a la caldera o al horno, como sucede al inyectar la de los ciclones.

Otras variables diferentes a la configuración del quemador y la reinyección de cenizas, que también pueden afectar las emisiones, son la carga de trabajo de la caldera o del horno y la composición del carbón. Las emisiones de partículas pueden incrementarse al aumentarse la carga de la caldera o del horno, en especial al trabajar a máxima capacidad. De igual manera, las emisiones de partículas pueden incrementarse al aumentar el contenido de cenizas y finos (partículas menores de 1.6 mm de diámetro) del carbón.

### **7.1.2 Emisiones de óxidos de azufre**

Las emisiones gaseosas de óxidos de azufre de la combustión del carbón están, en su gran mayoría, compuestas por  $\text{SO}_2$  y, en una menor cantidad, por trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ) y sulfatos gaseosos. En promedio, cerca del 98% del azufre presente en el carbón bituminoso es emitido en forma de óxidos de azufre. Sin embargo, debido a la naturaleza alcalina de las cenizas en algunos carbones sub-bituminosos es posible que menos de esa cantidad sea emitida, ya que algunos de los óxidos reaccionan para

formar sulfatos, los cuales son retenidos en la caldera o en el horno o en los equipos de control. Generalmente, el tamaño de la caldera o del horno, la configuración del quemador y las condiciones de operación tienen muy pequeño efecto sobre el porcentaje de conversión del azufre a óxidos de azufre.

### 7.1.3 Emisiones de óxidos de nitrógeno

Los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) se producen en el proceso de combustión debido a dos mecanismos: a partir del nitrógeno molecular en el aire de la combustión ( $\text{NO}_x$  térmico) y del nitrógeno del combustible que está siendo quemado ( $\text{NO}_x$  prompt). Las contribuciones relativas de cada uno de estos dos mecanismos de formación dependen de las condiciones de la combustión, el tipo de caldera u horno y el tipo de combustible que está siendo utilizado<sup>1</sup>.

La formación del  $\text{NO}_x$  térmico es marcadamente dependiente de la temperatura del gas, incrementándose rápidamente a temperaturas superiores a 1600 °C<sup>2</sup>. El modelo aceptado actualmente es el desarrollado por Zeldovich (1946).

Se ha observado que las variables de operación más importantes en la formación del  $\text{NO}_x$  térmico son: temperatura máxima del gas, tiempo de residencia del gas a la dicha temperatura pico y la relación estequiométrica aire-combustible. En general, a bajas temperaturas de operación, bajos tiempos de residencia y a bajas relaciones aire-combustible se logra la reducción de los  $\text{NO}_x$ .

---

<sup>1</sup> C.D. Cooper and F.C. Alley, Air Pollution Control: A Design Approach, PWS Engineering, 1988, p 452.

<sup>2</sup> C.D. Cooper and F.C. Alley, Air Pollution Control: A Design Approach, PWS Engineering, 1988, p 452. Control Techniques for Nitrogen Oxide Emission from Stationary Sources, 2nd ed., EPA-450/3-83-002, U.S. Environmental Protection Agency, 1983.

Los  $\text{NO}_x$  también pueden ser formados en la zona de combustión por otros mecanismos alternos en los cuales el nitrógeno molecular ( $\text{N}_2$ ) del aire de combustión reacciona con radicales libres de hidrocarburos disponibles de la reacción del combustible, originándose la siguiente reacción:



El HCN se combina entonces con radicales libre OH, para formar CN, el cual es entonces oxidado a NO por una serie de reacciones en cadena sucesivas. Los  $\text{NO}_x$  formados por esta vía son llamados "NO<sub>x</sub> PROMPT", y su contribución es relativamente pequeña<sup>3</sup>.

El nitrógeno del combustible el cual varía entre 0.5-2.0% para muchos carbones, reacciona con el oxígeno del aire de combustión y produce  $\text{NO}_x$ , a pesar de que la cantidad de nitrógeno en el combustible es relativamente pequeña si se compara con la del aire de la combustión, éste nitrógeno es altamente reactivo y dependiendo de las condiciones de la combustión, la contribución final a la formación de  $\text{NO}_x$  puede ser significativa.

#### **7.1.4 Emisiones de Compuestos Orgánicos Volátiles Y CO**

Los Combustibles Orgánicos Volátiles (VOC) y el Monóxido de Carbono (CO) son combustibles gaseosos que aún no se han quemado, los cuales son emitidos desde las calderas y hornos que utilizan carbón, pero generalmente en cantidades demasiado pequeñas. Sin embargo, durante los periodos de arranque y paradas temporales de los equipos, las emisiones de combustibles inquemados pueden incrementarse.

---

<sup>3</sup> M. Hupa, R. Backman, and S. Bostrom, "Nitrogen oxide emission of Boilers in Finland" J. APCA, 39(11): 1496 (1989)

## 7.2 CONTROL DE LAS EMISIONES

Las tecnologías limpias para el uso del carbón pueden ser aplicadas en cualesquiera de los tres estadios del empleo del combustible, a saber:

- Precombustión limpia del carbón. En esta etapa, el azufre y otras impurezas del carbón son removidas antes de que sean utilizadas en las calderas o en los hornos.
- Combustión limpia del carbón. Los contaminantes dentro de la caldera o del horno son removidos mientras es quemado el carbón.
- Postcombustión limpia del carbón. Los gases combustibles se someten a un proceso de limpieza antes de ser arrojados al ambiente

Existe una cuarta alternativa, la cual se aparta de las estrategias tradicionales y que consiste en la reconversión tecnológica, en la cual el carbón es gasificado o licuado y, una vez esté en este nuevo estado, se limpia para, finalmente, ser utilizado en la caldera o en el horno.

### 7.2.1 Precombustión limpia del carbón

Tradicionalmente, las investigaciones para proveer una precombustión limpia del carbón se han concentrado en dos categorías principales: limpieza física y limpieza química. Recientemente, una nueva categoría ha atraído la atención de los investigadores, la limpieza biológica, en donde se han logrado importantes avances en las técnicas microbiológicas y enzimáticas para liberar el azufre del carbón. Los investigadores han identificado bacterias que pueden "asimilar" el azufre orgánico del carbón. Otras técnicas involucran el empleo de hongos en vez de bacterias, y la inyección de enzimas digestoras de azufre directamente en el carbón.

La limpieza física y química del carbón han mostrado unos porcentajes de remoción del azufre de hasta 90% del total (pirítico y orgánico). Algunas técnicas químicas también pueden remover el 99% de las cenizas.

a). Limpieza física del carbón. Es el método más ampliamente utilizado hoy en día para el lavado del carbón. La limpieza física normalmente separa materia indeseable del carbón aprovechando las diferencias de densidades. Cuando el carbón se extrae de la mina, se tritura y se lava; las impurezas más pesadas se separan. Este tratamiento sólo remueve material distinto al carbón, como son pequeñas impurezas, rocas y azufre pirítico (el combinado con partículas de hierro): entre el 30 y el 50% del azufre pirítico se remueve (aprox. entre el 10 y el 30% del total) y cerca del 60% de las cenizas.

Los procesos físicos incluyen procesos relacionados con la gravedad específica (separación en agua, separación en seco, clasificación con aire), procesos de superficie (aglomeración con aceite, aglomeración selectiva), procesos avanzados, (flotación avanzada, separadores magnéticos, aglomeración avanzada, fluoculación selectiva.)

b). Limpieza química del carbón. Los tratamientos cáusticos han sido los más investigados para la desulfurización de carbones. En otros métodos, el carbón se pone en contacto con un lecho de soda líquida, el azufre reacciona con ella y se retiene. Los problemas asociados con este proceso son la retención de sustancias alcalinas en el carbón, originando corrosión de los equipos, dificultad en la recuperación del producto (carbón) y altos costos de proceso.

c). Limpieza biológica del carbón. Históricamente, las investigaciones acerca de los tratamientos biológicos del carbón han estado encaminadas a la remoción del azufre pirítico y muy pocos estudios a la remoción del azufre orgánico. La meta principal de todos los procesos de desulfurización es remover orgánicamente el azufre asociado con el carbón, mientras se mantienen las características del combustible. La

biodesulfurización requiere oxidar sólo una pequeña cantidad del carbono presente en el carbón, el cual es utilizado por los organismos encargados de asimilar el azufre.

El proceso se lleva a cabo a temperaturas que varían entre los 25 y 35°C, en un medio básico o neutro, y no requiere la presencia de otros aditivos o procesos adicionales que incurran en gastos energéticos y/o económicos. A pesar de los atractivos de la biodesulfurización, ésta tiene serios problemas por solucionar. Uno de ellos es la gran variedad de carbones, lo cual impide utilizar un mismo microorganismo en diferentes carbones con la misma efectividad. Los largos tiempos de residencia necesarios para obtener una efectiva remoción del azufre es otro de los mayores obstáculos para el uso efectivo de esta tecnología, ya que hay una baja velocidad de crecimiento bacteriano, además el azufre orgánico tiene la capacidad para resistir el ataque bacteriano.

### **7.2.2 Combustión limpia del carbón**

La combustión limpia del carbón consiste en la remoción de los contaminantes del carbón al tiempo que éste se quema. Esto va acompañado de un adecuado control de los parámetros de la combustión (combustible, oxidante y temperatura) para minimizar la formación de contaminantes.

Algunos sistemas avanzados de combustión se diseñan para la reducción de las emisiones de  $\text{NO}_x$  en un 50-70%, las emisiones de  $\text{SO}_2$  en un 50-95% y las de cenizas en un 50-90%, cuando son comparados con una tecnología convencional.

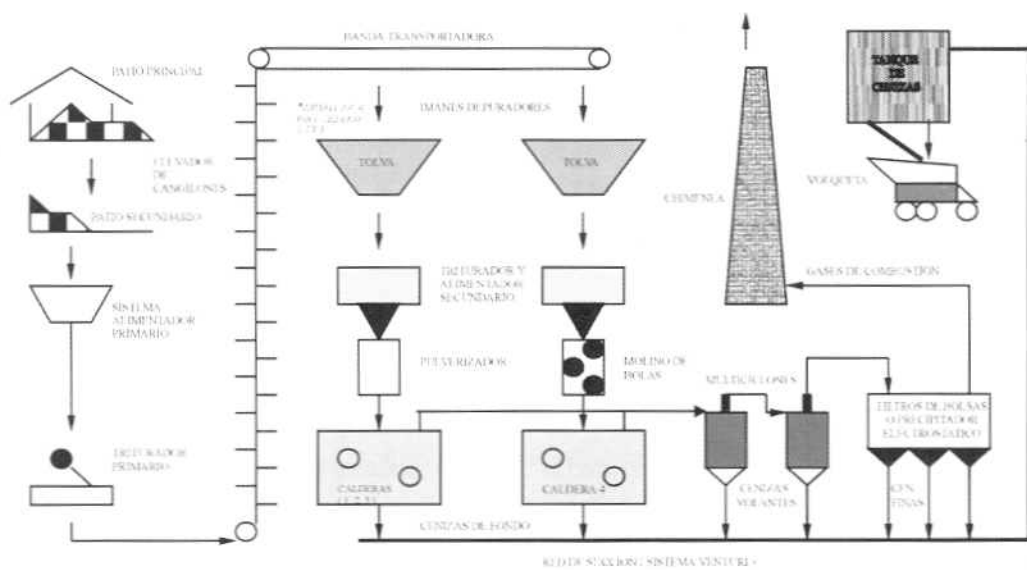
Algunos ejemplos de tecnologías avanzadas incluyen quemadores de bajo  $\text{NO}_x$ , combustión en vortex, combustión en pulsos, inyección de limos, quema en múltiples etapas y quemadores en lecho fluidizado (ver figura 28).

## 7.2.3 Postcombustión limpia del carbón

La postcombustión involucra la remoción de  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  y/o partículas de los gases de salida después de que abandonan la caldera o el horno. Se ha hecho énfasis en el control de partículas, la remoción de  $\text{SO}_2$  y de  $\text{NO}_x$ .

a). Control de partículas. Las clases principales de equipos de control de partículas son multiciclones, precipitadores electrostáticos, filtros de fibra de vidrio y lavadores venturi.

La aplicación de un tipo particular de control dependerá del tipo de caldera u horno, las propiedades del carbón y las condiciones de operación.



Control emisiones  
provenientes del  
carbón.

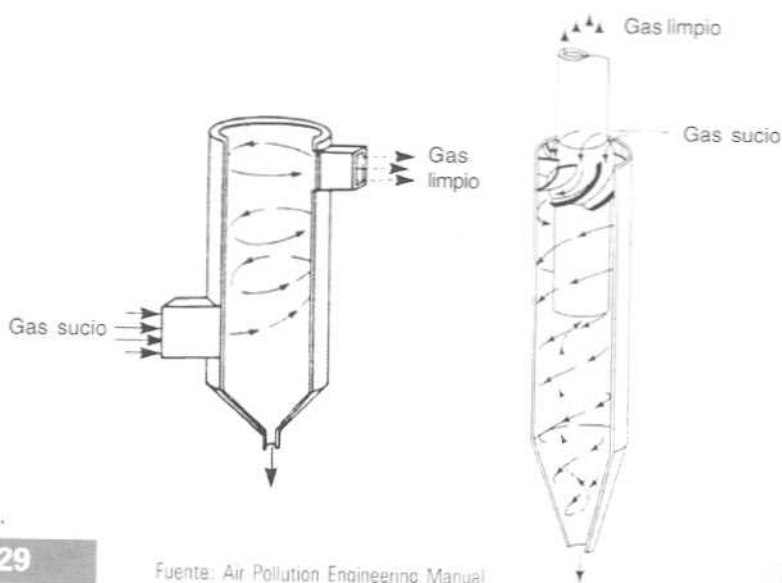
**FIGURA 28**

Los ciclones han sido usualmente utilizados para el control de las cenizas volantes. En años recientes han sido reemplazados por equipos de control más eficientes, manteniéndose como dispositivos de prelimpieza. Un esquema de un colector de partículas inercial se ilustra en la figura 29.

Los precipitadores electrostáticos (ESP's) se utilizan ampliamente en calderas y hornos que utilizan carbón, trabajan en rangos de temperatura que oscilan entre 270 y 350°F. El esquema de un precipitador electrostático se ilustra en la figura 30.

Los filtros de talegas (Baghouses), (figura 31) han tenido un amplio desarrollo en años recientes; su empleo se ha extendido en las instalaciones eléctricas para la colección de las cenizas volantes.

b). Control de óxidos de azufre. Los principales sistemas de desulfurización de gases (FGD) incluyen diferentes clases de *absorsores*,



Colector inercial.

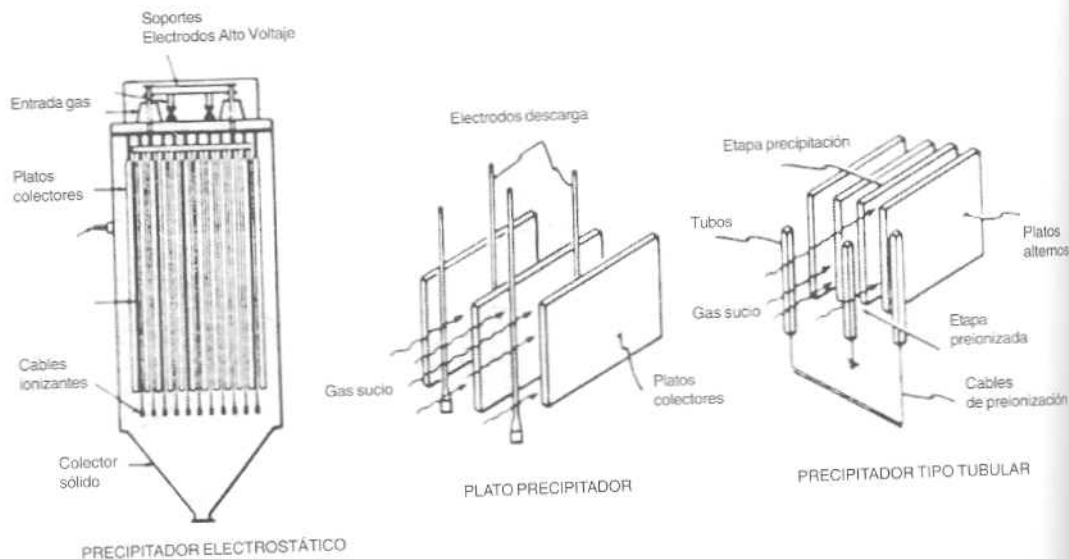
**FIGURA 29**

Fuente: Air Pollution Engineering Manual

# Precipitador electrostático.

**FIGURA 30**

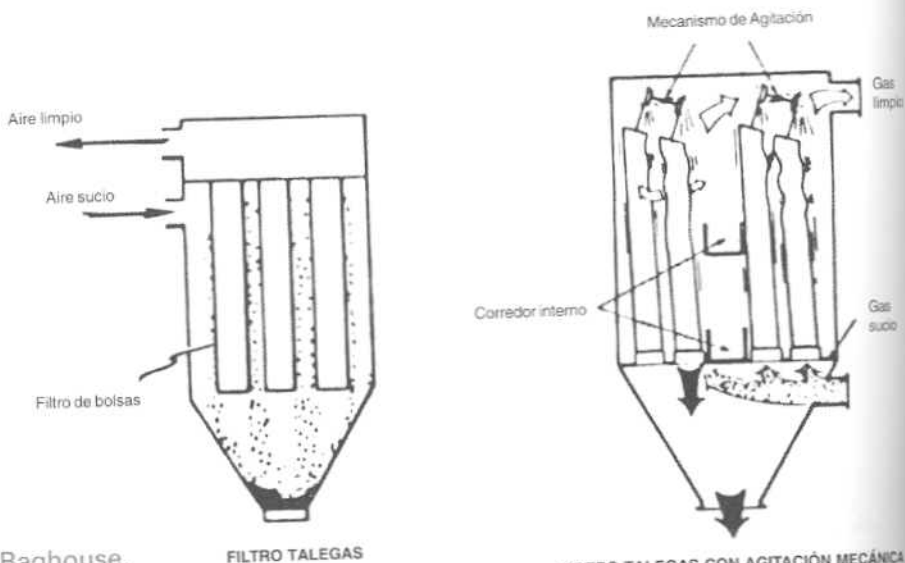
Fuente: Handbook of Pollution Control processes



# Esquema Baghouse.

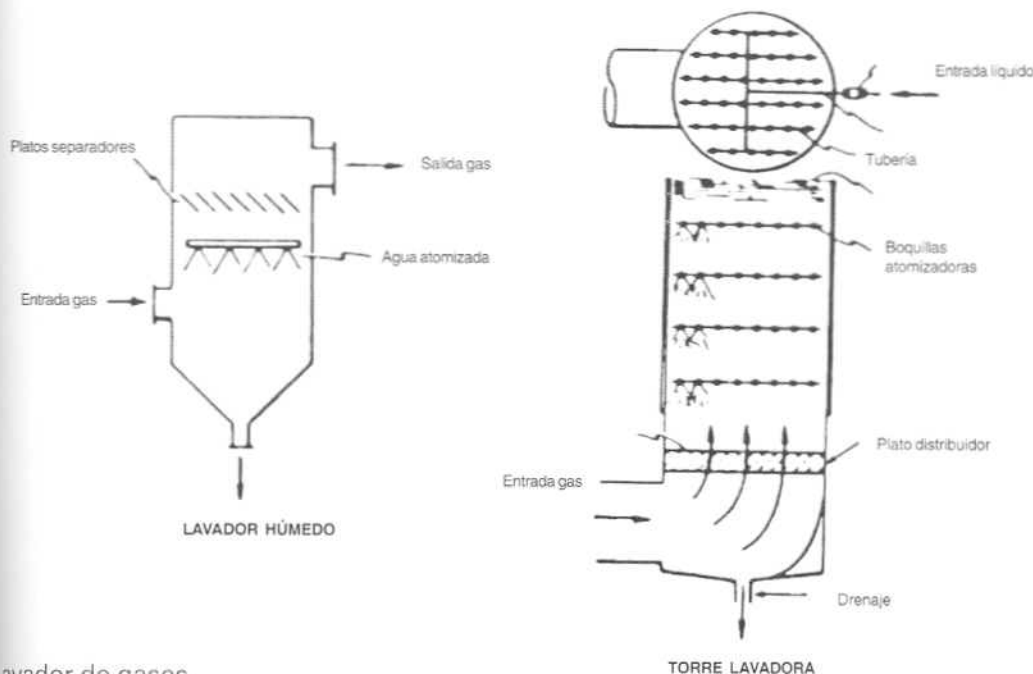
**FIGURA 31**

Fuente: Handbook of Pollution Control processes



los cuales son usados en los lavadores de gases tipo venturi, lavadores compactos y torres absorción<sup>4</sup>. Un esquema típico para el control de  $SO_x$  se presenta en la figura 32.

c). Control de óxidos de nitrógeno. Los métodos para controlar los óxidos de nitrógeno se dividen en dos grupos: métodos de control de la combustión, en los cuales las condiciones de operación para la combustión se modifican para reducir la formación de  $NO_x$ ; y los métodos de postcombustión, en los cuales el  $NO_x$  es removido desde el flujo de gases después de la formación.



Lavador de gases.

**FIGURA 32**

Fuente: Handbook of Pollution Control processes

<sup>4</sup> Lime FGD Systems Data Book Second Edition, EPRI, Publication N°CS-2781, Black and Veatch Consulting Engineers, 1983

Para reducir el pico de temperatura en la zona de combustión por operación de la zona de llama primaria, se emplea una mezcla rica y un enfriamiento de la llama a alta velocidad. El tiempo de residencia del gas se reduce en la zona de alta temperatura y finalmente se utiliza una mezcla rica en la zona de llama primaria y se trabaja en un rango ligeramente superior a la relación estequiométrica en el resto de la cámara de combustión. Lo anterior se logra a través de los llamados quemadores de bajo  $\text{NO}_x$  (LNB), como el ilustrado en la figura 33.

Los quemadores ciclónicos son una aplicación típica de los LNB. En éstos, el aire se introduce a la cámara por un quemador ciclónico haciendo que las partículas grandes se precipiten hacia las paredes en donde se queman, mientras que las finas pasan a la cámara principal en donde se completa la combustión. Un esquema de un quemador ciclónico se presenta en la figura 34

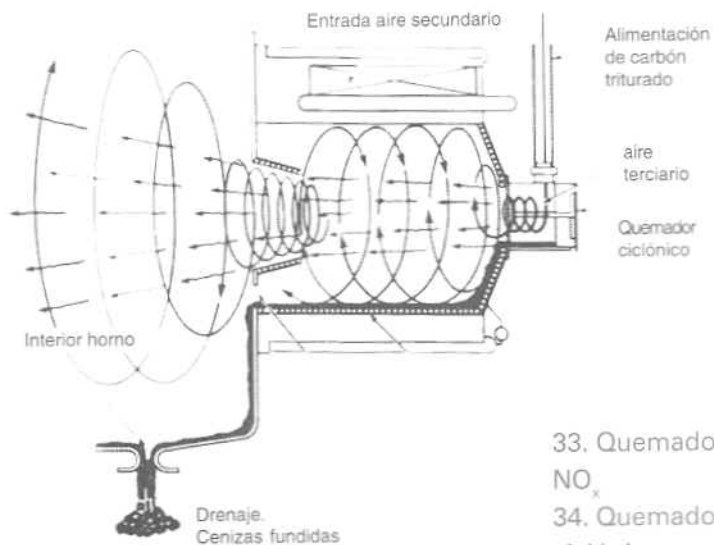
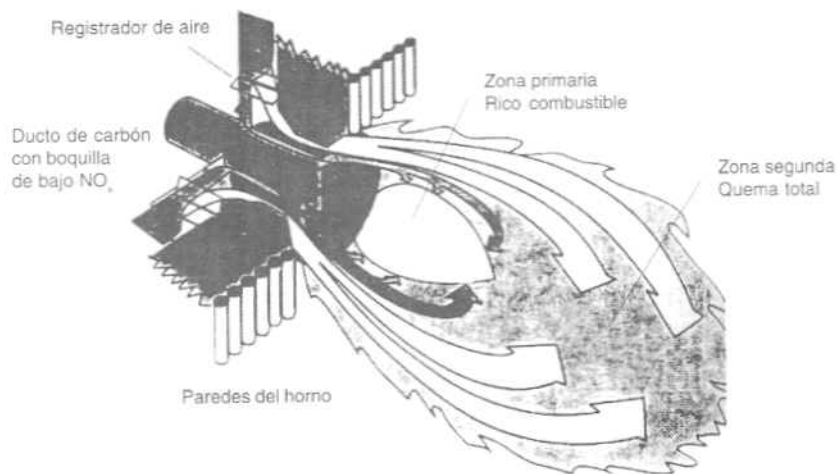
#### **7.2.4 Manejo de los residuos sólidos.**

Luego de la combustión del carbón, podría pensarse que los desechos resultantes serían inutilizables. Sin embargo, hay una serie de procedimientos en los que las cenizas son de gran utilidad práctica y en los cuales éstas constituyen una materia prima que puede reemplazar con amplia ventaja a ciertos materiales convencionales de mayor costo y de mayor dificultad de consecución.

Dentro de las técnicas de disposición de cenizas se pueden enumerar varias alternativas, dependiendo de su utilización. El área de mayor aplicación ha sido la Ingeniería Civil, como es el caso de los rellenos, material de pavimento, como material para la fabricación de bloques y tubos de concreto-ceniza; aplicaciones en la construcción de presas y cimentaciones que necesiten grandes cantidades de concreto, como en el caso de la presa de Salt Lake City, en Utah, EUA.<sup>5</sup>

---

<sup>5</sup> Revista Desarrollo Nacional América Latina: "Construcción de Presas: Los Últimos Adelantos". Octubre 1985, Henry Mozdzer.



33. Quemador de bajo  $\text{NO}_x$   
 34. Quemador ciclónico.

**FIGURAS 33 Y 34**

Fuente: Air Pollution Engineering Manual

La alternativa de empleo en los pavimentos consiste en utilizar las cenizas en mezclas con otros materiales pétreos y cal en determinadas proporciones, para que produzcan una mezcla con una capacidad de soporte aceptable dentro de los parámetros que se utilizan en la compactación. En este aspecto se han hecho algunos estudios en Colombia, de los cuales en uno de ellos se analizaron las cenizas provenientes de Termozipa compuestas básicamente de óxidos de sílice y aluminio, las cuales, al dividirse en forma fina, y en presencia de agua, reaccionan químicamente con el calcio (proveniente de la cal) a temperatura ambiente y se forman compuestos con propiedades cementantes<sup>6</sup>. Los resultados obtenidos muestran unas buenas capacidades de soporte, con unos valores óptimos de mezcla de 25% de ceniza, 68% de material granular y 7% de cal.

Los análisis químicos de las mezclas de ceniza volátil y piedra caliza muestran que se trata de materia prima apropiada, como aditivo, en la fabricación de cemento. Dichas cenizas no requerirían molienda previa a su empleo. Los óxidos de azufre, que originalmente fueron removidos durante la combustión en la caldera o en el horno, deben ser extraídos antes de la manufactura del cemento cuando se encuentre en grandes concentraciones.

Las cenizas de carbón también se utilizan en la neutralización de aguas ácidas de minas, en donde se mezcla con piedra caliza como neutralizante, mostrando propiedades similares a las de la cal que se emplea comúnmente. No obstante, los costos de la ceniza volante modificada pueden ser superiores a los de la cal.

Una alternativa final es la deposición de las mismas en vertederos diseñados para tal fin; en este caso, las cenizas son acopiadas para ser depositadas en rellenos en los cuales reciben un tratamiento especial.

---

<sup>6</sup> Las cenizas de los pavimentos. Ponencia, agosto de 1977, Bogotá

### 7.3 LEGISLACIÓN AMBIENTAL

La legislación ambiental colombiana reglamenta las emisiones atmosféricas permisibles en el Decreto 948 de 1995, que acepta las regulaciones establecidas en el Decreto 02 de 1982. Los valores estipulados en dicho Decreto para las emisiones de los diferentes contaminantes provenientes de calderas y hornos son los siguientes:

#### 7.3.1 Material particulado.

En el artículo 48 se estipulan las emisiones permisibles de material particulado, las cuales se presentan en la tabla 25.

La interpolación de los diferentes valores de las normas de emisión está dado por las siguientes ecuaciones de acuerdo con la zona en la cual se encuentre la fuente emisora:

a. Zona rural	kilo	Mkcal
	Mkcal	h
	$E = 3.0,$	$P \leq 10$
	$E = 6.29 * P^{-0.321}$	$10 < P < 1500$
	$E = 0.60$	$P \geq 1500$

b. Zona urbana	kilo	Mkcal
	Mkcal	h
	$E = 2.0,$	$P \leq 10$
	$E = 4.45 * P^{-0.340}$	$10 < P < 1500$
	$E = 0.25$	$P \geq 1500$

**TABLA 25 - Emisiones permisibles material particulado en calderas y hornos**

Consumo de calor Mkcal/h	Zona rural Kilos/10 <sup>6</sup> kcal	Zona urbana kilos/10 <sup>6</sup> kcal	Altura de referencia Punto de descarga
10 ó menos	3.00	2.00	15
25	2.24	1.45	20
50	1.79	1.14	25
75	1.57	0.99	30
100	1.43	0.90	40
200	1.15	0.71	45
300	1.01	0.61	50
400	0.92	0.55	55
500	0.86	0.51	60
750	0.75	0.45	100
1000	0.68	0.40	115
1500 o más	0.60	0.35	120

Donde:

E = Emisión máxima permisible de partículas, expresada en kilos por millón de kilocalorías consumidas por hora.

P = Calor liberado por el combustible utilizado, millones de kilocalorías por hora.

Cuando la fuente fija se encuentre ubicada a una altura diferente de la del nivel del mar, la norma de emisión se deberá modificar multiplicándola por un factor K, calculado como:

$$K = \frac{pbh}{760} + 0.04 * H$$

Donde:

K = Factor de modificación por altitud.

pbh = Presión barométrica del lugar, en milímetros de mercurio.

H = Altitud sobre el nivel del mar, en miles de metros.

Los hornos no tienen una norma específica que los rija, y la norma de emisión está referida al artículo 70, "Otras Industrias". Ésta se presenta en la tabla 26.

**TABLA 26 - Emisiones permisibles material particulado en calderas y hornos**

PRODUCCIÓN Ton/h	Zona rural kilos/hora	Zona urbana kilos/hora	Altura de referencia Punto de descarga
0.10	3.01	1.50	15
0.50	5.96	2.98	15
1.0	8.00	4.00	15
2.0	14.67	7.33	15
3.0	20.92	10.46	15
4.0	26.91	13.45	15
5.0	32.71	16.36	15
10.0	60.00	30.00	20
20.0	79.82	41.21	20
30.0	94.32	49.62	25
40.0	106.17	56.60	25
50.0s	116.39	62.70	30
100.0	154.91	86.20	35
200.0	205.93	118.30	40
300.0	243.33	142.42	50
400.0	273.92	162.50	60
500.0 o más	300.27	180.00	70

La interpolación de los diferentes valores está dado por las siguientes expresiones:

a. Zona rural

kilo h	Ton h
$E = 3.0,$	$P < 0.1$
$E = 8.0 * P^{0.425}$	$0.1 \leq P < 1.0$
$E = 8.0 * P^{0.875}$	$1.0 \leq P < 10.0$
$E = 23.26 * P^{0.4116}$	$10 \leq P \leq 500$

b. Zona urbana

kilo h	Ton h
$E = 1.5$	$P < 0.1$
$E = 4.0 * P^{0.425}$	$0.1 \leq P < 1.0$
$E = 4.0 * P^{0.875}$	$1.0 \leq P < 10.0$
$E = 10.45 * P^{0.456}$	$10 \leq P \leq 500$

Donde:

E = Emisión máxima permisible de partículas, expresada en kilos por hora.

P = Máxima producción horaria.

Al igual que en el caso anterior, las emisiones deben ser corregidas por el factor K ya definido.

### 7.3.2 Óxidos de azufre.

En el artículo 79 se especifican las alturas mínimas de emisión para calderas y hornos y equipos de combustión que utilicen combustibles sólido o líquido, entre ellos: carbón, fuel oil, Kerosene, y otros. Los valores de dichas alturas se presentan en la tabla 27.

**TABLA 27 - Emisiones permisibles material particulado en calderas y hornos**

Calor liberado Mkcal/h	Porcentaje de azufre		
	1.4 o menos	1.5 - 2.9	3.0 - 6.0
Altura mínima requerida en metros			
10 o menos	15	15	20
11 - 40	20	25	30
50	25	30	35
75	30	37	50
100	35	45	65
200	40	52	72
300	45	60	80
400	52	67	95
500	60	75	110
750	85	100	130
1000	110	125	150
2000 o más	125	150	-

Adicionalmente la resolución 623 de 1998 reglamenta la cantidad de azufre total del carbón mineral o sus mezclas que se puede utilizar como combustible de acuerdo a la tabla 28.

**TABLA 28 - Contenido de azufre total (%peso) del carbón mineral o sus mezclas, en base "como se recibe", a la entrada del sistema de combustión**

REGIÓN	FECHA DE VIGENCIA
	Ene. 1 de 1998 hasta Ene. 1 de 2003
Atlántica	1.5
Orinoquia y central, excepto Boyacá	1.7
Boyacá	2.5
Pacífica y Amazonia	3.3

Sin embargo, se permite el uso de carbones o sus mezclas con contenidos de azufre total o superiores a los establecidos en la tabla 25 cuando se garantice, mediante muestreos isocinéticos anuales, que las emisiones de óxidos de azufre sean iguales o menores a las que se obtendría aplicando los factores de emisión de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos -EPA- (documento AP42, sección 1, 1985) a los contenidos de azufre total establecidos regionalmente en la tabla anterior.

### **7.3.3 Óxidos de nitrógeno.**

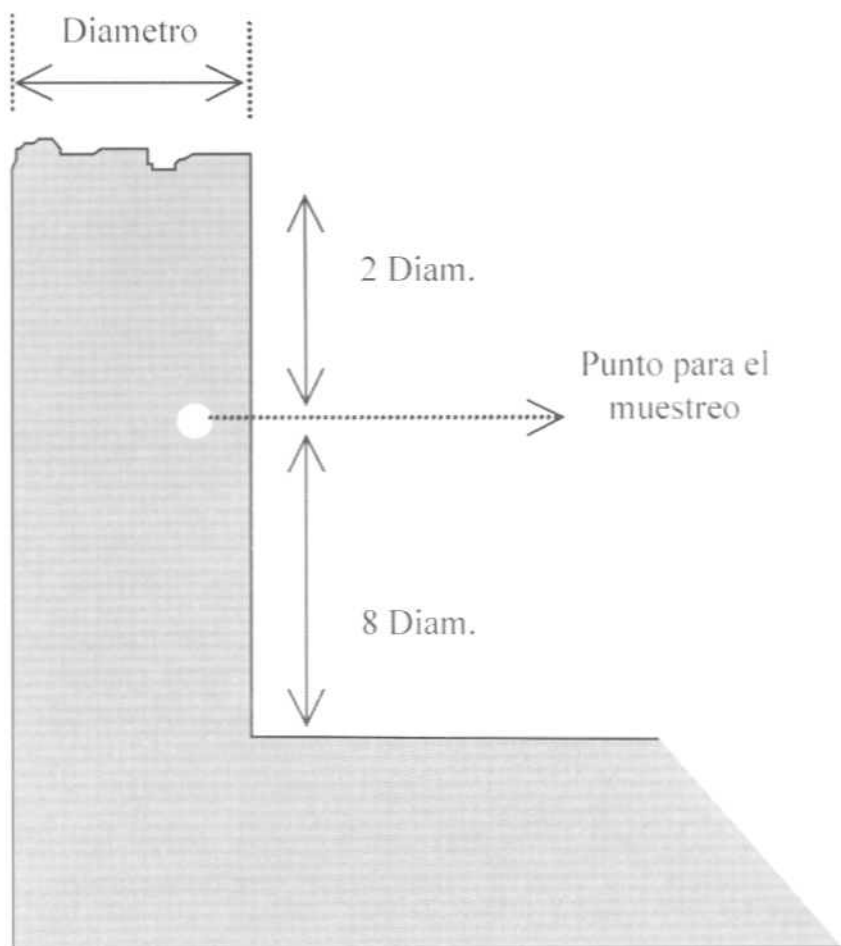
No se menciona en dicho Decreto norma de emisión para este contaminante.

## **7.4 MUESTREOS ISOCINÉTICOS**

Un muestreo isocinético consiste en la extracción de una muestra de gas desde un ducto a una velocidad igual a la de circulación del mismo.

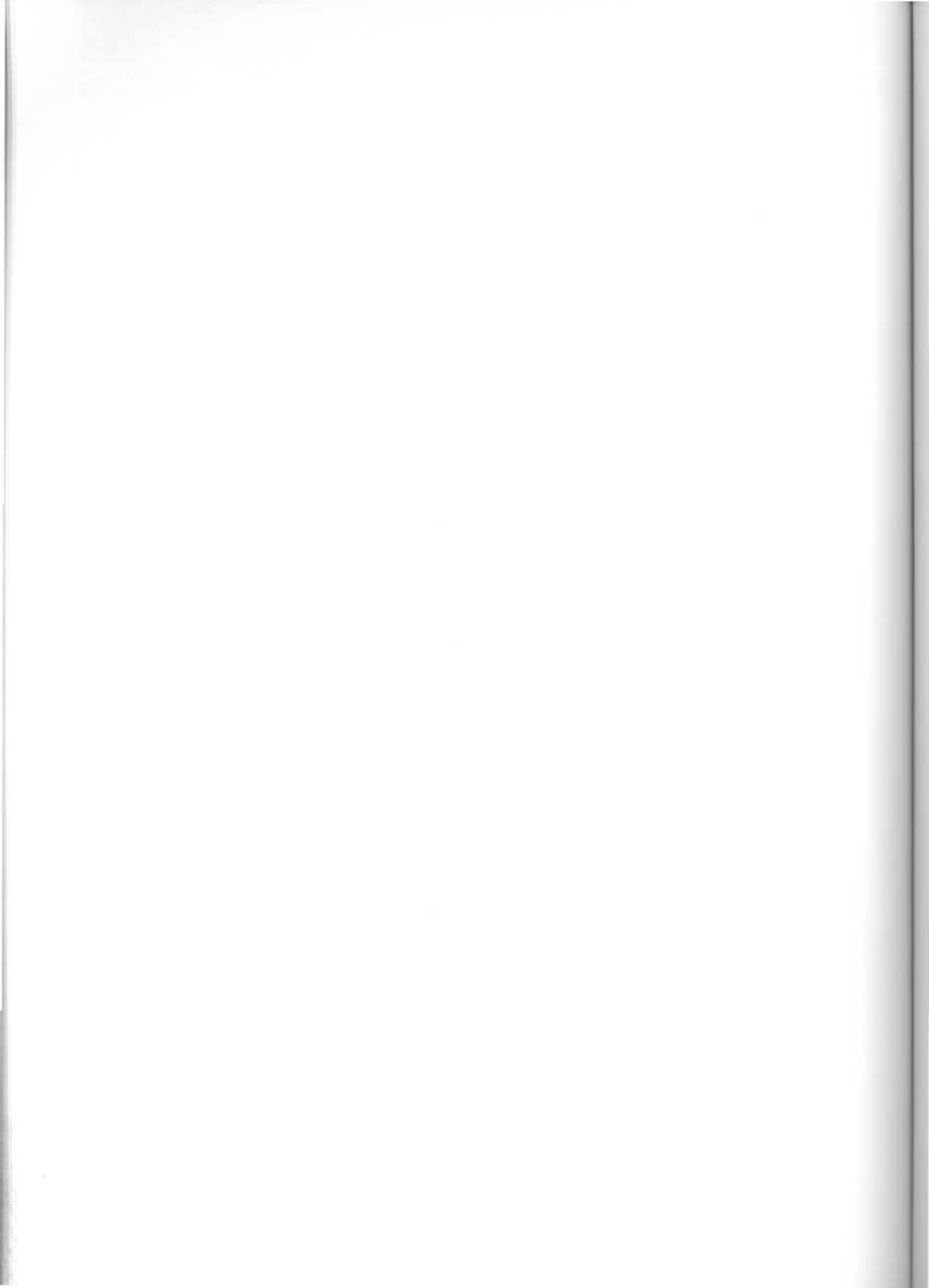
El muestreo isocinético es necesario para realizar la cuantificación de los diferentes contaminantes que se evacúan a la atmósfera, entre ellos se encuentran el material particulado, los óxidos de azufre y nitrógeno, y las neblinas ácidas. El muestreo debe realizarse con el equipo apropiado instalado siguiendo las normas de medición especificadas para cada contaminante, entre ellas se establece que el punto de toma de la muestra debe ubicarse a una distancia igual a ocho veces el diámetro de la chimenea después de la última perturbación en el ducto, y dos diámetros antes de la siguiente perturbación, como se ilustra en la figura 35.

En el caso del material particulado, SO<sub>2</sub> y neblinas ácidas en las chimeneas, el equipo recolector de la muestra debe regularse adecuadamente para que la velocidad de la succión sea igual a la velocidad de los gases en la chimenea. De esta forma se garantiza que la concentración determinada en el laboratorio por métodos fisicoquímicos sea equivalente a la del gas en la chimenea. Con este dato y el caudal real de los gases es posible entonces calcular la emisión en el equipo de interés.



Ubicación del punto de muestreo en una chimenea.

**FIGURA 35**



**BIBLIOGRAFÍA**

- [1] Manuales técnicos y de instrucción para conservación de la energía. Vol.1: Combustibles y su combustión. IDAE. Madrid, 1987.
- [2] Manuales técnicos y de instrucción para conservación de la energía. Vol.2: Generación de vapor. IDAE. Madrid, 1987.
- [3] CENTRO DE ESTUDIOS DE LA ENERGÍA, Técnicas energéticas en la Industria Volumen 4, Madrid, 1980.
- [4] SHIELD CARL, Boilers. Types, characteristics and functions. McGraw Hill Book Company Inc. New York. 1965.
- [5] FRYLING, G. Combustion Engineering. Combustion Engineering Inc. New York, 1966.
- [6] BARH H y HERRE O. Calderas máquinas de vapor. 3ª Edición. Verlag Von Moritz Schafer. Barcelona.1955.
- [7] BLANCHARD, C. Combustión en capa sobre parrilla móvil. Traducción M. Urhán. Univ. del Valle, Cali, 1995.
- [8] NOYES, R. Handbook of Pollution Control Processes. Noyes Publications New Jersey, 1991.
- [9] AIR POLLUTION ENGINEERING MANUAL. Van Nostrand ..Reinhold. New York, 1992.
- [10] CHEJNE J. F y HILL B. A. "Proceso de la combustión y metodología para realización de balances de masa y energía de algunos procesos. Cuadernos .del -CIDI- Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín, 1992.
- [11] INGEOMINAS, ECOCARBÓN. Muestreo, Preparación y Análisis básico de carbones. Santafé de Bogotá. 1997.

- [12] RAMÍREZ, Pedro. Introducción a la valorización de carbones. Univ. Nacional de Colombia. Facultad de Minas, Centro de Investigaciones del carbón. Medellín. 1988.
- [13] ECOCARBÓN. Normas Generales sobre Muestreo y Análisis de Carbons. Santafé de Bogotá. 1995.
- [14] ECOCARBÓN. Manejo Eficiente del Carbón en Instalaciones de Combustión a Carbón. Santafé de Bogotá. 1997.
- [15] PERRY Robert. Manual del Ingeniero Químico. Tomos II y III. McGrawHill. México. 1995.
- [16] Guías para el Uso Racional de Energía por Procesos en la Industria. ANDI, EEPP de Medellín, Univ. Pontificia Bolivariana. Medellín. 1998.
- [17] THUMANN, Albert. Fundamentals of energy engeneering. The Fairmont Press Inc. USA, 1984.
- [18] SINGER , P. E. Joseph G. "Combustion Fosil Power" Combustion Engeneering Inc. Windsor < Connecticut, 1991.
- [19] TURNER Wayne C. (EDITOR) Energy Managment Handbook, Jhon Wiley & Sons, USA, 1982.
- [20] GIRALDO, S.R. Problemas con el punto de rocío ácido en los filtros de bolsas. Revista Contaminación Ambiental Nro 10, U P B, Medellín, 1982.
- [21] YEN - HSIUNG Kian G. Waste energy utilization Technhnology, Marcel Dekker. Inc. New York, 1981.

## LISTADO DE FIGURAS Y TABLAS

FIGURA 1: Esquema de una caldera pirotubular .....	13
FIGURA 2: Esquema de una caldera acuotubular simplificada .....	13
FIGURA 3: Clasificación de las calderas de acuerdo con la potencia de combustión y el consumo de carbón .....	16
FIGURA 4: Esquema ilustrativo de un sistema de distribución del vapor .....	17
FIGURA 5: Representación de la composición del carbón y la denominación de sus componentes .....	24
FIGURA 6: Metodología para la determinación de humedad total ..	25
FIGURA 7: Metodología para la determinación de material volátil ..	26
FIGURA 8: Metodología para la determinación de cenizas .....	26
FIGURA 9: Esquema ilustrativo para la determinación del poder calorífico bruto del carbón .....	29
FIGURA 10: Esquema ilustrativo del proceso de la combustión .....	41
FIGURA 11: Esquema ilustrativo de las diferentes etapas de la combustión de carbonos .....	43
FIGURA 12: Esquema ilustrativo de la combustión de carbón pulverizado .....	46
FIGURA 13: Esquema ilustrativo de un hogar de parrilla .....	48
FIGURA 14: Dependencia de la producción del molino y el consumo específico de energía, en función de la humedad del carbón .....	68
FIGURA 15: Consumo específico de energía en molienda de acuerdo con el tipo de carbón y el tipo de molino .....	69
FIGURA 16: Sistema de alimentación con tornillo para carbón pulverizado .....	71
FIGURA 17: Alimentación de carbón con banda .....	71
FIGURA 18: Sistema de alimentación de carbón por gravedad con clasificador móvil .....	72
FIGURA 19: Quemador de parrilla fija y alimentación por debajo .....	73
FIGURA 20: Quemador de parrilla viajera .....	74

FIGURA 21: Quemador tipo Spreader Stoker .....	74
FIGURA 22: Quemadores de carbón pulverizado. ....	76
FIGURA 23: Combustor de lecho fluidizado. ....	79
FIGURA 24: Distribución cualitativa de la energía aportada por el combustible. ....	86
FIGURA 25: Esquema que muestra las entradas y salidas de una caldera. ....	88
FIGURA 26: Relación de la eficiencia de la combustión y de los porcentajes de pérdida en la chimenea y el porcentaje de CO <sub>2</sub> y la temperatura de la chimenea ....	92
FIGURA 27: Gráfico para calcular el porcentaje de pérdidas de energía por paredes. ....	95
FIGURA 28: Control emisiones provenientes del carbón. ....	118
FIGURA 29: Colector inercial. ....	119
FIGURA 30: Precipitador electrostático. ....	120
FIGURA 31: Esquema Baghouse. ....	120
FIGURA 32: Lavador de gases. ....	121
FIGURA 33: Quemador de bajo NO <sub>x</sub> .....	123
FIGURA 34: Quemador ciclónico. ....	123
FIGURA 35: Ubicación del punto de muestreo en una chimenea. ...	131

----- \* -----

TABLA 1 - Clasificación de carbones según el rango .....	22
TABLA 2 - Poder calorífico superior promedio de algunos carbones colombianos .....	27
TABLA 3 - Composición promedio para diferentes carbones colombianos .....	31
TABLA 4 - Número de incrementos para suministros de hasta 1000 ton. según normas ISO .....	37
TABLA 5 - Composición del aire seco .....	42
TABLA 6 - Reacciones globales en la combustión de carbones ....	49
TABLA 7 - Relación aire combustible para diferentes carbones colombianos .....	50

TABLA 8 -	Análisis último de un carbón .....	55
TABLA 9 -	Formato para el cálculo de requerimiento de oxígeno y gases generados .....	56
TABLA 10 -	Formato para el cálculo de flujo de aire, de gases y otros parámetros .....	57
TABLA 11 -	Análisis de C en la escoria y cenizas y del CO y CO <sub>2</sub> en los gases .....	59
TABLA 12 -	Calidad real de oxígeno requerido para la combustión ...	61
TABLA 13 -	Cantidad real de productos de combustión .....	61
TABLA 14 -	Resultados comparativos entre la combustión completa e incompleta .....	63
TABLA 15 -	Carbón, granulometría y capacidad de generación de parrillas fijas y móviles .....	75
TABLA 16 -	Valores de entalpía de vapor saturado y del agua líquida .....	88
TABLA 17 -	Recolección de datos en los puntos estratégicos que se ilustran en la figura 25 .....	89
TABLA 18 -	Valores de cp promedio entre 273K y la temperatura Tg en KJ/Nm <sup>3</sup> °c .....	91
TABLA 19 -	Valores del flujo de gases, capacidad calorífica y pérdidas en gases .....	91
TABLA 20 -	Valores aproximados de los coeficientes de transferencia de calor total (h) para varias diferencias de temperatura entre la pared y el medio que rodea el equipo, válido para materiales con emisividad de 0.95 .....	94
TABLA 21 -	Pérdida de energía por presencia de carbono, hidrógeno y monóxido de carbono en los residuos .....	96
TABLA 22 -	Equipos de combustión de carbón y exceso de aire recomendado .....	100
TABLA 23 -	Rango de variación de las pérdidas de calor .....	102

TABLA 24 - Relación entre la pérdida de eficiencia y el porcentaje de purga .....	106
TABLA 25 - Emisiones permisibles material particulado en calderas y hornos .....	126
TABLA 26 - Emisiones permisibles material particulado en calderas y hornos .....	127
TABLA 27 - Emisiones permisibles material particulado en calderas y hornos .....	129
TABLA 28 - Contenido de azufre total (%peso) del carbón mineral o sus mezclas, en base "como se recibe", a la entrada del sistema de combustión .....	129

## ANEXO

## FACTORES DE CONVERSIÓN

Masa

$$1 \text{ kg} = 2.205 \text{ lb}$$

Longitud

$$1 \text{ m} = 100 \text{ cm}$$

$$1 \text{ cm} = 0.3937 \text{ pulgadas}$$

$$1 \text{ pie} = 12 \text{ pulgadas}$$

$$\text{pulgada} = \text{in} \qquad \text{pie} = \text{ft}$$

Volumen

$$1 \text{ lt} = 0.0353 \text{ pie}^3$$

$$1 \text{ lt} = 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$1 \text{ lt} = 0.2642 \text{ gal}$$

Energía

$$1 \text{ kilocaloría} = 3.97 \text{ Btu}$$

$$1 \text{ kilocaloría} = 4.18 \text{ kiloJoule}$$

$$1 \text{ kJ/kg} = 0.431 \text{ Btu/lb}$$



Este libro se terminó de imprimir  
en los talleres editoriales de  
la Universidad Pontificia Bolivariana  
bajo la modalidad de impresión digital  
en el mes de diciembre de 1998

Tipo de letra: Zurich - Tahoma  
Tipo de papel: Propalmate



REPÚBLICA DE  
COLOMBIA



**ECOCARBON**  
EMPRESA COLOMBIANA DE CARBÓN LTDA.



MINISTERIO DE  
MINAS Y ENERGÍA



Universidad  
Pontificia  
Bolivariana



ISBN 958696017-X



9 789586 960175