

HORNOS LADRILLEROS A CARBON



ECOCARBON
EMPRESA COLGMBXNABECARBON LTDA.

HORNOS LADRILLEROS A CARBON



ECOCARBON

EMPRESA COLOMBIANA DE CARBÓN LTDA.

© Ecocarbón
© Universidad Pontificia Bolivariana

HORNOS LADRILLEROS A CARBÓN, 1998

ISBN: 958-696-018-8

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

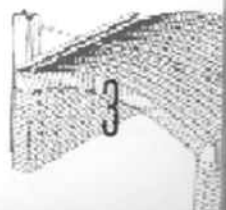
E-mail editupb@janua.upb.edu.co

Telefax: 413 30 11

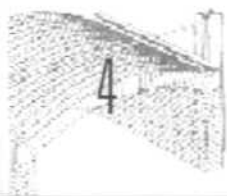
A.A. 56006

CONTENIDO

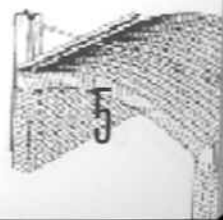
PRESENTACIÓN	7
1. DESCRIPCIÓN	9
1.1 HORNOS EN LA INDUSTRIA CERAMICA Y LADRILLERA	11
1.2 HORNOS PAMPA	12
1.3 HORNOS DE LLAMA INVERTIDA	14
1.4 HORNOS TIPO HOFFMAN	15
1.5 HORNOS TIPO TÚNEL	17
1.6 PROBLEMAS DE OPERACIÓN Y SU CONTROL	19
2. CARBÓN	21
2.1 FORMACIÓN	21
2.2 CLASIFICACIÓN	21
2.3 ANÁLISIS	23
2.3.1 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



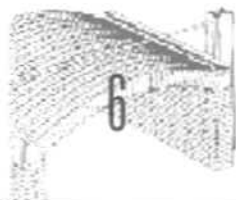
2.5.3	Tamaño de partículas y temperaturas	32
2.5.4	Capacidad de aglomeración.	33
2.6	PROPIEDADES DEL CARBÓN PARA PULVERIZARLO	33
2.6.1	Índice de molienda Hardgrove	34
2.6.2	Humedad	34
2.6.3	Grado de finura	34
2.6.4	Abrasividad	34
2.7	MUESTREO DEL CARBÓN	34
2.7.1	Muestreo en bandas transportadoras	35
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
4.2	SISTEMAS DE COMBUSTIÓN DE CARBÓN	72
4.2.1	Combustores de lecho fijo o móvil	73
4.2.2	Combustores de lecho pulverizado	73
4.3	SUMINISTRO Y DISTRIBUCIÓN DE AIRE	75
4.4	SISTEMAS DE EVACUACIÓN DE LAS CENIZAS	77
4.4.1	Evacuación hidráulica.....	78
4.4.2	Evacuación por deshollinador o motor impulsor.....	78
4.4.3	Evacuación neumática.....	78
4.4.4	Evacuación por válvula rotativa.....	78
5.	CÁLCULO DE EFICIENCIA	79
5.1	CÁLCULO DE LA ENERGÍA DEL COMBUSTIBLE.....	80
5.2	CÁLCULO DE LA ENERGÍA ÚTIL.....	81
5.3	CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS DE ENERGÍA.....	84
5.3.1	Cálculo de las pérdidas en gases de chimenea.....	84
5.3.2	Cálculo de las pérdidas por paredes.....	90
5.3.3	Energía perdida por proceso intermitente (BATCH).....	90
5.3.4	Cálculo de las pérdidas por inquemados (EI).....	93
6.	ASPECTOS ENERGÉTICOS	97
6.1	POSIBILIDADES DE REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS	98
6.1.1.	Acciones en la operación de hornos para la reducción de pérdidas.....	98
6.1.2.	Acciones enfocadas al diseño del horno.....	99
6.1.3.	Acciones enfocadas al mantenimiento.....	100
6.2	EVALUACIÓN DE LAS PÉRDIDAS Y AHORROS DE ENERGÍA	100
6.2.1	Reducción de las pérdidas por gases de combustión	100
6.2.2.	Reducción de las pérdidas por inquemados.....	101
6.2.3	Reducción de las pérdidas por las paredes	102



6.2.4	Reducción de pérdidas debida a baja carga de operación ...	102
6.2.5	Reducción de pérdidas por aire falso.	103
7.	ASPECTOS AMBIENTALES	105
7.1	EMISIONES DURANTE LA COMBUSTIÓN DEL CARBÓN	105
7.1.1	Emisiones de partículas	105
7.1.2	Emisiones de óxidos de azufre	106
7.1.3	Emisiones de óxidos de nitrógeno	107
7.1.4	Emisiones de Compuestos Orgánicos Volátiles Y CO	108
7.2	CONTROL DE LAS EMISIONES	108
7.2.1	Precombustión limpia del carbón	109
7.2.2	Combustión limpia del carbón	111
7.2.3	Postcombustión limpia del carbón	112
7.2.4	Manejo de los residuos sólidos.	116
7.3	LEGISLACIÓN AMBIENTAL	119
7.3.1	Material particulado.	119
7.3.2	Óxidos de azufre.	122
7.3.3	Óxidos de nitrógeno.	124
7.4	MUESTREOS ISOCINÉTICOS	124
	BIBLIOGRAFÍA	127
	LISTADO DE FIGURAS Y TABLAS	129
	ANEXO: FACTORES DE CONVERSIÓN	133



PRESENTACIÓN

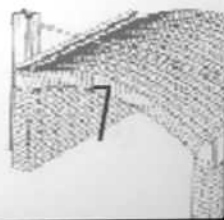
ECOCARBÓN, empresa industrial y comercial del Estado, que tiene bajo su responsabilidad fortalecer la industria del carbón a nivel nacional, viene desarrollando el Servicio de Asistencia Técnica para grandes, medianos y pequeños consumidores, en cumplimiento del Programa de Atención a consumidores actuales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

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.

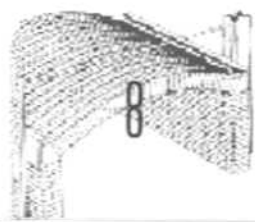
En cumplimiento del Servicio de Asistencia Técnica Específica, dirigido a medianos y pequeños consumidores, hemos editado esta guía técnica ilustrada, que esperamos contribuya a enriquecer la información técnica sobre manejo y operación eficiente de Calderas industriales a carbón, en procura de afianzar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

La guía HORNOS DE PRODUCCIÓN DE LADRILLO A CARBÓN resume importante material teórico práctico sobre aspectos básicos de hornos de producción de ladrillo, naturaleza del carbón, combustión de carbonos,



quemadores a carbón para hornos ladrilleros 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 asociadas con la utilización del carbón e instalaciones de combustión, en los diferentes subsectores consumidores de este importante recurso energético en nuestro país.

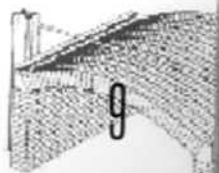


DESCRIPCIÓN

Los hornos son equipos en los cuales se realizan transformaciones y/o tratamientos, con empleo de la energía térmica, a una materia prima, para obtener un producto final o como parte de un proceso intermedio para su posterior elaboración. Las transformaciones que sufre el material (la carga), se deben a la transferencia de calor con sus alrededores, en el interior del horno. El calor se transfiere a la carga por convección forzada y radiación cuando el horno opera con gases calientes producto de una combustión. Cuando el horno tiene como elemento de calentamiento resistencias eléctricas el calor se transfiere por radiación y convección. En el interior de la carga, el calor se transfiere por conducción desde la superficie hacia el interior.

Normalmente, la carga inicial del horno la constituye material sólido, el cual gana calor y aumenta su temperatura (calor sensible) hasta el punto en que se originan transformaciones tales como cambios químicos endo o exotérmicos, liberándose energía debido al rompimiento de enlaces, cambios físicos como transformaciones cristalinas o fusión (calor latente), secado del material, etc. Es importante anotar que muchos cambios ocurren, dependiendo de la naturaleza de la materia prima, a temperaturas superiores o inferiores a las de fusión del principal constituyente de la carga. De acuerdo con lo expuesto anteriormente, se presupone que, normalmente y de acuerdo con la naturaleza de la carga y el producto deseado, existen tres o más etapas en el proceso de transformación que se deben controlar estrictamente con el objeto de obtener un producto y/o varios subproductos de alta calidad, con el mínimo de rechazo, procurando minimizar el impacto ambiental, con el máximo rendimiento posible y con el mínimo consumo de combustible. Por lo tanto, los procesos de transformación, en los hornos tienen curvas características de temperatura de la carga contra el tiempo, que se constituyen en la "receta" de elaboración. Por consiguiente, es neces-

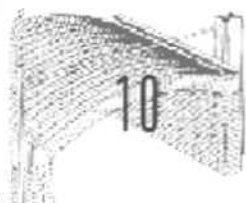
1



rio ejercer un control estricto de la evolución de la temperatura de la carga en el interior del horno. En general, en una primera etapa tiene lugar el calentamiento de la carga hasta la temperatura de transformación, posteriormente la carga permanece un tiempo a esta temperatura hasta completarse la transformación, pasando posteriormente a una etapa de enfriamiento.

Dependiendo de la naturaleza de la carga, de las curvas de temperatura, del producto final y del nivel de temperaturas requeridas se emplean comúnmente hornos que operan con combustibles sólidos, líquidos o gaseosos o con energía eléctrica. Los hornos que operan con energía eléctrica pueden ser de arco voltaico, comunes en las siderúrgicas no integradas, en cuyo interior se genera un arco producto de la diferencia de potencial entre electrodos, liberándose calor. Los de inducción, usados en la industria de la fundición, generándose corrientes de Foucault en la carga liberándose calor. Y los netamente resistivos empleados en fijadores de pintura y en la industria de alimentos. Es importante anotar que normalmente los procesos que se realizan en hornos netamente resistivos pueden llevarse a cabo en hornos que utilicen un combustible. Existen hornos eléctricos que emplean otras tecnologías como son: los microondas y los infrarrojos, empleados en secado y termofijado en la industria textil. Los hornos que emplean combustibles sólidos son los más comúnmente empleados en industrias como la cerámica, de la cual forman parte las ladrilleras y la industria del cemento, entre otras.

Los hornos según el régimen de operación pueden ser continuos, en los cuales existe un flujo continuo y uniforme de materiales y en todo instante dentro del horno existe material en cualquier fase del proceso; semicontinuos, en los cuales coexiste material en algunas fases del proceso con alimentación y descarga periódica, y discontinuos donde la carga se alimenta, se procesa y se descarga sin coexistir fases diferentes del proceso dentro del horno.



1.1 HORNOS EN LA INDUSTRIA CERAMICA Y LADRILLERA

Los hornos son equipos de gran importancia en la industria cerámica y ladrillera. En éstos se realiza el proceso de cocción, el cual es un tratamiento térmico en el que se dan las propiedades adecuadas de los productos cerámicos.

En general en el proceso de cocción de la obra cerámica se presentan las siguientes fases:

- Hasta los 200 °C tiene lugar la evacuación del agua residual no eliminada en el secado. Si esta eliminación no es gradual o si el contenido de agua es alto pueden producirse roturas debido a contracciones.
- Entre 200 °C y 400 °C se oxida el material orgánico.
- Entre 450 °C y 650 °C se modifica la estructura del material arcilloso. Por lo tanto se elimina el agua de constitución molecular, produciéndose una contracción y un endurecimiento irreversible.
- A 573 °C ocurre la transformación alotrópica del cuarzo produciéndose una dilatación. Este proceso es reversible y tiene gran importancia en el enfriamiento.
- Entre 680 °C y 800 °C tiene lugar la descarbonatación (liberación de CO_2) de las arcillas calcáreas. El desprendimiento rápido de CO_2 puede producir roturas o burbujas. La descarbonatación debe finalizar antes de iniciar la vitrificación para evitar florescencias.



- Por encima de los 800 °C inicia la vitrificación. La temperatura máxima requerida depende del tipo de material utilizado.

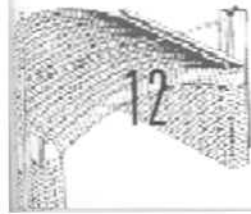
El proceso de cocción de ladrillos se puede realizar en forma intermitente en hornos pampa y hornos de llama invertida, en forma semicontinua en hornos tipo Hoffman y en forma continua en hornos tipo túnel.

El material en el interior del horno sufre básicamente tres etapas. En la primera denominada secado y precalentamiento, el material no incrementa su temperatura. El calor suministrado elimina la humedad residual que contiene la carga. En esta etapa se debe evitar un secado rápido que pueda dar origen a roturas. Una vez seco el material comienza a ganar calor sensible aumentando su temperatura gradualmente hasta valores cercanos a los 1000°C. Por lo tanto, hay que ejercer un cuidadoso control sobre la velocidad de incremento de ésta para evitar que sea brusco, puesto que puede dar lugar a roturas. El material seco y a la temperatura adecuada pasa a la etapa de quema. Es importante anotar que la temperatura de quema y el tiempo de permanencia en ésta, inciden considerablemente sobre las propiedades del material; por ejemplo, se observa una mayor resistencia y menor porcentaje de absorción de agua en los materiales que han sido sometidos a mayores temperaturas y durante períodos de tiempo mayor.

Finalmente, el material se somete a la etapa de enfriamiento bajando gradualmente su temperatura. En los puntos más críticos (alrededor de los 570 °C) no se recomienda enfriar a una velocidad superior a los 15°C/h. Con base en lo anterior puede decirse que la cocción de ladrillos es un proceso que requiere de un buen control para llevarlo a cabo con el mínimo de desperdicio.

1.2 HORNOS PAMPA

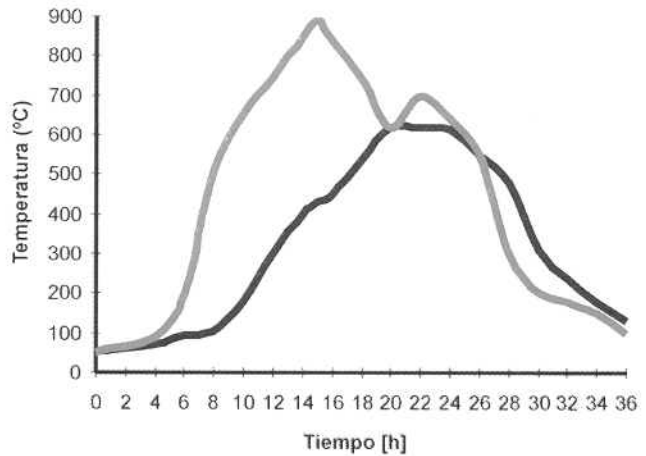
Estos hornos son construidos básicamente con adobes macizos en forma rudimentaria. Consisten en cuartos rectangulares con puertas de salida y entrada a través de las cuales se extraen e introducen los materiales



antes y después de la cocción; además poseen unas bóvedas en la parte inferior formadas por material a quemar, por las cuales se introduce el carbón para la cocción.

El carbón, de toda variedad de tamaños, se suministra por medio de palas y su flujo se regula según la experiencia de la persona que lo alimenta a través de las bocas ubicadas en la base. Estas bocas atraviesan el horno en forma longitudinal y por lo tanto, para mantener homogéneo el suministro de combustible se requiere alimentar por ambos lados. En las etapas donde se requiere sostener altas temperaturas se requiere alimentar alto flujo de carbón para su pronta pirólisis y por consiguiente, dado lo rudimentario de la parrilla, mucho se filtra por las ranuras originando una pérdida alta de combustible en los residuos. En la etapa de enfriamiento, la temperatura de la carga se regula controlando el ingreso de aire tapano las bocas, evitando un enfriamiento rápido.

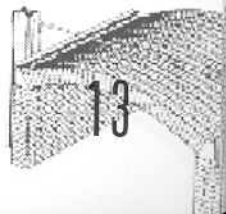
En la figura 1 se presenta la curva típica de quema en un horno tipo pampa.



Curva típica de quema en un horno pampa. Materiales en parte superior e inferior.

FIGURA 1

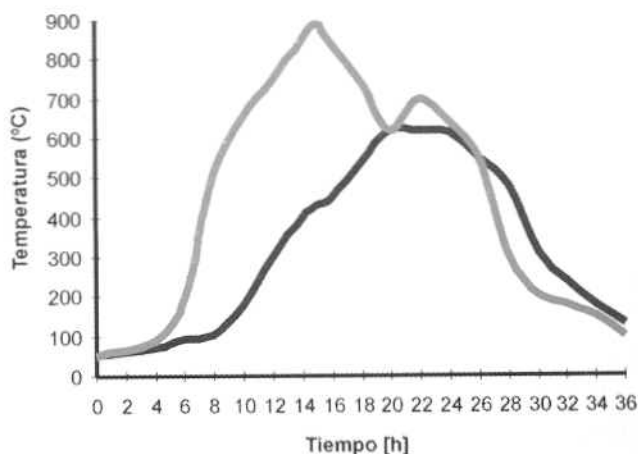
Fuente: Proyecto de energía CIDI-LPB



antes y después de la cocción; además poseen unas bóvedas en la parte inferior formadas por material a quemar, por las cuales se introduce el carbón para la cocción.

El carbón, de toda variedad de tamaños, se suministra por medio de palas y su flujo se regula según la experiencia de la persona que lo alimenta a través de las bocas ubicadas en la base. Estas bocas atraviesan el horno en forma longitudinal y por lo tanto, para mantener homogéneo el suministro de combustible se requiere alimentar por ambos lados. En las etapas donde se requiere sostener altas temperaturas se requiere alimentar alto flujo de carbón para su pronta pirólisis y por consiguiente, dado lo rudimentario de la parrilla, mucho se filtra por las ranuras originando una pérdida alta de combustible en los residuos. En la etapa de enfriamiento, la temperatura de la carga se regula controlando el ingreso de aire tapando las bocas, evitando un enfriamiento rápido.

En la figura 1 se presenta la curva típica de quema en un horno tipo pampa.



Curva típica de quema en un horno pampa. Materiales en parte superior e inferior.

FIGURA 1

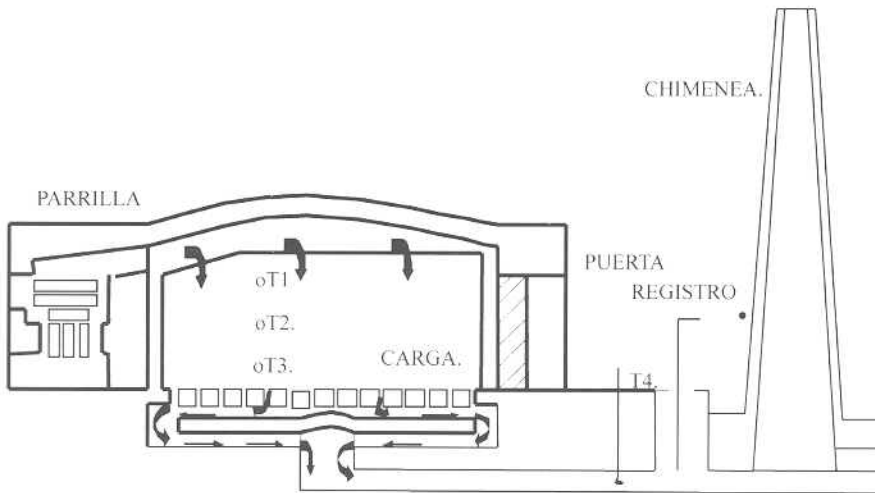
Fuente: Proyecto de energía CIDI-UPB



Aproximadamente el 70% del combustible se consume en el calentamiento y la quema, el restante 30% se consume en el secado. Es importante anotar que la temperatura del material situado en la parte inferior del horno, alcanza valores muy superiores al que está situado en la parte superior del mismo.

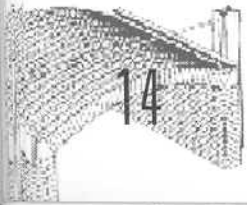
1.3 HORNOS DE LLAMA INVERTIDA

Se emplean principalmente para la cocción de materiales especiales como tejas o ladrillos que requieran una elevada temperatura de cocción. Dentro de este tipo de hornos se encuentran los hornos tipo colmena. Estos están contruidos en forma de cámaras circulares o rectangulares con paredes y techo en bóveda de ladrillo. Los hornos poseen hogares laterales donde se quema el carbón. Los gases de combustión entran por la parte superior y son obligados a salir por la parte inferior atravesando la carga de arriba hacia abajo abandonando el horno por las perforaciones del piso hacia la chimenea. El combustible y sus residuos no están en contacto inmediato con el producto debido a la pared separadora y conductora de gases del hogar. (ver figura 2)

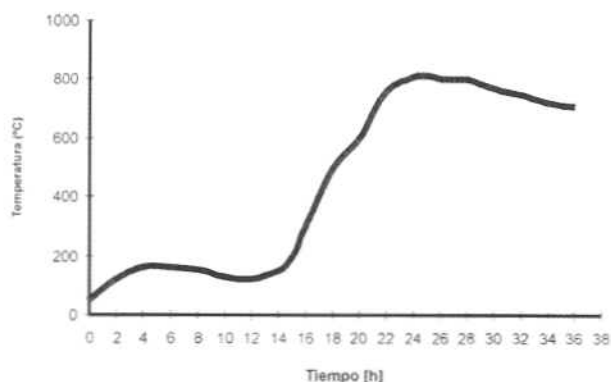


Horno llama invertida.

FIGURA 2



La primera fase de precalentamiento y secado puede durar entre 8 y 15 horas dependiendo del contenido de humedad. La temperatura y la rata de secado se controlan con la alimentación de combustible. La segunda fase es la quema que dura aproximadamente 13 horas y finalmente, el material se enfría durante 24 horas controlándose la temperatura con la regulación del aire de enfriamiento. En la figura 3 se presenta la curva de temperatura en un horno de llama invertida.



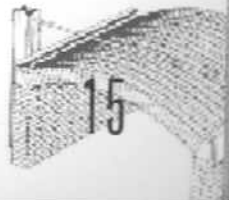
Curva de temperatura en un horno de llama invertida.

FIGURA 3

Fuente: Proyecto de energía CIDI-UPB

1.4 HORNOS TIPO HOFFMAN

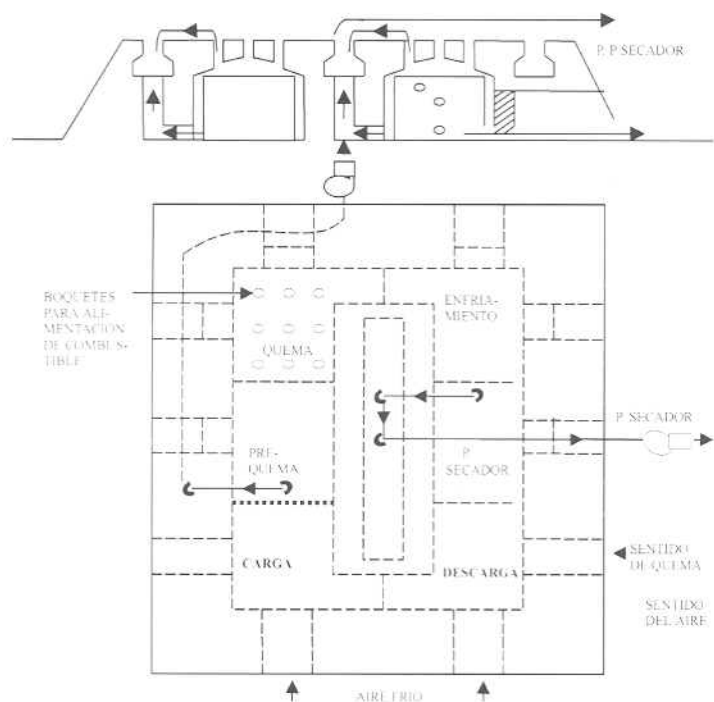
Tienen un funcionamiento semicontinuo. La carga permanece estática y el fuego es movable rotando los quemadores, que se alimentan con un carbón semipulverizado con buena regulación, situados en el techo del horno. Consisten en una serie de cámaras comunicadas entre sí por portillos que hay en las paredes laterales. El fuego avanza de un compartimiento al inmediatamente siguiente. En el interior las piezas son apiladas de tal forma que se permite el paso adecuado de los gases a través de la



carga. Los gases calientes que salen de la zona de fuego pasan a la cámara contigua y sirven para calentar las piezas crudas.

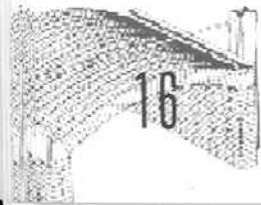
En términos generales, la operación de un horno Hoffman se divide en las siguientes etapas: El proceso de cargue en el cual el material se apila dentro del horno. El período de precalentamiento durante el cual se retira la humedad residual del material. Se realiza con los gases provenientes de la sección de quema. La etapa de quema comprende la región donde se alimenta el combustible y se sostiene la temperatura necesaria para la cocción. En la figura 4 se presenta un esquema de este tipo de horno.

Finalmente, en la etapa de enfriamiento, el material se enfría lentamente para evitar roturas debido al choque térmico. Se realiza con el aire que ingresa al horno para ser empleado en la zona de quema. En la figura 5 se presenta una curva típica de quema para el horno Hoffman.

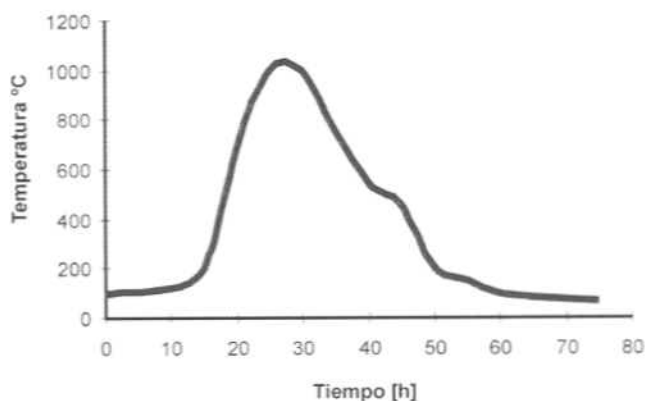


Horno Hoffman.

FIGURA 4



La duración del ciclo completo (carga, precalentamiento, cocción, enfriamiento y descarga) puede variar según que la carga y descarga sea manual o con máquinas, ya que el tiempo de cocción propiamente dicho suele ser de una hora.



Curva típica de quema de un horno Hoffman.

FIGURA 5

Fuente: Proyecto de energía CIDI-UPB

1.5 HORNOS TIPO TÚNEL

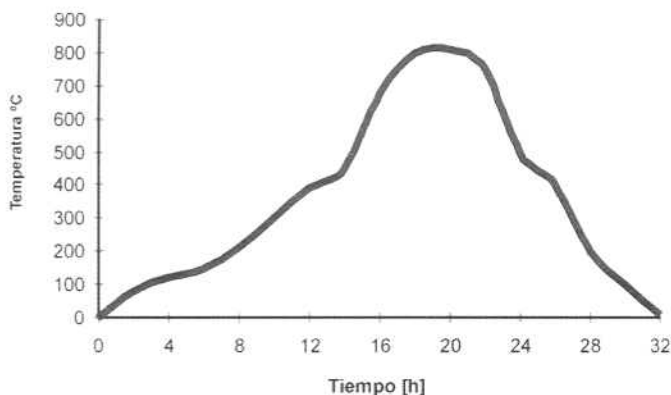
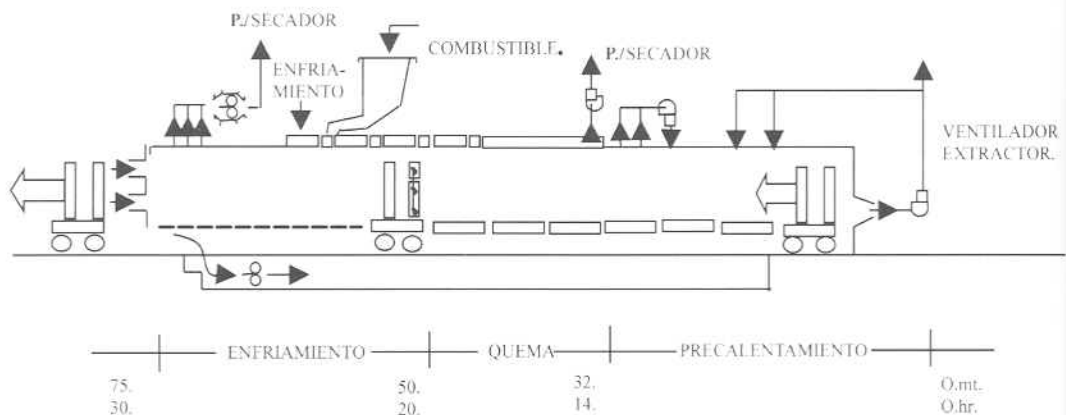
Tienen un funcionamiento continuo. La zona de fuego es estable y el material móvil. El horno está dividido en tres zonas que son las de precalentamiento, cocción y enfriamiento. Es importante anotar que las industrias que poseen este tipo de hornos tienen un secador asociado donde se remueve la humedad y por lo tanto el horno se carga con material de baja humedad. (Ver figura 6)

En la zona de precalentamiento, las piezas que se transportan en vagoneas a través del horno, alcanzan gradualmente temperatura con el calor de los gases de combustión en contracorriente, y algunas veces ayudados con unos pequeños quemadores de carbón pulverizado instalados en esta zona.



La zona de quema o cocción ocupa aproximadamente una quinta parte de la longitud total del horno. Es una zona fácilmente controlable debido a su estabilidad. El tiempo de cocción es alrededor de una hora.

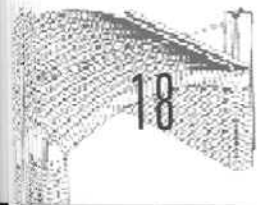
La zona de enfriamiento ocupa aproximadamente dos quintas partes de la longitud del horno. El aire de enfriamiento se dirige en contracorriente con las piezas. Este aire se calienta al enfriar las piezas y una parte se utiliza como aire secundario de combustión. En la figura 6 se presenta la curva típica de quema del ladrillo en un horno tipo túnel.



6. Horno tipo Túnel.
7. Curva típica de quema para un horno túnel.

FIGURA 6 Y 7

Fuente: Instituto de Pesquisas Tecnológicas IPT- Brasil



1.6 PROBLEMAS DE OPERACIÓN Y SU CONTROL

En la operación de hornos en la industria se pueden presentar diferentes problemas tales como variaciones no deseadas en la temperatura de la carga y en la regulación de la relación aire/combustible entre otros.

En la industria ladrillera es común- en los hornos continuos y semicontinuos- que la temperatura de la carga se controle con la experiencia del operador. En las etapas de secado, precalentamiento y quema se regula el ingreso del combustible y en el enfriamiento se permite un ingreso de aire taponando sus entradas. Es importante, en este tipo de hornos implementar termocuplas para ejercer un control más estricto. También, debe ejercerse un control de la concentración de oxígeno en los gases de combustión para alimentar el combustible de forma controlada.

En el caso de la regulación de la temperatura de la carga, dependiendo de la naturaleza del proceso, el objetivo puede ser llevar la temperatura de la superficie de la carga a una temperatura deseada y mantenerla durante un tiempo hasta que ésta sea uniforme o variar la temperatura de la carga de acuerdo a una curva de calentamiento.

Si la temperatura no se controla de forma adecuada, se pueden presentar problemas tales como rotura del producto, cambios químicos no deseados, formación de ampollas, entre otros.

Los instrumentos de medida usualmente utilizados para el control de la temperatura son los pirómetros y los termopares los cuales censan la temperatura de la carga y esta medida se compara con el valor de referencia. Con base en esta comparación se regula el suministro de combustible a los quemadores en la etapa de secado y precalentamiento en



hornos intermitentes y semicontinuos. En hornos continuos básicamente la temperatura de salida de los gases permanece en un punto que es el de operación.

La regulación adecuada de la relación aire/combustible permite un buen rendimiento y por lo tanto un ahorro en el consumo de combustible. Para lograr este objetivo el sistema de control de la combustión debe evitar la presencia de inquemados y minimizar las pérdidas de calor en los gases de combustión.

Un sistema de control de combustión, para el caso de carbón en parrilla, debe tener en cuenta el tamaño y la calidad del carbón, el espesor del lecho, la cantidad de cenizas y escorias y la variación de la demanda de energía, por lo tanto el control automático no es sencillo aunque se puede realizar.

En los hornos que utilizan carbón pulverizado, el control automático es más sencillo debido a que el flujo de combustible se puede medir con precisión.



El 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 ¹ %	PODER CALORÍFICO ² (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

¹ Base seca libre de cenizas - ² 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

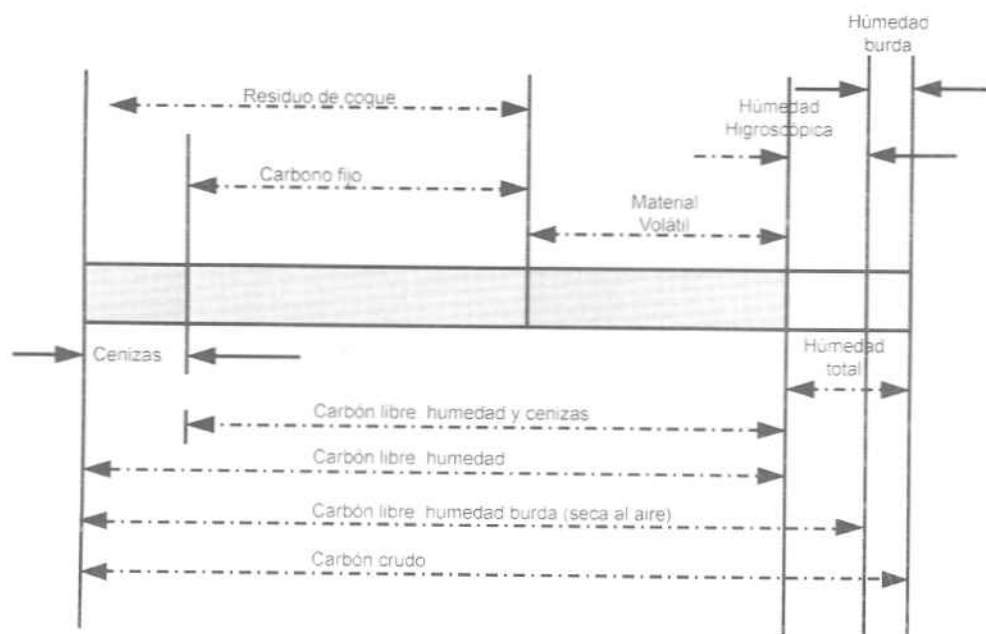
Con el análisis se evalúan las características físicas, químicas y petrográficas del carbón. Es necesario, para evitar problemas en su manejo y tratamiento, reducir los posibles daños en los equipos, disminuir el impacto ambiental, planear y controlar la exploración y determinar los tipos de carbones 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 residual es aquella que contiene un carbón seco a la atmósfera del laboratorio y que se pierde a la temperatura de 106 °C; 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 8



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 9

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 ₂ , CO ₂ , CO, H ₂ S, CH ₄ , C ₂ H ₆ , 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 METODO	→ 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, piritas, fijación del SO ₃ desprendido.
NORMA	→ ASTM D3174 - 93
PRINCIPIO DEL METODO	→ Determinar el peso del residuo de la combustión de 1 gr de carbón, a 750 °C con circulación de aire, hasta peso
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.

10. Metodología para la determinación de material volátil.

11. Metodología para la determinación de cenizas.

FIGURA 10 Y 11

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 Antioquia Caldas	6061	10910
Valle del Cauca, sector Yumbo - Suarez	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):

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

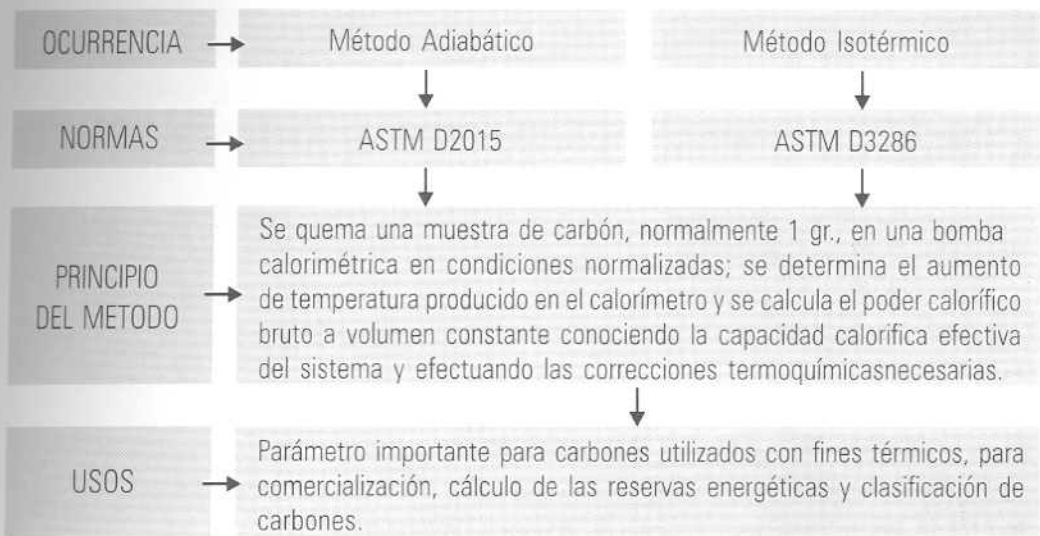
$$PCI = PCS - 5.85 \left(9 * \frac{\%H}{100} + \frac{\% \text{ HUMEDAD}}{100} \right) \frac{\text{Kcal}}{\text{Kgcarbón}}$$

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 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 H_2O , 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 12



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 CÁLDAS	VALLE DEL GAUCA(1)	BOYACÁ (2)	CUNDINA MARCA (3)	CESAR (4)	CERREJÓN (5)	CÓRDOBA, (6)	NORTE DE SANTANDER (7)
ANÁLISIS 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
ANÁLISIS 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 μ m.

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

Los Hornos tipo Hoffman 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:

$$P = 0.60 D \quad \text{Cuando } D < 150 \text{ mm y}$$

$$P = 10 \text{ Kgs} \quad \text{Cuando } D > 150 \text{ mm}$$

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 prevaletientes (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.

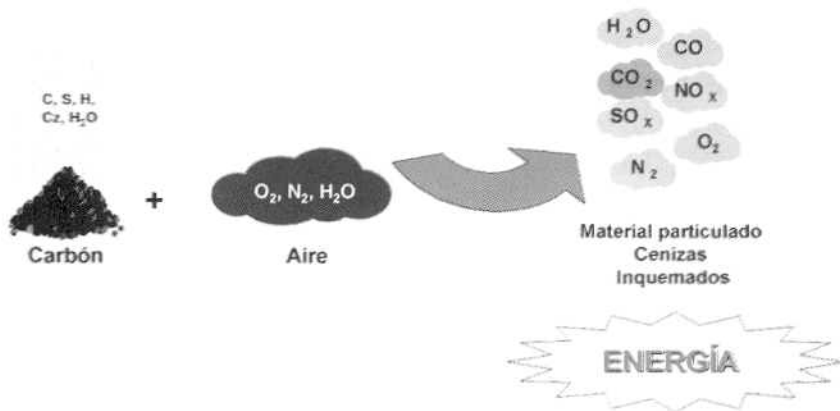
En caso de presentarse un incendio es difícil extinguirlo; el único método seguro de extinción es el de esparcir el montón de carbón, irrigándolo simultáneamente con agua. La irrigación con agua, sin esparcir simultáneamente el montón, tiene un efecto insignificante, puesto que una cantidad de agua insuficiente 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 13).



Esquema ilustrativo del proceso de la combustión.

FIGURA 13



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	—

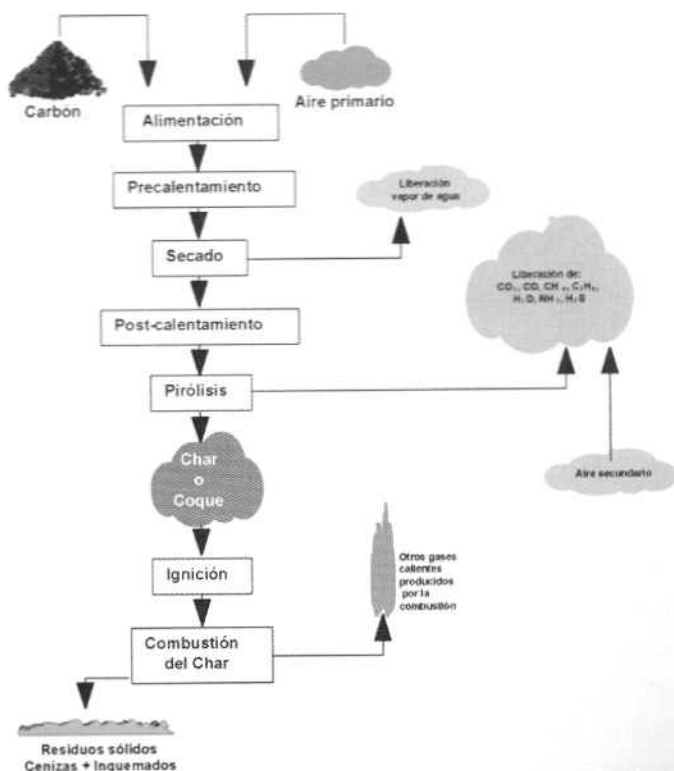
En condiciones ideales, el proceso de la combustión ocurre con proporciones exactas de aire y combustible, la cual se denomina cantidades estequiométricas o cantidades teóricas de aire. Sin embargo, en la práctica, como no es posible esta condición, se utilizan cantidades superiores a la estequiométrica, 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 14) 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 14



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_2 , CO , H_2 , H_2O 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

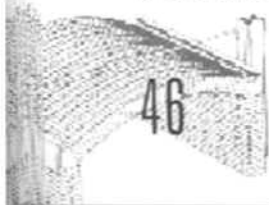
El carbón con granulometría pequeña, finos hasta 5 mm, se oxida como partículas independientes, suspendidas en aire en los quemadores de lecho fluidizado. En estos equipos, las partículas pasan por las diferentes etapas que se ilustran en la figura 15 (precalentamiento, secado, poscalentamiento, pirólisis 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 15

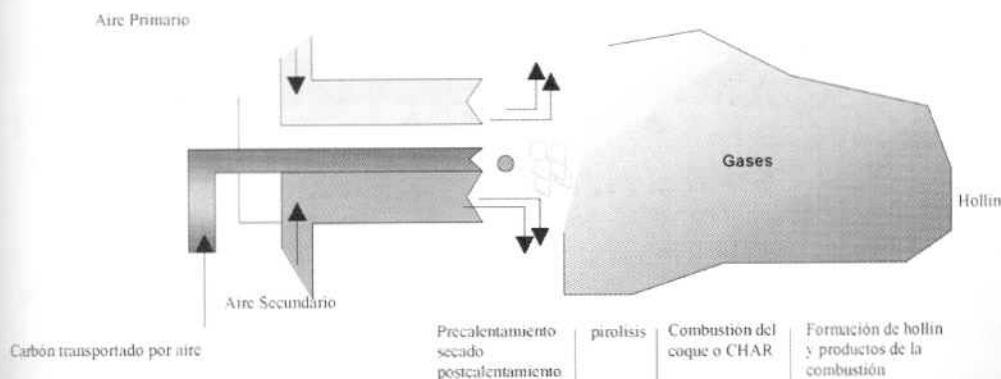


La combustión del carbón en lechos sobre parrillas está influenciada por el flujo de aire que lo atraviesa, por la altura de la capa y por sus características fisicoquímicas. Por lo general, la presión del aire bajo la parrilla puede estar entre 2 y 4 pulgadas de agua, según su tipo, garantizando la 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 16).

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.

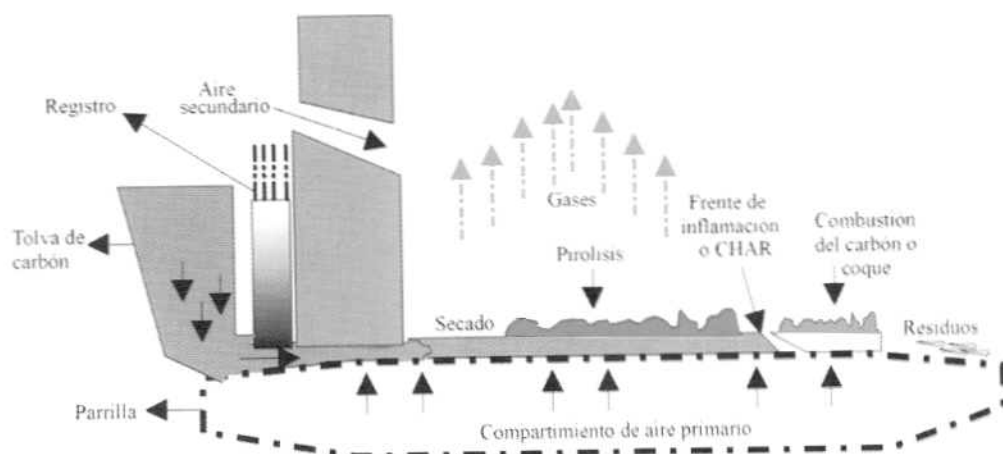
En estos quemadores, la superficie de la capa se calienta bajo el efecto de la radiación térmica de la bóveda y de las llamas vecinas y también por radiación y conducción a partir de la parte adyacente ya inflamada del



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 desvolatilización. 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.

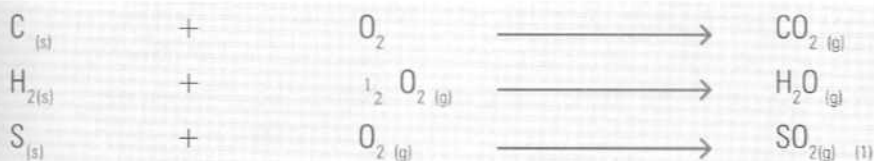
FIGURA 16

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 (λ). 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 sino no se captura al azufre (S) antes de quemar

A continuación se ilustra un ejemplo que permite el cálculo de la relación aire combustible estequiométrico (λ). 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_2) 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	RELACION AIRE-COMBUSTIBLE EN KgAIRE/KgCARBÓN, (*)	RELACION AIRE-COMBUSTIBLE EN m ³ (n) /KgCARBÓN
Antioquia y Antigua Caldas	8.73	11.29
Valle del Cauca, sector Yumbo - Suarez	8.48	10.97
Boyaca, 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 (λ) 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:

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

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 Ft³ 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 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 _a):	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 m³(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 ₂ m ³ (n)/Kg	Factor	CO ₂ m ³ (n)/Kg	Factor	SO ₂ m ³ (n)/Kg	Factor	H ₂ O m ³ (n)/Kg	Factor	N ₂ m ³ (n)/Kg
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 _{2_{min}}	1,2655	V _{CO2}	1,1013	V _{SO2}	0,0005	V _{H2O}	0,5714	V _{N2}	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 (SO₂) y de dióxido de carbono (CO₂).

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_{min}: cantidad de aire teórico que se requiere para quemar el combustible en una combustión completamente. V_{GT min}: cantidad teórica de gases secos de combustión cuando el combustible es quemado con L_{min}. 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	$m^3(n)/Kg$
$V_{G\min}$	$V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{S_2} - O_{2\min} \times \frac{0,7810}{0,2094}$	5,83	$m^3(n)/Kg$
$CO_2\max$	$\frac{V_{CO_2}}{V_{G\min}} * 100$	18,89	%
$SO_2\max$	$\frac{V_{SO_2}}{V_{G\min}} * 10^6$	85,77	ppm
V_{Gt}	$\frac{V_{CO_2}}{CO_{2(m)}}$	9,18	$m^3(n)/Kg$
λ_v	$\frac{V_{Gt} - V_{G\min}}{L_{\min}} + 1$	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_{Gf}	$v_{Gt} + v'_{H_2O}$	9,85	$m^3(n)/Kg$
SO_2	$\frac{V_{SO_2}}{V_{Gf}} * 10^6$	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'''	$\frac{v'_{H_2O}}{V_{Gt}} * 100$	7,2	%
ρ_{to}	$CO_2 \times 1,977 + O_2 \times 1,429 + (1 - CO_2 - O_2) \times 1,251$	1,3517	$\frac{kg}{m^3 nt}$
ρ_{to}	$\frac{\rho_{to} + X'}{1 + \frac{X'}{0,804}}$	1,315	$\frac{kg}{m^3 nf}$

*Valor medido a partir del análisis de los gases.

medad. ρ_{to} : densidad promedio de los gases de combustión en base seca. (ρ_{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_{Vb} (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 ₂ 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:

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

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

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 CO_2 en el total de carbono presente en los gases de combustión:

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

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

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

Cantidad real de CO_2 producido = $(0,5812 \text{ kg/kg}_{\text{combustible}}) \times (0,92857)$

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



$$\text{Cantidad real de CO producido} = (0,5812 \text{ kg/kg}_{\text{combustible}}) \times (0,071428)$$

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

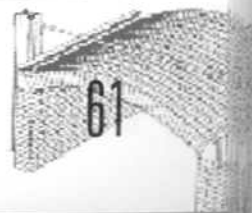
Ahora se deben corregir los datos hallados en la tabla anterior de acuerdo con la metodología que se ilustra en las tablas 12 y 13.

TABLA 12 - Cantidad real de oxígeno requerido para la combustión

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

TABLA 13 - Cantidad real de productos de combustión

Producto	Factor _{combustión} / Fracción	V _{producto} / M ³ (n)/kg _{comb.}
CO ₂	1,854 x 0,5399	1,0010
CO	1,865 x 0,0415	0,0774
SO ₂	0,682 x 0,0080	0,0055
N ₂	0,800 x 0,010	0,0080
H ₂ O	11,111 x 0,037 + 1,243 x 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:

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

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

$$\lambda_v = \frac{V_{Gf} - V_{G\min}}{L_{\min}} + 1 = 1,3644$$

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

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

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
λ_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

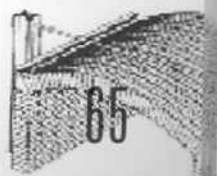
En los hornos de la industria ladrillera, el carbón se puede quemar sobre parrilla principalmente en hornos pampa y de llama invertida y pulverizado en hornos hoffman y túnel.

En el caso de los quemadores sobre parrilla, estos pueden ser de alimentación manual o automática. En el primer caso, la eficiencia 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 y atizar el carbón regularmente, manipular los dampers 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 dependen de la cantidad de combustible que se va a quemar, de la calidad del combustible puesto que mientras más difícil de quemar sea el combustible más bajo será la tasa de combustión, del tamaño de las partículas y de la cantidad y composición de las partículas, entre otros factores. Para carbones antracíticos y lignitos la tasa de combustión es del orden de $130 \text{ Kg/m}^2\text{h}$ y $190 \text{ Kg/m}^2\text{h}$ respectivamente. Para basuras está entre 250 y $350 \text{ Kg/m}^2 \text{ h}$.

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

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 $50000 \text{ Btu/hr ft}^3$ ($258,7$ hasta $517,4 \text{ kW/m}^3$)



En los quemadores sobre parrilla alimentados automáticamente, el carbón entra a la retorta por debajo de la parrilla impulsado por un tornillo sin fin y el aire pasa a través del lecho de carbón, alimentado por un ventilador. En este tipo de quemadores es posible consumir menos cantidad de carbón que en los anteriores siempre y cuando 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.

4.1 PREPARACIÓN Y ALIMENTACIÓN DEL CARBÓN

En la mayoría de las industrias el carbón se utiliza sin un tratamiento previo. Esta práctica no es aconsejable ya que el tamaño puede no ser el apropiado, aumentando la cantidad de inquemados y por lo tanto el consumo de combustible. Antes de la alimentación del carbón a los quemadores, este 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 debe ser secado para permitir la pulverización, con aire caliente, así como hacer 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 auto ignición 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 va a reducir a una granulometría fina (pulverizado) 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 están dispuestos 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, que 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. Otro tipo 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

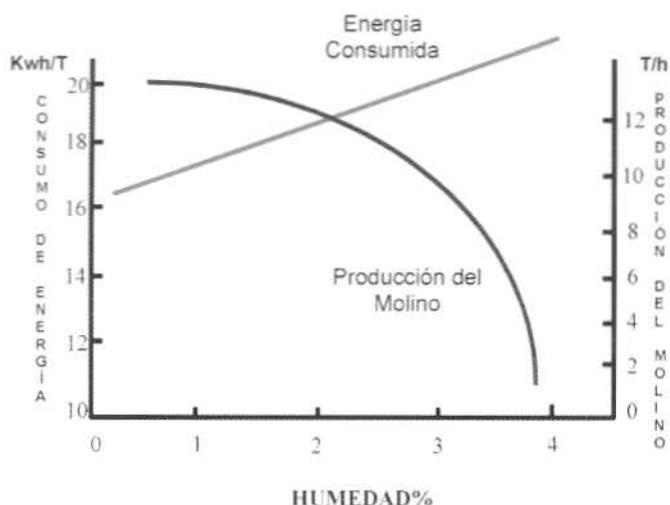


desciende aproximadamente un 40%, aumentando el consumo de energía un 10% para la misma granulometría, (figura 17).

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.

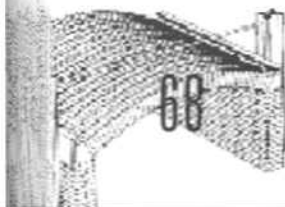
En la figura 18, se reflejan los consumos específicos en kwh por tonelada de carbón molido, para los tres tipos de molinos más usados, el tubular, el de resortes y el de impactos, observándose que el mínimo consumo específico corresponde al molino de resortes.



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

FIGURA 17

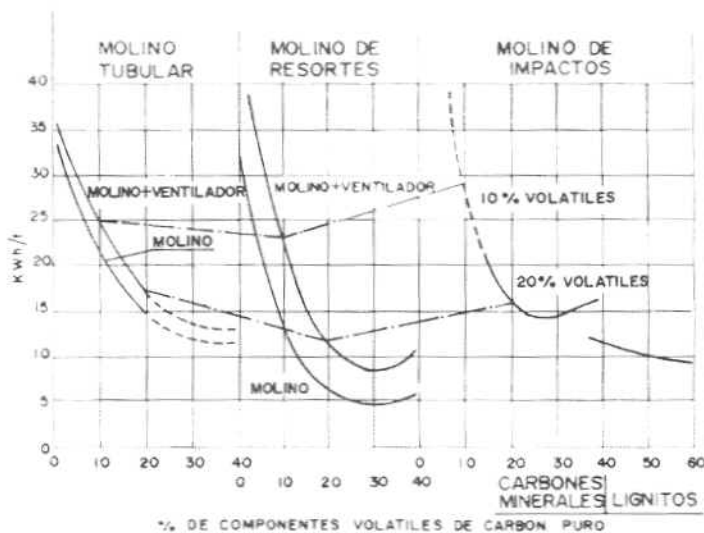
Fuente: Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía, IDAE



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. 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 con regularidad 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 sobre el flujo de carbón. Uno de los mecanismos más utilizados es el tornillo sin



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

FIGURA 18

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



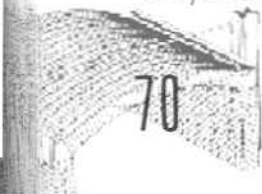
fin, en el cual el carbón se mueve a lo largo de una tubería o canal mediante un impulsor rotatorio en forma de hélice, para alimentarlo por debajo de la parrilla a la cámara de combustión. Para la selección del tamaño del tornillo es importante conocer la granulometría del carbón, la velocidad depende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

El tornillo sin fin también se puede utilizar para carbón pulverizado, especialmente en hornos hoffman. 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 19 se presenta un sistema de alimentación con tornillo.

Otro tipo de alimentadores que se usan para 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.

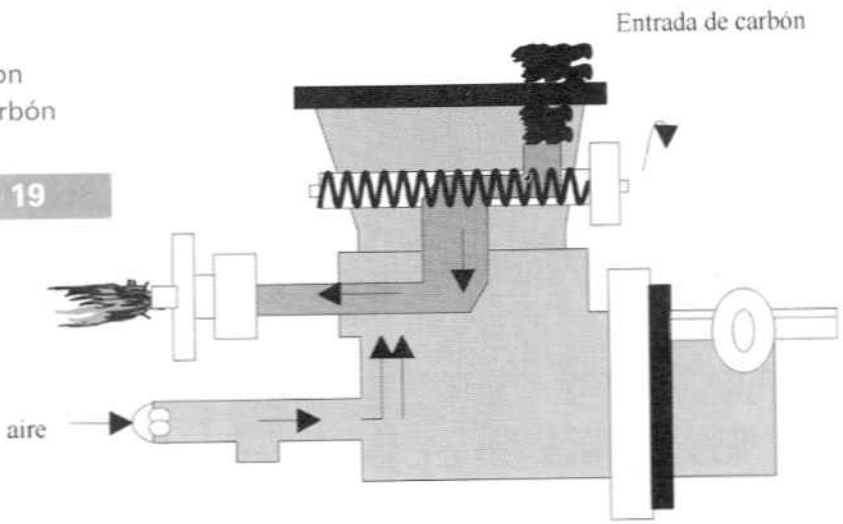
El alimentador de correa utiliza una banda que rueda sobre rodillos. Esta banda recibe por un extremo el carbón y por el otro extremo lo descarga. El control de la rata de alimentación se realiza variando la velocidad de los rodillos. Este sistema se puede utilizar en aplicaciones volumétricas y gravimétricas, 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 20 se presenta un esquema de un sistema de alimentación con banda.

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.



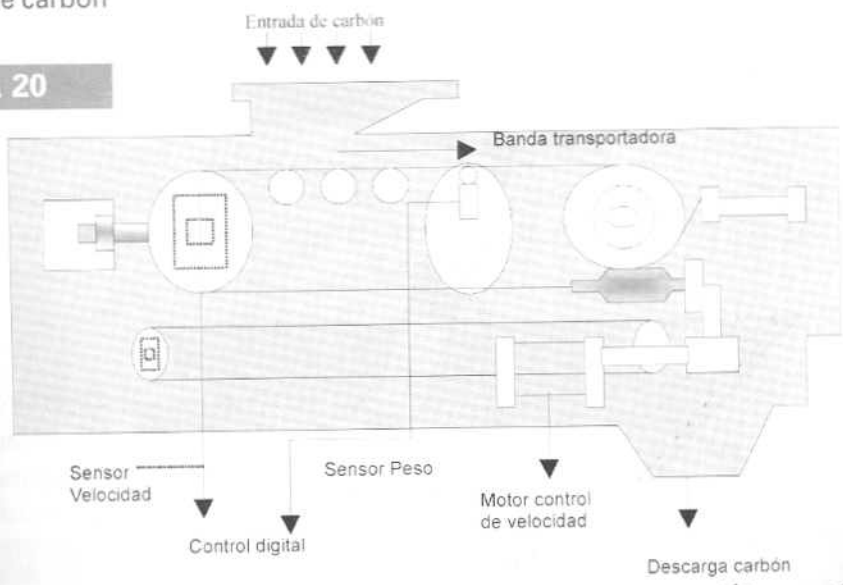
Sistema de alimentación con tornillo para carbón pulverizado.

FIGURA 19



Alimentación de carbón con banda.

FIGURA 20



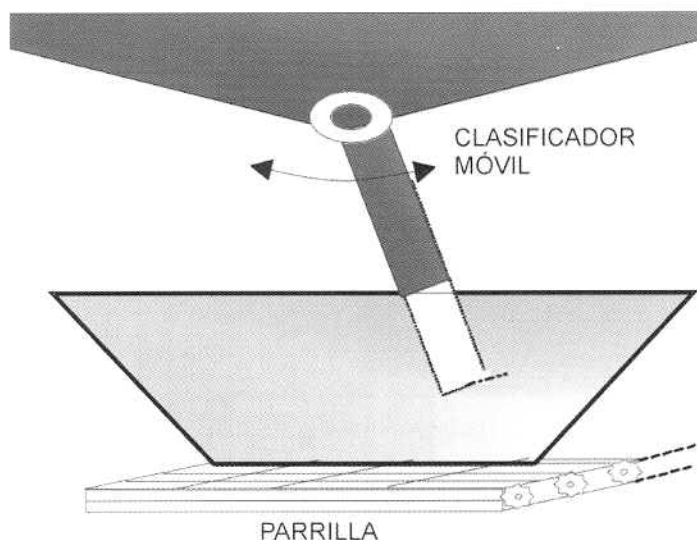
El carbón también se puede alimentar por gravedad donde el combustible, contenido en una tolva, reposa sobre la parrilla. Una cortina permite regular la altura de la capa. La parrilla arrastra el combustible. El flujo lo regula la altura de la capa y la velocidad de la parrilla.

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 4.5).

4.2 SISTEMAS DE COMBUSTIÓN DE CARBÓN

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



Sistema de alimentación de carbón por gravedad con clasificador móvil.

FIGURA 21

4.2.1 Combustores de lecho fijo o móvil

Las parrillas son los equipos más utilizados en la industria ladrillera, especialmente en los hornos pampa y de llama invertida. Pueden ser de alimentación manual por encima o automática por debajo de la parrilla. Se clasifican en quemadores de retorta simple, que trabajan mejor con carbones bituminosos y antracitas, y 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 22 se presenta un esquema de un quemador de parrilla fija.

Con respecto a la granulometría, se recomienda quemar un carbón con tamaño entre 2.5 y 3.8 cm (1 y 1-½ pulgada) evitando que el porcentaje de carbón con tamaño menor a 0.6 cm (¼ de pulgada) sea superior al 5%. Para los quemadores de parrilla fija que posean más de una retorta el tamaño puede ser hasta de 5 cm (2 pulgadas).

4.2.2 Combustores de lecho pulverizado

Este tipo de quemadores, conocido también como carbojet, se utiliza en hornos tipo Hoffman y túnel. El carbón se reduce a partículas muy finas

Quemador de parrilla fija y alimentación por debajo.

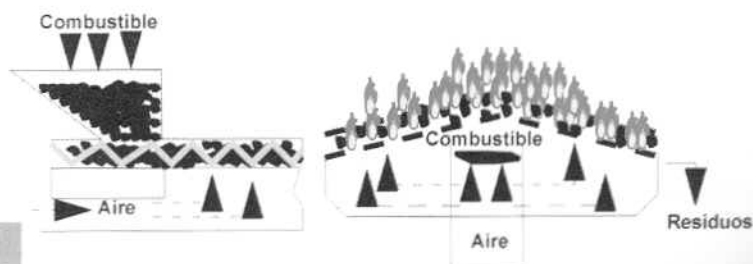


FIGURA 22

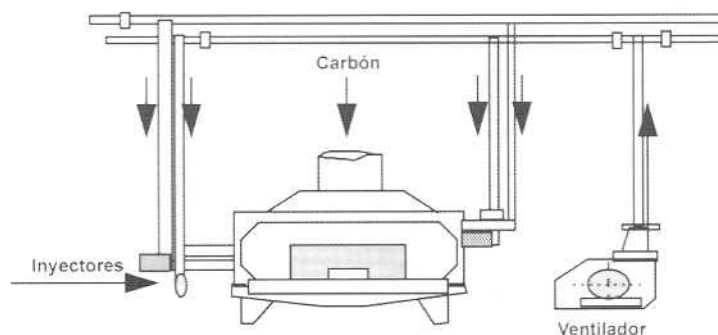


(polvo) las cuales se transportan por una corriente de aire primario hacia el interior del hogar. El carbón se enciende a medida que la mezcla carbón-aire entra al hogar, donde se une al aire de combustión secundario, el cual se calienta hasta temperaturas entre 260 y 425°C.

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

Los hornos con hogares pequeños, requieren quemadores con longitud de llama corta para evitar que la llama y las partículas de carbón alcancen las paredes opuestas antes de la combustión completa. En estos casos se utilizan sistemas con varios inyectores, como el que se presenta en la figura 23, los cuales son muy utilizados en hornos tipo Hoffman.

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. Un buen dispositivo de combustión debe reunir las siguientes condiciones: Mante-



Quemador de carbón pulverizado con varios inyectores.

FIGURA 23

ner una proporción de aire primario mínimo, retrasar la mezcla con el aire secundario hasta que se establezca el encendido y aumentar al máximo la recirculación de gases.

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.

Por otra parte, 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.

4.3 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 22), y aire secundario o de sobrefuego que ingresa a la cámara de combustión por encima del carbón que está consumiéndose. 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, y puede ocasionar problemas de sobrecalentamiento en la parrilla y otras partes del quemador.

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

La regulación del flujo de aire y gases en el interior de los hornos es realizada por el tiro. Éste tiene por objeto hacer llegar el aire al combustible, obligar a los gases de combustión a recorrer las distintas cámaras y conductos del horno y a evacuar los gases.

Al quemar un combustible en el hogar de un horno, éste 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. Esto permite una mayor rapidez en la cocción de las piezas,



mejor recuperación de los calores perdidos por empleo de tomas auxiliares y una mayor renovación de aire en secaderos.

Un ventilador puede ser de tiro forzado, toma el aire de la atmósfera y lo descarga en el horno, o de tiro inducido, descarga los gases en la atmósfera.

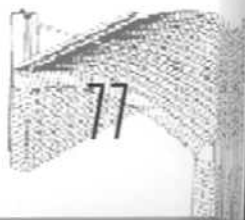
En general los ventiladores más utilizados en la industria son los del tipo centrífugo, los cuales a su vez se clasifican en ventiladores de paletas curvadas hacia adelante, paletas rectas o radiales, paletas curvadas hacia atrás o paletas doblemente curvadas.

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, puede ser regulada 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.

4.4 SISTEMAS DE EVACUACIÓN DE LAS CENIZAS

Las cenizas producidas durante la combustión se pueden evacuar en forma manual en la cual un operario retira las cenizas, en forma hidráulica o mecánica.



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.

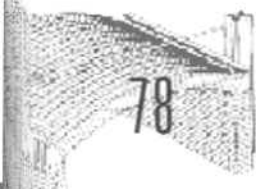
4.4.3 Evacuación neumática

Se hace a partir de un equipo que produce una succión alta que arrastra las cenizas a un depósito, para luego ser descargadas en camiones y trasportadas 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

El estado energético del horno se puede diagnosticar conociendo su eficiencia, la cual cuantifica la porción de la energía del combustible realmente aprovechable en el proceso.

La eficiencia termodinámica de un horno (η) se define como la relación entre el flujo de energía útil (E_u) y el flujo de la energía aportada por el combustible (E_c):

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

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:

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

Puesto que la energía aportada por el combustible será para aprovecharlo en la transformación de la materia prima (Flujo de Energía útil, (E_u)) y para suplir las pérdidas en chimenea, por paredes por inquemados, etc. (pérdidas totales P), o sea:

$$E_c = E_u + P$$

La eficiencia en hornos puede variar desde un valor del 60%, en hornos de quema rápida, tipo túnel, en el sector cerámico, hasta un valor del 20% en los hornos de operación discontinua, tipo pampa, en el sector ladrillero.



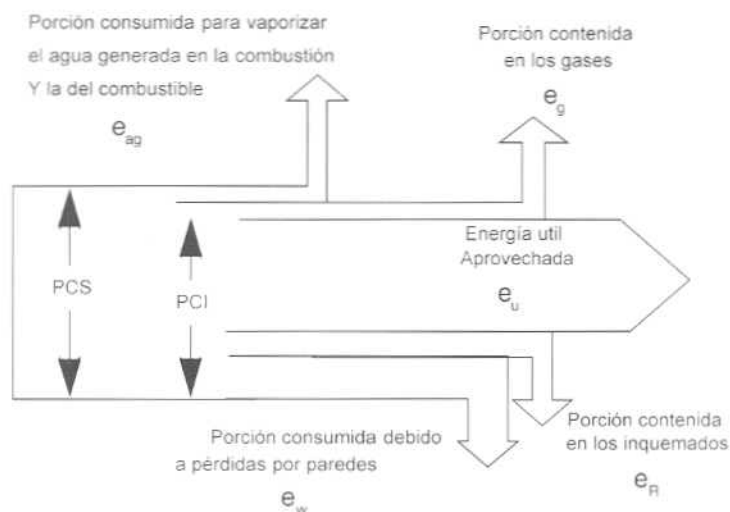
5.1 CÁLCULO DE LA ENERGÍA DEL COMBUSTIBLE

El cálculo de la energía aportada por el combustible se puede apreciar en la figura 24, donde se puede deducir que, del total, 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 se aprovecha como energía útil en el proceso deseado (generación de vapor, calentamiento, cocción, etc.), la otra parte pierde. Las unidades de energía se expresan en KJ/Kg carbón.

Por lo tanto, la energía aportada por el combustible dado en Kw se puede calcular con base en el poder calorífico superior:

$$E_c = m_c * PCS$$

Este es el más utilizado debido a que es el valor que se reporta en el análisis de laboratorio.



Distribución cualitativa de la energía aportada por el combustible.

FIGURA 24

Con base en el poder calorífico inferior:

$$E_c = m_c * PCI$$

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

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

5.2 CÁLCULO DE LA ENERGÍA ÚTIL

El cálculo de la energía útil en hornos depende mucho del proceso a realizar, v.g. transformación química de obra cerámica, fusión de metales y/o vidrio, calentamiento de materiales, etc. En consecuencia, la energía útil requerida para llevar a cabo estos procesos, debe tener en cuenta una energía de calentamiento o sensible que depende del aumento de la temperatura y en los casos donde existen transformaciones químicas o de fase se le debe adicionar al anterior valor de la energía sensible otra cantidad correspondiente a la energía para la transformación química o física denominada energía o calor de formación y calor de cambio de fase respectivamente.

En el caso de hornos para ladrillos la energía útil (E_u) se puede calcular así:

$$E_u = E_s + E_R$$

Si el horno es utilizado para la cocción de obra cerámica o ladrillo o:

$$E_u = E_s + E_{ca}$$



Si el horno es utilizado para el calentamiento de obra.

En donde:

E_s = Energía para secar la obra húmeda, la cual puede calcularse así:

$$E_s = m_{ag,eva} h_{eva} \approx m_{ag,eva} * 2200 \text{ Kw}$$

$m_{ag,eva}$ = Flujo de masa evaporada en Kg/s

h_{eva} = Entalpía de evaporación aproximadamente igual a 2200 KJ/Kg.

E_{ca} = Energía de calentamiento, la cual puede calcularse así:

$$E_{ca} = m_{ocr} c_{ocr} (T_p - T_{ref})$$

m_{ocr} = Flujo de obra cruda en Kg/s

c_{ocr} = Calor específico de obra cruda (de producto cerámico 0.22 Kcal/Kg °C)

T_p = Temperatura máxima del proceso en °C.

T_{ref} = Temperatura de referencia del ambiente en °C

E_R = Energía de transformación química o calor de reacción. Por la transformación de componentes en el ladrillo se puede usar un valor de 80kcal/Kg de obra cocida. Para la transformación del producto cerámico se recomienda un valor de 260Kcal/Kg obra cocida.

Es importante mencionar que en algunos hornos se utiliza aire para el enfriamiento de la obra y se aprovecha como aire caliente en el propio horno o en los secaderos. La energía asociada a este aire se calcula así:

$$E_{WH} = m_{ar} C_{p_{ar}} (T_s - T_{ref})$$

E_{WH} = Flujo de energía en el aire caliente que sale del horno después de enfriar la obra cocida y que puede ser utilizado en secaderos.

m_{ar} = Flujo de aire caliente utilizado en otro equipo en kg/s.

T_s = Temperatura de salida del aire aprovechado en °C.

$C_{p_{ar}}$ = Capacidad calorífica del aire. (Aproximadamente 0,24 kcal/kg°C)

La energía en aire caliente que sale del horno y que se aprovecha en secaderos se debe tener en cuenta como una energía útil adicional a la hallada anteriormente, si se desea calcular la eficiencia global de horno y secadero conjuntamente. En estos casos la nueva energía útil (E_{ug}) será:

$$E_{ug} = E_u + E_{WH}$$

También se recomienda tener en cuenta el cálculo del rendimiento (η) como la relación entre el consumo de energía aportada por el combustible (E_c) y el flujo de obra cocida (m_{cc}) que sale del horno así:

$$\eta = \frac{E_c}{m_{cc}}$$

Valores típicos del rendimiento se puede observar en la tabla 15

TABLA 15 - Valores típicos de rendimientos

HORNOS	Kcal/Kg obra
Hornos ladrilleros tipo Pampa	700 y 1000
Horno ladrillero tipo Hoffman	300 y 700
Horno ladrillero tipo túnel	300 y 500
Horno cerámico tipo túnel	700 Y 1400
Horno cerámico quema rápida	400 Y 800



5.3 CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS DE ENERGÍA

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

El balance debe realizarse teniendo en cuenta si el horno es continuo (figura 25a) o discontinuo (figura 25b y 25c). Puesto que en los continuos no hay necesidad de calcular energía almacenada en las paredes.

El análisis energético empieza con la recolección de datos en los puntos señalados en la figura 25 y son presentados en la tabla 16 en la que se indican las principales variables o parámetros que se deben medir o calcular para realizar el balance de masa y energía.

En consecuencia, las pérdidas de energía se deben al flujo de energía contenida en gases que se escapan por la chimenea (E_g), a la que se pierde por paredes (E_w) y debido a los inquemados (E_l)

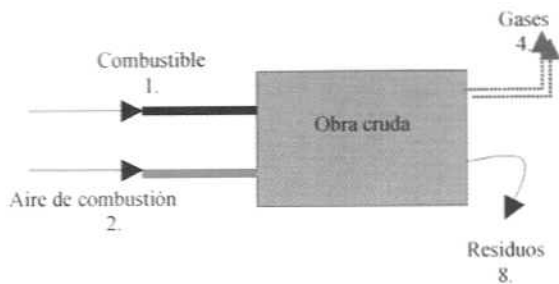
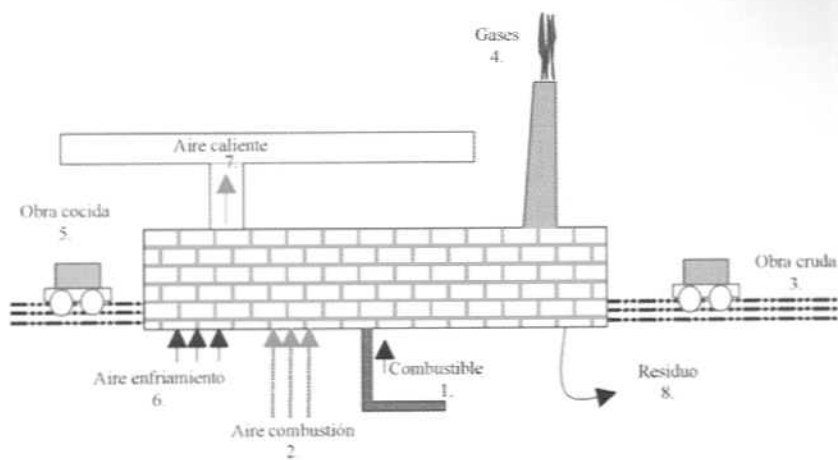
$$P = E_g + E_w + E_l$$

Las pérdidas totales en hornos dependen mucho del tipo de horno, la calidad del aislamiento y del tipo de quemador. Ellas pueden alcanzar valores que varían entre un 40% y un 80% del total de energía aportada.

5.3.1 Cálculo de las pérdidas en gases de chimenea

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

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



- a. Volumen de control para horno continuo.
- b. Volumen de control para hornos discontinuos etapa de calentamiento.
- c. Volumen de control para hornos discontinuos etapa de enfriamiento.

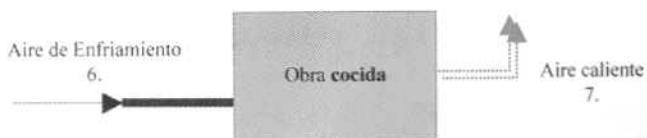


FIGURA 25



TABLA 16 - Recolección y datos en los puntos estratégicos que se ilustran en la figura 25

PUNTO DE MUESTREO	DATOS A REGISTRAR			
(1) COMBUSTIBLE	<ul style="list-style-type: none"> • Flujo de combustible • Análisis próximo del combustible • Temperatura del combustible • Poder calorífico del combustible 			
(2) AIRE DE COMBUSTIÓN	<ul style="list-style-type: none"> • Flujo de aire de combustión • Presión Atmosférica • Temperatura de entrada del aire • Humedad relativa 			
(3) OBRA CRUDA	<ul style="list-style-type: none"> • Flujo de obra • Humedad de entrada • Temperatura de entrada 			
(3) MASA MUERTA	<ul style="list-style-type: none"> • Flujo de masa muerta • Temperatura de entrada y de salida • Tipo de material 			
(4) GASES DE CHIMENEA	<ul style="list-style-type: none"> • Flujo de gases • Temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo de los gases • Composición: % en volumen <table border="0" style="margin-left: 40px;"> <tr> <td style="text-align: center;">% CO₂</td> <td style="text-align: center;">% CO</td> <td style="text-align: center;">% O₂</td> </tr> </table> 	% CO ₂	% CO	% O ₂
% CO ₂	% CO	% O ₂		
(5) OBRA COCIDA	<ul style="list-style-type: none"> • Flujo de obra • Humedad de salida • Temperatura de salida 			
(6) AIRES DE ENFRIAMIENTO	<ul style="list-style-type: none"> • Flujo de aire de enfriamiento • Presión Atmosférica • Temperatura de entrada del aire • Humedad relativa 			
(7) AIRE DE DESECHO	<ul style="list-style-type: none"> • Flujo de aire de desecho • Temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo del aire • Composición: % en volumen <table border="0" style="margin-left: 40px;"> <tr> <td style="text-align: center;">% CO₂</td> <td style="text-align: center;">% CO</td> <td style="text-align: center;">% O₂</td> </tr> </table> 	% CO ₂	% CO	% O ₂
% CO ₂	% CO	% O ₂		
(8) RESIDUO	<ul style="list-style-type: none"> • Flujo de residuo • Temperatura 			
(9) PÉRDIDAS POR PAREDES	<ul style="list-style-type: none"> • Temperaturas promedio en cada zona del horno • Área del techo y paredes de cada zona del horno 			

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 donde:

- V_i = Flujo volumétrico de cada gas i , en $m^3(n)/s$ o en $m^3(n)/Kg$ combustible.
- Cp_i = Calor específico promedio de cada gas i , en $KJ/m^3(n) ^\circ C$. Ver tabla 17
- h_{H_2O} = 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 = Temperatura del gas en chimenea en $^\circ C$.
- T_a = Temperatura ambiente en $^\circ C$.

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 $^\circ C$.

En la tabla 18 se ilustra el resultado teniendo en cuenta la ecuación dada para la pérdida de gases.

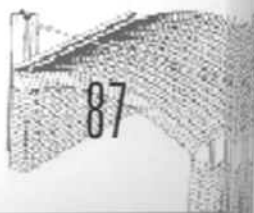


TABLA 17 - Valores de c_p promedio entre 273K y la temperatura T_g en KJ/Nm³ °C

K	T_g °C	C_p , KJ / Nm ³ K				
		O ₂	CO ₂	N ₂	H ₂ O	SO ₂
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

TABLA 18 - Valores del flujo de gases, capacidad calorífica y pérdidas en gases

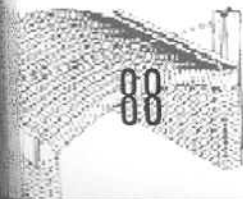
GAS	V_t [m ³ (n)/Kg. combustible]	$C_{p,n}$ [KJ/m ³ (n)°K]	$V_t C_{p,t} (T - T_{ref})$
N ₂	7.29996	0.3060	390.9
CO ₂	1.1013	0.4393	84.7
SO ₂	0.0005	0.4262	0.04
O ₂	0.7013	0.3084	37.9
Pérdidas energía en gases secos, en KJ/Kg combustible			517.54

$T = 200$ °C, $T_{ref} = 25$ °C

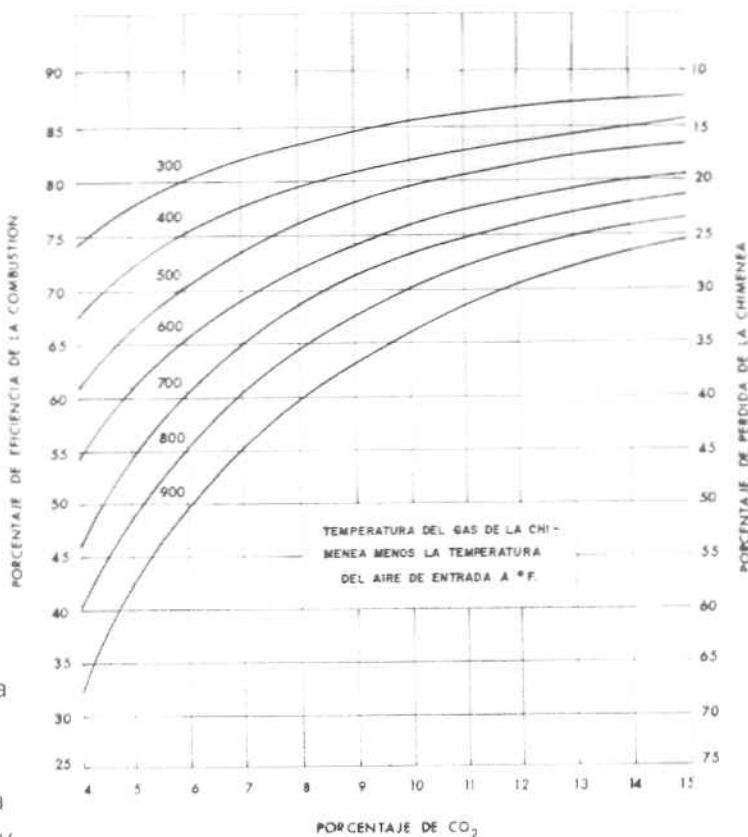
Para incluir la energía en el vapor de agua se procede así:

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

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 CO₂ en los gases y en la temperatura de salida de los



gases. V.g. gases saliendo a 300 °F (149 °C) con una concentración de CO₂ del 9.5 % (% peso, base seca), representa una pérdida del 15 % de la energía aportada por el combustible



Relación de la eficiencia de la combustión y de los porcentajes de pérdida en la chimenea y el porcentaje de CO₂ y la temperatura de la chimenea.

FIGURA 26



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_w = Energía pérdida por paredes, en Kw.
- A = Área total del equipo expuesta a transferencia de calor, en m^2 .
- T_w = Temperatura de pared, en $^{\circ}C$.
- T_a = Temperatura ambiente, en $^{\circ}C$.
- h = Coeficiente total de transferencia de calor. (Ver tabla 19)

V.g. Si la pared horizontal de un horno se encuentra a $200^{\circ}C$ y existen $100 m^2$ de área expuesta al ambiente que se encuentra a $25^{\circ}C$, las pérdidas por paredes serán:

$$E_w = 21.5 * 100 * 175 = 376.3Kw$$

5.3.3 Energía perdida por proceso intermitente (BATCH)

Cuando se trata de hornos discontinuos, los cuales funcionan por ciclo, se debe considerar la energía almacenada en las paredes y estructuras que no se aprovechan en el proceso.

Esta porción está relacionada con la energía almacenada en cada uno de los componentes del equipo involucrado en el proceso, como un cambio de su energía interna, debido a que en el proceso discontinuo, la tempe-

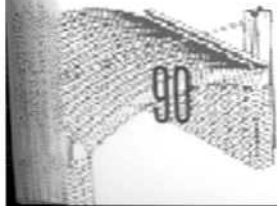


TABLA 19 - Valores aproximados de los coeficientes de transferencia de calor total (h) para varias diferencias de temperatura entre la pared y el medio que rodea el equipo, válido para materiales con emisividad de 0.95

DIFERENCIA DE TEMPERATURA (°C)	PARED HORIZONTAL CALIENTE ARRIBA	PARED HORIZONTAL CALIENTE ABAJO	PARED CILÍNDRICA VERTICAL	PARED CILÍNDRICA HORIZONTAL
	h (w/m ² C)	h (w/m ² C)	h (w/m ² C)	h (w/m ² 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

ratura varía con el tiempo. En su forma simple, esta energía almacenada se puede calcular, así:

$$\text{Est} = \frac{mC(T_f - T_i)}{t}$$

Donde:

Est = Energía almacenada en todos los elementos constitutivos del proceso, en Kw.

m = masa de los elementos del equipo, Kg.



- C = capacidad calórica de los elementos, $\text{KJ/Kg}^{\circ}\text{C}$.
 T_f = Temperatura final alcanzada durante el proceso, $^{\circ}\text{C}$.
 T_i = Temperatura inicial del proceso, $^{\circ}\text{C}$.
 t = Tiempo de calentamiento o enfriamiento, s.

Cuando se trata de calcular las pérdidas por paredes en hornos discontinuos que funcionan por ciclos o tandas, se debe tener en cuenta que la energía que se escapa del horno no sólo va al ambiente que lo rodea sino que parte se acumula en las paredes del horno durante el ciclo de operación. Por lo tanto, las pérdidas por paredes se calculan usando la figura 27, la cual considera los tiempos de operación, el espesor de la pared y las características físicas del material representado en la difusividad térmica del material.

$$\alpha = \frac{\text{conductividad}}{\text{densidad} * \text{calor específico}}$$

A manera de ejemplo, si un horno opera 10 horas y descansa 20 horas, para un tiempo total del ciclo de 30 horas, cuyas paredes poseen un espesor de 0.3 m y una difusividad de $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, se tienen las siguientes relaciones y el porcentaje de pérdidas:

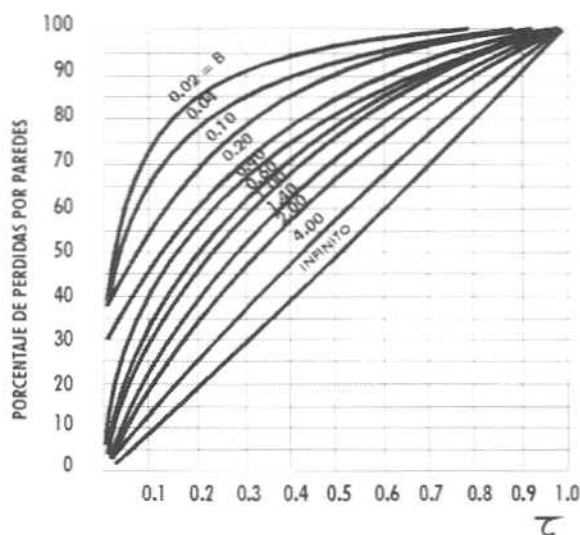


Gráfico para calcular las pérdidas por paredes en hornos discontinuos.

FIGURA 27

$$R_1 = \frac{10}{10 + 20} = 0.33$$

$$R_2 = \frac{10^{-5} * 30 * 3600}{(03)^2} = 60$$

$$\% \text{ Pérdidas} = 33\%$$

5.3.4 Cálculo de las pérdidas por quemados (E_1)

Como se había mencionado anteriormente, la presencia de quemados en los productos de la combustión, representa una porción de combustible no quemado, por lo tanto es energía que se dejó de suministrar al proceso.

En la tabla 20 se presenta la energía perdida por cada elemento presente en los residuos.

TABLA 20 - 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:

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

Donde, E_{PRE} 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:

$$E_l = m_c * 32762 + m_H * 120798 + m_{CO} * 10092.2 + E_{PRE}$$

También, se puede calcular la energía pérdida por inquemados con base en el análisis próximo de la siguiente manera:

$$E_l = m_{CSV} * 29080 + m_{CO} * 10092.2 + E_{PRE}$$

Donde:

m_c = Flujo de carbono en los residuos.

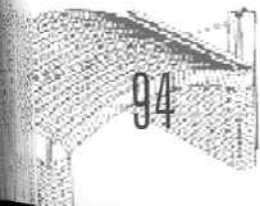
m_H = Flujo de hidrógeno en los residuos.

m_{CO} = Flujo de CO en los gases

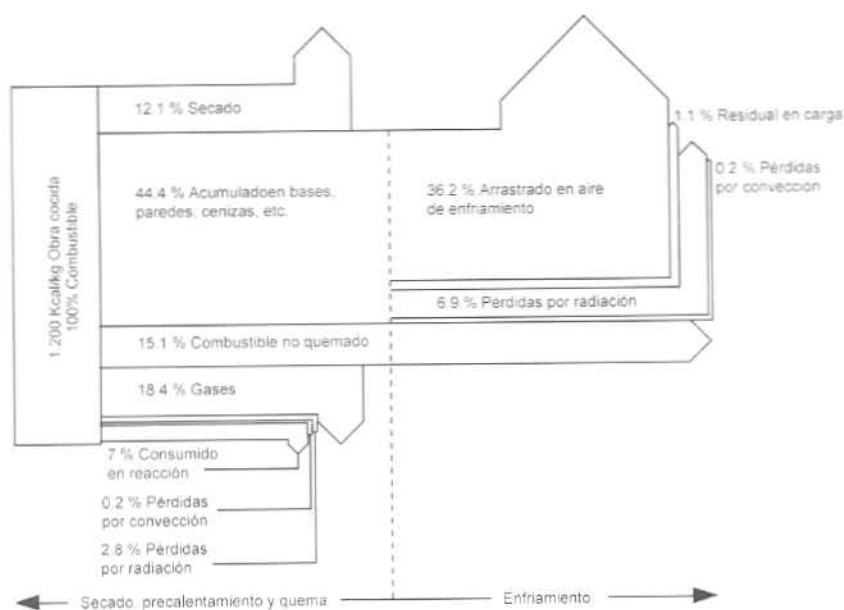
m_{CSV} = Flujo de combustible sin quemar en los residuos, el cual se calcula a partir del contenido de carbono fijo y de material volátil en los residuos:

$$(\text{Carbono fijo en residuos} + \text{Material volátil en residuos}) * \text{flujos de residuos}$$

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



A manera de ejemplo, se presenta en las figuras 28, 29 y 30 los balances de energía para hornos pampa, de llama invertida y hoffman respectivamente. En ella se observa la participación de energía correspondiente a los diferentes items mencionados anteriormente. V.g. se deduce que en los hornos pampas y de llama invertida, la mayor participación de energía se debe a las pérdidas de energía por su acumulación en las paredes.



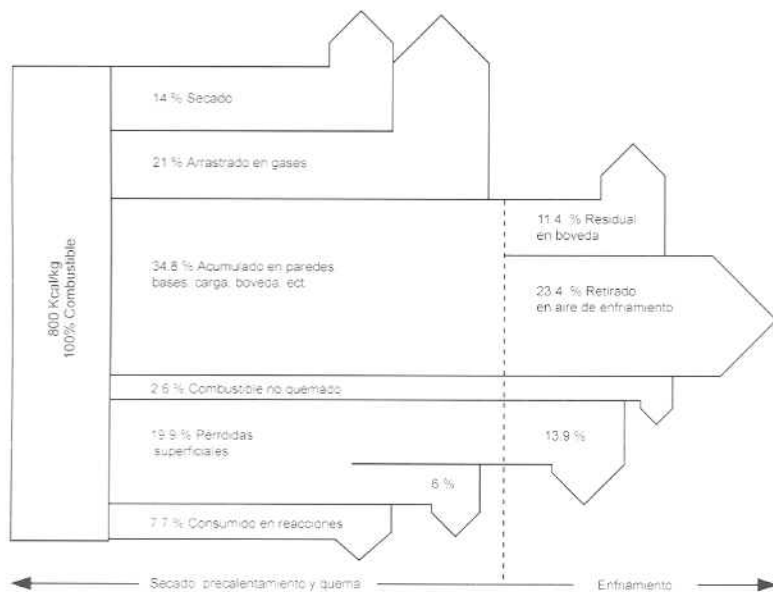
Balance por etapas para horno pampa.

FIGURA 28

Fuente: Proyecto de Energía-CIDI-U.P.B.



Fuente: Proyecto de
Energía-CIDI-U.P.B.



29. Balance de energías para horno de llama invertida.

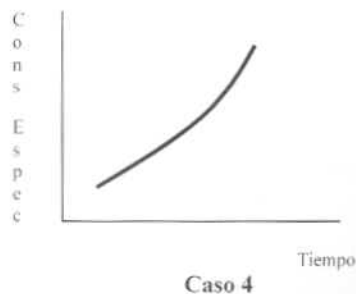
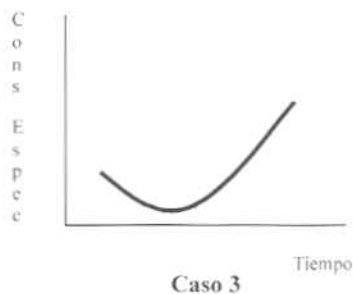
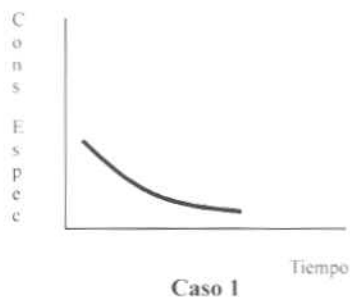
30. Balance de energía para horno Hoffmann.

FIGURA 29 y 30

ASPECTOS ENERGÉTICOS

El estado energético de un horno se conoce calculando su consumo específico, el cual es la relación entre la energía consumida y la cantidad de producto, cada mes. En la figura 31 se presenta la gráfica del comportamiento de los consumos específicos que puede darse en un horno.

De acuerdo con la figura 31, los casos 1 y 2 son comportamientos excelentes; éstos indican que los programas de conservación de energía están dando resultados. Los casos 3 y 4 son de cuidado y se deben determinar las causas por las cuales está aumentando el consumo de energía.



Diversos comportamientos de los consumos específicos en los hornos.

FIGURA 31



Un comportamiento como el de los casos 1 y 2 indica que se están combatiendo los focos de pérdida. La mejor forma para determinar dichos focos de pérdida es por medio de la realización de los balances energéticos explicados en el capítulo 5.

6.1 POSIBILIDADES DE REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS

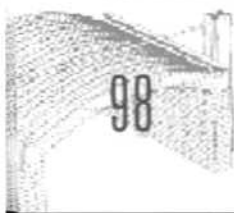
Las acciones a seguir para lograr un uso eficiente de la energía en hornos se pueden clasificar en acciones enfocadas a la operación, al diseño y al mantenimiento.

6.1.1 Acciones en la operación de hornos para la reducción de pérdidas

Las normas generales a seguir para lograr un uso eficiente de la energía en el sentido de la operación del horno son:

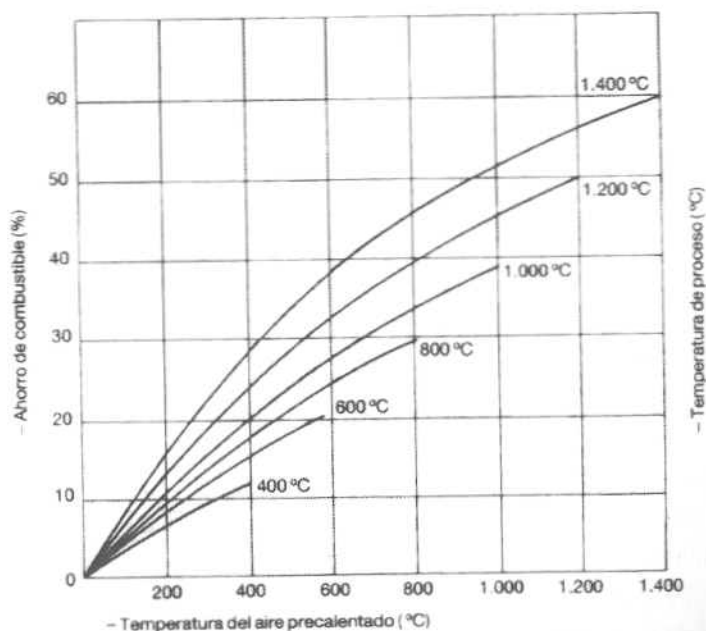
Operar hornos a plena carga y a plena producción; en el caso de hornos intermitentes evitar el enfriamiento excesivo entre operaciones, aislar adecuadamente las paredes del horno y las conducciones calientes, precalentar el aire de combustión con el material que se debe enfriar. En la figura 32 se puede apreciar el ahorro de energía que se lograría si se precalienta aire de combustión, quemar el combustible con exceso de aire moderado, precalentar el material con los gases calientes de la zona de cocción, secar con los gases calientes que provienen de la zona de precalentamiento, evitar al máximo que el calor salga del equipo, mantener la materia prima en zonas aireadas y cubiertas para que entre lo más seca posible al horno; una disminución en 1% en la humedad de la carga, supone un ahorro de energía que puede variar del 3 al 20% de acuerdo al grado de humedad, vigilar las pérdidas en los hornos, haciendo el balance térmico correspondiente.

Figura 32. Ahorro de energía en hornos.



6.1.2 Acciones enfocadas al diseño del horno

Cuando se diseña un horno, se debe tener en cuenta: dimensionar el horno de modo que se adapte a sus necesidades, dimensionar el horno con aprovechamiento del calor de los gases de escape para secado, precalentamiento o recirculación con el objeto de tener los gases en chimenea a una temperatura lo más baja posible, diseñar hornos grandes y continuos. En lo posible, instalar todo el equipo de control y regulación para una operación precisa, aislar adecuadamente el horno y seleccionar quemadores de alta eficiencia con auto control de emisiones de NO_x .



Efectos del precalentamiento del aire en combustión.

FIGURA 32



6.1.3 Acciones enfocadas al mantenimiento

Es necesario cuidar que el consumo de energía se mantenga en los valores previstos y no aumente con el tiempo. Para el efecto controle las mediciones necesarias relacionadas con el consumo de energía, cuide que no se aparte de los parámetros de diseño del fabricante, conserve el aislamiento en condiciones óptimas, mantenga un control preciso y acorde con los parámetros óptimos y calcule índices como son Kg carbón/Kg de producto, Kwh/Kg de producto, etc. Si se salen de lo normal se debe investigar.

6.2 EVALUACIÓN DE LAS PÉRDIDAS Y AHORROS DE ENERGÍA

Las principales fuentes de pérdida de energía en los hornos están relacionadas con los gases de combustión, pérdidas por inquemados, por radiación y convección a través de las paredes y por entradas de aire falso. La reducción de éstas conduce a ahorro en el consumo de energía. A continuación se presentan algunas medidas que se pueden tomar para reducirlas.

6.2.1 Reducción de las pérdidas por gases de combustión

La principal pérdida de energía en los gases de combustión se debe a la temperatura con la cual salen por la chimenea.

La temperatura mínima posible de operación no debe ser menor que la del punto de rocío en 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 presenta 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, esta se refiere a la máxima temperatura con que se debe generar un producto. 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 como aire caliente para secaderos.

6.2.2 Reducción de las 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 debe 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.
- Recubrir con refractarios la zona de encendido.

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

- Se debe distribuir en forma uniforme el carbón sobre la parrilla.
- No se debe alimentar lechos gruesos de carbón. La alimentación de éste se debe efectuar en forma regulada.
- Controlar la granulometría y calidad del carbón. Esto puede disminuir hasta un 5% el consumo 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 las pérdidas por las paredes

Para construir las paredes de los hornos se hace uso de materiales refractarios cuya función es resistir las altas temperaturas y de materiales aislantes cuya función es resistirse al paso del calor. Incrementar el espesor del aislamiento de las paredes de los hornos puede ahorrar energía, pero tomar esta decisión requiere de un análisis costo-beneficio. La oportunidad de mejorar el aislamiento es durante una revisión total de la unidad o cuando definitivamente el aislamiento está en muy malas condiciones.

En general las temperaturas a las cuales ocurren las diferentes transformaciones en los hornos son muy superiores a las del medio ambiente y deben seguir un ciclo preestablecido. Por esta razón, además de la seguridad y comodidad de los operarios, se debe utilizar en la construcción de los hornos, materiales que impidan que el calor aportado al proceso se disipe al medio ambiente, para conseguir las temperaturas requeridas y un rendimiento térmico óptimo.

6.2.4 Reducción de pérdidas debida a baja carga de operación

En la tabla 21, se presenta el rendimiento del proceso o equipo cuando se opera en puntos alejados del valor de diseño.

Es importante mencionar que la pérdida por operación intermitente de los hornos se traduce en pérdidas de energía por paredes.

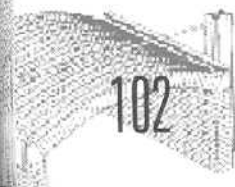


TABLA 21 - Comportamiento de la eficiencia con respecto al factor de carga del horno

FACTOR DE CARGA	EFICIENCIA (%)
0,6	71
0,7	76
0,8	80
0,9	83
1,0	82
1,1	76
1,2	64

6.2.5 Reducción de pérdidas por aire falso

En todo tipo de hornos es muy importante evitar y reducir las entradas de aire falso. Mantener los niveles de exceso de aire en los valores mínimos posibles mediante un sistema de control de combustión adecuado, puede garantizar ahorros de energía.

Las entradas de aire falso en los hornos tienen los siguientes efectos:

- El ventilador de gases tiene una curva característica de funcionamiento (caudal, presión) y su punto de funcionamiento se ajustará a dicha característica y a la curva de resistencia hidráulica equivalente al conjunto del horno, incluyendo las entradas de aire falso.
- En la zona de fuego, modifica las características de la llama y de la transmisión de calor de la misma, e incluso en casos extremos, pueden aparecer inquemados por defecto de aire.



Estos inconvenientes se traducen en un aumento en el consumo de energía eléctrica en los ventiladores ya que manejan un volumen de aire mayor que el necesario, así como en un aumento del consumo de combustible.

En los hornos túnel, la reducción de aire falso obliga a una supervisión periódica del estado de los areneros y a un control de la presión en el interior del horno.



Durante 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 SO_2 y los óxidos de nitrógeno 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 del horno y de las propiedades del carbón. En

7



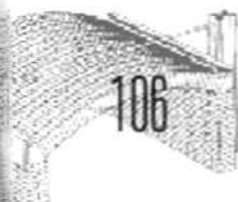
las unidades que utilizan carbón pulverizado y ciclones con extracción de las cenizas de fondo vía húmeda, la cantidad de cenizas que dejan los hornos es menor que en las unidades con extracción vía seca, ya que algunas de las cenizas se funden y se colectan en las paredes del hogar para ser drenadas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

Un método para aumentar la eficiencia de 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 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 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 del horno y la composición del carbón. Las emisiones de partículas pueden incrementarse al aumentarse la carga 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 SO_2 y, en una menor cantidad, por trióxido de azufre (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 el horno o en los equipos de control. Generalmente, el tamaño 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 (NO_x) se producen en el proceso de combustión debido a dos mecanismos: a partir del nitrógeno molecular en el aire de la combustión (NO_x térmico) y del nitrógeno del combustible que está siendo quemado (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 horno y el tipo de combustible que está siendo utilizado¹.

La formación del NO_x térmico es marcadamente dependiente de la temperatura del gas, incrementándose rápidamente a temperaturas superiores a $1600\text{ }^\circ\text{C}$ ². El modelo aceptado actualmente es el desarrollado por Zeldovich (1946).

Se ha observado que las variables de operación más importantes en la formación del 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 NO_x .

Los NO_x también pueden ser formados en la zona de combustión por otros mecanismos alternos en los cuales el nitrógeno molecular (N_2) del aire de

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

² 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.



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 NO_x formados por esta vía son llamados "NO_x PROMPT", y su contribución es relativamente pequeña³.

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 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 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.

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:

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

- 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 NO_x en un 50-70%, las emisiones de 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 NO_x , combustión en vortex, combustión en pulsos, inyección de limos, quema en múltiples etapas y quemadores en lecho fluidizado (ver figura 33).

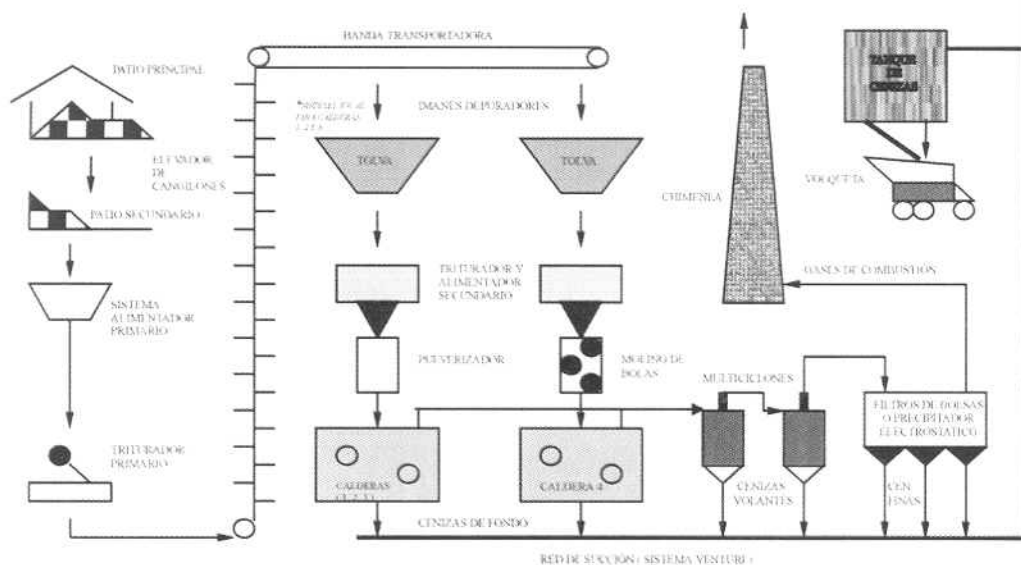


7.2.3 Postcombustión limpia del carbón

La postcombustión involucra la remoción de SO_2 , 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 SO_2 y de NO_x .

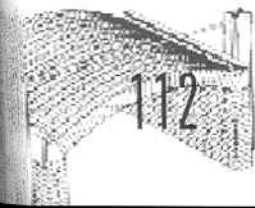
a). Control de partículas. Las clases principales de equipos de control de partículas son multiciclones, precipitadores electrostáticos, filtros de fibra de vidrio y lavadores venturi.

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 33

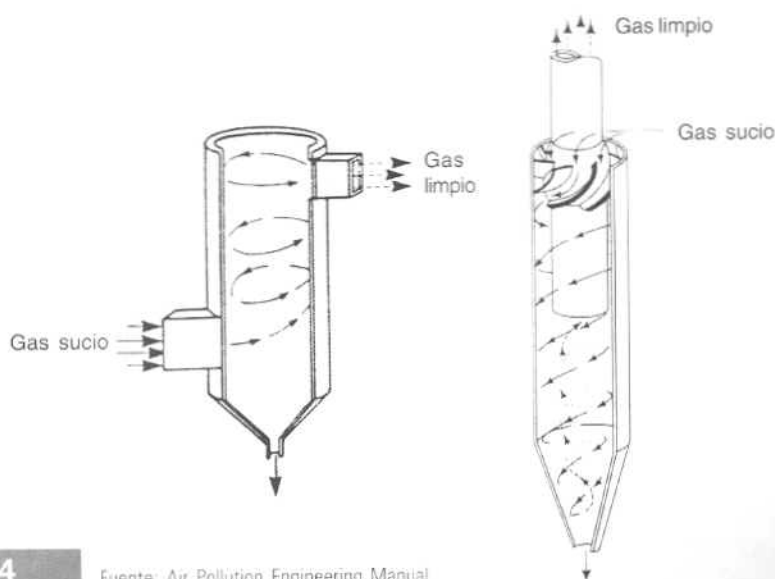


Los ciclones han sido usualmente utilizados para el control de las cenizas volantes. En años recientes han sido reemplazados por equipos de control más eficientes, manteniéndose como dispositivos de prelimpieza. Un esquema de un colector de partículas inercial se ilustra en la figura 34.

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 35.

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 34

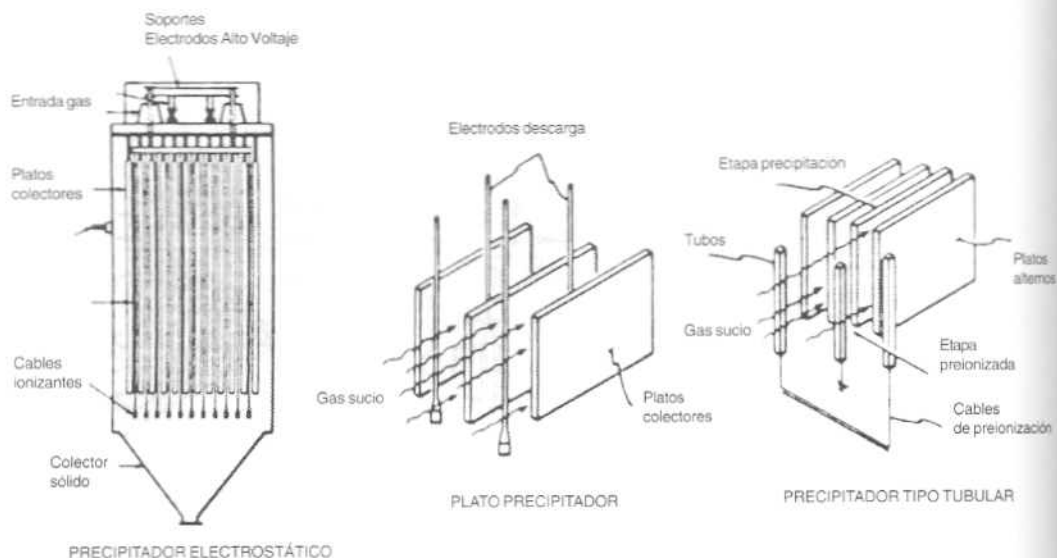
Fuente: Air Pollution Engineering Manual



Precipitador electrostático.

FIGURA 35

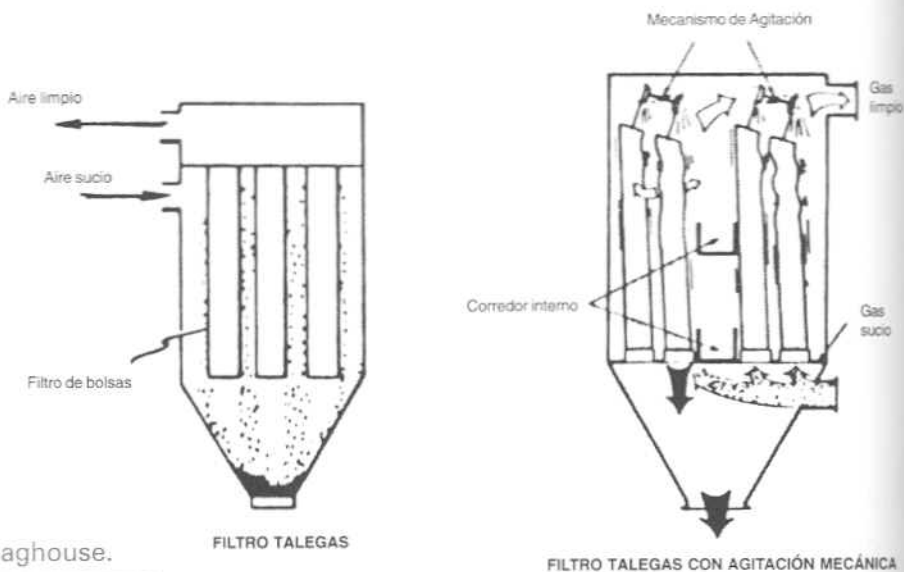
Fuente: Handbook of Pollution Control processes



Esquema Baghouse.

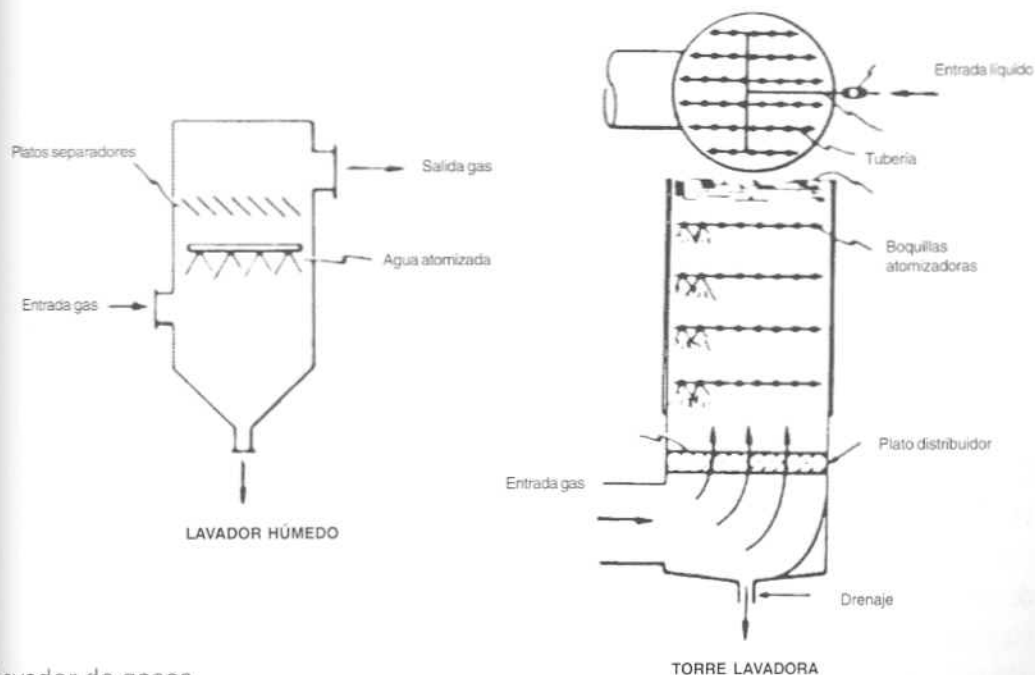
FIGURA 36

Fuente: Handbook of Pollution Control processes



los cuales son usados en los lavadores de gases tipo venturi, lavadores compactos y torres absorción⁴. 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 37

Fuente: Handbook of Pollution Control processes

⁴ 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 NO_x (LNB), como el ilustrado en la figura 38.

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 39

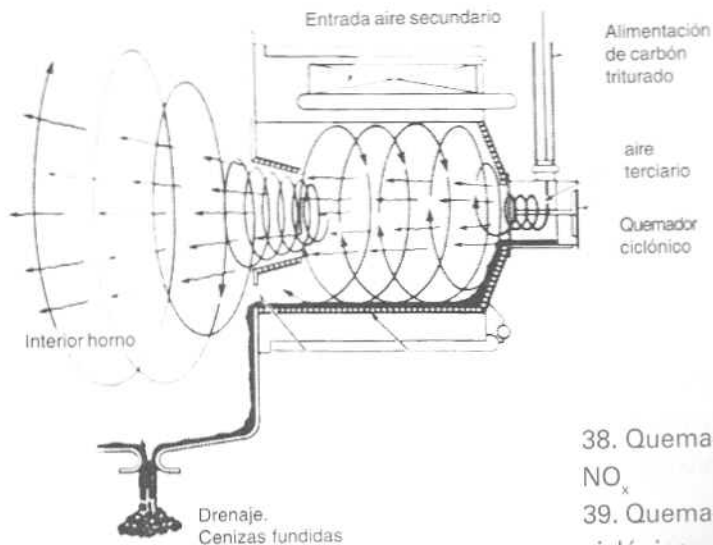
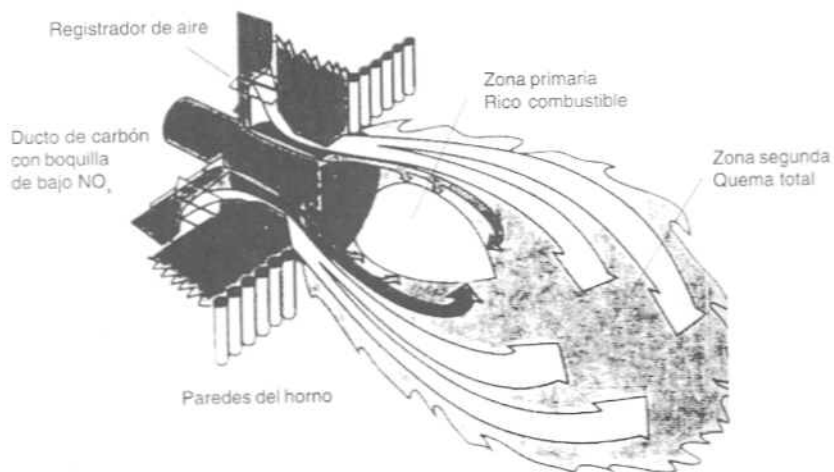
7.2.4 Manejo de los residuos sólidos

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.⁵

⁵ Revista Desarrollo Nacional América Latina, "Construcción de Presas: Los Últimos Adelantos, octubre 1985, Henry Mozdzer.





38. Quemador de bajo NO_x
 39. Quemador ciclónico.

FIGURA 38 Y 39

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 cementantes⁶. 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.

⁶ 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 22.

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
	$E = 2.0,$	$P \leq 10$
	$E = 4.45 * P^{-0.348}$	$10 < P < 1500$
	$E = 0.25$	$P \geq 1500$



TABLA 22 - Emisiones permisibles material particulado en calderas y hornos

Consumo de Calor Mkcal/h	Zona Rural Kilos/10 ⁶ kcal	Zona Urbana kilos/10 ⁶ 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 23.

TABLA 23 - 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
$E = 1.5$	$P < 0.1$
$E = 4.0 * P^{0.425}$	$0.1 \leq P < 1.0$
$E = 4.0 * P^{0.875}$	$1.0 \leq P < 10.0$
$E = 10.45 * P^{0.458}$	$10 \leq P \leq 500$

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 24.

TABLA 24 - 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 25.

TABLA 25 - 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

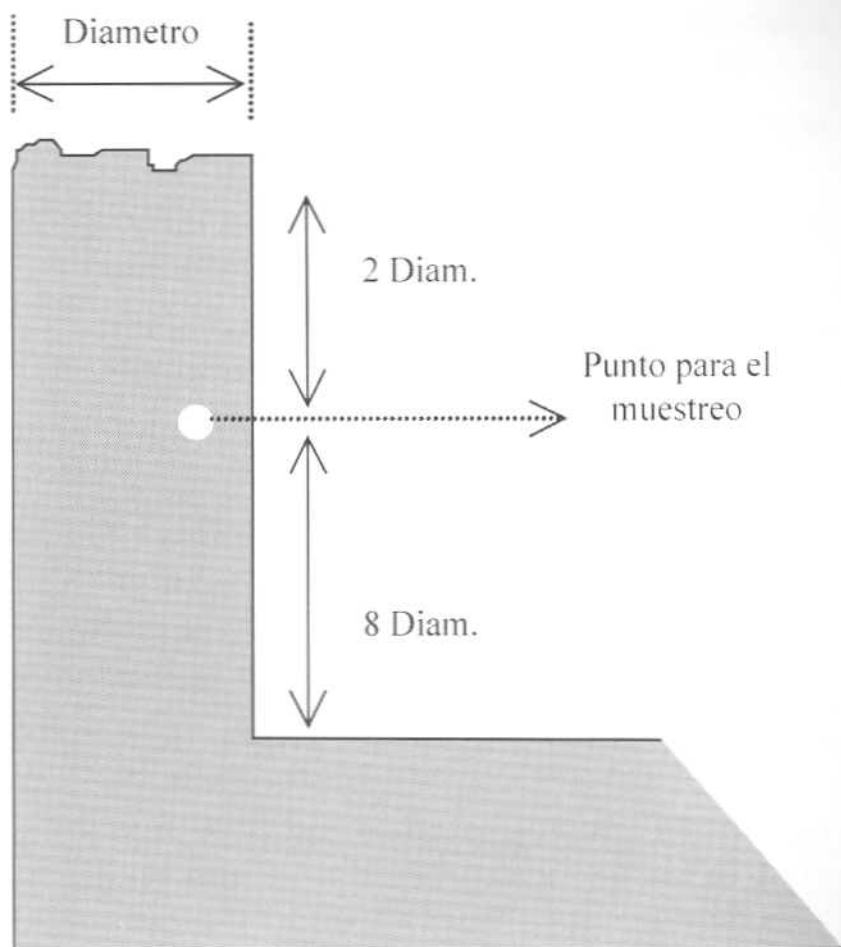
No se menciona en dicho Decreto norma de emisión para este contaminante.

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 40.

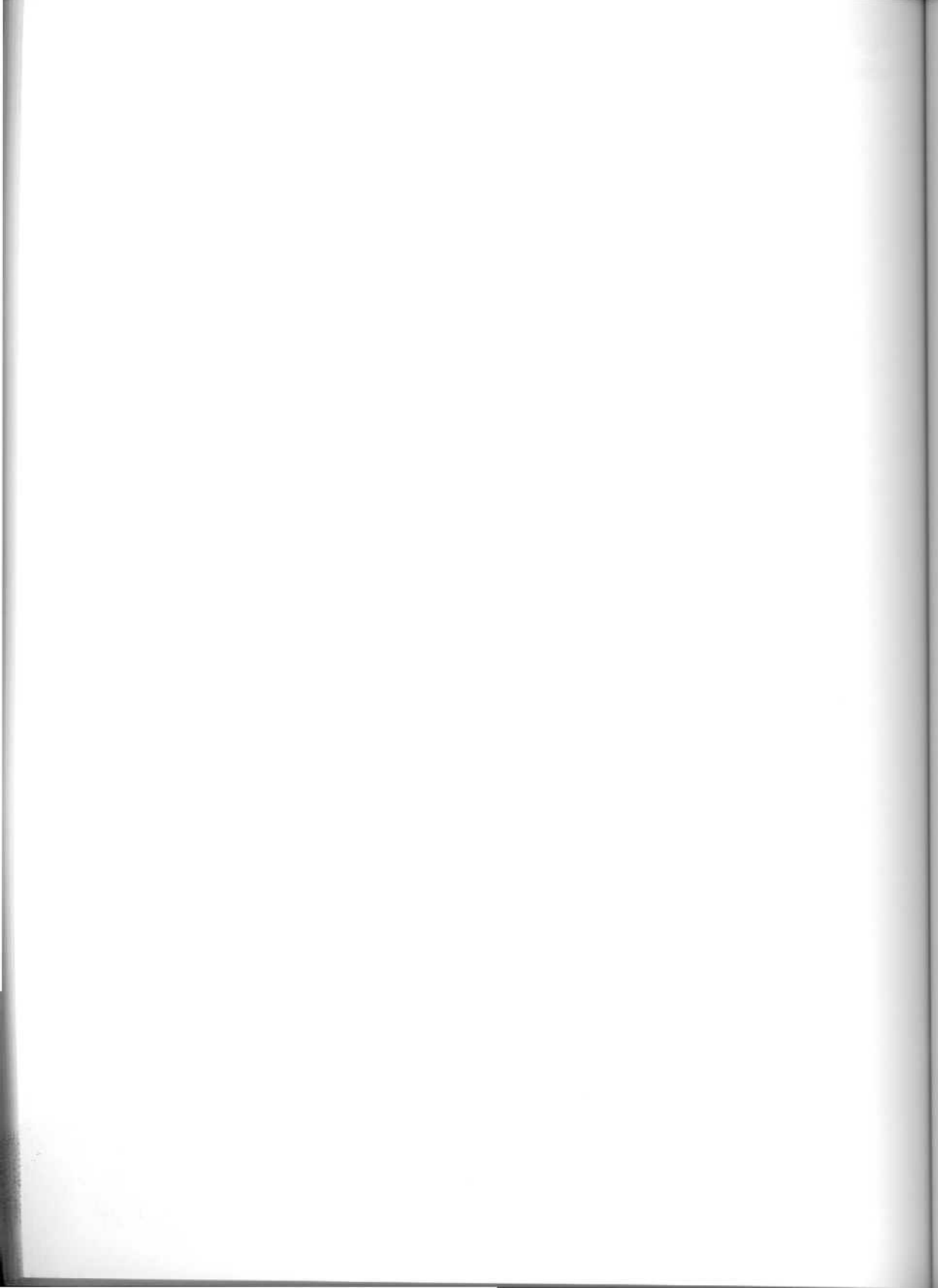
En el caso del material particulado, SO₂ y neblinas ácidas en las chimeneas, el equipo recolector de la muestra debe regularse adecuadamente para que la velocidad de la succión sea igual a la velocidad de los gases en la chimenea. De esta forma se garantiza que la concentración determinada en el laboratorio 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 40



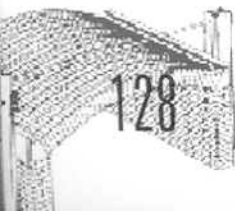


BIBLIOGRAFÍA

- [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 Carbones. 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, EEP de Medellín, Univ. Pontificia Bolivariana. Medellín. 1998.
- [17] THUMANN, Albert. Fundamentals of energy engineering. The Fairmont Press Inc. USA, 1984.
- [18] SINGER, P. E. Joseph G. "Combustion Fossil Power" Combustion Engineering Inc. Windsor, Connecticut, 1991.
- [19] TURNER Wayne C. (EDITOR) Energy Management Handbook, John 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 Technology, Marcel Dekker. Inc. New York, 1981.



LISTADO DE FIGURAS Y TABLAS

FIGURA 1: Curva típica de quema en un horno pampa. Materiales en parte superior e inferior.....	13
FIGURA 2: Horno llama invertida.....	14
FIGURA 3: Curva de temperatura en un horno de llama invertida....	15
FIGURA 4: Horno Hoffman.....	16
FIGURA 5: Curva típica de quema de un horno Hoffman.....	17
FIGURA 6: Horno tipo Túnel.....	18
FIGURA 7: Curva típica de quema para un horno túnel.....	18
FIGURA 8: Representación de la composición del carbón y la denominación de sus componentes.....	24
FIGURA 9: Metodología para la determinación de humedad total... 25	25
FIGURA 10: Metodología para la determinación de material volátil. .26	26
FIGURA 11: Metodología para la determinación de cenizas.....	26
FIGURA 12: Esquema ilustrativo para la determinación del poder calorífico bruto del carbón.....	29
FIGURA 13: Esquema ilustrativo del proceso de la combustión.....	41
FIGURA 14: Esquema ilustrativo de las diferentes etapas de la combustión de carbones.....	43
FIGURA 15: Esquema ilustrativo de la combustión de carbón pulverizado.....	46
FIGURA 16: Esquema ilustrativo de un hogar de parrilla.....	48
FIGURA 17: Dependencia de la producción del molino y el consumo específico de energía, en función de la humedad del carbón.....	68
FIGURA 18: Consumo específico de energía en molienda de acuerdo con el tipo de carbón y el tipo de molino....	69
FIGURA 19: Sistema de alimentación con tornillo para carbón pulverizado.....	71
FIGURA 20: Alimentación de carbón con banda.....	71
FIGURA 21: Sistema de alimentación de carbón por gravedad con clasificador móvil.....	72



FIGURA 22: Quemador de parrilla fija y alimentación por debajo.	73
FIGURA 23: Quemador de carbón pulverizado con varios inyectores.	74
FIGURA 24: Distribución cualitativa de la energía aportada por el combustible.	80
FIGURA 25: a. Volumen de control para horno continuo.	85
b. Volumen de control para hornos discontinuos etapa de calentamiento.	85
c. Volumen de control para hornos discontinuos etapa de enfriamiento.	85
FIGURA 26: Relación de la eficiencia de la combustión y de los porcentajes de pérdida en la chimenea y el porcentaje de CO ₂ y la temperatura de la chimenea.	89
FIGURA 27: Gráfico para calcular las pérdidas por paredes en hornos discontinuos.	92
FIGURA 28: Balance por etapas para horno pampa.	95
FIGURA 29: Balance de energías para horno de llama invertida.	96
FIGURA 30: Balance de energía para horno Hoffmann.	96
FIGURA 31: Diversos comportamientos de los consumos específicos en los hornos.	97
FIGURA 32: Efectos del precalentamiento del aire en combustión.	99
FIGURA 33: Control emisiones provenientes del carbón.	112
FIGURA 34: Colector inercial.	113
FIGURA 35: Precipitador electrostático.	114
FIGURA 36: Esquema Baghouse.	114
FIGURA 37: Lavador de gases.	115
FIGURA 38: Quemador de bajo NO _x	117
FIGURA 39: Quemador ciclónico.	117
FIGURA 40: Ubicación del punto de muestreo en una chimenea.	125

----- * -----

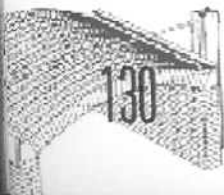


TABLA 1 - Clasificación de carbones según el rango	22
TABLA 2 - Poder calorífico superior promedio de algunos carbones colombianos	27
TABLA 3 - Composición promedio para diferentes carbones colombianos	31
TABLA 4 - Número de incrementos para suministros de hasta 1000 ton. según normas ISO	42
TABLA 5 - Composición del aire seco	
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 ₂ 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 - Valores típicos de rendimientos	83
TABLA 16 - Recolección y datos en los puntos estratégicos que se ilustran	86
TABLA 17 - Valores de cp promedio entre 273K y la temperatura Tg en KJ/Nm ³ °c	88
TABLA 18 - Valores del flujo de gases, capacidad calorífica y pérdidas en gases	88
TABLA 19 - 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	91
TABLA 20	- Pérdida de energía por presencia de carbono, hidrógeno y monóxido de carbono en los residuos	93
TABLA 21	- Comportamiento de la eficiencia con respecto al factor de carga del horno	103
TABLA 22	- Emisiones permisibles material particulado en calderas y hornos	120
TABLA 23	- Emisiones permisibles material particulado en calderas y hornos	121
TABLA 24	- Emisiones permisibles material particulado en calderas y hornos	123
TABLA 25	- Contenido de azufre total (%peso) del carbón mineral o sus mezclas, en base "como se recibe", a la entrada del sistema de combustión	123



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 958696018-8



9 789586 960182