XIV.- QUEMADORES Y SISTEMAS DE COMBUSTIÓN PARA CARBÓN PULVERIZADO

pfernandezdiez.es

Introducción	*513*
Combustión	*515*
Contenido en materias volátiles.	*516*
Partículas de subcoque (char)	*516*
Efecto del contenido en humedad	*517*
Efecto del contenido en materia mineral	*518*
Sistema de combustión del carbón pulverizado	*518*
Carbón pulverizado convencional	*518*
Carbones bajos en volátiles	*519*
Carbones altos en humedad	*520*
Integración del sistema de combustión y de la caldera	*521*
Principios fundamentales del quemador	*522*
Control	*522*
Estabilidad de la llama	*522*
Mezcla aire + combustible	*523*
Regímenes de flujos de aire primario y carbón	*524*
Pérdida por carbono inquemado	*525*
Requisitos de características operativas.	*525*
Quemadores convencionales para carbón pulverizado	*526*
Quemador convencional circular	*526*
Quemador alveolar	*527*
Quemador tipo S	*527*
Sistemas de combustión con bajos NO_x	*528*
Normativa y control de NO_x en la combustión; métodos	*528*
Quemador de cortatiros dual para carbón pulverizado, (DRB)	*531*
Quemador DRB - XCL (2^a generación)	*532*
Quemador DRB - 4Z (3^a generación)	*534*
Quemador AIREJET (4^a generación)	*536*
Quemador alveolar de bajos NO_x	*538*
Portillas de NO_x	*540*
OFA con quemadores de pared	*541*
OFA con sistemas de combustión en esquina	*544*
Quemadores para carbones difíciles	*548*
Quemador de ignición mejorada	*548*
Quemador con derivación de aire primario (PAX)	*549*
Equipo auxiliar	*549*
Equipos de combustión de fuelóleo/gas	*549*
Ignitores	*550*
Sistemas de seguridad de la llama	*551*
Seguridad y operatividad	*551*
Referencias	*552*

El método que se emplea en la actualidad en la combustión del carbón es el sistema de combustión en *hogar de carbón pulverizado*, que consiste en quemar el carbón finamente molido y mantenido como una suspensión de polvo fino en un *hogar abierto*. Los modernos quemadores de carbón pulverizado (PC) permiten lograr una alta eficiencia de combustión y unas bajas emisiones, mediante su integración en el diseño global del *generador de vapor*.

La combustión de un carbón pulverizado en un *lecho suspendido* difiere de otras tecnologías de combustión por $\begin{cases} \text{- } el\ menor\ tamaño\ de\ las\ particulas\ de\ carbón\ involucradas\ en\ el\ proceso \\ \text{- } los\ consecuentes\ altos\ regímenes\ de\ combustión \end{cases}$

El régimen de combustión del carbón se controla, en gran medida, por la superficie global que ofrece el conjunto de las partículas de combustible; con una pulverización del carbón equivalente a partículas con diámetro de 50 micras o menos, el carbón de cada partícula se puede quemar por completo en 1 ó 2 segundos, aproximadamente; esta velocidad de combustión es comparable al régimen del fuelóleo y gas natural.

Existen otras tecnologías que emplean *carbón troceado*, es decir, partículas de diversos tamaños y dimensiones mayores, que proporcionan tiempos de residencia mucho más largos en la zona de combustión, del orden de 60 segundos o más.

El carbón pulverizado se usó por primera vez hacia 1880, como un combustible efectivo para *hornos de cemento*; el contenido en ceniza mejoraba las propiedades del cemento y su bajo coste provocó una rápida sustitución de los combustibles *fuelóleo y gas* por el carbón pulverizado.

Los primeros equipos de pulverización no eran muy fiables, por lo que se desarrolló un sistema de combustión indirecta con un silo intermedio que hacía de compensador entre las etapas de pulverización y combustión del carbón. Posteriormente, el carbón pulverizado se empezó a usar en la industria siderúrgica de todo el mundo, aplicación que puso de relieve:

- *La importancia del secado*
- *La trascendencia del control inherente al tamaño de las partículas del carbón*
- *La necesidad de la alimentación uniforme del combustible*

El éxito en las aplicaciones de generadores de vapor para la combustión de carbón pulverizado, afectó a la geometría del hogar de la caldera de forma que los recintos de fuego y los bancos tubulares se tuvieron que agrandar para poder acomodar la combustión del carbón pulverizado; a finales de la década de 1920 se empezaron a utilizar los primeros hogares con paredes refrigeradas por agua, en avanzados sistemas de combustión para carbón pulverizado; los diseños de quemadores

progresaron hasta conseguir una
- *mejor estabilidad de la llama*
- *más perfecta mezcla combustible-comburente*
- *mayor temperatura de llama*
- *mejor eficiencia en la combustión*

Junto a las mejoras introducidas en el diseño de los pulverizadores, los quemadores más perfeccionados de carbón pulverizado han permitido el empleo del sistema de *combustión directa*, en el que el carbón pulverizado se transfiere directamente desde el pulverizador hasta los quemadores correspondientes. En la actualidad, la práctica totalidad de los diferentes tipos de carbón, desde antracita hasta lignito, se pueden quemar con el sistema de combustión directa de carbón pulverizado.

La investigación actual está centrada en la reducción de las emisiones de los NO_x, con vistas a la protección medioambiental, sin tener que sacrificar las características operativas o la disponibilidad en el generador de vapor.

XIV.1.- COMBUSTIÓN

La forma de quemar el carbón pulverizado depende de la categoría y propiedades del mismo, y de las particulares condiciones del hogar correspondiente.

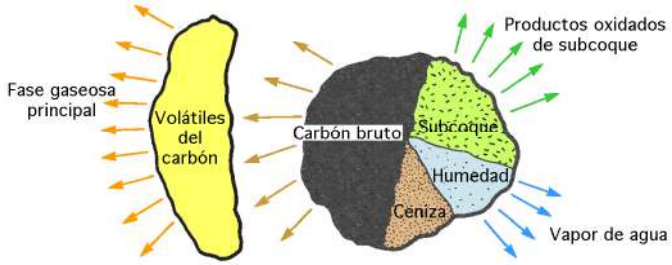


Fig XIV.1.- Combustión de una partícula de carbón

Cuando una partícula de carbón entra en el hogar, Fig XIV.1, su temperatura superficial aumenta debido a la transferencia de calor por radiación y convección, desde los dos tipos de fuentes:

- *Gases (humos) del hogar*
- *Otras partículas que se encuentran en combustión*

Conforme aumenta la temperatura de la partícula, la humedad de la misma vaporiza y las materias volátiles se desprenden, inflaman *(ignicionan)* y queman casi inmediatamente, aumentando la temperatura de la *partícula residual*, identificada normalmente como *subcoque (char),* que se consume a alta temperatura, dejando como residuo el contenido en *ceniza* y una pequeña parte de *carbono no quemado (*inquemado*)*.

Las materias volátiles, el carbono fijo (precursor del subcoque), la humedad y el contenido en ceniza del combustible, se cuantifican como porcentajes en peso, que configuran el denominado análisis inmediato.

Contenido en materias volátiles.- Las materias volátiles son elementos críticos para la estabilidad de la llama y para acelerar la combustión del subcoque (char). Los carbones que tienen un mínimo de materias volátiles, como las antracitas y los bituminosos bajos en volátiles, son difíciles de encender y requieren sistemas de combustión de diseño especial.

La cantidad de materias volátiles desprendidas de una partícula de carbón, depende de una serie de parámetros como $\begin{cases} su\ composición \\ temperatura\ a\ la\ que\ se\ expone \\ tiempo\ de\ exposición \end{cases}$

Para la determinación del contenido en materias volátiles, la Sociedad Americana para Ensayos y Materiales (ASTM), en su norma D-3175, estipula una temperatura de 950 ± 20ºC durante 7 minutos.

Al aumentar la temperatura, manteniendo invariables los demás parámetros, se incrementa la producción de materias volátiles desprendidas del carbón. Los carbones que tienen altos contenidos en materias volátiles facilitan un control más efectivo en la emisión de NO_x mediante los adecuados métodos de combustión.

La ignición de un carbón depende de la $\begin{cases} - \ calidad \\ - \ cantidad \end{cases}$ de materias volátiles que contenga.

Las materias volátiles de carbones bituminosos y de carbones de alto rango son ricas en hidrocarburos y tienen elevados poderes caloríficos que, por unidad de masa, pueden llegar al doble del que corresponde a los carbones de bajo rango.

Las materias volátiles de carbones de bajo rango incluyen grandes cantidades de CO y de humedad (procedente de la descomposición térmica); en consecuencia, los poderes caloríficos de los carbones de bajo rango son reducidos.

Partículas de subcoque (char).- La velocidad de combustión de una partícula de subcoque depende de varios factores, que incluyen $\begin{cases} - \ el\ tamaño\ de\ la\ partícula\ y\ su\ porosidad \\ - \ el\ medio\ ambiente\ térmico \\ - \ la\ presión\ parcial\ del\ oxígeno \end{cases}$

Las reacciones sobre el subcoque comienzan cuando la partícula de carbón se calienta y desprende las materias volátiles, continuando hasta completarse el desprendimiento de las materias volátiles; la mayoría de las veces, la liberación de materias volátiles se completa al cabo de 0,01 segundos, mientras que las reacciones sobre el subcoque continúan durante 1 ÷2 segundos; la partícula de subcoque retiene una pequeña fracción de hidrocarburos.

Las partículas pequeñas de subcoque, de diámetro 10 ÷20 micras, propician una elevada relación $\frac{Superficie}{Masa}$ y un rápido calentamiento; las partículas mayores se calientan con bastante más lentitud.

Muchos carbones sufren una deformación plástica y cuando se calientan se hinchan del orden de un $10 \div 15\%$, lo que puede influir de forma significativa en la porosidad de las partículas de carbón.

La *oxidación del subcoque* requiere que el oxígeno alcance al carbono de la partícula; la *combustión del subcoque* comienza gradualmente a temperaturas relativamente bajas. La *velocidad de reacción* depende de la $\begin{cases} \textit{- temperatura local} \\ \textit{- difusión del oxígeno} \\ \textit{- reactividad del subcoque} \end{cases}$

En las partículas grandes, la masa sólida se reduce con la formación de CO y CO_2, pero el volumen de las partículas se mantiene; las partículas más bastas (> 100 micras de diámetro), arden lentamente como consecuencia de su menor relación $\frac{Superficie}{Masa}$; los mayores tiempos de quemado inherentes a éstas partículas, hacen que éstas sigan reaccionando aguas abajo de la zona principal de combustión, donde la temperatura de la llama es mucho más moderada.

En las partículas de tamaños menores, la rápida transferencia de calor y la combustión correspondiente, conducen a mayores temperaturas de las partículas.

La *velocidad de reacción* aumenta exponencialmente con la temperatura; *la difusión del O_2 en el interior de la partícula* pasa a ser el parámetro de control. En este proceso se modifican el diámetro y la densidad de las partículas.

A temperaturas mayores de la partícula, las reacciones del subcoque son tan rápidas que se consume el O_2 antes de que pueda penetrar en la superficie de la partícula, que se reduce conforme se van consumiendo las porciones exteriores, y *el transporte del O_2 desde el medio ambiente hacia la partícula* se convierte en el parámetro que gobierna la velocidad de combustión.

Efecto del contenido en humedad.- El contenido en humedad que tiene el carbón influye en las características funcionales del proceso de combustión. En los sistemas de combustión directa del carbón pulverizado, toda la humedad del combustible se transporta hacia los quemadores; esta humedad dificulta la ignición del carbón, ya que el agua tiende a evaporarse y sobrecalentarse durante el desprendimiento de las materias volátiles de las partículas, por lo que las moléculas de agua se disocian y se absorbe más energía adicional a temperaturas elevadas.

Son normales humedades del $\begin{cases} \textit{15\% en carbones bituminosos altos en volátiles} \\ \textit{30\% en el caso de los sub-bituminosos} \\ \textit{40\% o más para algunos lignitos} \end{cases}$

Los contenidos en humedad superiores al 40% sobrepasan las posibilidades reales de ignición que tienen los sistemas convencionales de combustión del carbón pulverizado; en estos casos se precisan sistemas alternativos, que sean capaces de:

- Reforzar el secado durante la preparación del combustible, ó

- Poder separar al menos una parte de la humedad evaporada que va a quemadores

En todo caso, la humedad rebaja la temperatura de la llama e impide o dificulta el quemado del subcoque; ésto se compensa por las reactividades y porosidades, generalmente más elevadas, que suelen tener los carbones con humedad elevada.

Efecto del contenido en materia mineral.- La materia mineral o ceniza resultante de la combustión del carbón es inerte y minora el poder calorífico del combustible, por lo que cuando la ceniza aumenta, se requiere más peso de carbón para alcanzar un determinado nivel de aporte de calor neto en el hogar de la caldera o generador de vapor.

La ceniza absorbe calor al tiempo que interfiere la transferencia de calor por radiación hacia las partículas de carbón, por lo que dificulta el proceso de combustión, especialmente en el caso de carbones con alta ceniza.

El comportamiento de la materia mineral determina la tendencia a la escorificación de la ceniza del carbón y condiciona la combustión, al influir de forma notable en:

- La disposición del conjunto quemadores / hogar

- Las temperaturas de llama resultantes

- El tiempo de residencia correspondiente

XIV.2.- SISTEMA DE COMBUSTIÓN DEL CARBÓN PULVERIZADO

Carbón pulverizado convencional.- La combustión de carbón pulverizado resulta adecuada para casi la totalidad de los diversos tipos de carbones; la versatilidad de este sistema lo ha convertido en el método más predominante de combustión de carbón, a nivel mundial, y en particular para la generación de vapor en plantas termoeléctricas.

La mayoría de los carbones se queman como carbón pulverizado, en los sistemas convencionales de combustión, Fig XIV.2; en estos sistemas, los quemadores están ubicados en la parte inferior del hogar y, en general, se disponen en una o dos paredes del mismo, según sea su requerimiento.

El *aire primario*, tiene temperaturas de 130 ÷200ºF (54 ÷93ºC), transporta el carbón pulverizado directamente desde el pulverizador hasta los quemadores, a un régimen de velocidad que fija el correspondiente control de combustión, conforme a los requisitos de la demanda.

El *aire secundario* se suministra por los ventiladores de tiro forzado y se precalienta hasta unos 600ºF (316ºC); la mayor parte se suministra a las cajas de aire que envuelven a los quemadores; la fracción restante de este $aire_{secundario}$ se deriva del que va a quemadores y se dirige a las portillas de NO_x para controlar la formación de los mismos.

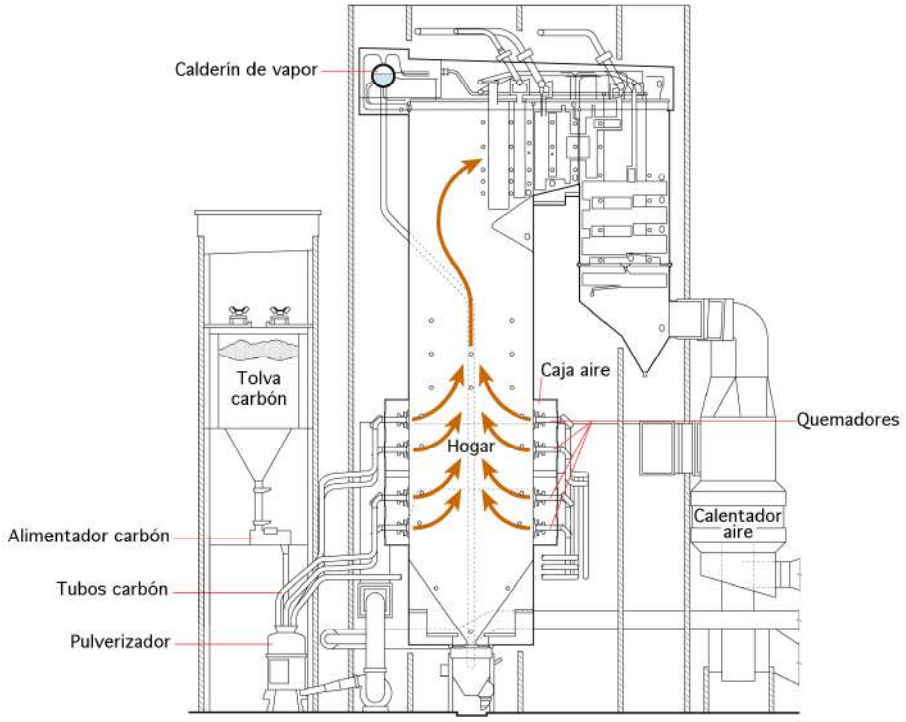


Fig XIV.2.- Sistema convencional que quema carbón pulverizado

El $aire_{secundario}$ suministrado a los quemadores se mezcla con el $\begin{cases} - \textit{ carbón pulverizado} \\ - \textit{ aire}_{primario} \textit{ de transporte} \end{cases}$ en la garganta del quemador, lo que permite que el carbón ignicione y comience a quemarse iniciándose el proceso de la combustión que continúa, al tiempo que $\begin{cases} - \textit{ los gases} \\ - \textit{ el combustible no quemado} \end{cases}$ se mueven desde la boca del quemador hacia el eje vertical del hogar de la caldera, por el que ascienden.

El quemado final del subcoque depende de: $\begin{cases} - \textit{ Las propiedades del carbón} \\ - \textit{ La finura de las partículas} \\ - \textit{ El exceso de aire} \\ - \textit{ La mezcla aire+combustible} \\ - \textit{ El medio ambiente térmico} \end{cases}$

Finalmente, los productos de la combustión abandonan el hogar y penetran en el paso de convección de la caldera, tras ser enfriados lo suficiente para minimizar el ensuciamiento de las superficies de convección.

Carbones bajos en volátiles.- La mayoría de las unidades de queman carbón pulverizado del tipo bituminoso, subbituminoso y lignito, se configuran de una forma parecida; para otros tipos de carbones, se requieren diseños alternativos.

Los carbones con bajos contenidos en materias volátiles, en particular las antracitas, tienen un difícil encendido debido a sus bajos contenidos de volátiles, que son de rápida combustión, lo que limita esta fuente de energía para la ignición; además, debido a su avanzado estado de carbonización, la reactividad del subcoque se reduce, lo que origina unas elevadas temperaturas de ignición y

de combustión, requiriéndose hogares más calientes para poder mantener la combustión; ésto se consigue con un sistema de combustión que cuente con llamas descendentes *o llamas en* U, Fig XIV.3, y un hogar revestido en gran parte de refractario; en el fuego descendente la llama tiene un primer recorrido hacia abajo y, tras su giro, efectúa un segundo recorrido ascendente, para dirigirse hacia la salida del hogar.

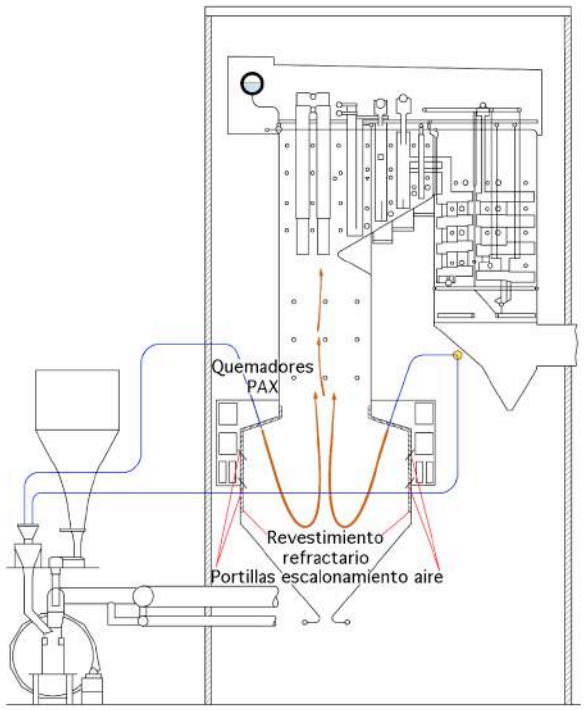


Fig XIV.3.- Unidad de fuegos verticales con hogar revestido de refractario para carbones bajos en volátiles y quemadores PAX

El calor de este tipo de llama suministra desde el hogar, la energía necesaria para la ignición del combustible que sale por los quemadores.

El hogar inferior está agrandado para facilitar un mayor tiempo de residencia, y así amoldarse a la más lenta combustión del carbón pulverizado que siempre tiene una finura muy elevada, con el fin de acelerar las reacciones del subcoque y reducir las pérdidas por carbono inquemado.

El aumento del tamaño de las unidades y las legislaciones que reducen las emisiones de NO_x han limitado las unidades con fuegos descendentes en USA, aunque internacionalmente se han aplicado en aquellos casos en los que los carbones con pocos volátiles constituyen una relevante fuente energética.

Carbones altos en humedad.- Otra categoría importante de unidades no convencionales que queman carbón pulverizado, está compuesta por los generadores de vapor que consumen lignitos con un elevado contenido en humedad que oscila entre el 50÷70% en peso, lo que supera el límite que se puede secar en los pulverizadores con extracción por chorro de aire; en esta situación, en vez de estos pulverizadores, para secar y preparar el combustible se utilizan gases calientes procedentes de la parte alta del hogar a 1.832ºF (1.000ºC), en combinación con molinos de martillos; no se utiliza aire caliente, porque éste tiene un límite práctico de 752ºF (400ºC).

El bajo contenido en O_2 de estos gases propicia una atmósfera relativamente inerte para el equipo de molienda, disminuyendo el riesgo de incendio o explosión cuando los gases calientes se mezclan con carbones tan reactivos. El combustible se transfiere desde los molinos hasta los quemadores situados en unas secciones de paredes casi horizontales (bóvedas), provocándose la com-

bustión cuando el $aire_{secundario}$ se mezcla con el combustible, dentro del hogar. Unidades con este tipo de diseño predominan en algunos países de Europa y Australia, en los que se utilizan carbones pardos (lignitos) que tienen unas elevadas humedades.

Integración del sistema de combustión y de la caldera.- Los factores más importantes que determinan el diseño de la caldera son $\begin{cases} \text{- los requisitos de producción de vapor} \\ \text{- el carbón que se va a quemar} \end{cases}$

El ciclo termodinámico define los requisitos de *absorción de calor* para la caldera, que es la que suministra el flujo de vapor a la presión y temperatura diseñadas. Los parámetros del lado de gases basados en el carbón de diseño, se emplean para estimar la eficiencia de la caldera.

Los requisitos de *aporte de calor* por parte del carbón se determinan ajustando el régimen de consumo de carbón (combustión) para la carga máxima. Seguidamente se seleccionan el número y tamaño de los pulverizadores o molinos de combustible. La selección del pulverizador se basa en conseguir los máximos requerimientos con uno de ellos fuera de servicio; ésto permite realizar trabajos de mantenimiento en un pulverizador, sin tener que limitar la carga de la caldera.

El tamaño y la configuración del hogar se diseñan para asumir adecuadamente la combustión y las características del carbón, en cuanto a escorificación y ensuciamiento. En el proyecto de los modernos sistemas de combustión se incorporan también los factores de control de emisión de NO_x.

El $\begin{cases} \text{número de quemadores} \\ \text{aporte calorífico por quemador} \end{cases}$ se seleccionan de forma que se minimice el impacto de las llamas sobre las paredes del hogar. Resulta conveniente un conjunto de quemadores múltiples, de aporte moderado, en una disposición de fuegos opuestos, que facilita una distribución más uniforme en todo el hogar del calor aportado globalmente por el conjunto de quemadores; de esta forma se $\begin{cases} \text{- reducen los gradientes térmicos} \\ \text{- contribuye a evitar las escorificaciones locales} \end{cases}$, a la vez que se mejora el $\begin{cases} \text{- control de emisiones de } NO_x \\ \text{- rendimiento de la caldera} \end{cases}$

El diseño del quemador de basa en los $\begin{cases} \text{- parámetros del combustible} \\ \text{- requisitos de control de emisión de } NO_x \end{cases}$, con el fin de facilitar una información completa y una mínima emisión contaminante.

La cantidad de $aire_{teórico}$ y del $aire_{exceso}$ se determinan para el régimen requerido de aporte de calor, a partir de los cálculos de aire comburente.

Los $\begin{cases} \text{ventiladores} \\ \text{conductos} \\ \text{calentadores de aire} \\ \text{cajas de aire} \\ \text{quemadores} \end{cases}$ se dimensionan para satisfacer los requisitos de $\begin{cases} \text{flujo} \\ \text{caídas de presión} \\ \text{calentamiento} \\ \text{velocidad del aire} \end{cases}$, en todas las zonas de la unidad generadora de vapor.

Para cumplimentar los requisitos de emisiones, se puede utilizar la combustión en etapas o

combustión escalonada en el hogar, inyectando aire aguas debajo de la zona de quemadores, portillas de NO_x.

Principios fundamentales del quemador.- Los quemadores constituyen los elementos centrales del diseño de sistemas de combustión; incorporan: $\begin{cases} \text{- } la\ preparación\ del\ combustible \\ \text{- } la\ distribución\ de\ la\ mezcla\ aire{+}combustible \\ \text{- } el\ diseño\ del\ hogar \\ \text{- } el\ control\ de\ la\ combustión \end{cases}$

Los quemadores introducen y mezclan el combustible y el $aire_{comburente}$, tal como se representa en la Fig XIV.4.

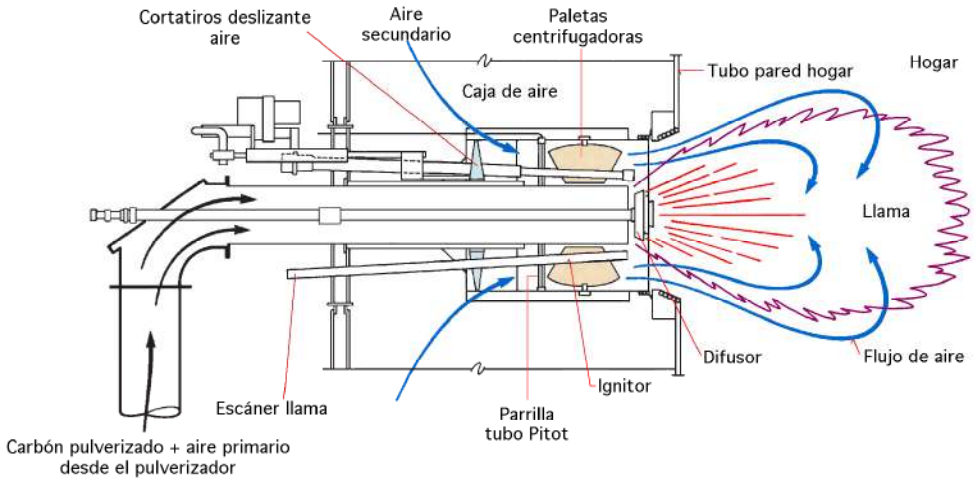


Fig XIV.4.- Quemador tipo S y componentes

Control.- Las cantidades de $\begin{cases} \text{- } carbón\ pulverizado \\ \text{- } aire_{primario} \end{cases}$ suministradas a los quemadores, vienen reguladas por el sistema de control del régimen de alimentación de los mismos; en las tuberías que unen los pulverizadores a sus respectivos quemadores se incluyen unas restricciones determinadas, para una más adecuada distribución del combustible entre los diversos quemadores.

El flujo de $aire_{secundario}$ se controla por los cortatiros de los ventiladores de *tiro forzado*, para mantener el adecuado $aire_{exceso}$ requerido por una $\begin{cases} \text{- } buena\ combustión \\ \text{- } óptima\ operación\ de\ caldera \end{cases}$

La distribución del $aire_{secundario}$ se cumplimenta por medio de $\begin{cases} \text{- } cortatiros\ en \begin{cases} \text{- } conductos \\ \text{- } cajas\ de\ aire \end{cases} \\ \text{- } ajustes\ en\ el\ quemador \end{cases}$

Estabilidad de la llama.- El quemador introduce el $\begin{cases} \text{- } carbón\ pulverizado \\ \text{- } aire_{primario} \end{cases}$ en el flujo de $aire_{secundario}$ de tal manera que configure un frente de llama estable cerca de la boca del quemador a lo largo de todo el campo de condiciones operativas.

Para iniciar la combustión se requiere un ignitor o un encendedor cuando:

- El combustible comienza a introducirse en el quemador

- Hay que sustentar la combustión si la llama fuese inestable

El quemador mantiene una llama estable por el calor procedente de la combustión del carbón, procurando la ignición del combustible nuevo que va llegando al mismo.

Los quemadores modernos incluyen un sistema de seguridad de la llama que la escanea electrónicamente, para $\begin{cases} \text{- comprobar su estabilidad} \\ \text{- introducir acciones correctoras en el caso de que la llama se haga inestable} \end{cases}$

Mezcla aire+combustible.- El quemador contribuye a la mezcla íntima y total del aire y el combustible, para que el carbón se queme completamente.

La mezcla total es una combinación de las mezclas favorecidas por el $\begin{cases} \text{- quemador} \\ \text{- hogar} \end{cases}$

La mezcla favorecida por el hogar es consecuencia de la expansión en el mismo de la mezcla aire+combustible, lo que se debe a: $\begin{cases} \text{- el rápido incremento de la temperatura durante la combustión} \\ \text{- las variaciones de flujo introducidas por los quemadores} \\ \text{- el tamaño y configuración del cerramiento del hogar} \end{cases}$

La cantidad de mezcla aire+combustible que es capaz de manipular un quemador, varía considerablemente con el tipo de quemador.

Los quemadores simples inyectan por separado el combustible y el aire, en flujos paralelos concéntricos, sin aprovechar otras mezclas inducidas por el propio quemador.

El arrastre por corrientes de flujo adyacentes tiene lugar cuando éstas se desarrollan y como consecuencia de la expansión derivada del proceso de combustión; los hogares de fuegos tangenciales y algunos diseños de quemadores en bóvedas, operan de esta forma.

La longitud de la llama y las características operativas de la combustión dependen de la efectividad de la mezcla que se haya propiciado en el hogar, que decrece al mismo tiempo que la carga de la caldera, a consecuencia de la disminución de los regímenes de los flujos de aire y combustible, lo que conduce a unas pobres características operativas de la combustión, cuando se tienen cargas reducidas en caldera. Los modernos quemadores de pared facilitan una mezcla de aire y combustible más controlable, que varía con el régimen de fuego de los quemadores.

Para cargas reducidas en caldera, se consiguen mezclas de aire y combustible adecuadas, mediante la operación simultánea de pocos quemadores en servicio, que soporten individualmente mayores tasas de fuego.

La mezcla local propiciada por el quemador se induce por $\begin{cases} \text{- el aire}_{primario} + \text{carbón pulverizado} \\ \text{- el aire}_{secundario} \\ \text{- una combinación de ambos} \end{cases}$

Respecto al sistema flujo de aire$_{primario}$+carbón pulverizado, los dispositivos de mezcla del quemador que se utilizan más frecuentemente, son los $\begin{cases} \text{- deflectores} \\ \text{- perfiles escarpados} \\ \text{- generadores de torbellino} \end{cases}$

- Los deflectores o difusores del chorro de combustible reducen la componente axial de la cantidad de movimiento, con lo que disminuye la longitud de la llama, estos difusores deben introducir en el chorro un torbellino con desarrollo radial para acelerar aún más la mezcla.

- Los perfiles escarpados se utilizan, $\begin{cases} \text{a veces, dentro del propio quemador, ó} \\ \text{en la zona adyacente a la garganta del mismo} \end{cases}$ *; el flujo se* $\begin{cases} \text{- acelera localmente aguas arriba del perfil escarpado} \\ \text{- recircula aguas abajo del mismo, removiendo y activando la mezcla} \end{cases}$ *; los perfiles escarpados se emplean también para aumentar el tiempo de residencia de una parte del combustible en las proximidades del quemador y con ello mejorar la estabilidad de la llama.*

El generador de torbellino por aire$_{secundario}$ es el sistema más común para inducir la mezcla aire+combustible, en el caso de quemadores que tengan garganta circular. Los generadores de torbellino se utilizan aguas arriba de la garganta del quemador, para dar al aire un movimiento de rotación, cuando abandona la garganta del quemador, con una velocidad que tiene componentes radial, tangencial y axial.

Los gradientes de presión radial y axial configuran el campo del flujo aguas abajo de la garganta. Si el torbellino se incrementa, aumentan los gradientes de presión, lo que provoca que el flujo se invierta y viaje hacia la zona de baja presión a lo largo del eje de la llama, produciéndose un flujo de recirculación próximo al quemador.

Regímenes de flujos de aire$_{primario}$ y carbón.- Los requisitos de *aire$_{primario}$* se determinan a partir de los datos del pulverizador y los tubos a quemadores que se deben adecuar a los propios quemadores, que requieren del orden del $40 \div 70\%$ del total de *aire$_{primario}$* correspondiente a la plena carga, para alcanzar su mínima capacidad individual.

La mezcla de *aire$_{primario}$+carbón pulverizado* que va a los quemadores, se transporta a una velocidad de ≈ 3.000 ft/min (15 m/s), con lo que se evita la deposición de partículas de carbón suspendidas en el flujo de aire que puede tener lugar en los tramos horizontales de los tubos de carbón.

El flujo de *aire$_{primario}$* mínimo es el mayor de los dos siguientes flujos mínimos requeridos:

- Por el pulverizador

- Para satisfacer los límites de velocidad lineal exigidos por el quemador

En condiciones de plena carga la mezcla transportada alcanza un máximo de $\begin{cases} \text{velocidad} \\ \text{carga de sólidos} \end{cases}$ cuando varía proporcionalmente con la capacidad del molino al reducir su carga.

Conforme aumenta la velocidad en la garganta del quemador, el punto de ignición se desplaza gradualmente alejándose del quemador; si la velocidad en la garganta del quemador continúa creciendo, se puede llegar al soplado de la llama, lo que constituye un peligro por la pérdida de ignición

y estabilidad de la llama; las altas velocidades en la garganta del quemador pueden acelerar la erosión de algunos componentes del quemador.

La relación de la carga de sólidos en peso $\frac{carbón\ pulverizado}{aire\ primario}$ tiene un valor:

- Máximo comprendido entre 0,4÷0,65 en condiciones de plena carga del pulverizador

- Mínimo entre 0,15÷0,30 en condiciones de mínima carga del pulverizador

La reducción de la carga $\frac{carbón\ pulverizado}{aire\ primario}$, puede producir eventualmente inestabilidad de la llama, disminuyendo la temperatura de la misma.

Temperatura.- La temperatura de la mezcla *aire*$_{primario}$+*carbón pulverizado* suministrada a los quemadores, depende de las propiedades del carbón bruto.

Para carbones reactivos, con elevada humedad, la temperatura mínima requerida es de ≈ 130°F (54°C)

Para carbones bituminosos, con alto contenido en materias volátiles, la temperatura de la mezcla aire$_{primario}$*+carbón pulverizado, es de ≈ 150°F (66°C)*

Para mejorar la ignición de carbones con pocos volátiles, se utiliza una temperatura que como máximo no sobrepase los 200°F (93°C), para limitar las solicitaciones mecánicas en el pulverizador.

Pérdidas por carbono inquemado.- En cualquier caldera, una pequeña parte del carbón no se quema por completo, lo que implica una disminución de la eficiencia de la unidad, que se cuantifica en menos de un 1% como pérdida por inquemados y que se calcula teniendo en cuenta los datos siguientes:

- *Configuración del sistema de combustión + hogar*
- *Medio ambiente térmico del hogar*
- *Reactividad del carbón pulverizado*
- *Exceso de aire*

REQUISITOS DE CARACTERÍSTICAS OPERATIVAS.- El equipo destinado a quemar carbón pulverizado debe satisfacer las siguientes condiciones, relativas a características operativas:

a) Los regímenes de alimentación de carbón y aire deben cumplimentar la demanda de carga, en un determinado campo operativo.

En aplicaciones modernas con carbones
- *bituminosos altos en volátiles*
- *subbituminosos*

, con cualquier carga de la unidad superior al 30%, las llamas tienen que ser estables sin utilizar ignitores y/o pilotos.

La carga mínima depende de
- *el tipo de carbón*
- *el diseño del quemador*
- *la carga del pulverizador*

El funcionamiento por debajo de la carga mínima se realiza siempre con ayuda de ignitores y/o pilotos.

b) La pérdida por combustible inquemado reduce la eficiencia en menos del 1%.

- Con carbones reactivos, subbituminosos o lignitos, la pérdida por inquemados es inferior al 0,2%.

- Aumenta con carbonos bituminosos (menos reactivos) y con calderas de pequeña capacidad, inferior a 400.000 lb/h (50,4 kg/seg).

c) El quemador, para mantener sus características operativas, no debe precisar de ajustes continuos; la unidad se diseña para evitar la formación de deposiciones localizadas de escoria que puedan interferir en las características operativas del generador de vapor o dañar la propia caldera.

d) Durante una indisponibilidad programada anual, sólo deben ser precisos pequeños trabajos de mantenimiento. Para evitar daños por alta temperatura, en las partes del quemador se usan aceros aleados:

- Expuestas a la radiación (termotransferencia radiativa) del hogar

- Sometidas a la erosión del carbón pulverizado que pueden requerir reparaciones o sustituciones más frecuentes

e) La seguridad debe ser lo principal en todas las condiciones de operación. Los sistemas de seguridad de llama y de control se recomienda sean automatizados.

XIV.3.- QUEMADORES CONVENCIONALES PARA CARBÓN PULVERIZADO

Hasta 1970, el desarrollo de sistemas de combustión se dirigía, principalmente, a lograr diseños de calderas compactas *y* baratas. Los sistemas de quemadores que se desarrollaron tenían el objetivo de conseguir un máximo aporte de calor por unidad de volumen, lo que implicaba pequeños volúmenes de hogar con quemadores de mezcla rápida y temperatura de llamas muy alta, lo que implicaba la producción de altos niveles de emisión de NO_x. Los quemadores que se utilizaban en esas unidades se podían agrupar en tres tipos, quemador $\begin{cases} - convencional\ circular \\ - alveolar \\ - tipo\ S \end{cases}$, en donde el quemador tipo S es una versión mejorada del quemador circular que, mecánicamente, resulta mas fiable

Quemador convencional circular.- Es una de las primeras configuraciones de quemadores estabilizados por torbellino para carbón pulverizado, Fig XIV.5. Debido al éxito obtenido, este quemador se ha utilizado durante seis décadas para quemar una gran variedad de carbones, en una gran diversidad de tamaños de calderas; en algunos casos se sigue utilizando en la actualidad.

El quemador circular se compone de una tobera a la que se suministra el flujo $aire_{primario}$+*carbón pulverizado*, dotada de un difusor en su extremo para dispersar el carbón hacia el flujo de $aire_{secundario}$, que entra en el recinto del quemador a través de un cortatiros, que consiste en un conjunto de paletas dispuestas en configuración circular, entre dos placas.

Cuando el quemador está fuerza de servicio estas paletas se cierran sólo hasta la posición de

refrigeración; para el encendido del quemador se abren parcialmente hasta la posición de ignición y llegan a la abertura total con el funcionamiento nominal del quemador.

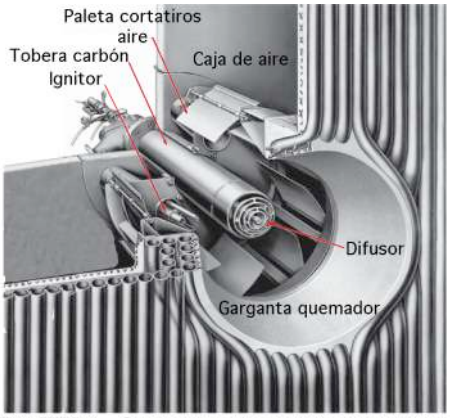


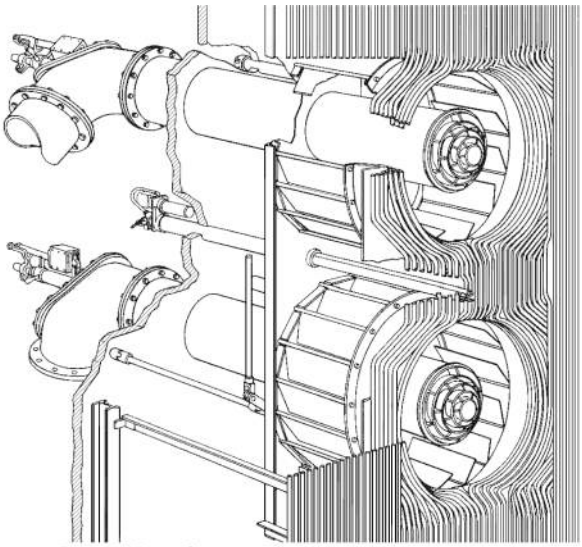
Fig XIV.5.- Quemador de carbón pulverizado con cortatiros circular

Cuanto más abiertas están las paletas del cortatiros, más aire se permite a la entrada del quemador, lo que reduce automáticamente el torbellino, modificándose el *perfil* de la llama; la distribución de aire en el quemador viene afectada por la posición del cortatiros y, como es sabido, un alto rendimiento de la combustión depende de la distribución uniforme que se consiga en el flujo de aire+combustible.

En el quemador circular se pueden quemar, indistintamente, $\begin{cases} gas\ natural \\ fuelóleo\ (aceite) \\ carbón\ pulverizado \end{cases}$, pero no se recomienda el uso simultáneo de combustibles distintos en un mismo recinto quemador, debido a un posible exceso de fuego (sobrecombustión), y a los problemas que de dicho exceso se pueden derivar.

Las distintas variantes del quemador circular que se encuentran en operación, cubren un campo de aportes de calor que va desde $(50 \div 300).10^6$ Btu/h, (15 ÷88 MW).

En general, las unidades de aportes moderados facilitan una distribución más uniforme del calor en la zona de combustión y, por tanto, mejoran la operación de la unidad.


Fig XIV.6.- Quemador alveolar convencional

Quemador alveolar.- El quemador alveolar combina dos o tres quemadores circulares dispuestos como un conjunto en una disposición vertical que, a todos los efectos, funciona como una única unidad Fig XIV.6.

En las décadas 1960/70, el quemador alveolar se aplicó a muchas calderas de plantas generadoras termoeléctricas, que tenían compactas zonas de quemadores; estas unidades eran de elevada eficiencia, pero con este tipo de quemadores se producían siempre altos niveles de emisión de NO_x.

Quemador tipo S.- El quemador tipo S conserva las principales características funcionales del quemador circular, pero cuenta con una configuración mejorada, Fig XIV.4. La garganta o tobera del quemador es prácticamente la misma que la del quemador circular. Sin embargo, el flujo de $aire_{secundario}$ y el torbellino que se induce al flujo de aire se controlan por separado.

El flujo de $aire_{secundario}$ se controla mediante un disco deslizante, que se aleja o acerca al cuer-

po del quemador; el torbellino de $aire_{secundario}$ se obtiene por medio de unas paletas centrifugadoras ajustables, ubicadas en el cuerpo del quemador; el control del torbellino que permite perfilar la llama del quemador, se consigue actuando adecuadamente sobre las paletas centrifugadoras.

Para la medida del caudal de $aire_{secundario}$ se cuenta con una parrilla de tubos Pitot, colocadas delante de las paletas centrifugadoras; el $aire_{secundario}$ se mide para cada quemador, con el fin de conseguir una distribución uniforme del flujo entre todos los quemadores, lo que se puede realizar mediante discos deslizantes u otros procedimientos.

El quemador tipo S permite una mayor eficiencia de la combustión y más fiabilidad mecánica que el quemador circular convencional, siendo muy sencilla su sustitución por otro quemador de reserva.

XIV.4.- SISTEMAS DE COMBUSTIÓN CON BAJOS NO_x

NORMATIVA Y CONTROL DE NO_X EN LA COMBUSTIÓN Los óxidos de nitrógeno NO_x constituyen un subproducto indeseable de la combustión de combustibles fósiles; sus emisiones están reguladas por legislaciones diversas y de todo tipo a nivel universal. La eficacia de la tecnología de control de los NO_x procedentes de la combustión del carbón pulverizado, depende de las características del combustible y del diseño global del sistema.

En unidades que utilizan carbón pulverizado y que tienen paredes de hogar refrigeradas por agua, las emisiones de NO_x que producen los sistemas convencionales de combustión, se resumen en un margen entre $0,8 \div 1,6$ lb / 10^6Btu, ($984 \div 1.968$ mg/m^{3}N).

La Agencia Internacional de la Energía (IEA) ha adoptado la siguiente equivalencia, a efectos de conversión para gases secos, con 6% de oxígeno y 350 m^{3}N/GJ , para el caso del carbón:

$$1.230\ mg/m^3N = 1\ lb/10^6\ tBu\ ,\ con\ N \equiv\ en\ condiciones\ normales \Rightarrow m^3N \equiv m^3\ Normal$$

Los sistemas de combustión de carbón pulverizado con bajos NO_x son capaces de reducir el margen anterior hasta $0,2 \div 0,7$ lb/10^6 Btu, ($246 \div 861$ mg/m^{3}N).

Del total de los NO_x que se forman en la combustión del carbón pulverizado, más del 75% tiene su origen en el combustible, es decir, procede del nitrógeno contenido en el mismo; las medidas más eficaces para su reducción son las que se ejecutan sobre el proceso de combustión.

El NO_x del combustible se forma por la oxidación del nitrógeno liberado del combustible durante los procesos de $\begin{cases} - \textit{ desprendimiento de volátiles} \\ - \textit{ quemado del subcoque} \end{cases}$

El contenido normal de nitrógeno en un carbón está ligado a su materia orgánica, en el campo

de 0,5 ÷2%; durante el desprendimiento de volátiles con la $\begin{cases} \text{- } elevada\ disponibilidad\ de\ oxígeno \\ \text{- } alta\ temperatura\ de\ llama \end{cases}$, se facilita la formación del NO_x, a partir del nitrógeno liberado con las materias volátiles.

El nitrógeno que queda retenido en el subcoque no es tan eficiente en la conversión a NO_x, debido a la menor disponibilidad de oxígeno que hay durante el quemado del subcoque. Los carbones más reactivos, con alto contenido en volátiles y con una baja relación $\frac{carbono\ fijo}{materias\ volátiles}$ resultan más susceptibles para un posible control de los NO_x mediante una adecuada modificación de las condiciones de combustión.

El proceso más efectivo de reducir la formación de NO_x procedentes del combustible, consiste en disminuir la disponibilidad de oxígeno (aire) durante la etapa de desprendimiento de materias volátiles; posteriormente se añade aire para $\begin{cases} \text{- } completar\ las\ reacciones\ sobre\ el\ subcoque \\ \text{- } mantener\ una\ alta\ eficiencia\ de\ combustion\ en\ la\ unidad \end{cases}$

La disponibilidad del O_2 durante el proceso de desprendimiento de materias volátiles, se puede reducir de varias formas.

Primer método.- *Consiste en desviar una porción del* $aire_{comburente}$ *que va al quemador, e introducirlo en otro lugar del hogar del generador de vapor; este método se denomina escalonamiento de aire.*

Los sistemas de combustión del carbón pulverizado operan con un $aire_{exceso}$ de $15 \div 20\%$ a plena carga. En algunas situaciones con escalonamiento de aire, es suficiente reducir el $aire_{exceso}$ en quemadores hasta un 10% para controlar las emisiones de NO_x, en un nivel determinado, lo que permite que los quemadores puedan seguir operando en condiciones de $aire_{exceso}$.

Si se reduce el flujo de aire por debajo del valor correspondiente al estequiométrico, se pueden disminuir aún más las emisiones de NO_x, lo que se debe a la significativa fracción de la combustión que se pospone a $\begin{cases} \text{- } los\ altos\ flujos\ de\ aire \\ \text{- } las\ elevadas\ velocidades\ de\ mezcla \end{cases}$, que se precisan para completar la combustión con posterioridad.

Cuando se usan carbonos bituminosos, el funcionamiento del quemador con menos aire que el teórico, incrementa la $\begin{cases} \text{- } pérdida\ por\ C_{inquemado} \\ \text{- } escorificación\ en\ la\ zona\ de\ combustión \end{cases}$, al mismo tiempo que aumenta el riesgo de corrosión en el hogar.

La pérdida por $C_{inquemad}$ se controla $\begin{cases} \text{- } aumentando\ la\ finura\ del\ carbón \\ \text{- } controlando\ el\ reparto\ del\ aire\ entre \begin{cases} los\ diversos\ quemadores \\ las\ portillas\ del\ escalón\ de\ aire \end{cases} \end{cases}$

La escorificación se minimiza mediante $\begin{cases} \text{- } una\ adecuada\ disposición\ de\ quemadores \\ \text{- } un\ apropiado\ diseño\ de\ los\ mismos \end{cases}$

El sulfuro de hidrógeno (H_2S) se forma durante la combustión de carbones que contienen S, en

condiciones reductoras o deficientes de oxígeno; la *corrosión en tubos* por el ataque del H_2S es un problema preocupante cuando se queman carbones con alto contenido en S en condiciones estequiométricas, y depende de $\begin{cases} \text{- la concentración de } H_2S \\ \text{- el material tubular} \\ \text{- la temperatura tubular} \\ \text{- las condiciones de operación} \end{cases}$

Esta corrosión se reduce $\begin{cases} \textit{sustituyendo el carbón por otro con menos S} \\ \textit{recubriendo los tubos de la zona de quemadores con un metal anticorrosivo} \end{cases}$

Segundo método.- *Consiste en reducir la disponibilidad de oxígeno durante el desprendimiento de volátiles del carbón, y radica en el diseño del quemador para recibir todo el aire$_{comburente}$, limitando la velocidad de introducción en la llama.*

Durante el período de desprendimiento de volátiles, hay que procurar que sólo una fracción del aire se mezcle con el carbón; el resto del aire se mezcla con posterioridad, aguas abajo de la llama, para completar la combustión. Por lo tanto, la mezcla global se reduce y la envolvente de la llama es más grande en comparación con la convencional de mezcla rápida.

Con la utilización de quemadores de bajo NO_x, la emisión de NO_x se reduce a un 30 ÷60% de la emisión correspondiente a unidades con quemadores convencionales.

Los quemadores de bajo NO_x se pueden combinar con los de escalonamiento de aire mediante portillas de NO_x, para cumplimentar los límites correspondientes de emisiones; desde un punto de vista económico y de las características operativas, las portillas de NO_x se deben minimizar.

Tercer método.- *Consiste en reducir las emisiones de NO_x por recombustión o escalonamiento de combustible (introducción del combustible en varias etapas); con esta técnica de control se destruyen los NO_x formados previamente.*

La mayor parte del combustible se quema en el hogar, en condiciones próximas a la estequiométrica; el resto del combustible, con una limitada cantidad de aire, se inyecta para crear una zona reductora en el desarrollo del proceso de combustión.

Las condiciones reductoras forman radicales de hidrocarburos que toman el oxígeno de los NO_x; el aire necesario para completar la combustión, se añade a continuación.

Algunos sistemas de escalonamiento de combustible incluyen quemadores separados o inyectores de combustible, seguidos de portillas de NO_x que se encargan de suministrar el *aire$_{comburente}$* restante.

Existen quemadores avanzados de bajo NO_x dotados de un sistema de escalonamiento de combustible que opera cuando se está suministrando el 100% de todo el combustible a los quemado-

res; una fracción del combustible se introduce por la vía habitual para formar los radicales de hidrocarburos y el resto se mezcla más tarde con la llama, para reducir los NO_x formados previamente; con estos quemadores avanzados se pueden alcanzar reducciones del 50 ÷70%, respecto a las emisiones correspondientes a unidades que carecen de todo tipo de control de los NO_x.

XIV.5.- QUEMADOR DE CORTATIROS DUAL PARA CARBÓN PULVERIZADO, (DRB)

Desde la década de 1950, B&W ha experimentado diversas técnicas para reducir la formación de los NO_x en los quemadores de carbón pulverizado.

Un primer paso fue el quemador de lumbreras, en el que se incorporó un control de la mezcla aire+combustible; el aire introducido a través de la garganta del quemador se mezclaba rápidamente con la llama, mientras que el aire desviado hacia unas lumbreras exteriores se mezclaba gradualmente; este diseño de quemador con lumbreras exteriores a la garganta, era efectivo pero difícil de aplicar a los hogares de los generadores de vapor.

En 1972 B&W desarrolla un quemador de cortatiros dual (DRB) para carbón pulverizado, que facilita dos zonas de aire, cada una de ellas controlada por un cortatiros independiente, y concéntricas con la tobera del quemador de carbón, Fig XIV.7.

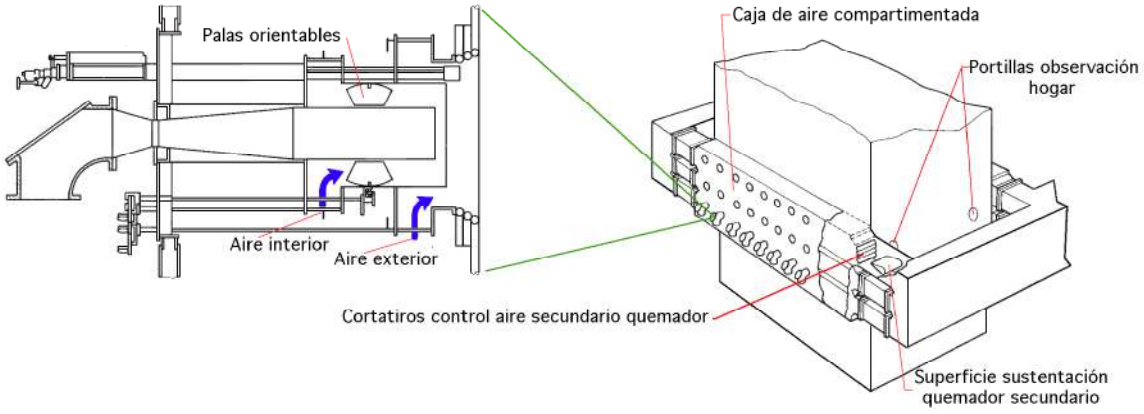


Fig XIV.7.- Quemador de cortatiros dual y caja de aire compartimentada

Una parte del $aire_{secundario}$ entra por la zona interior para cooperar en la $\begin{cases} - \textit{ ignición} \\ - \textit{ estabilidad} \end{cases}$ de la llama; el resto del aire se conduce y pasa por la zona exterior, y se mezcla con los gases aguas abajo de la llama.

La recirculación, inducida por el torbellino que se comunica al aire exterior, mejora la estabilidad de la llama. La tobera del quemador está equipada con un Venturi, para conseguir la dilución de la mezcla aire+carbón; de esta forma la mezcla se inyecta en la garganta sin desviación alguna; el resultado global es una llama estable con un núcleo rico en combustible, consiguiéndose la mezcla completa aguas abajo.

La primera unidad modernizada con un equipo (DRB) data de 1973, (primera generación), con la que se logró una reducción del 50% de los NO_x, respecto a los quemadores circulares iniciales de la unidad; el quemador de cortatiros dual (DRB) se utiliza frecuentemente con:

- Extensas zonas de combustión en el hogar para reducir los NO_x térmicos

- Cajas de aire compartimentadas para conseguir un mejor control de la distribución del aire

En este diseño, el conjunto de quemadores asociados a un pulverizador se corresponde siempre con un mismo compartimento de la caja de aire. El $aire_{secundario}$ se mide y controla por separado para cada uno de los compartimentos de la caja de aire. Con este método se corrige gran parte del desequilibrio entre flujos a quemadores, que se experimenta en los diseños de caja única de aire. La consecuencia de todo ésto es una alta eficiencia de la combustión, con escorificación mínima en la zona de quemadores.

El quemador de zona dual (DRB) reduce un $50 \div 60\%$ los NO_x correspondientes a la carencia de control alguno; esta eficiencia facilita su empleo $\begin{cases} \text{- en calderas nuevas sin portillas de } NO_x \text{ , ó} \\ \text{- con otros sistemas de derivación de aire} \end{cases}$

Las emisiones de NO_x en calderas de plantas energéticas equipadas con (DRB), están en el intervalo $0{,}27 \div 0{,}70$ lb/10^6, Btu ($332 \div 861$ mg/m^3N).

XIV.6.- QUEMADOR DRB-XCL (2ª generación)

El quemador de cortatiros dual tipo XCL es una versión avanzada del original DRB anterior; éste quemador DRB-XCL se configura tal como se representa en la Fig XIV.8. El flujo de aire hacia el quemador se regula por medio de un disco deslizante, similar al que se utilizaba en el quemador tipo S. Para medir el $aire_{secundario}$ se cuenta con una rejilla de tubos Pitot (para presión dinámica y estática), ubicada en el cuerpo del quemador; con los datos adquiridos, el $aire_{secundario}$ se puede distribuir entre todos los quemadores mediante el ajuste de discos deslizantes u otros medios.

Para la eficiencia de la combustión, particularmente en el caso de sistemas de bajo NO_x, resulta crítica una distribución equilibrada del aire y del combustible, entre los diversos quemadores.

Aguas abajo de la rejilla de tubos Pitot, se encuentran las zonas de aire interior y exterior.

En la zona interior hay unas paletas ajustables, que arremolinan el aire para estabilizar adecuadamente la ignición de la llama en el extremo de la boca del quemador. La zona exterior, que es la que conduce el flujo principal de aire, está equipada con dos tipos de paletas:

- La etapa de paletas del lado aguas arriba está formada por paletas fijas y sirve para mejorar la estabilidad periférica del aire dentro del quemador

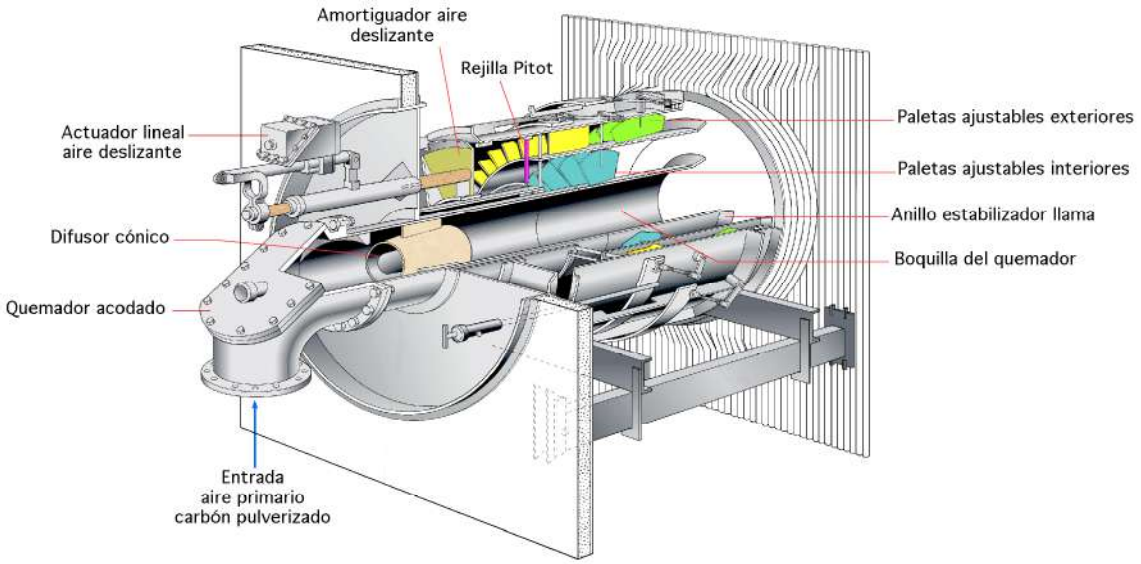


Fig XIV.8.- Quemadores de carbón pulverizado para bajos NOx, tipo DRB-XCL (2ª generación)

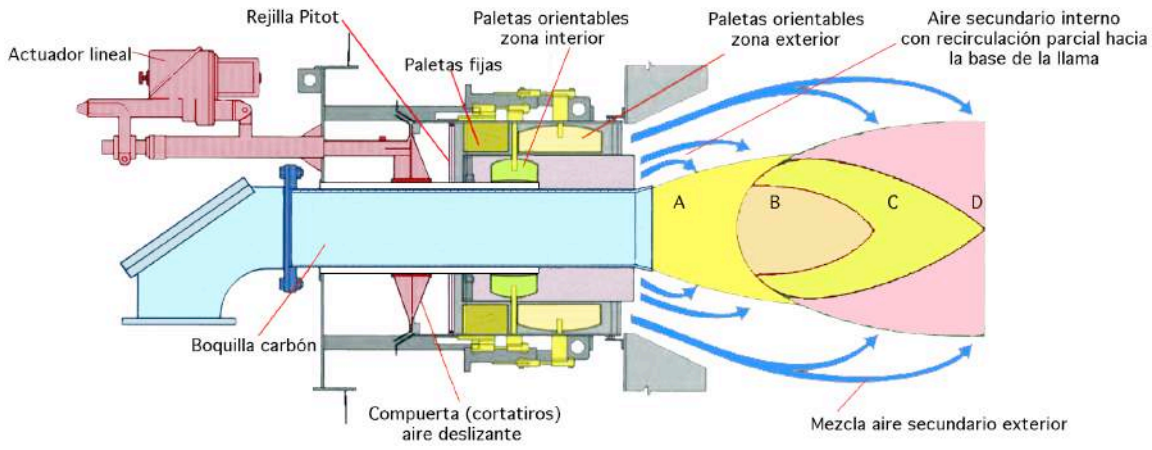
- La etapa de paletas del lado aguas abajo ajusta y facilita la mezcla apropiada del aire$_{secundario}$ con la llama

Las paletas ajustables interiores y exteriores permiten la optimización lineal de las emisiones durante la puesta en servicio, y después se fijan durante el funcionamiento.

La tobera del quemador cuenta con $\begin{cases} un\ difusor\ cónico\ (más\ bajo\ en\ NO_x \\ impulsores\ de\ palas\ (llamas\ más\ cortas) \\ un\ anillo\ estabilizador\ de\ la\ llama. \end{cases}$

Todos esos medios se combinan $\begin{cases} mejorando\ la\ estabilidad\ de\ la\ llama \\ reduciendo\ más\ el\ NO_x\ al\ incorporar\ el\ escalonamiento\ de\ combustible \end{cases}$

El quemador DRB-XCL consigue reducir los NO_x entre un $50 \div 70\%$ respecto a un quemador convencional sin usar portillas de No, nivel de reducción que es posible gracias a la creación de zonas de combustión de la llama, como se indica en la Fig XIV.9.



A) Zona de alta temperatura rica en combustible, en la que se produce el desprendimiento de volátiles
B) Zona de producción de especies por reducción ; C) Zona descomposición NO_x ; D) Zona de oxidación del subcoque

Fig XIV.9.- Zonas de combustión del DRB-XCL de bajo NO_x

El quemador se diseña para producir $\begin{cases} - \textit{un rápido calentamiento} \\ - \textit{una temperatura elevada} \end{cases}$, en el núcleo de la llama, rico en carbón, lo que facilita se quemen más volátiles del carbón y se libere mayor cantidad de N_2 del combustible, en los primeros estadios de la combustión, dejando menos N_2 en el subcoque.

Si se limita el O_2 en el núcleo de la llama se minimiza la formación de los NO_x y, al mismo tiempo, se producen sustancias reductoras a partir de las materias volátiles, que se propagan hacia el interior de la llama reduciendo los NO_x formados, en zonas posteriores de la llama.

Finalmente, el subcoque se oxida con menores $\begin{cases} - \textit{temperaturas y} \\ - \textit{concentración de } O_2 \end{cases}$ y, por tanto, el NO_x se limita durante esta fase del proceso de la combustión.

Las portillas de NO_x se añaden en el caso de que se necesite una mayor reducción de NO_x

En aplicaciones de remodelación o modernización, el quemador DRB-XCL se puede equipar también con impulsores modificados, para acomodar la llama a los hogares existentes.

La tecnología de escalonamiento de aire y de combustible, inherente al quemador DRB-XCL, también se puede adaptar para los fuegos de fuelóleo (aceite) y de gas, e incluso se puede extender para aplicaciones con varios combustibles y carbón pulverizado.

XIV.7.- QUEMADOR DRB - 4Z (3ª generación)

En la Fig XIV.10 se presenta un quemador de carbón pulverizado para bajos NO_x, tipo DRB-4Z, de tercera generación que incorpora la más avanzada tecnología de control de emisiones en un contexto mecánico comprobado. El diseño patentado DRB-4Z combina el control estequiométrico y la tecnología para lograr muy bajas emisiones de NO_x, además de mejorar la eficiencia de la combustión. La simulación por ordenador ha señalado la existencia de una zona de aire adicional (zona de transición) que separa la boquilla de carbón de las principales zonas de aire del quemador, actuando como un amortiguador entre $\begin{cases} - \textit{la alta temperatura} \\ - \textit{el núcleo de la llama rica en combustible} \\ - \textit{las corrientes de aire}_{secundario} \end{cases}$

El campo de flujo producido en la zona de transición se basa en los gases procedentes de las zonas exteriores de la llama hacia el núcleo de la misma; los NO_x formados en la región exterior de la llama, rica en oxígeno, se reducen a otras especies nitrogenadas.

Una ventaja adicional de la zona de transición es la capacidad de alterar la estequiometría en la zona primaria. Una inadecuada estequiometría en la zona primaria inhibe la combustión durante la etapa crítica de desgasificación. El aire suministrado por la zona de transición puede compensar ésto sin inundar el núcleo de la llama con $aire_{secundario}$ de las principales zonas de aire.

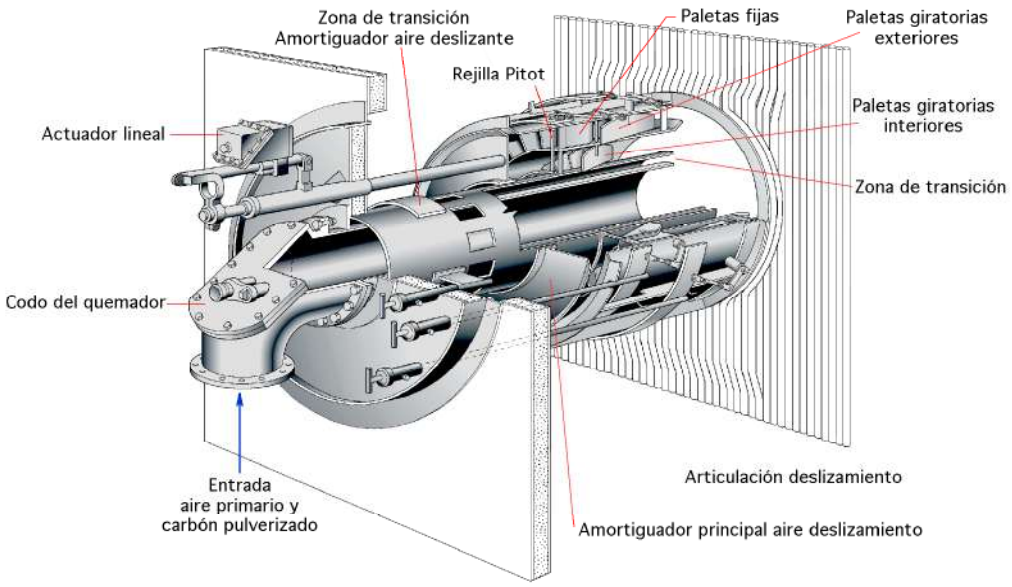
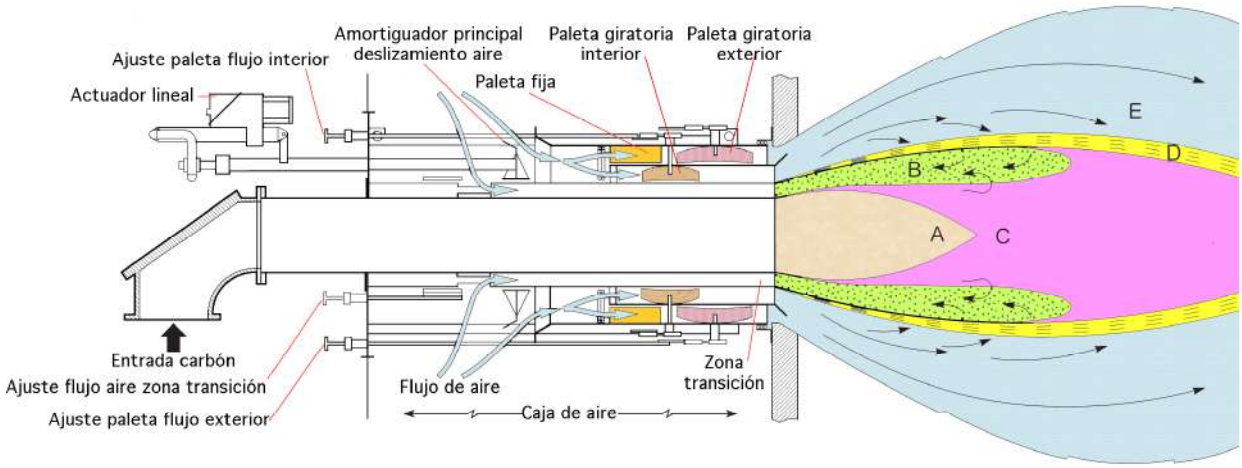


Fig XIV.10.- Quemador de carbón pulverizado para bajos NO_x, tipo DRB-4Z (3ª generación)



A) Oxígeno desvolatilización carbón; B) Recirculación de productos; C) Zona de reducción de NO_x

D) Lámina de llama de alta temperatura; E) Mezcla controlada del aire secundario de combustión

Fig XIV.11.- Zonas de combustión del DRB-4Z de bajo NO_x

Con el DRB-4Z se pueden conseguir reducciones de NO_x de hasta el 80%; cuando se requieran emisiones de NO_x aún mayores, el quemador se adapta muy bien para su uso con un sistema de OFA, Fig XIV.12. La construcción mecánica del DRB-4Z es una adaptación del DRB-XCL, que incorpora elementos aerodinámicos avanzados. La boquilla de carbón es parecida a la de sus predecesores y es intercambiable en algunas situaciones.

- El $aire_{secundario}$ se suministra en la zona de transición por medio de ranuras y un manguito deslizante ajustable manualmente

- El amortiguador de aire de deslizamiento se utiliza para regular el $aire_{secundario}$ a las principales zonas de aire

- La rejilla Pitot se instala aguas abajo de la compuerta para hacer medidas locales del $aire_{secundario}$

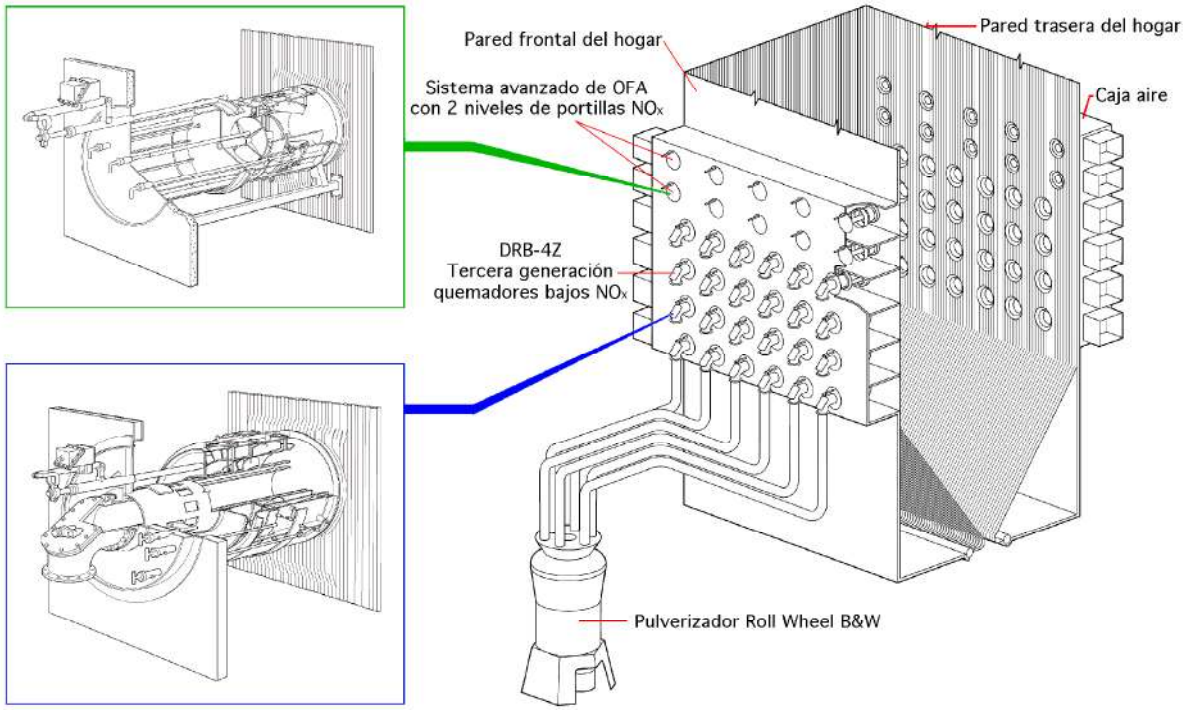


Fig XIV.12.- Avances en sistemas de combustión bajos en NO_x, con quemadores de carbón pulverizado

- Las paletas, ajustables manualmente, situadas en las zonas de aire interior y exterior permiten optimizar la configuración de remolino durante la puesta en marcha del quemador

- Las paletas fijas y orientables se instalan para mejorar la distribución del flujo de aire y reducir la caída de presión a través de estas zonas de aire

- La aerodinámica mejorada proporciona una mejor mezcla total aire-combustible que resulta significativa en la menor cantidad de inquemados del combustible, que son más bajos que en los quemadores anteriores de bajos NO_x

Los componentes de la pared frontal se fabrican de acero inoxidable de alta calidad, endurecido mecánicamente de forma que absorba la expansión diferencial a elevada temperatura, manteniéndose la integridad del producto. El quemador es capaz de funcionar con gas natural, o puede ir equipado para funcionar con fueloil como combustible primario.

XIV.8.- QUEMADOR AIREJET (4ª generación)

Es un quemador B&W único, fundamentalmente diferente a cualquier otro quemador de bajo NO_x disponible, que ofrece:

- Una reducción significativa de los niveles de NO_x en comparación con la anterior tecnología de quemadores de bajo NO_x

- Una combustión mucho más limpia por lo que requiere menos $aire_{exceso}$ para minimizar el CO y el carbono no quemado

- Mejora la eficiencia de la caldera y el rendimiento térmico de la planta

- Excelente estabilidad de la llama

El *quemador AireJet* fue desarrollado específicamente para su uso con $aire_{secundario}$ (OFA) conformando un sistema integrado para una reducción global de NO_x más eficaz. Para diseñar su innovadora estructura de quemador se utilizaron técnicas de Dinámica de Fluidos Computacional y diferentes pruebas físicas, llegándose a un quemador construido alrededor de un chorro de aire central, rodeado por una corriente de combustible, y rodeados ambos por aire comburente adicional.

Con la estructura de diseño del quemador AireJet, el encendido se lleva a cabo desde dentro hacia fuera y de fuera hacia dentro. La combustión se intensifica suministrando oxidante directamente al núcleo de la llama, en lugar de esperar a que el aire del exterior se mezcle con la corriente de combustible.

Mecánicamente, el quemador AireJet es similar a la configuración del quemador DRB-4Z, con una excelente reputación por su durabilidad. La boquilla de carbón y los dispositivos de aire centrales se revisten con materiales cerámicos para resistir el desgaste.

De entre sus características podemos señalar las siguientes:

- Se puede incluir en nuevas instalaciones de calderas, así como en la modernización de unidades con una adecuada geometría del horno, en combinación con los sistemas de aire sobre el fuego

- Utiliza el mismo equipo auxiliar (codos, escáneres, equipos de encendido) que otros quemadores de B&W

- La garganta del quemador es la adecuada en aplicaciones de modernización sin modificaciones parciales de presión

- Bajo $aire_{exceso}$ para una mayor eficiencia y bajas emisiones

Las principales características mecánicas de diseño, Fig XIV.13, son:

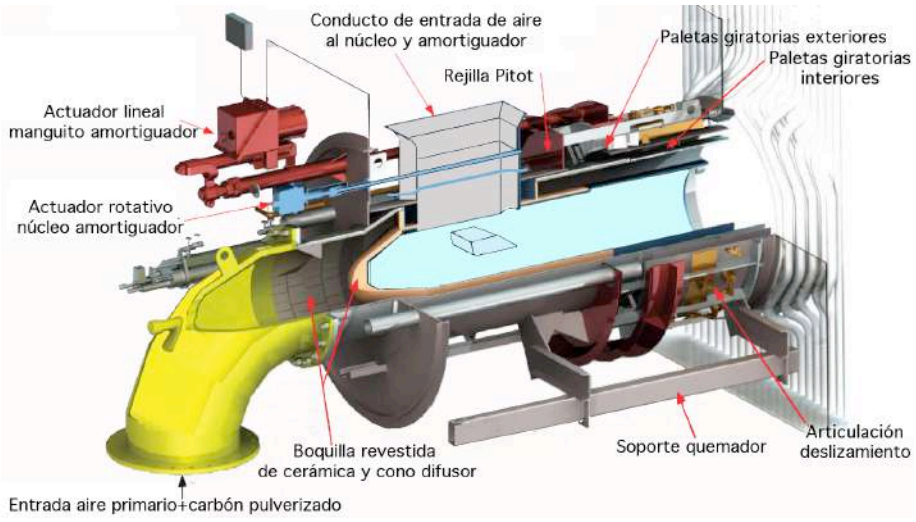


Fig XIV.13.- Quemador de carbón pulverizado para bajos NO_x, tipo AIREJET (4^a generación)

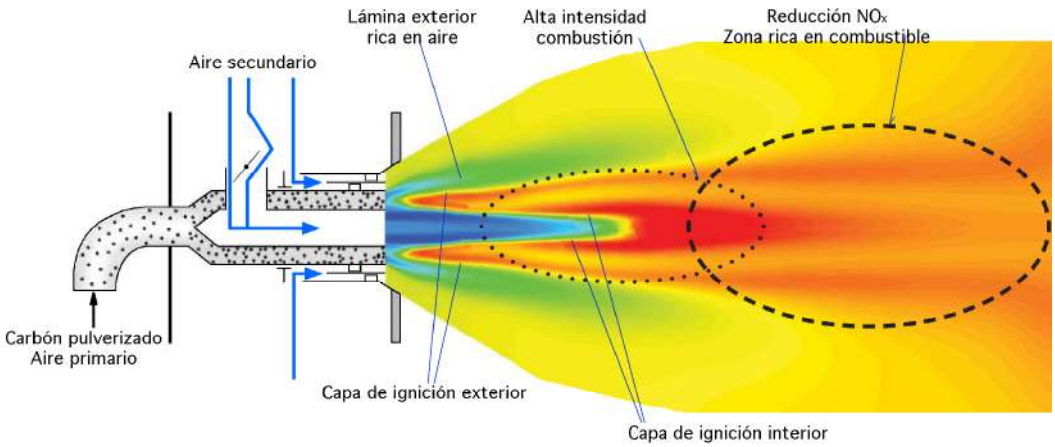


Fig XIV.14.- Zonas de combustión del quemador de carbón pulverizado de bajos NO_x, AIREJET

- El actuador rotativo amortiguador del núcleo, permite ajustar el flujo de aire central para minimizar las emisiones

- El amortiguador lineal de manguito amortiguador, ajusta el flujo de $aire_{secundario}$ para el funcionamiento normal del quemador principal

- El conducto de entrada de aire al núcleo y amortiguador, controla el flujo de $aire_{secundario}$ en la zona central del quemador

- La rejilla Pitot, de 30 tomas, proporciona una medida relativa del flujo de $aire_{secundario}$ al quemador principal, para facilitar el equilibrio del flujo de aire durante la puesta en servicio

- Las paletas fijas mejoran la distribución del aire periférico y, al ser ajustables, se pueden orientar durante la puesta en marcha para minimizar las emisiones

- Las paletas giratorias en la zona interior del aire, proporcionan al $aire_{secundario}$ un remolino adecuado a través de la zona interior del aire para la ignición

- La articulación deslizamiento es un mecanismo de palanca que orienta las paletas giratorias exteriores

- Un amortiguador de manguito principal regula el flujo de $aire_{secundario}$ a las zonas de aire interior y exterior del quemador, independiente del remolino

- Los componentes básicos de la boquilla de carbón y partes centrales interiores del quemador, llevan una protección cerámica contra la erosión

XIV.9.- QUEMADOR ALVEOLAR DE BAJOS NO_x

Los quemadores alveolares, tal como se ha expuesto anteriormente, producen altas emisiones de NO_x, llegando a niveles del orden de $1 \div 1{,}8$ lb/10^6 Btu ($1.230 \div 12.214$ mg/m^3N). La singular disposición del quemador alveolar, Fig XIV.6, es incompatible con cualquier sustitución directa, propia de una remodelación o modernización, por quemadores estandarizados de bajo NO_x.

El pequeño espacio de las gargantas de los quemadores alveolares impide la instalación directa de otros quemadores mayores multizona de bajo NO_x.

Una primera opción consistiría en redistribuir los quemadores, aumentando la separación entre ellos, e instalando un quemador DRB-XCL de bajo NO_x, solución efectiva, pero cara, por la necesidad de sustituir $\begin{cases} \textit{paneles tubulares de la pared de la caldera} \\ \textit{tubos de carbón, quemadores y sistemas de ignición} \end{cases}$, junto con la modificación de la caja de aire.

Otra alternativa estaría en el empleo de un quemador alveolar (LNCB) de bajo NO_x, que se representa en la Fig XIV.15; éste quemador se ha diseñado para ajustarlo en las ubicaciones de los quemadores alveolares existentes.

En él, una parte del $aire_{secundario}$ y todo el carbón, se suministran a la tobera del quemador inferior; el $aire_{secundario}$ restante se suministra a la tobera del quemador superior, que sirve como portilla de NO_x, integrada en el conjunto alveolar de quemadores.

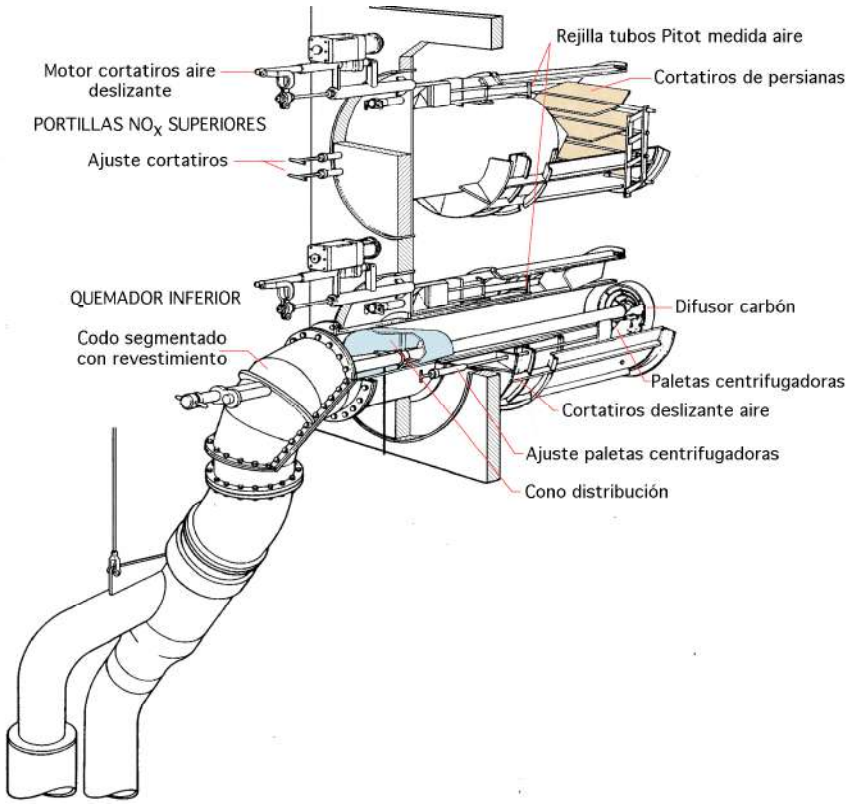


Fig XIV.15.- Quemador alveolar (LNCB) de bajos NO_x

Los tubos de suministro del carbón al quemador inferior, se modifican normalmente mediante la unión de dos existentes en uno solo, con una conexión en Y; el quemador inferior es más grande y se puede equiparar a un gran difusor para perfilar la llama; el conjunto del quemador inferior es como un quemador convencional tipo S, con una tobera sobredimensionada. El conjunto del quema-

dor superior dispone de un disco deslizante y una rejilla de tubos Pitot, para ajustar el flujo de *aire-secundario*, y unas paletas para controlar la mezcla del $aire_{secundario}$ con la llama.

Los niveles de NO_x se pueden reducir hasta un 50% con el (LNCB), manteniendo una alta eficiencia de la combustión.

Los costes de remodelación o modernización son reducidos, porque.

- Se evitan las modificaciones de paneles de pared y de la caja de aire

- Son pequeñas las alteraciones de los tubos de carbón

Portillas de NO_x.- B&W fue la pionera en desarrollar y aplicar $\begin{cases} \text{- las portillas de } NO_x \\ \text{- el escalonamiento de aire} \end{cases}$, como control de la emisión de NO_x.

Cuando una porción del $aire_{secundario}$ que va a los quemadores, se desvía hacia unas portillas que lo introducen en el proceso de combustión, se puede reducir la correspondiente emisión de los NO_x; estas portillas se pueden ubicar:

- Cerca de los quemadores, como es el caso de los quemadores alveolares (LNCB) de bajos NO_x

- A alguna distancia de todos los quemadores

En la mayoría de las aplicaciones, las portillas de NO_x se sitúan por encima de la zona de quemadores, en aquellos hogares cuyos humos ascienden y luego salen fuera del recinto; éstas portillas se identifican, algunas veces, como boquillas de $aire_{terciario}$ o como *aire por encima del fuego (OFA)*.

Sólo en determinadas aplicaciones, las portillas de NO_x se colocan por debajo del nivel de la zona de quemadores o dentro de dicha zona.

Independientemente de la eficacia probada de las portillas de NO_x, la realidad es que no siempre se han utilizado en las unidades generadoras de vapor que consumían carbón pulverizado, lo que se justificaba por $\begin{cases} \text{- un potencial aumento de la escorificación y corrosión en el hogar} \\ \text{- una posible pérdida de eficiencia de la combustión} \end{cases}$

La potencial corrosión del H_2S con carbones altos en S es un tema preocupante, particularmente con contenidos en S que superen 2 lb/10^6 Btu (860 g/GJ). Los carbones bituminosos con escorificación elevada y severa no son idóneos con las portillas de NO_x a causa de la escoria húmeda y plástica que se forma en el hogar, la cual se puede acumular en la boca del quemador o en la tolva del hogar, siendo corrosiva para los tubos de la caldera. La corrosión se reduce con revestimientos protectores de acero inoxidable o aluminio

A pesar de ésto, cuando se queman carbones altos en S, no es recomendable operar en condiciones subestequiométricas; para estos carbones, la mejor solución es mantener siempre una este-

quiometría en quemadores ≈ 1,05, utilizando carbones bajos en NO_x, o bien éstos con un ligero escalonamiento de aire.

Para mantener una combustión de alta eficiencia $\begin{cases} el\ tamaño \\ la\ velocidad \end{cases}$ del chorro de aire a través de las portillas de NO_x deben ser suficientes para lograr la $\begin{cases} penetración\ en\ el\ hogar \\ mezcla\ con\ los\ gases_{combustión} \end{cases}$ *en flujo cruzado*

No obstante, los chorros de alta velocidad pueden provocar la pérdida de combustión en los productos que fluyen entre las portillas; para resolver este problema se idearon las portillas de zona dual.

La zona interior de la portilla facilita un chorro de aire que penetra a través del hogar de la caldera

La zona exterior tiene unas paletas que desvían el aire y arrastran los gases de combustión más próximos

Las portillas cuentan con discos y paletas que se ajustan durante la puesta en servicio inicial de la unidad. Cada portilla está dotada de tubos Pitot, para medir y uniformizar la distribución del flujo de aire, a través de las portillas.

Algunos sistemas que han operado con estequiometrías bajas en la zona de quemadores (0,70 ÷ 0,85), resultan interesantes cuando se dispone de dos niveles de portillas de NO_x, mejora con la que se controla la introducción de O_2 en las últimas etapas de la combustión minimizando la formación de NO_x; este sistema de portillas de NO_x incluye el equipo de medida y regulación de flujos, en quemadores y en portillas, para todo el campo de cargas del generador de vapor.

Una tecnología de última generación, que facilita esa integración, son los modelos numéricos; existen programas informáticos que facilitan información detallada sobre la efectividad de la mezcla del flujo que circula por el hogar; estos programas se pueden emplear para la:

- *Optimización del tamaño y la ubicación de portillas de NO_x*
- *Orientación del torbellino en el quemador*
- *Geometría del hogar*

XIV.10.- OFA CON QUEMADORES DE PARED

La aplicación de un sistema OFA a un sistema de encendido de pared reduce la mezcla inducida en el quemador, que tiende a perjudicar la estabilidad de la llama y ralentizar el proceso de combustión; ésto es debido a:

- *Las menores velocidades en la garganta del quemador*
- *El $aire_{secundario}$ que está en proporción inferior a la del $aire_{primario}$*

En consecuencia, las reducciones en $\begin{cases} -\ el\ impulso \\ -\ la\ energía \end{cases}$ de mezclado del $aire_{secundario}$ en el quemador, se pueden compensar aumentando la velocidad en la garganta del quemador, por lo que se ha-

cen necesarios nuevos quemadores, más pequeños, para un buen rendimiento de la combustión.

Mayor número de remolinos para una parte del $aire_{secundario}$ fomentan la estabilidad de la llama.

La $\begin{cases} \text{- disposicion del quemador} \\ \text{- orientacion de los remolinos} \end{cases}$ se pueden alterar para presentar un campo de flujo más uniforme al sistema OFA.

Los quemadores de bajo NO_x avanzados con mejores medidas de control de $aire_{secundario}$ pueden compensar estas situaciones con sistemas de aire escalonados, y que han demostrado tendencias de escorificación en el hogar iguales o inferiores en comparación con algunos diseños convencionales.

Una cuestión importante referente al funcionamiento es la apropiada distribución OFA dentro del hogar, de forma que se minimice la formación de NO_x, CO, y char no quemado:

- El minimizar el combustible no quemado implica una mezcla rápida OFA
- El minimizar los NO_x implica una mezcla gradual

Los chorros de las portillas OFA fluyen transversalmente a los gases de combustión del hogar y deben suministrar el aire necesario para completar las reacciones de combustión en el hogar; ésto implica un menor número de portillas con altos flujos de masa y velocidad, y como la OFA debe cubrir completamente la sección transversal del hogar, se favorece la existencia de un gran número de portillas más pequeñas.

Las portillas situadas más cerca de los quemadores proporcionan mayor tiempo de mezcla disminuyendo el combustible no quemado, mientras que la ubicación de portillas más distanciadas tiende a maximizar la reducción de NO_x.

La aplicación efectiva de los sistemas OFA requiere combinar $\begin{cases} \textit{la experiencia} \\ \textit{los modelos computarizados} \\ \textit{el ajuste en línea} \end{cases}$

Los sistemas de rejillas Pitot cerca de los quemadores y portillas OFA permiten una evaluación más precisa de las reacciones y campos de flujo, pero requieren un mayor tamaño del modelo y recursos computacionales.

La validación de los modelos de predicción basados en la experiencia de campo es esencial; el suministro de equipos con capacidad de ajuste lineal proporciona los medios para ajustar el sistema OFA a las condiciones reales y reducir al mínimo las emisiones.

El quemador de zona dual de NO_x, Fig XIV.16 proporciona los medios para variar linealmente la penetración del chorro respecto a las características de dispersión de la OFA suministrada a través de la portilla correspondiente.

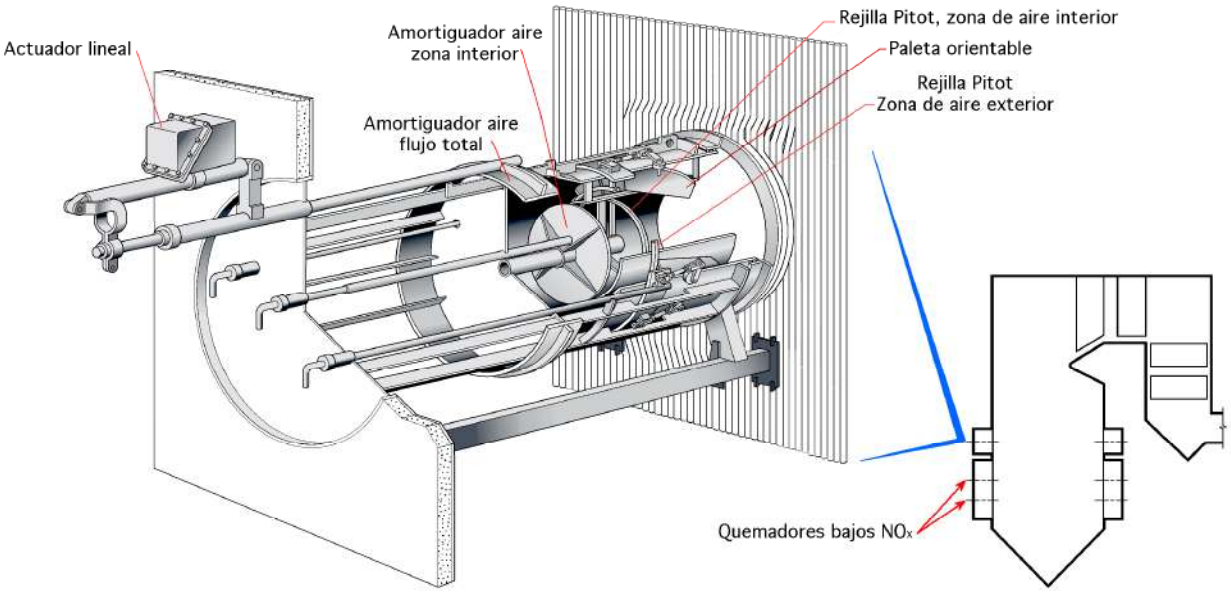


Fig XIV.16.- Quemador de zona dual para bajos NO_x

Un amortiguador con manguito de deslizamiento, junto con el actuador lineal, proporcionan los medios para regular la OFA en cada portilla, lo que permite mejorar la distribución, y variar la OFA respecto a la carga para el control de NO_x.

En cada portilla se proporciona localmente una indicación relativa del flujo de aire mediante una rejilla Pitot instalada en el interior del puerto.

La zona interior del puerto dual, se compone de un tubo central con disco de deslizamiento ajustable manualmente para ajustar el flujo de aire; el tubo central produce un chorro de aire de alta velocidad que penetra a través del hogar.

La zona exterior de la portilla está equipada con paletas giratorias.

El aumento de la turbulencia de este aire origina una mezcla local por arrastre de los gases recirculantes del hogar.

Las paletas se pueden ajustar manualmente para modificar el remolino en un amplio margen.

La combinación de estos ajustes tiene un fuerte efecto sobre las tasas de mezcla y las emisiones.

Las portillas de zona dual pueden estar contenidas en cajas de viento de forma similar a los quemadores, aunque en algunas situaciones es más rentable suministrar el aire en conductos individuales para cada portilla.

La máxima reducción de NO_x con etapas de aire, necesita que los quemadores funcionen con una estequiometría baja < 0,85.

La modificación de los NO_x se convierte en un problema si toda la OFA asociada se reintroduce rápidamente en el hogar; para evitar ésto, es beneficioso emplear dos niveles de OFA:

- El nivel más cercano a la zona del quemador suministra una fracción menor de la OFA para lograr una estequiometría próxima a la unidad

- El segundo nivel de OFA proporciona el equilibrio de aire$_{secundario}$

Esta disposición reduce el nivel de picos de O_2 y modera las tasas de combustión en la parte superior del hogar para el control de NO_x, mientras que proporciona la mezcla necesaria para limitar el combustible no quemado.

El uso de aire precalentado suministrado por los ventiladores (FD) a través de los calentadores de aire ayuda a mantener la eficiencia de la caldera, pero limita la presión estática disponible para el sistema OFA, que tiene que ser compatible con la ubicación, número, tamaño y diseño de las portillas OFA.

Los ventiladores auxiliares se utilizan para aumentar la presión estática, pero pueden ser demasiados para contener el número de OFAs involucrados en muchos servicios de las aplicaciones de calderas; complicaciones en la ubicación de estos ventiladores, junto con el costo de gastos operativos, restringen su uso.

XIV.11.- OFA CON SISTEMAS DE COMBUSTIÓN EN ESQUINA

El aire sobre fuegos ha demostrado ser muy eficaz en calderas con quemadores en esquina y es el método dominante de control de NO_x en sistemas modernos.

Vamos a considerar primero la funcionalidad del sistema de combustión con quemadores en esquina antes de considerar la aplicación OFA con dicho equipo.

En un sistema de combustión en esquina, el carbón y el aire se introducen en el hogar a alturas distintas a través de cajas de viento situadas en las esquinas (cuatro por hogar) y en hogares grandes con pared divisoria (ocho por hogar).

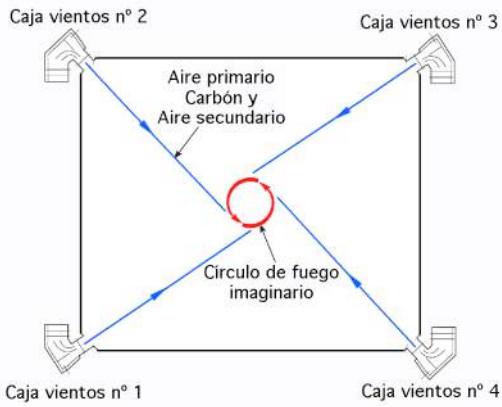


Fig XIV.17- Vista en planta de la disposición de quemadores en esquina

Las boquillas de las cajas de viento dirigen las corrientes de aire y carbón ligeramente desviadas de las diagonales de la sección en planta del hogar, siendo tangentes a un círculo imaginario en el centro del hogar (círculo de fuego), como se muestra en la Fig XIV.17.

La combinación de los ángulos de fuego y el impulso de los flujos de combustible y aire, originan una bola de fuego de rotación ciclónica que llena el área transversal del hogar. En este sistema de fuego, el hogar funciona como un gran quemador en el que cada rincón proporciona la energía de ignición a la esquina aguas abajo, estabilizando el efecto remolino de la bola de fuego de las llamas.

Para controlar la temperatura del vapor a cargas bajas, las boquillas de $\begin{cases} - \, combustible \\ - \, aire \end{cases}$ se diseñan para inclinarse hacia arriba o hacia abajo, al unísono, para subir o bajar la bola de fuego y, por lo tanto, aumentar o disminuir la temperatura de los gases de salida del hogar.

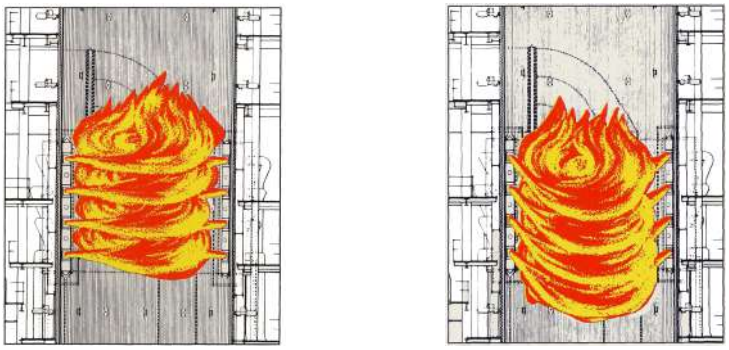


Fig XIV.18- Vista frontal de las llamas en flujo tangencial con diversas inclinaciones

Cada caja de viento se divide a lo largo de su altura, alternando los compartimentos de aire y carbón, como se muestra en la Fig XIV.19; en ella:

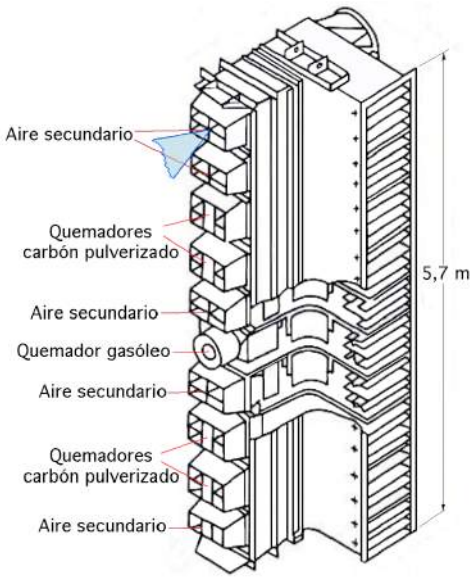


Fig XIV.19.- Quemador de esquina (PF) para carbón bituminoso

- Los inyectores de los quemadores son de sección rectangular

- Las toberas de $aire_{primario}$ y $aire_{secundario}$ se apilan alternativamente

- El $aire_{primario}$ transporta el carbón; el $aire_{secundario}$ proporciona el aire de combustión

- El quemador de gasóleo intermedio ayuda al encendido

- Los quemadores se pueden inclinar para modificar la posición de la llama

Cada pulverizador abastece carbón a una altura determinada (cuatro u ocho esquinas). Las cajas de viento distribuyen el $aire_{secundario}$ de combustión como aire $\begin{cases} combustible \\ auxiliar \end{cases}$.

- El <u>aire combustible</u> es la porción de $aire_{secundario}$ admitido en el hogar a través de la sección de anillos de aire alrededor de cada boquilla de carbón y se usa para la combustión y estabilización de las llamas.

- El <u>aire auxiliar</u> es la fracción de $aire_{secundario}$ que entra en el hogar a través de las boquillas de aire situadas en los compartimentos por encima y por debajo de cada inyector de carbón para completar la combustión.

El $aire_{primario}$ es la fracción de aire que entra en el hogar a través de las tuberías y boquillas

de carbón y actúa de la misma forma que en la disposición de quemadores de pared.

El $aire_{secundario}$ se distribuye en la caja de viento por un sistema de amortiguadores situados en la entrada de cada compartimento.

- Los amortiguadores de aire combustible se controlan en función de la velocidad de alimentación del pulverizador

- Los amortiguadores de aire auxiliares se controlan en función de la presión diferencial entre la caja de vientos y el hogar

En las aplicaciones convencionales, todo el $aire_{secundario}$ entra en el hogar a través del sistema de cajas de viento de esquina; éstos sistemas de combustión de fuego en esquina incorporan la tecnología de puesta en servicio del aire, introduciendo capas estratificadas de combustible y aire, que reducen los NO_x retardando la mezcla de aire y combustible a medida que avanzan en el vórtice de la llama.

La aplicación de aire sobre el fuego (OFA) a un sistema de esquina implica desviar una parte del aire auxiliar a una zona de $aire_{secundario}$ situada por encima de la zona de combustión.

Según sea la reducción de NO_x requerida, se puede introducir un sistema OFA en la parte superior de la caja de vientos a través de:

- Dos o más compartimentos de aire

- Portillas separadas situadas a una cierta distancia por encima de la cota máxima del carbón

El aumento de la separación entre la zona de combustión y las portillas OFA reduce más eficazmente las emisiones de NO_x; para un número dado de OFAs, la OFA separada es dos veces más eficaz que la OFA de caja de vientos para la reducción de NO_x.

Un método eficiente para la reconversión de un sistema separado de OFA de bajos NO_x implica añadir un nivel de entre cuatro y diez portillas, dependiendo del tipo de hogar.

Para hogares pequeños, cuatro esquinas, las portillas se encuentran normalmente en las esquinas del hogar ya que se puede lograr la cobertura adecuada al tener estos hogares unas secciones cuadradas transversales más pequeñas que las unidades de pared divisoria, más grandes, de ocho esquinas.

Los conductos para las unidades de cuatro esquinas son más sencillos cuando las portillas se encuentran en las esquinas.

Para grandes hogares con pared divisoria (ocho esquinas), las portillas pueden estar dispuestos en las paredes delantera y trasera y compensadas en la dirección de rotación de la bola de fuego, lo que reduce los NO_x al tiempo que proporciona:

- Una cobertura más completa de la superficie en planta del hogar

- Esquinas para una mejor combustión del carbono y el control de CO

En ambos tipos de hogar, las portillas se encuentran varios metros por encima de la cota más alta de la inyección de carbón, que permita una distancia de separación:

- Adecuada para el control eficaz de los NO_x

- Suficientemente baja para un tiempo de residencia en el hogar que permita quemar totalmente el carbón después de la inyección de aire sobre el fuego

La ubicación y tamaño de las portillas se establecen para evitar o reducir al mínimo las modificaciones cuando sea posible. Los modelos computarizados optimizan la disposición y funcionamiento de las portillas.

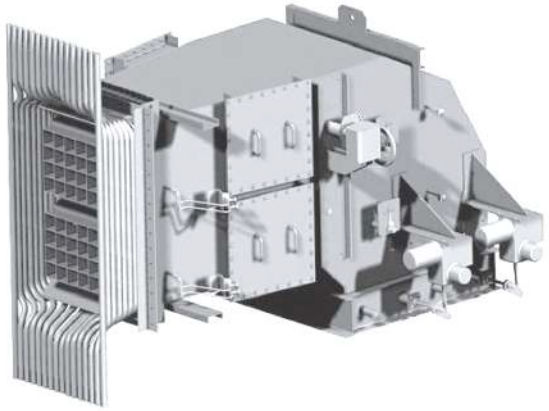


Fig XIV.21.- Portilla de aire sobrefuegos en esquina

Una portilla OFA para fuego en esquina se muestra en la Fig XIV.21 y utiliza una garganta soldada (sin refractario), con apertura perpendicular para refrigerar las toberas de aire, del intenso calor radiante en la zona OFA. La portilla tiene dos compartimientos de aire con deflectores integrales y amortiguadores de control de flujo independientes, para maximizar la velocidad y penetración por encima del rango de carga. Las toberas de aire se pueden inclinar de forma manual para el control de las emisiones.

Una pequeña rejilla Pitot que se encuentra cerca de la entrada de cada boquilla mide el flujo de aire; la introducción de un sistema OFA reduce el flujo de $aire_{secundario}$ en la caja de vientos principal.

Para compensar ésto se reducen el $\begin{cases} \text{- compartimento de aire} \\ \text{- tamaño de los amortiguadores auxiliares existentes} \end{cases}$ con placas de bloqueo, mientras que las toberas de aire auxiliar se reemplazan por otras más pequeñas.

Estas modificaciones son necesarias para mantener la $\begin{cases} \text{- velocidad de inyeccion} \\ \text{- caída de presión} \end{cases}$ y, por tanto, la capacidad de control del amortiguador sobre el rango de cargas.

La adición de OFAs ha demostrado ser una modificación del sistema de combustión eficaz, fiable y rentable para la reducción de las emisiones de NO_x en calderas con quemadores de carbón en las esquinas. La reducción de NO_x en unidades con una caja de viento de aire sobrefuegos varía entre $20 \div 30\%$.

Para una reducción adicional de NO_x, se pueden añadir OFAs a las unidades con o sin caja de vientos de aire sobrefuegos; la reducción de NO_x con estos arreglos varía entre un $40 \div 60\%$, depen-

diendo de: $\begin{cases} \text{- los niveles de } NO_x \text{ iniciales} \\ \text{- el tamaño de la caldera} \\ \text{- tipo de hogar} \\ \text{- velocidad de liberación de calor} \\ \text{- distancias de separación} \\ \text{- reactividad del carbón} \end{cases}$

La reducción de NO_x en unidades de quemadores en esquina, puede estar acompañada por un cierto aumento en las emisiones de CO y carbón no quemado; sin embargo, con un cuidadoso diseño y puesta a punto del sistema, las emisiones de CO se pueden mantener normales, y las de carbono no quemado en resultados razonables.

XIV.12.- QUEMADORES PARA CARBONES DIFÍCILES

Hay carbones que ofrecen muchas dificultades para desarrollar su proceso de combustión; en ellos se pueden incluir carbones reactivos y no reactivos que se suelen quemar con cierta facilidad, salvo que contengan una excesiva abundancia de humedad o ceniza.

La selección del tipo de quemador se basa en un factor empírico de ignición, que se deduce de todos los experimentos realizados con estos carbones difíciles. El factor empírico relaciona el comportamiento en la ignición con la variación de los siguientes parámetros: $\begin{cases} \text{- Relación } \dfrac{\text{carbono fijo}}{\text{materia volátil}} \\ \text{- Contenido en humedad} \\ \text{- Contenido en ceniza} \\ \text{- Poder calorífico del carbón} \end{cases}$

La selección del tipo de quemador para estos carbones difíciles, puede incluir quemadores de los siguientes tipos: $\begin{cases} \text{- Elementales} \\ \text{- De bajo } NO_x \\ \text{- De ignición mejorada} \\ \text{- Con derivación de aire primario PAX} \end{cases}$

Los dos primeros tipos ya se han discutido previamente, y los otros dos se analizan a continuación.

Quemador de ignición mejorada.- El quemador de ignición mejorada (EI) se asemeja mucho al quemador de cortatiros dual DRB-XCL.

En el quemador de ignición mejorada se emplea una tobera para el carbón más grande, que reduzca convenientemente la velocidad de la mezcla $aire_{primario}$+*carbón*, a la entrada del hogar de la caldera; el difusor cónico produce un $\begin{cases} \text{- anillo rico en combustible} \\ \text{- núcleo pobre en combustible} \end{cases}$ que, a bajas velocidades, hace que esta combinación ignicione con una facilidad relativamente mayor.

Las zonas duales de aire se ajustan, con relación al quemador DRB-XCL, para incrementar la

recirculación de los gases calientes a lo largo del chorro de combustible.

El quemador de ignición mejorada (EI) es apropiado para el encendido de:

- Lignitos con alta humedad (> 35%)

- Carbones bituminosos con bajos volátiles

Quemador con derivación de aire primario (PAX).- Este quemador se ha diseñado para utilizarlo en la combustión de antracitas; las que tienen mínimos contenidos de volátiles se llevan a quemadores de bóveda, para desarrollar llamas descendentes o llamas en U.

El diseño del cortatiros, es similar al del quemador de ignición mejorada (EI), aunque en el caso de llamas en U, las portillas de escalonamiento de aire le dirigen lejos del quemador, para aumentar la temperatura de la llama.

Para mejorar la eficiencia de la combustión, se incrementa la finura de la antracita.

También se aumenta la temperatura de salida del pulverizador, hasta el máximo admisible, que generalmente es del orden de 200ºF (93ºC), por razones mecánicas.

El quemador PAX incrementa la temperatura del $aire_{primario}$ y carbón pulverizado, mediante un diseño patentado que separa la mitad del $aire_{primario}$ de la mezcla y lo descarga en el hogar.

Este $aire_{primario}$ se sustituye por $aire_{secundario}$ a 700ºF (371ºC), lo que hace que el combustible eleve significativamente su temperatura, a la entrada del hogar de la caldera.

El extremo de la tobera PAX está dimensionado para bajas velocidades, con el fin de ayudar en el proceso de ignición.

Incluso con estas nuevas técnicas, la buena combustión depende en gran parte de una alta temperatura en el hogar; la operación a bajas cargas requiere mecheros o ignitores adecuados, para la correspondiente estabilización de la llama.

XIV.13.- EQUIPO AUXILIAR

Equipos de combustión de fuelóleo/gas.- En algunos casos se exige que los hogares que queman carbón pulverizado, quemen también fuelóleo (aceite) o gas natural, llegando incluso a los regímenes de aporte de calor correspondientes a la plena carga.

Estos combustibles se pueden quemar cuando:

- No hay disponibilidad de carbón en el comienzo de la vida de la unidad

- Se produce una interrupción en el suministro de carbón

- Obliga a una estrategia inherente al control de la emisión de los NO_x

Con este sistema, algunos operadores evitan la instalación de un pulverizador de reserva cuando un molino queda fuera de servicio.

Cuando se quema fuelóleo se instala axialmente, en el recinto del quemador, un mechero atomizador (tobera), que debe tener una adecuada protección contra la erosión.

Cuando se quema fuelóleo o gas hay que disponer de una buena fuente de aire, para purgar el mechero y mejorar la combustión; este sistema de aire se tiene que poder sellar completamente, antes de encender el carbón pulverizado. Las mejores características operativas se obtienen con los mecheros de atomización asistida por vapor.

Cuando se quema carbón pulverizado, en los recintos de quemadores se pueden emplear diversos diseños de lanzas de gas; el colector de gas, que alimenta las diversas lanzas, puede ser interno o externo, respecto a la caja de aire. Si el colector se instala dentro de la caja de aire, el frente de quemadores queda más diáfano, pero se complican algo las alineaciones o separaciones de lanzas.

La lanza de gas va equipada con una caperuza de estabilización de la llama que protege su base. Cuando se remodela o moderniza (retrofit) un quemador de carbón pulverizado mediante múltiples lanzas de gas (antorchas), se puede perturbar el flujo de aire de la tobera o boca del recinto y modificar su característica operativa. Es muy importante compatibilizar las lanzas de gas (antorchas) con el diseño del quemador de carbón pulverizado.

Cualquier remodelación o modernización con $\begin{cases} \text{- lanzas de gas (antorchas)} \\ \text{- mecheros de fuelóleo (pilotos)} \end{cases}$, aumenta la carga de los ventiladores de tiro forzado. El $aire_{primario}$ se elimina y hay mayores cantidades de $aire_{secundario}$, en comparación con la situación correspondiente al carbón pulverizado; en consecuencia hay que tener en cuenta los márgenes de caudales y presiones correspondientes a los ventiladores.

Ignitores.- Un ignitor o encendedor es imprescindible para poder iniciar la combustión del carbón pulverizado cuando: $\begin{cases} \text{- Se inicia su introducción (puesta en servicio) en el quemador} \\ \text{- Los quemadores se vayan a retirar de servicio} \\ \text{- Lo requiera el sistema para la consecución de la estabilidad de llama} \end{cases}$

Normalmete los ignitores utilizan una chispa eléctrica (de bujía) para encender un combustible ligero, que suele ser un fuelóleo ligero de alta calidad y elevado precio, por ejemplo el nº 2 (gasóleo) o, a veces, un gas.

Las unidades más modernas han automatizado el control de tal modo que los ignitores se pueden $\begin{cases} \text{poner en servicio} \\ \text{mantener en operación} \\ \text{purgar} \\ \text{retirar de servicio} \end{cases}$, sin que intervenga el operador en cualquiera de estos procesos.

En algunos casos, el fuego soporte para conseguir una estabilidad de la llama se asigna a un mechero (piloto) de un fuelóleo de número superior (de peor calidad y más barato), que normalmente

se enciende con un ignitor convencional.

Sistemas de seguridad de la llama.- Las modernas calderas que queman carbón pulverizado están equipadas normalmente con un sistema de seguridad de la llama (FSS), que utiliza un explorador especial (escáner) en cada uno de los recintos quemadores, para monitorizar y vigilar electrónicamente las condiciones de la llama.

El *escáner de llama* se utiliza para evaluar la intensidad y frecuencia, de modo individual, de las llamas del ignitor, piloto y quemador correspondiente al combustible principal.

La ausencia de señales satisfactorias de la llama provoca que el sistema (FSS) inicie automáticamente la oportuna acción correctora, que consiste en apartar del servicio al quemador correspondiente, junto con todo su equipo asociado; con ésta acción se impide que en el hogar entre cualquier combustible sin quemar, reduciéndose así, significativamente, el riesgo de una eventual explosión.

Seguridad y operatividad.- La ignición incontrolada del carbón pulverizado, o de cualquier otro combustible, puede desembocar en una explosión, generalmente, con severos daños en el equipo y con posibles víctimas entre el personal.

La explosión es el resultado de la ignición súbita de una determinada cantidad de combustible acumulada en:
- *el interior del hogar*
- *los pasos de humos asociados con la caldera*
- *los conductos*
- *los ventiladores*

La magnitud e intensidad de una explosión dependen de la cantidad de sustancias combustibles acumuladas y de la dosificación de la mezcla *combustible+aire* en el momento de la ignición.

Las explosiones se pueden producir como consecuencia de:
- *una operación incorrecta*
- *un diseño inadecuado*
- *un mal funcionamiento del equipo*

La Asociación Nacional de Protección contra el Fuego (NFPA), USA, tiene publicadas, entre otras, las siguientes normativas:

- *Pulverized Fuel System (NFPA-85F)*
- *Prevention of Furnace Explosion in Pulverized Coal-Fired Multiple Burner Boiler-Furnaces (NFPA-85E)*

Esta documentación constituye una excelente fuente de información para el diseño, construcción, operatividad y control de equipos, que se tienen que integrar en los sistemas de combustión de carbón pulverizado. Otra fuente de información la proporciona el conjunto de Libros de Instrucciones que acompañan a los diversos equipos. Los operadores de unidades que queman carbón pulverizado tienen a su disposición esas instrucciones, de las que obtienen información relativa al diseño, calibración y ajuste, puesta y retirada de servicio, de los diversos equipos, así como de su mantenimiento e investigación de averías.

REFERENCIAS CAP XIV.- QUEMADORES Y SISTEMAS DE COMBUSTIÓN PARA CARBÓN PULVERIZADO

STANDARD TEST METHOD FOR VOLATILE MATTER IN THE ANALYSIS SAMPLE OF COAL AND COKE.- D3175-89a, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 5.05, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Pennsylvania, pp. 329- 331, 1991.

Beer, J.M., Chigier, N.A.- COMBUSTION AERODYNAMICS, Chapter 5.- Krieger Publishing, Malabar, Florida, 1983

Brackett, C.E., Barsin, J.A.- THE DUAL REGISTER PULVERIZED COAL BURNER.- Presented at The Electric Power Research Institute NO_x Control Technology Seminar, San Francisco, California, February 1976.

LaRue, A.D.- THE XCL BURNER-LATEST DEVELOPMENTS AND OPERATING EXPERIENCE.- Presented to Joint Symposium on Stationary NO_x Control, San Francisco, California, March 1989

LaRue, A.D., Nikitenko, G.- LOWER NO_x/HIGHER EFFICIENCY COMBUSTION SYSTEMS.- Presented to the EPA/DOE/ EPRI MegaSymposium, Chicago, Illinois, August 2001

Sivy, J.L., Kaufman, K.C., McDonald, D.K.- DEVELOPMENT OF A COMBUSTION SYSTEM FOR B&W's ADVANCED COAL-FIRED LOW-EMISSION BOILER SYSTEM.- Presented at the 22^{nd} International Technical Conference on Coal Utilization and Fuel Systems, Clearwater, Florida, March 1997.

Sivy, J.L., Sarv, H., Koslosky, J.V.- NO_x SUBSYSTEM EVALUATION OF B&W'S ADVANCED COAL-FIRED LOW-EMISSION BOILER SYSTEM AT 100 MBTU/HR.- Proceedings of the EPRI- DOE-EPA Combined Utility Air Pollutant Control Symposium, Washington, D.C., August 1997.

Flynn, T.J., LaRue, A.D., Nolan, P.S.- INTRODUCTION TO BABCOCK & WILCOX'S 100 MBTU/H CLEAN ENVIRONMENT DEVELOPMENT FACILITY.- Presented to American Power Conference, Chicago, Illinois, April 1994.

LaRue, A.D., Bryk, S.A., Kleisley, R.J., Hoh, R.H., Blinka, H.S.- FIRST DRB-4Z BURNER RETROFIT ACHIEVES ULTRA-LOW NO_x EMISSION GOAL.- Presented to POWERGEN International, Orlando, Florida, November 2000.

LaRue, A.D., Costanzo, M.A., Fulmer, J.A., Wohlwend, K.J.- UPDATE OF B&W'S LOW NO_x BURNER EXPERIENCE.- Presented to ASME International Joint Power Generation Conference, Miami, Florida, July 2000.

Latham, C.E., LaRue, A.D.- DESIGNING AIR STAGING SYSTEMS WITH MATHEMATICAL MODELING.- Presented to AFRC/JFRC, Maui, Hawaii, October 1994.

Kokkinos, A., Wasyluk, D., Boris, M.- RETROFIT LOW NO_X EXPERIENCE FOR TANGENTIALLY-FIRED BOILERS – 2002 UP- DATE.- Presented to ICAC, Houston, Texas, February 2002.

Fiveland W.A., Latham C.E. , LaRue A.D.- COMBUSTION SYSTEM OPTIMIZATION BY ADVANCED MODELING TECHNOLOGY.- International Joint Power Generation Conference. Boston 1990

Annual Book of ASTM Standards.- STANDARD TEST METHOD FOR VOLATILE MATTER IN THE ANALYSIS SMAPLE OF COAL AND COKE.- D3175 - 89a, Vol 5.05, pp. 329-331, American Society for Testing and Materials 1991

NFPA - 85C.- PREVENTION OF FURNACE EXPLOSIONS/IMPLOSIONS IN MULTIPLE BURNER BOILER-FIRNACES.- National Fire Protection Association. Quincy, Massachusetts 1991

NFPA - 85F.- INSTALLATION AND OPERATION OF PULVERIZED FUEL SYSTEMS.- National Fire Protection Association, Quince, Massachusetts 1991

B&W.- STEAM: ITS GENERATION AND USE 40^{th} Edition, The Babcock & Wilcox Company, Barberton, Ohio, USA, 1992

Sarv H., LaRue A., Rowley D., Sayre A., Kahle. W. - MINIMIZING NO_x WITH THE INNOVATIVE AIREJET^{TM}, PULVERIZED COAL BURNER.- 32^{nd} International Technical Conference on Coal, June 10-15, 2007.- Clearwater, Florida, U.S.A.

Maringo G.J., Shah A.I., Madden V.F.- LOW NO_x COMBUSTION SYSTEM WITH DSVS^{TM} ROTATING; CLASSIFIER RETROFIT FOR A 630 MWE CELL BURNER UNIT.- Presented to: International Joint Power Generation Conference, October 14-16, 1996.- Houston, Texas, U.S.A.