XV.- HOGARES CICLÓN

pfernandezdiez.es

Disposición del combustor ciclón	*555*
Principios operativos del combustor ciclón	*558*
Combustor ciclón	*558*
Combustión ciclón	*559*
Distribución del aire	*559*
Regímenes de calor	*560*
Capa de escoria	*561*
Combustibles idóneos	*562*
Criterios de evaluación de combustibles	*562*
Factor T250 de viscosidad de la escoria	*563*
Tipos de combustores ciclón para carbones	*564*
Quemador espiral	*564*
Quemador vorticial	*565*
Quemador radial	*565*
Características de diseño	*566*
Hogar de caldera principal	*566*
Entrega del carbón	*567*
a) Sistema de combustión indirecta (sistema de silo)	*567*
b) Sistema de combustión directa	*567*
c) Sistema de combustión directa con presecado	*568*
Alimentadores de carbón	*568*
Equipo de manipulación de escoria	*570*
Quemadores de fuelóleo y de gas	*571*
Otros combustibles	*572*
Combustibles de desechos y de derivados de residuos	*572*
Combustibles derivados de cubiertas de caucho	*572*
Coque de petróleo	*572*
Virutas de madera	*572*
Control de la combustión	*573*
Ignitores	*573*
Cortatiros seccionales de control del aire secundario	*573*
Funcionamiento a cargas bajas	*574*
Requisitos de energía	*574*
Mantenimiento	*575*
Tubos con protuberancias y refractario	*575*
Tubos con protuberancias planas	*576*
Revestimiento por metalización y revestimiento refractario	*576*
Trituradores de carbón	*576*
Control de la contaminación atmosférica	*577*
Polvo	*577*
Reducción de SO_2	*577*
Reducción de NO_x	*578*
Referencias	*580*

La denominación hogar ciclón corresponde al recinto de fuego integrado en el hogar de una caldera, mientras que la de combustor ciclón comprende todos los fuegos como el quemador de carbón, el mechero de fuelóleo, la antorcha de gas, etc. El hogar ciclón y el combustor ciclón se desarrollaron en la década de 1940, para quemar carbones no adecuados para la combustión, como carbón pulverizado. La ceniza de estos carbones se caracteriza por una baja temperatura de ablandamiento y fusión, por lo que podría llegar en estado viscoso a los sobrecalentadores de unidades que queman carbón pulverizado, provocando serias escorificaciones.

El combustor ciclón se diseñó para utilizar una serie de ventajas, como:

- Costes de inversión menores en la preparación del combustible y en la operación (ya que sólo se requieren trituradores y no pulverizadores)

- Un recinto de fuego de pequeñas dimensiones

- Menos ceniza volante y menor ensuciamiento del paso de convección, puesto que en esta zona entra sólo del 15÷30% de la ceniza del combustible, en lugar del 80% característico de las unidades que queman carbón pulverizado

XV.1.- DISPOSICIÓN DEL COMBUSTOR CICLÓN

El combustor ciclón es un cilindro de eje horizontal, de diámetro $\begin{cases} 6 \div 10\ ft \\ 1{,}8 \div 3\ m \end{cases}$, adosado por su parte posterior a una de las paredes del hogar de la caldera, Fig XV.1. El cuerpo del combustor ciclón está refrigerado por agua que circula por el interior de un conjunto de tubos que configuran la superficie del mismo.

La superficie interior del combustor ciclón está recubierta con unas protuberancias puntiagudas, soldadas a la superficie exterior de los tubos y cubiertas con un material de revestimiento refractario, al que sirven de soporte, y que mantiene el combustor ciclón a una temperatura suficientemente alta, facilitándose el vaciado de la ceniza desde la parte inferior de la unidad y reduciendo significativamente la corrosión de los tubos.

El carbón triturado y algo de $aire_{comburente\ primario\ y\ terciario}$, entran por el frente del combustor ciclón a través de quemadores especialmente diseñados, ubicados en la parte cilíndrica frontal del mismo. En el cuerpo principal del combustor ciclón (en la parte superior de la pared cilíndrica del mismo), se crea un vórtice cuando se introduce $aire_{secundario}$, de lo que resulta un flujo gaseoso recirculante y una singular configuración de la combustión. Se desarrolla una capa de ceniza fundida que cubre el cuerpo del ciclón; la escoria se drena hacia el fondo del ciclón y se descarga por medio de una piquera de escoria.

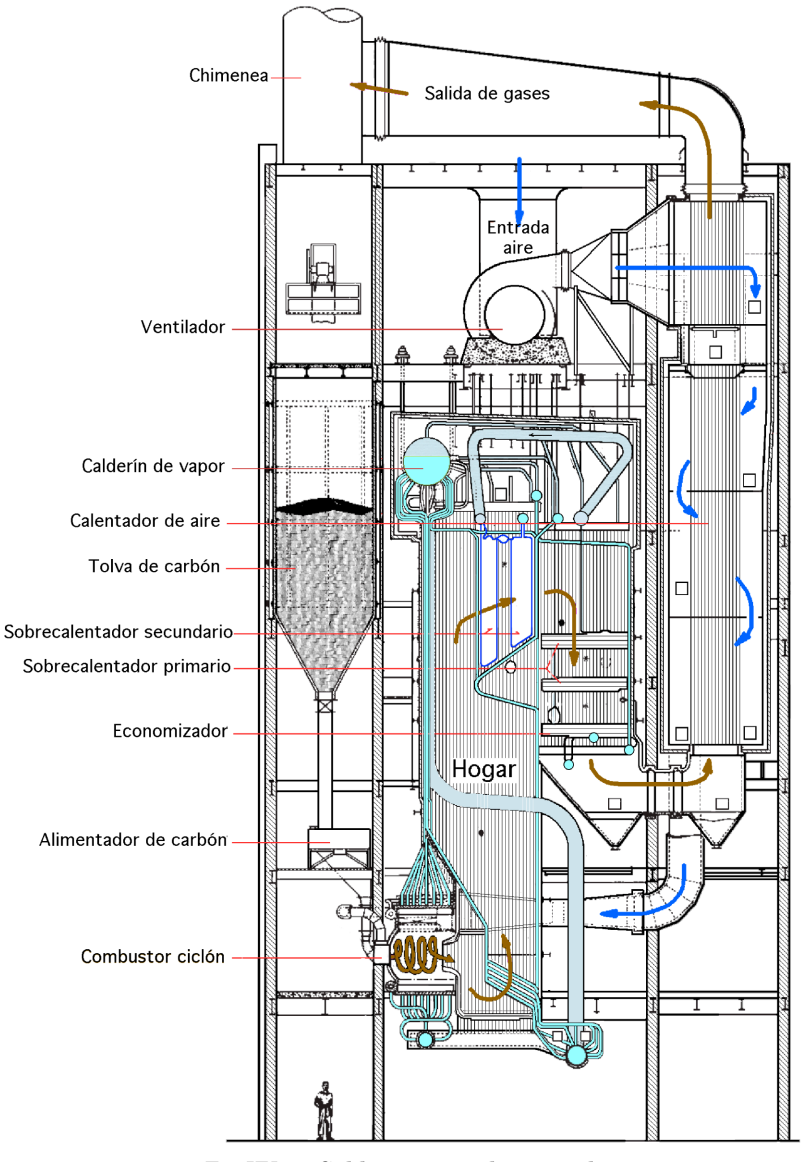


Fig XV.1.- Caldera con combustor ciclón

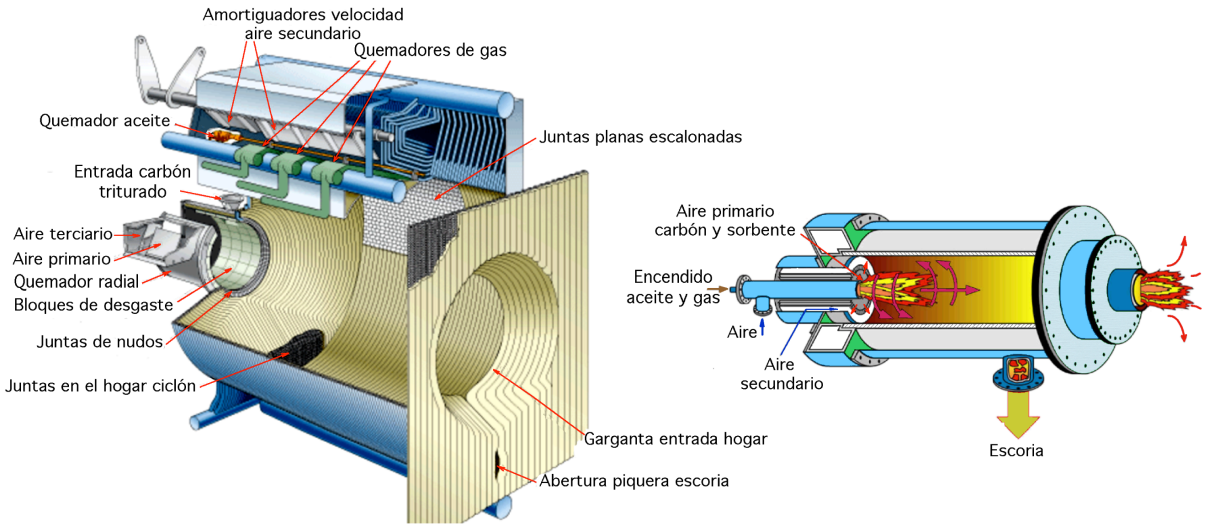


Fig XV.2a.- Combustores ciclón

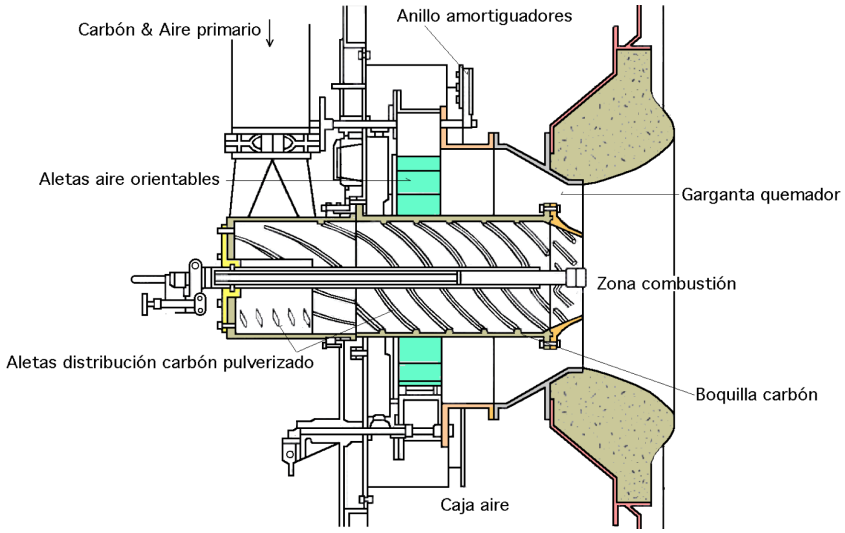


Fig XV.2b.- Combustor ciclón

XV.2.- PRINCIPIOS OPERATIVOS

Para entender el funcionamiento de un combustor ciclón hay que estudiar la combustión del carbón pulverizado. Durante la combustión del carbón en el hogar de la caldera, la parte volátil arde sin dificultad; sin embargo, la combustión del carbono fijo del subcoque del combustible requiere de medidas especiales, para asegurar un suministro continuo de O_2 a las partículas de $C_{inquemado}$.

La mezcla de las partículas de $carbón+aire_{comburente}$ se tiene que producir:

- *Con la turbulencia suficiente para que se desalojen los productos de la combustión*

- *Para facilitar la llegada de aire fresco hasta la superficie de las partículas*

En los sistemas de combustión de carbón pulverizado se alcanzan estas condiciones reduciendo el tamaño del carbón a un polvo extremadamente fino, de modo que el 70% de este material pase a través del tamiz estandarizado de 200 mesh, y mezclarlo el $aire_{comburente}$ dotado de un movimiento rotacional; pasada esta fase inicial, las partículas pequeñas se arrastran por la corriente de aire, con una mezcla mucho menor; la combustión de las partículas de carbón se completa por medio de la difusión del O_2 y de los productos de la combustión que rodean las partículas.

El hogar de una unidad convencional de carbón pulverizado (relativamente grande), facilita un tiempo de residencia suficiente para que el O_2 pueda penetrar en los productos de combustión que se mantienen alrededor de las partículas de carbón y para refrigerar la ceniza a fin de evitar el ensuciamiento del paso de convección.

Combustor ciclón.- Quema partículas de carbón triturado relativamente grandes, que pasan en un 95% a través de la criba de 4 mesh (5 mm), según el tipo de combustible. Las partículas de carbón de este tamaño son demasiado grandes para que se puedan quemar completamente en sus-

pensión, ya que pasarían a lo largo de todo el hogar de la unidad de carbón pulverizado, sin que se quemara por completo la totalidad de su C, por lo que las partículas grandes se tienen que retener en el recinto del combustor ciclón, con paso de aire sobre ellas para que pueda tener lugar la combustión completa.

El combustor ciclón cumplimenta lo anterior mediante la formación de una capa de ceniza fundida que captura y retiene las partículas de masa mayor. Mientras las partículas grandes de carbón quedan atrapadas en la capa de escoria, los volátiles y las partículas más finas arden en suspensión, proporcionando el intenso calor radiante que requiere la combustión en la capa de escoria.

En condiciones ideales, todas las partículas grandes de carbón quedan atrapadas por la ceniza fundida, en la que completan la combustión de su C, dejando atrás la ceniza para conformar la capa de escoria fundida. La mayor parte de la combustión tiene lugar dentro de los recintos de fuego que constituyen los diversos ciclones integrados en la caldera por lo que, el hogar principal puede ser más pequeño que el hogar de una unidad convencional de carbón pulverizado con la que se compara.

XV.3.- COMBUSTIÓN CICLÓN

La inyección tangencial del $aire_{comburente}$ principal crea un vórtice que proyecta las partículas grandes de carbón contra la superficie interior del recinto ciclón, en donde quedan atrapadas por la escoria y se queman completamente. Los gases de combustión calientes salen a lo largo del eje del ciclón y a través de su boca posterior (entrada al hogar), penetran en la caldera de la unidad.

Distribución del aire.- Desde la entrada hasta la salida del combustor ciclón, el flujo ciclónico no sigue un recorrido helicoidal, Fig XV.3; el $aire_{secundario}$ entra tangencialmente en el combustor ciclón a alta velocidad, y pasa a lo largo de la periferia del ciclón o zona de recirculación.

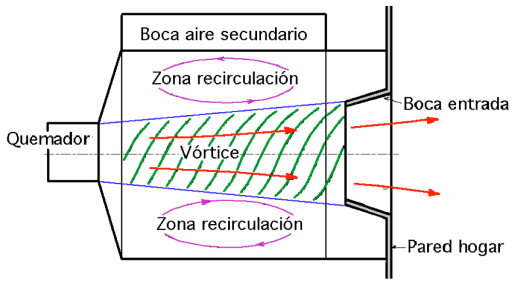


Fig XV.3.- Configuración de recirculación de gases en combustor ciclón

En esta zona, el flujo de aire-humos que circula se aleja de la boca de salida y se acerca a la de entrada del combustor ciclón, gracias al vacío que el vórtice crea en las proximidades del extremo del ciclón donde se encuentra la entrada del quemador.

El flujo general de gases calientes más cercano al eje del ciclón, se desplaza hacia la boca de entrada del hogar, fluyendo desde la zona de recirculación hacia el vórtice del combustor ciclón.

El tiempo de residencia del combustible en la zona de recirculación es proporcional a la velocidad del $aire_{secundario}$, e inversamente a la sección de abertura de entrada al hogar.

El resto del $aire_{comburente}$ se suministra como $aire_{primario}$ y $aire_{terciario}$.

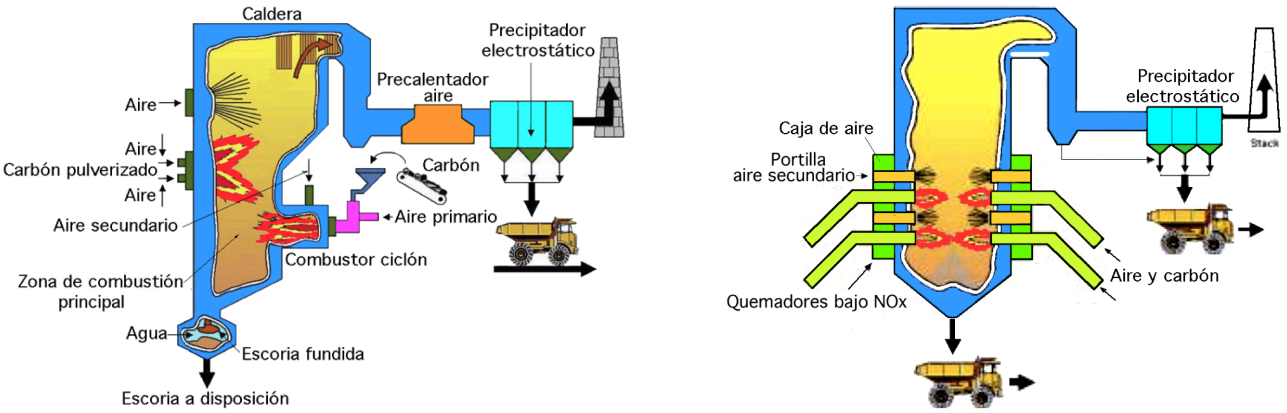


Fig XV.3a.- Posicionamiento del combustor ciclón en una caldera de 100 MWt

El $aire_{primario}$ entra tangencial al combustor ciclón, en el mismo sentido de giro que el $aire_{secundario}$, arrastrando carbón hacia el interior del quemador y controlando la distribución del carbón dentro del recinto del combustor ciclón. Para carbones críticos, el $aire_{primario}$ se minimiza para evitar el lanzamiento del carbón bruto demasiado lejos o cercano al vórtice, aunque tampoco se debe ajustar tan bajo como para que se pueda acumular combustible en el quemador o cerca de él.

El $aire_{terciario}$ pasa por el eje del combustor ciclón y se desplaza a lo largo del eje del recinto ciclón, controlando el vacío vorticial y determinando la posición de la zona de combustión principal, que constituye la fuente de calor radiante. Un incremento del $aire_{terciario}$ reduce el vacío del vórtice en el quemador, permitiendo que la zona de combustión principal se desplace hacia una zona más profunda del ciclón, acercándose a la boca de salida del mismo y a la de entrada al hogar de la caldera.

Regímenes de calor.- Dentro del ciclón, el combustible sólido se quema liberando calor del orden de $\begin{cases} 450.000 \div 800.000\ Btu/\ ft^3\,h \\ 4{,}66 \div 8{,}28\ MW_t/m^3 \end{cases}$ con temperaturas de gases de combustión del orden de $\begin{cases} 3600°F \\ 1650°C \end{cases}$

Los regímenes de absorción de calor en las paredes refrigeradas por agua son relativamente bajos, $\begin{cases} 40.000 \div 80.000\ Btu/ft^2\,h \\ 414 \div 828\ kW/m^2 \end{cases}$ debido a que el combustor ciclón tiene una superficie proyectada comparativamente pequeña y protegida por un revestimiento refractario.

Los $\begin{cases} \text{- altos regímenes de liberación de calor} \\ \text{- bajos regímenes de absorción de calor} \end{cases}$ se combinan para asegurar unas temperaturas muy altas a la salida del combustor ciclón, que son necesarias para completar la combustión y para mantener fundida la capa de escoria; producen elevados niveles de NO_2 característicos de los combustores ciclón que queman carbones bituminosos.

El combustor ciclón atrapa y quema todo el carbón que pueda manipular; el resto del combus-

tible no quemado, pasa al hogar de la unidad y llega a la salida de la caldera como carbón no quemado.

Durante un caldeo excesivo a largo plazo, si el ciclón opera con una atmósfera reductora, se puede producir la corrosión y deterioro de los tubos, por ataque del sulfuro de hierro, pudiendo también causar problemas en el hogar de la caldera y en el paso de convección de la misma.

Capa de escoria.- El intenso calor radiante y las altas temperaturas funden la ceniza, configurando una escoria viscosa que cubre la totalidad de la superficie del ciclón, con excepción del área que corresponde al frente de la abertura del $aire_{secundario}$. El recubrimiento refractario del recinto contribuye a mantener fundida la escoria, limitando la absorción de calor por las paredes refrigeradas por agua.

La capa de escoria se mantiene fluida y caliente gracias a la combustión y fluye constantemente desde el recinto del quemador hacia el hogar de la caldera, desde el que se lleva a través de una piquera practicada en el suelo, hacia un tanque de agua.

La capa de escoria se repone constantemente mediante la ceniza del carbón que penetra en el combustor ciclón; es por ésto por lo que los carbones,

- Bituminosos quemados en combustores ciclón necesitan un mínimo del 6% de ceniza (sobre seco)

- Subbituminosos un 4% de ceniza

Las condiciones óptimas de combustión se alcanzan cuando el $aire_{exceso}$ se mantiene ≈ 2,5% de O_2; si se utilizan mayores o menores niveles de O_2 la temperatura de operación del ciclón tiende a disminuir.

Las calderas equipadas con grandes combustores ciclón suelen quemar con mayores niveles de O_2 a la salida, para proteger los ciclones de una posible corrosión provocada por la atmósfera reductora.

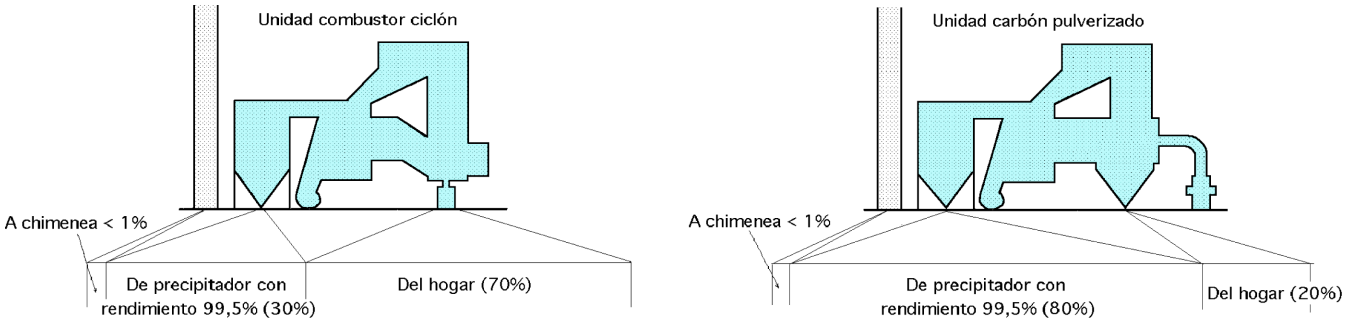


Fig XV.4.- Comparación de distribución ceniza, entre escoria y polvo, en una unidad grande con combustores ciclón y en una unidad típica de carbón pulverizado

El indicador principal de la temperatura de operación del ciclón es el de la temperatura de la escoria en la piquera de salida, que depende del aporte de calor al combustor ciclón. El aporte de calor radiante indica la fracción de la combustión que tiene lugar dentro del recinto del ciclón.

En condiciones ideales de combustión, el ciclón puede capturar un 70% de la ceniza original del combustible, en forma de escoria, y drenar después ésta hacia el hogar de la caldera, para su posterior vertido en un tanque de escoria Fig XV.4.

XV.4.- COMBUSTIBLES IDÓNEOS

El combustor ciclón puede manipular un amplio campo de carbones, desde los bituminosos bajos en volátiles, hasta los lignitos, dependiendo fundamentalmente de la preparación del combustible y del sistema de entrega; también sirve para la combustión simultánea de otros combustibles, como los derivados de desechos sólidos, virutas de madera, cortezas de todo tipo, subcoque (char) de carbón, derivados de residuos, coque de petróleo, derivados de ruedas de caucho, etc.

Los fuelóleos y gases combustibles se pueden quemar en los combustores ciclón, como combustible
- *principal*
- *de contingencia*
- *de puesta en servicio*

A largo plazo, la combustión exclusiva de fuelóleo o de gas se puede mantener sólo en un combustor ciclón con tubos desnudos, porque estos combustibles pueden destruir el revestimiento de escoria y refractario, provocando la erosión de los tubos, lo que conduce a fallos de las partes a presión de la unidad generadora de vapor.

Los combustores ciclón que cambian de combustible, pasando desde carbón a fuelóleo o gas, para operar en un prolongado período de tiempo, en esas nuevas circunstancias, deben:

- *Desprenderse de todo su refractario*
- *Anular la piquera y el vaciado de escoria*
- *Limpiar todos los conductos de aire*

Las protuberancias de los tubos se pueden mantener, en el caso de cambio de combustible, ya que tienen un mínimo efecto sobre la absorción de calor.

Tras un cambio de combustible, cuando se vuelve de nuevo a la utilización del carbón anterior, se debe reponer el refractario y restablecer la piquera de vaciado de escoria.

Criterios de evaluación de combustibles.- Los carbones y otros combustibles que se pueden quemar simultáneamente en un combustor ciclón, se evalúan según diversos criterios:

a) Para asegurar una combustión estable dentro del combustor ciclón:

- El contenido en materias volátiles debe ser superior al 15% sobre base seca

- El contenido en cenizas debe estar entre el $\begin{cases} 6{,}25\% \text{ sobre base seca para carbones bituminosos} \\ 4\% \text{ sobre base seca para subbituminosos} \end{cases}$

b) Con carbones bajos en ceniza no se puede desarrollar ni mantener una buena y adecuada capa de escoria, por lo que ésta se puede espesar mediante el incremento de $aire_{exceso}$ *y la consiguiente reducción de la temperatura de combustión en el ciclón, si lo permiten las demás condiciones operativas de la unidad.*

c) El contenido en humedad para los combustores ciclón que queman carbón bituminoso estándar, no debe exceder del 20%

Para secar el carbón con vistas a una adecuada combustión, los contenidos en humedad más elevados requieren un mayor troceado y temperaturas del $aire_{secundario}$ más altas.

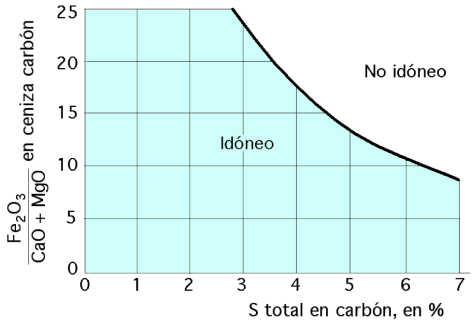


Fig XV.5.- Idoneidad de carbones para combustores ciclón, basada en la tendencia a formar Fe y sulfuro de Fe

Los combustibles húmedos requieren de un sistema de presecado, habitual en los generadores de vapor que queman lignitos en combustores ciclón.

Otra propiedad relativa a la ceniza del carbón, es su tendencia a formar compuestos de Fe y a iniciar un ataque corrosivo del sulfuro de Fe al refractario y al cuerpo del ciclón, efecto que se puede evaluar comparando la cantidad total de S en las relaciones Fe/Ca y Fe/Mg, Fig XV.5.

Los granos de Fe solidificados que se encuentran en el suelo del ciclón durante los períodos de inactividad del mismo, constituyen un indicativo prematuro del ataque por sulfuro de Fe.

XV.5.- FACTOR T_{250} DE VISCOSIDAD DE LA ESCORIA

Un factor importante en la evaluación de carbones para combustores ciclón, es la característica de la viscosidad de la escoria denominada T_{250}, que es la temperatura a la que la escoria del carbón fluye con normalidad sobre una superficie horizontal, tiene una viscosidad de 250 centipoise, y divide a los carbones para su uso en los combustores ciclón en dos categorías $\begin{cases} idóneos \\ no\ idóneos \end{cases}$

Una escoria con mayor viscosidad conduce a un flujo estacionario en el combustor ciclón y en el hogar y puede resultar demasiado espesa para atrapar las partículas de carbón no quemado con el fin de lograr una adecuada combustión. El valor máximo de T_{250} recomendado para todos los ciclones que queman carbones bituminosos, es de 2450ºF (1343ºC).

Con el empleo creciente de carbones subbituminosos bajos en S, cuando éstos se queman en combustores ciclón estandarizados, se ha establecido un límite de T_{250} = 2300ºF (1260ºC), que compensa el efecto de una mayor humedad del carbón sobre la temperatura de combustión en el ciclón.

Para algunos carbones, el valor T_{250} se puede reducir conforme varía la relación de componentes $\frac{básicos}{ácidos}$ de la ceniza, lo que se puede lograr añadiendo un fundente como la caliza; para asegurar una mezcla uniforme, el fundente se suministra sobre la cinta de carbón aguas arriba del triturador.

Si un ciclón tiene que quemar carbón con ceniza de elevada temperatura de fusión, lo mejor es ajustar el valor de T_{250} por medio de la mezcla con otro carbón diferente, aunque esta solución representa mayores costes en la manipulación del combustible.

La mezcla de carbones y la fusión de la ceniza son importantes con vistas a una política de mantenimiento aceptable. Los combustibles utilizados, que se queman al mismo tiempo, se deben evaluar individualmente haciendo especial mención al contenido de ceniza referido al % de aporte de calor.

Tabla XV.1- Características generales de carbones idóneos para su combustión en combustores ciclón

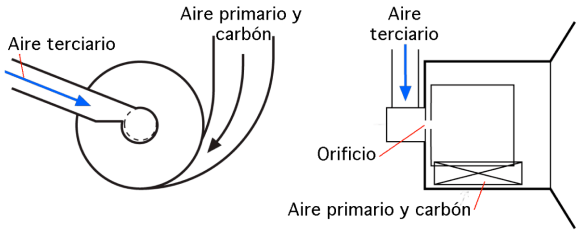
Ceniza	*Mínima-bituminoso*	*6% sobre seco*
	Mínima-subbituminoso	*4% sobre seco*
	Máxima	*25% sobre seco*
Humedad	*Combustión indirecta (bituminoso) - máx.*	*20% como se quema*
	Combustión directa (Subbituminoso) - máx.	*30% como se quema*
	Con presecado - máx.	*42% como se quema*
Volátiles	*Mínimo*	*15% sobre seco*
T_{250}	*Bituminoso - máxima*	*2450°F (1343°C)*
	Subbituminoso - máxima	*2300°F (1260°C)*
Tendencias "hierro ceniza carbón/azufre"		*Ver Fig XV.4*

XV.6.- TIPOS DE COMBUSTORES CICLÓN PARA CARBONES

En el combustor ciclón los quemadores inyectan el carbón troceado por el extremo frontal del mismo y le imprimen un movimiento rotacional, con el mismo sentido de rotación que el del $aire_{secundario}$; los combustores ciclón han equipado tres tipos diferentes de quemadores de carbón: el espiral, el vorticial y el radial, Fig XV.6abc.

Quemador espiral.- Se utilizó en los primeros combustores ciclón, y combinaba el $aire_{primario}$ y el carbón a la salida del alimentador, inyectando la mezcla según un modelo de distribución con perfil cónico. El $aire_{terciario}$ se admitía por el centro del quemador y controlaba la posición de la llama principal dentro del combustor ciclón, por lo que este modelo de inyección producía una alta concentración de partículas de carbón circulando alrededor de la salida del quemador, lo que provocaba una fuerte erosión en el bloque de desgaste del quemador. La mezcla de $aire_{primario}$ y carbón reque-

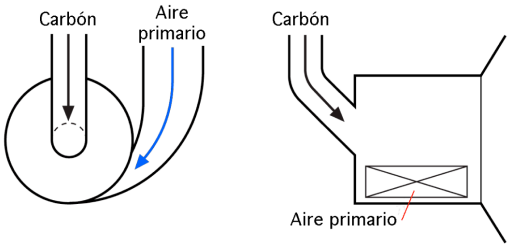
ría de una válvula rotativa de cierre para proteger el alimentador de retorno del flujo de $aire_{combu-rente}$ caliente.



FigXV.6a.- Quemador de carbón para combustor ciclón espiral

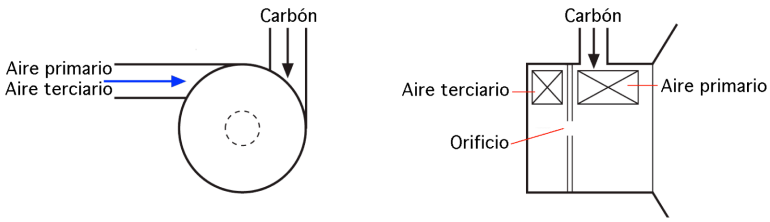
En los últimos modelos de quemadores espirales la válvula se ha sustituido por una mayor altura de carbón a la salida del alimentador, lo que impide el reflujo de aire caliente hacia el alimentador y la tolva de carbón.

Quemador vorticial.- Elimina el mecanismo de cierre alimentando por separado el quemador con el carbón y $aire_{primario}$ que entra tangencialmente en el cilindro del combustor ciclón, igual que en el quemador espiral, generando una configuración de inyección con perfil cónico, mientras que el carbón penetra en el recinto por el eje del cilindro del combustor ciclón, lo que elimina la boca de $aire_{terciario}$, aunque ajustando el aire de cierre del alimentador se tiene el mismo efecto sobre la zona de vórtice del ciclón combustor. Los bloques cerámicos de desgaste y el nuevo diseño de las entradas del quemador ciclón reducen los problemas de erosión.



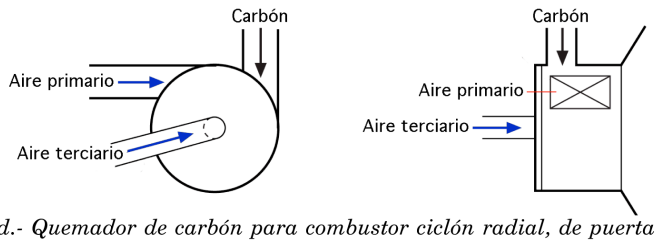
FigXV.6b.- Quemador de carbón para combustor ciclón vorticial

Quemador radial.- Elimina la erosión de los bloques de desgaste; al igual que en el vorticial, el quemador radial no mezcla el carbón y el $aire_{primario}$ hasta que se encuentran dentro del recinto del quemador; el carbón entra tangencialmente en el quemador, con el mismo sentido de giro que el $aire_{primario}$.



FigXV.6c.- Quemador de carbón para combustor ciclón radial

El $aire_{terciario}$ entra axialmente, mientras que las partículas de carbón, al pasar por los bloques de desgaste de la boca del quemador, entran en el ciclón formando largas líneas de corriente de C concentrado; este método reduce la concentración de carbón recirculante alrededor de la boca del quemador, minimizando la erosión de los bloques de desgaste. El quemador radial es idóneo para ciclones combustores que queman carbón bituminoso; se utiliza en unidades con combustores



FigXV.6d.- Quemador de carbón para combustor ciclón radial, de puerta delgada

ciclón que queman lignitos, porque el presecado durante la preparación del combustible, antes de su introducción en el quemador, requiere la mezcla de $aire_{primario}$ y carbón.

Los quemadores vorticial, radial y espiral, tienen ubicaciones de entrada de carbón ligeramente diferentes; cuando se requiere el cambio de uno a otro quemador, es preciso modificar la longitud de los alimentadores de carbón.

XV.7.- CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO

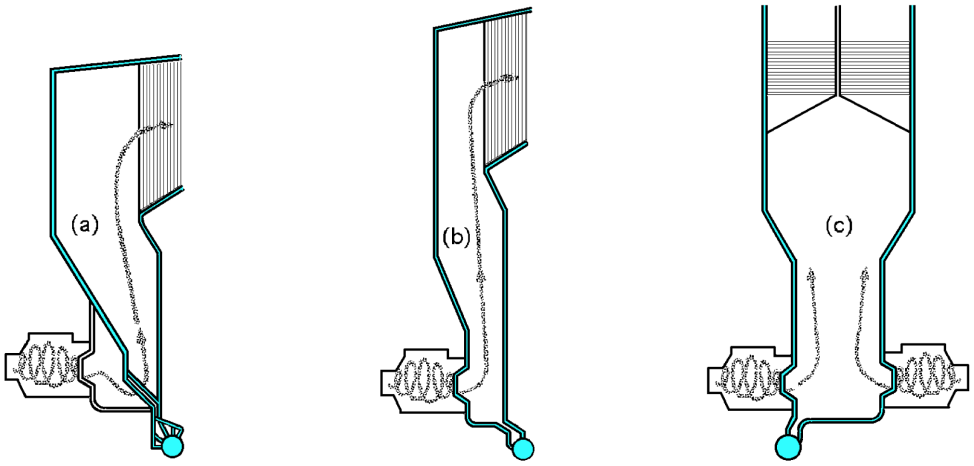
Hogar de caldera principal.- Los combustores ciclón se construyen con diámetros que van de $\begin{cases} 6 \div 10\ ft \\ 1{,}8 \div 3\ m \end{cases}$ para unos aportes máximos de calor de $\begin{cases} 160 \div 425).10^6\ Btu/h \\ 47 \div 124{,}6\ MWt \end{cases}$, respectivamente.

Tal como se representa en la Fig XV.7, el combustor ciclón se ha utilizado en tres configuraciones diferentes de calderas con fuegos en $\begin{cases} \text{- una sola pared con } \begin{cases} \text{- parrilla, Fig XIV.1} \\ \text{- hogar abierto, Fig XIV.8} \end{cases} \\ \text{- dos paredes, Fig XIV.8} \end{cases}$

La disposición de los combustores ciclón en calderas pueden ser desde:

- *Un único combustor ciclón de 6 ft (1,8 m) en una sola pared para una unidad pequeña*

- *Hasta un conjunto de 22 ciclones combustores de 10 ft (3 m) en dos paredes para una unidad de 1100 MW*



a) Disposición hogar apantallado en pared única ; b) Disposición hogar abierto en pared única
c) Disposición hogar abierto en doble pared
Fig XV.7.- Disposición de combustores ciclón en calderas

En todos los casos, el hogar de la caldera es relativamente pequeño, para así poder mantener su temperatura por encima de la que requiere la piquera de escoria (en el suelo del hogar), y también para facilitar el flujo de escoria en las paredes del hogar. La cámara inferior del hogar tiene un revestimiento refractario protector, que se sostiene por medio de miles de protuberancias convenientemente soldadas a los tubos que configuran el hogar.

La caldera equipada con ciclones puede operar de forma continuada, con bajadas de carga hasta el 50% de la capacidad total; por debajo de esta carga, la escoria solidifica en el suelo del hogar obstruyendo las piqueras, por lo que muchas unidades están dotadas con grandes piqueras.

ENTREGA DEL CARBÓN.- Las calderas equipadas con combustores ciclón disponen de tres sistemas de entrega de carbón, según la combustión sea
- *indirecta (sistema de silo)*
- *directa*
- *directa con presecado*

a) Combustión indirecta (sistema de silo).- Es la más simple, barata y común; con este sistema, una breve indisponibilidad de un triturador no interrumpe las operaciones de la caldera. Para preparar el carbón destinado a la carga por la parte superior de las tolvas, Fig XV.8a, utiliza un par de grandes trituradoras en una torre central; el carbón triturado tiene un tamaño de partícula relativamente grande, por lo que no existen los riesgos de incendio asociados al almacenaje y manipulación del carbón pulverizado. Para eliminar los gases procedentes de la trituración del carbón requiere de un sistema de ventilación.

Un sistema de silo se puede remodelar para quemar carbones con alta humedad, transformando las toberas de transferencia del carbón en un sistema simple de presecado, Fig XV.8b.

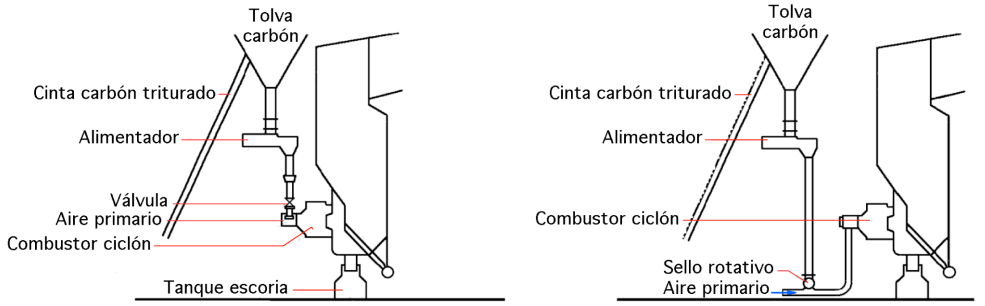


Fig XV.8a.b.- Sistemas de combustión indirecta y sistema de remodelación de presecado

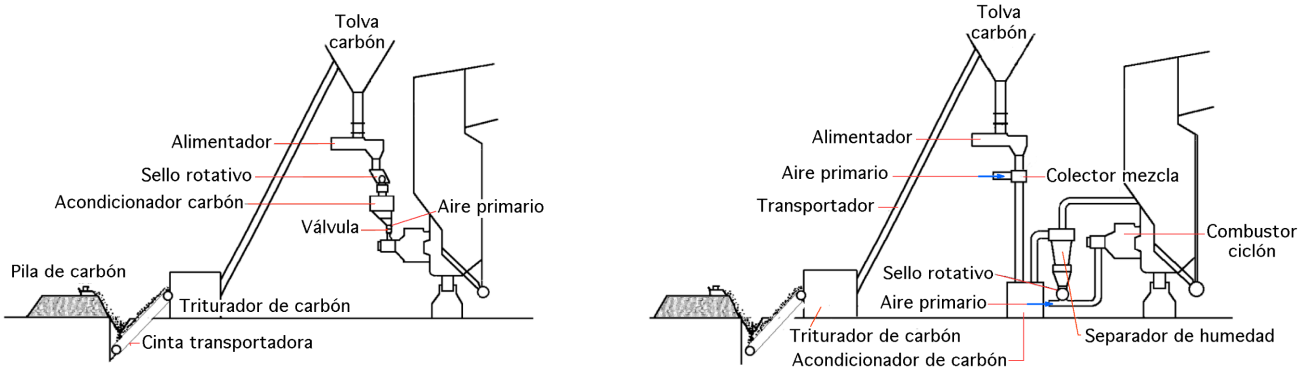


Fig XV.8c.d.- Sistemas de combustión directa y de combustión directa con presecado

b) Sistema de combustión directa.- Emplea un triturador individual, más pequeño, ubicado entre el alimentador de carbón y el quemador correspondiente a cada ciclón, que está barrido con aire caliente que elimina la humedad del carbón recién troceado, lo que conduce, cuando se queman

carbones que tienen contenidos de humedad hasta el 30%, a la mejora de las características operativas del triturador y de la ignición del combustible; este sistema puede incluir clasificadores del triturado y separadores de humedad de tipo mecánico, Fig XV.8c.

c) Sistema de combustión directa con presecado.- Prepara el combustible para ciclón, cuando éste tiene que quemar lignitos y otros carbones con altas humedades, Fig XV.8d. Los separadores mecánicos ciclón eliminan la humedad y los finos de la mezcla aire+carbón e introducen la mezcla directamente al hogar de la caldera, a través de la cámara de recirculación de gases; la eliminación de la humedad del carbón principal incrementa la temperatura de combustión en el combustor ciclón. Con separadores de humedad, Fig XV.8d, este sistema diseñado para lignitos con humedad superior al 36%, manipula carbones de mala calidad con la misma facilidad con la que los combustores ciclón del sistema estándar queman carbones bituminosos.

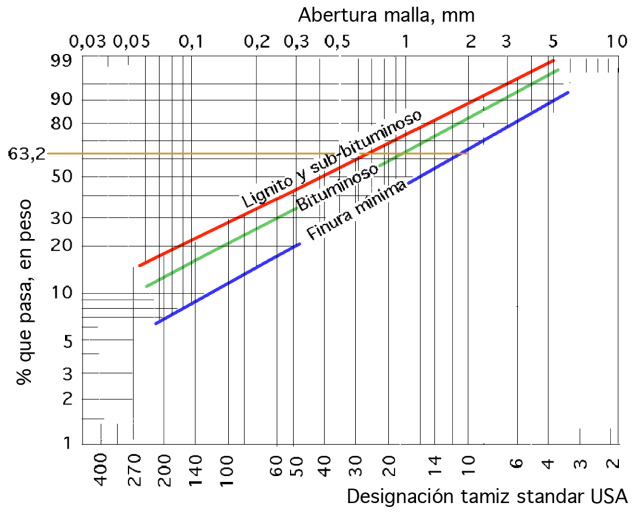


Fig XV.9
Requisitos de tamaño del carbón triturado para combustor ciclón

Por lo que respecta al tamaño del carbón, la distribución preferida para los diversos grados de carbones se muestra en la Fig XV.9. Un combustor ciclón manipula una cantidad limitada de carbón pulverizado, siendo difícil triturar carbón hasta una finura que resulte inadecuada para su combustión en un combustor ciclón, por lo que los trituradores no pueden alcanzar, en ningún caso, la capacidad de finura de un pulverizador. Para un carbón con $\begin{cases} \text{- } alta\ humedad \\ \text{- } ceniza\ de\ bajo\ punto\ de\ fusión \end{cases}$ conviene mantener, durante el troceado, la máxima producción de porcentaje de finos.

Alimentadores de carbón.- En los combustores ciclón se utilizan diferentes tipos de alimentadores de carbón para mejorar el control y la continuidad del flujo de carbón.

Las primitivas unidades generadoras de vapor dotadas de combustores ciclón, se equipaban con alimentadores $\begin{cases} \text{- } pequeños\ tipo\ plato \\ \text{- } de\ paletas\ o\ escalones \\ \text{- } volumétricos\ de\ cinta \\ \text{- } gravimétricos\ de\ cinta\ o\ banda\ continua \end{cases}$

El alimentador de carbón que se prefiere en la actualidad es el gravimétrico de cinta, dotado con con un moderno sistema de control. La exactitud de la relación $\frac{Combustible}{Aire}$ para optimizar las características operativas del combustor ciclón, exige disponer de un alimentador gravimétrico.

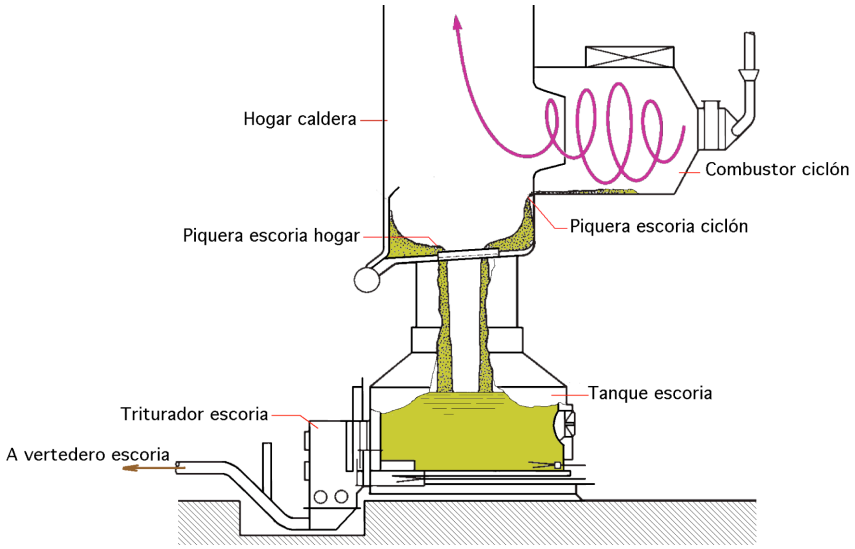


Fig XV.10.- Sistema de manipulación de escoria con evacuación periódica para caldera equipada con combustores ciclón

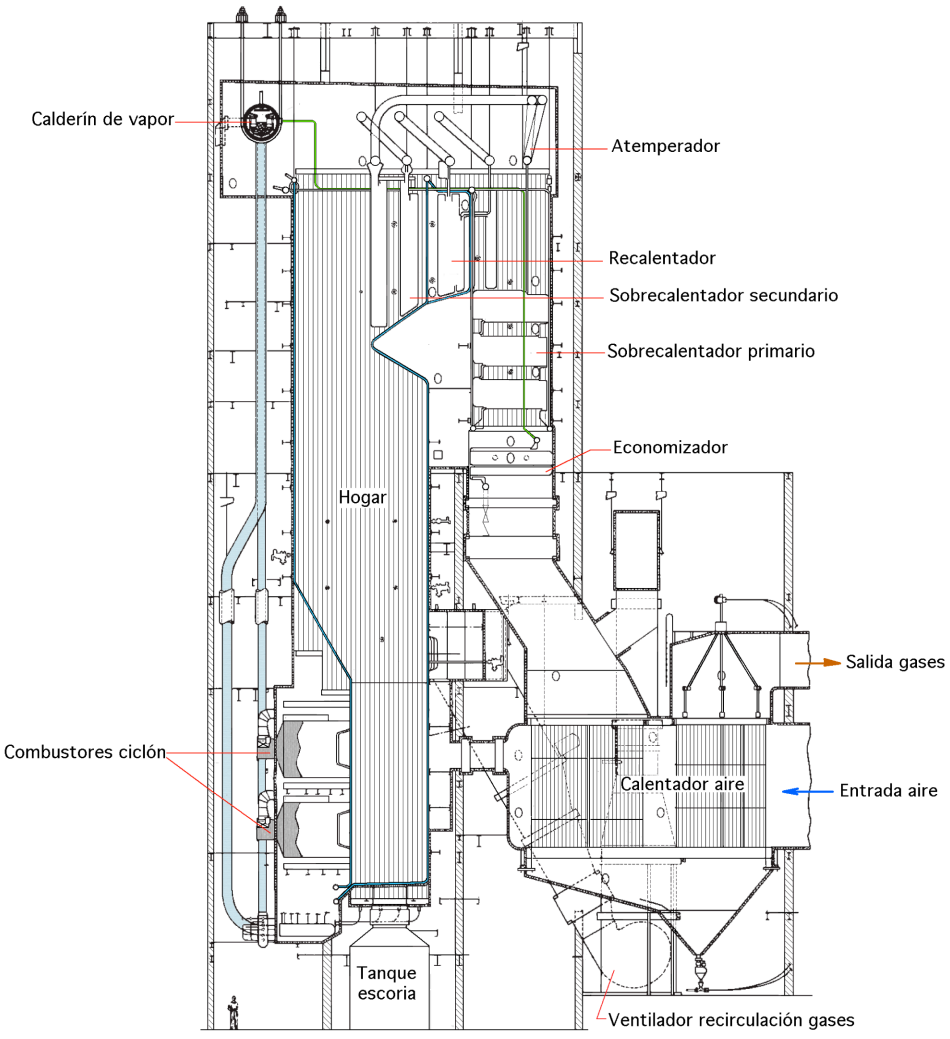


Fig XV.11.- Caldera radiante con combustores ciclón en una pared

Equipo de manipulación de escoria.- Las calderas equipadas con combustores ciclón disponen de un sistema de eliminación de lechada para deshacerse de la escoria, Fig XV.10. La escoria fundida fluye constantemente a través de la piquera del suelo del hogar de la caldera, y pasa a un tanque situado bajo el mismo, en el que se enfría y solidifica en un baño de agua. La escoria acumulada se trocea por medio de un triturador y se evacúa en diversas partidas; puede crear una acumulación de gas en la parte superior del tanque que constituye el baño de agua.

También se puede presentar una obturación de la piquera de escoria, situada en el suelo del hogar, lo que provocaría una acumulación de CO en la parte baja del hogar de la caldera; las posibles situaciones explosivas se pueden evitar instalando y manteniendo una línea de venteo de gases, desde la parte superior del tanque de agua hasta la salida del economizador de la caldera.

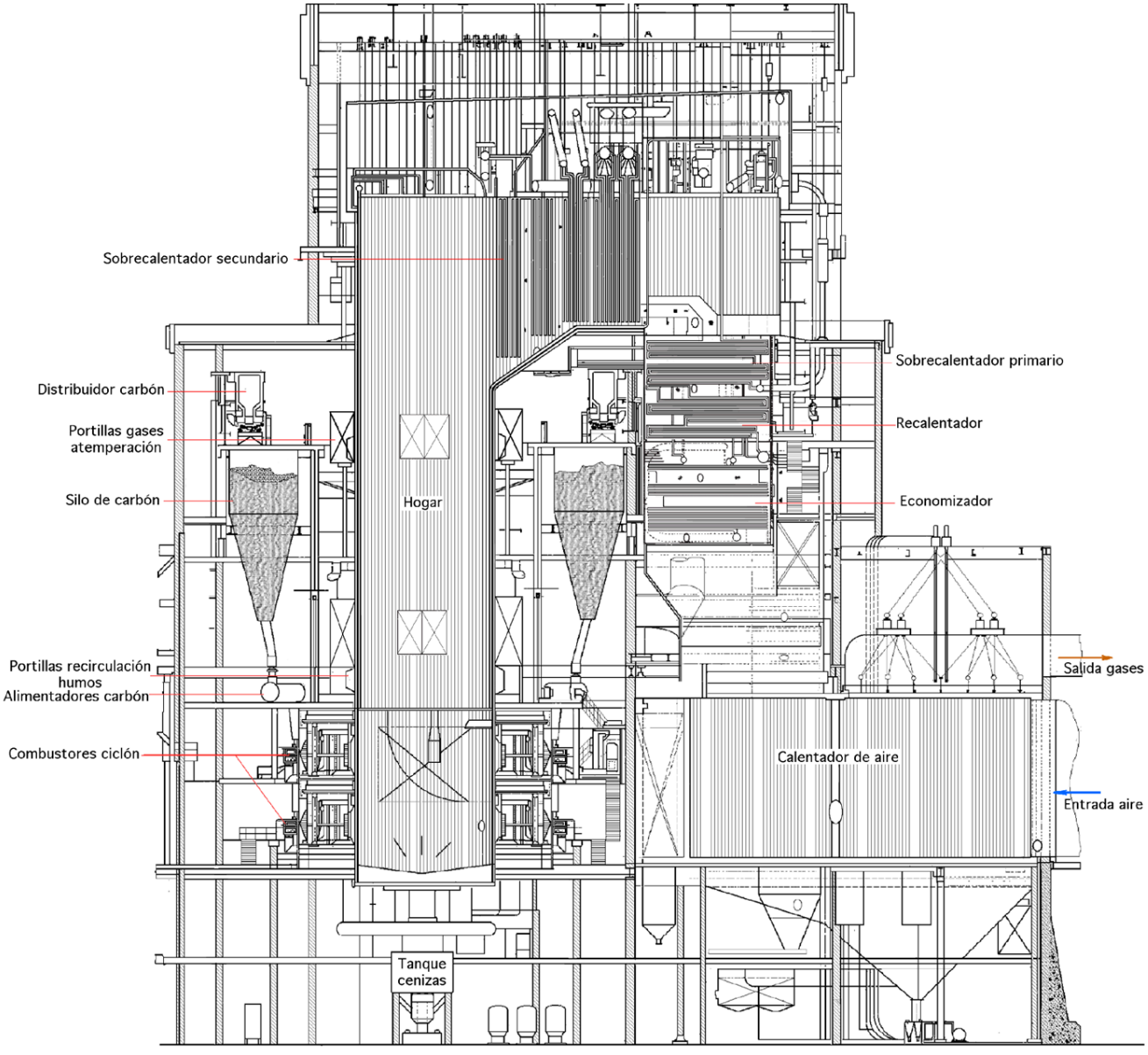


Fig XV.12.- Caldera de PU con ciclones en paredes opuestas y sistema de silo para preparación y alimentación de carbón

Quemadores de fuelóleo y de gas.- Aunque el carbón es el combustible principal de un combustor ciclón, en el mismo se pueden utilizar fuelóleo y gas, como combustibles:

- De puesta en servicio y combustibles auxiliares

- Principales, empleando los sistemas de combustión representados en la Fig XV.13

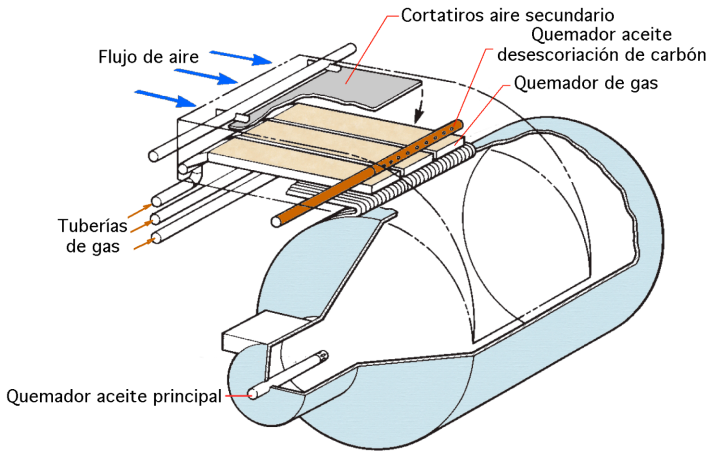


Fig XV.13.- Disposición de quemadores de fuelóleo y gas en combustor ciclón

Debido a la elevada caída de presión en el $aire_{comburente}$, común a todos los ciclones, estos combustores no pueden competir con otros tipos de quemadores (mecheros, antorchas) en los que el combustible principal es fuelóleo o gas.

El quemador de fuelóleo puede ser un simple tubo que atraviesa la entrada de $aire_{secundario}$, o una lanza de fuelóleo a través de la boca del quemador de carbón. El mechero, constituido por el tubo transversal a la entrada de $aire_{secundario}$, tiene una fila de agujeros radiales dirigidos tangencialmente hacia el ciclón. Este diseño se ha revelado como un excelente quemador de fuelóleo, aunque su inyección en el interior de la zona de recirculación del combustor ciclón da lugar a un régimen alto de liberación de calor, por lo que a largo plazo, los tubos desnudos pueden sufrir daños térmicos.

Este quemador de fuelóleo se sigue utilizando como un equipo de emergencia, en unidades que queman carbones con altos valores de T_{250}, para desescoriar los combustores ciclón, empleándose también para desescoriar un convector ciclón cuando se produce una interrupción en la caldera.

Un diseño alternativo utiliza un quemador de fuelóleo ubicado en el eje del combustor ciclón, que quema dentro del vórtice del mismo; este diseño crea algunos problemas en la limpieza de calderas como consecuencia de los bajos niveles de atomización que se producen con atomizadores mecánicos, problemas que se reducen utilizando grandes atomizadores por aire-vapor, que alcanzan regímenes del orden de $\begin{cases} 4{,}5.10^8\ Btu/h \\ 32\ MW_t \end{cases}$

El quemador (antorcha de gas) se ubica en la garganta de $aire_{secundario}$ inyectando el gas a través de tres toberas. El combustible gaseoso (gas natural) se inyecta directamente en la zona de recirculación y, debido a su bajo poder radiativo, en el combustor ciclón produce un menor aporte de calor, por lo que con el quemador de gas no se suelen presentar daños térmicos a largo plazo; el gas natural no calienta mucho los depósitos de escoria, como lo hace la combustión del fuelóleo, pero ayuda a desescoriar los ciclones obturados.

Las unidades equipadas con combustores ciclón que queman carbón, pueden sustituir este combustible por fuelóleo o por gas, durante un breve período de tiempo, sin que se produzcan daños serios. Sin embargo, el cambio de combustible para un largo período de operación, quemando sólo fuelóleo o gas, requiere que el combustor ciclón se despoje de toda la escoria y de todo el refractario, para prevenir la erosión de los tubos.

XV.8.- OTROS COMBUSTIBLES

Combustibles de desechos.- Los combustores ciclón son adecuados para quemar combustibles de desechos, junto con el carbón de diseño, debido a su elevado régimen de liberación de calor. Una relación de mezcla interesante se corresponde con el 5÷10% del calor de entrada proporcionado por el combustible de desecho.

Combustibles derivados de residuos.- Proceden de las basuras municipales, son los más ligeros y queman con más facilidad. Para minimizar el tiempo de residencia de estas partículas de combustible de desecho dentro del combustor ciclón, el punto ideal de la inyección es la antorcha de $aire_{secundario}$, que debe ser lo suficientemente grande y aislada. En los ciclones, las protuberancias planas soldadas no resisten la erosión producida por las partículas del combustible.

Combustibles derivados de cubiertas de caucho.- Los combustores ciclón, al igual que los hogares mecánicos y las unidades de carbón pulverizado con ceniza fundida, constituyen un procedimiento para deshacerse de las cubiertas de caucho que integran las ruedas de vehículos procedentes de desguaces. El caucho de las cubiertas facilita un excelente combustible, bajo en S, aunque su elasticidad impide las operaciones de troceado, trituración o pulverizado, clásicas en el caso del carbón; un tamaño óptimo de los trozos es de 13÷25 mm, y aunque la industria de desechos del caucho puede facilitar trozos de menor tamaño, su coste superaría el del carbón.

Coque de petróleo.- Existen operadores de combustores ciclón que han quemado con éxito coque de petróleo, mezclado con carbón. Sin embargo, la carencia de volátiles en el coque de petróleo retrasa el quemado de este combustible, con el consiguiente incremento de la temperatura de los gases a la salida del hogar de la caldera y la correspondiente escorificación en el sobrecalentador.

Virutas de madera.- Las virutas de madera, serrín, cortezas y otros productos sólidos de de-

secho, se queman, junto con el carbón, en los combustores ciclón. El contenido en humedad y el tamaño del combustible de residuos determinan la proporción de mezcla más adecuada.

XV.9.- CONTROL DE LA COMBUSTIÓN

La relación $\frac{Combustible}{Aire}$ en cada ciclón es el parámetro fundamental dentro del sistema de control de la combustión. Cuando el flujo de aire es demasiado bajo, en el ciclón se desarrolla una atmósfera reductora que conduce a un ataque corrosivo del sulfuro de Fe sobre el refractario y el armazón de protuberancias, pudiéndose llegar a un fallo de las partes a presión.

En calderas pequeñas, equipadas con uno, dos o tres combustores ciclón, el equilibrado de la relación $\frac{Combustible}{Aire}$ es fácil de realizar y de monitorizar; el $aire_{comburente}$ se suministra por conductos individuales que conducen a cada uno de los combustores ciclón.

En grandes unidades, los combustores ciclón se alojan dentro de cajas de aire que suministran el $aire_{secundario}$, disposición que no se adapta para una monitorización exacta del aire que va a cada uno de los combustores ciclón, por lo que las grandes calderas equipadas con éstos, operan con mayores niveles de $aire_{exceso}$ en comparación con las pequeñas unidades, reduciendo la posibilidad de que se desarrolle una atmósfera reductora en uno o más de los combustores ciclón, debido a desequilibrios entre los flujos.

Ignitores.- Los combustores ciclón están equipados con $\begin{cases} \text{- } encendedores \\ \text{- } ignitores \begin{cases} fuelóleo\ ligero \\ gas \end{cases} \end{cases}$

Los ignitores constituyen la opción más común; ambos tipos (fuelóleo ligero y gas) se ubican dentro del recinto del ciclón combustor, en el frente de salida de la tobera de $aire_{secundario}$.

Los primitivos ciclones utilizaban un ignitor de fuelóleo retráctil, con una capacidad térmica de 5 MW_t que contaba con atomización mecánica.

Para que las operaciones de puesta en servicio resulten críticas, se ha adoptado un ignitor más potente y limpio, que consiste en un mechero de fuelóleo de 7,3 MW_t, que incorpora un:

- Atomizador aire-vapor

- Ignitor de gas retráctil independiente, que se puede sobrealimentar con capacidad entre 5÷ 7,3 MW_t

Cortatiros seccionales de control del $aire_{secundario}$.- Los combustores ciclón se pueden equipar con cortatiros compartimentados (en secciones independientes), dispuestos a todo lo ancho de la entrada de $aire_{secundario}$, lo que facilita un nivel de control que regula la combustión en el recinto ciclón. La polarización de la señal en los cortatiros permite ajustar la configuración de la com-

bustión en el interior del recinto del combustor ciclón, incrementando el tiempo de retención del combustible dentro de recinto.

La efectividad de esta técnica de control aumenta cuando se queman combustibles con alta humedad y bajos niveles de S.

Funcionamiento a cargas bajas.- Los combustores ciclón no pueden operar por debajo de la mitad de la carga nominal sin que se produzca la solidificación de la escoria, siendo normal en el hogar de la caldera que se detenga el vaciado de escoria con cargas inferiores a la citada, ya que en esta situación la solidificación de la escoria tiende a obturar las piqueras. Un combustor ciclón individual puede continuar operativo y, eventualmente, puede lograr que recomience el vaciado de escoria; sin embargo, una caldera que tenga obturada la piquera del suelo del hogar, por solidificación de la escoria, se debe poner fuera de servicio para proceder a la limpieza manual de la misma.

Requisitos de energía.- Las calderas con combustores ciclón tienen unas necesidades de energía muy diferentes de las que queman carbón pulverizado, por cuanto el consumo energético en la preparación del combustible es bajo (el carbón sólo se trocea y no se pulveriza), y porque no se usa un ventilador de $aire_{primario}$. Hay que tener en cuenta que debido a la gran caída de presión en el combustor ciclón (5÷10 kPa), el consumo de los ventiladores de tiro forzado es más alto, Fig XV.14.

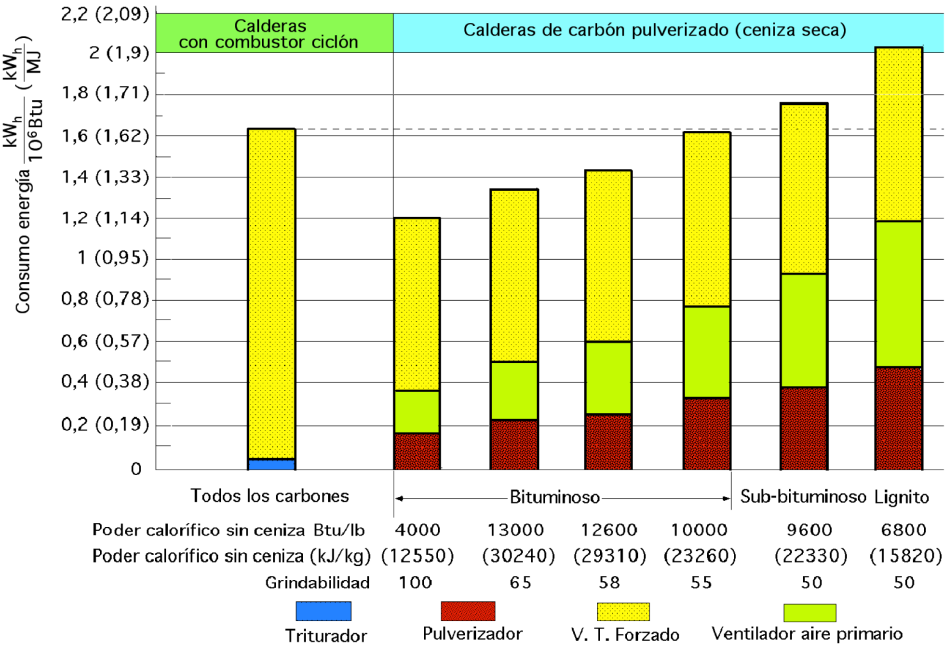


Fig XV.14.- Requisitos de energía auxiliar en unidades típicas de alta capacidad para {*combustores ciclón presurizados* / *carbón pulverizado*}

La diferencia entre la combustión del carbón pulverizado en combustor ciclón y en lecho suspendido, depende de {*el tipo de combustible* / *su poder calorífico*}

La *combustión del carbón pulverizado* en lecho suspendido tiene ventajas en el caso de:

- Altos poderes caloríficos

- Altas grindabilidades

- Consumo de carbones bituminosos

La *combustión en combustor ciclón* tiene ventajas en el supuesto de bajos poderes caloríficos y en aplicaciones que utilicen carbones de baja calidad, como los carbones subbituminosos, lignitos y carbones pardos, que normalmente son difíciles de pulverizar. Para carbones bituminosos con alto poder calorífico, los menores costes de operación en unidades que queman carbón pulverizado, se deben comparar con los menores costes de inversión de los sistemas de combustión en combustores ciclón.

XV.10.- MANTENIMIENTO

En un combustor ciclón, los problemas más importantes son los relativos a la corrosión y a la erosión.

En el quemador:

- La escoria fundida produce un ataque corrosivo del sulfuro de Fe sobre los tubos de las partes a presión

- La erosión predomina en un área opuesta diametralmente a la tobera de aire$_{secundario}$, en la que no se forma un revestimiento protector de escoria

Tubos con protuberancias y refractario.- En las áreas recubiertas con escoria fundida, los tubos se protegen por medio de una capa de refractario, que se mantiene en su sitio mediante unas protuberancias, Fig XV.15, que no sólo sostienen el refractario, sino que también refrigeran la superficie refractaria que está en contacto con la escoria corrosiva y, por lo tanto, retrasan la acción química de la corrosión; las protuberancias protegen al refractario y el refractario protege a las protuberancias.

La experiencia ha demostrado que cuantas más protuberancias existan por unidad de superficie

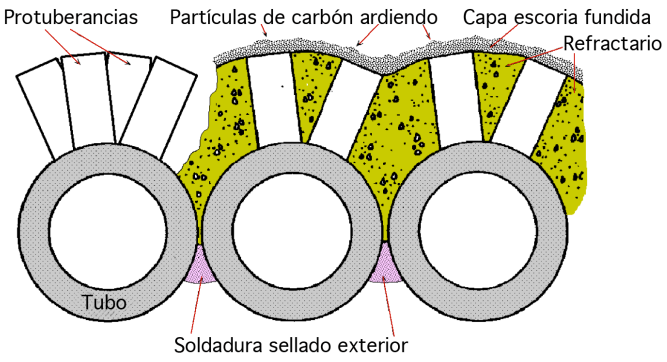


Fig XV.15.- Sección de protuberancias y de refractario de un combustor ciclón

tubular, tanto más se mejoran las características operativas del refractario que ocupa los espacios entre las mismas. El diseño con densidades de protuberancias más elevadas facilita características operativas extraordinarias, en cuanto a su capacidad de proteger al refractario y resistir la corrosión.

Tubos con protuberancias planas.- Los tubos del combustor ciclón que se encuentran en la zona erosiva, diametralmente opuesta a la boca de entrada del $aire_{secundario}$, se suelen proteger contra la erosión provocada por las partículas de combustible con pletinas rectangulares de acero soldadas a los tubos, diseño que tiene una serie de desventajas desde el punto de vista del mantenimiento. Un diseño más avanzado de protuberancias planas dispuestas al tresbolillo, tecnología que ofrece un diseño tan duradero como el propio combustor ciclón, presenta las siguientes ventajas, respecto al anterior:

- Fabricación más exacta de las protuberancias y menores espaciados
- Menor desgaste entre protuberancias
- Buena transferencia de calor, que reduce la temperatura del metal y la erosión del mismo
- Tamaños más gruesos de protuberancias con vida útil más larga

Revestimientos por metalización.- Para mejorar y prolongar la vida de los tubos, se pueden aplicar sobre su superficie determinadas aleaciones mediante pistola de plasma, aunque los resultados de los experimentos realizados con diferentes polvos de metalización, no han sido muy concluyentes. Algunas aplicaciones, que han utilizado revestimientos caros, han experimentado el ataque del sulfuro de Ni, que terminó por destruir el revestimiento, de forma similar a la corrosión que realiza el sulfuro de Fe sobre las protuberancias y las superficies tubulares.

El armazón de protuberancias no ofrece consistencia para las aplicaciones del chorreado por plasma. Algunos revestimientos no admiten la sustitución parcial del armazón de protuberancias, a menos que se retire el revestimiento y toda la superficie tubular afectada.

Refractario.- La experiencia ha puesto de manifiesto que la escoria corrosiva, en cualquiera de sus variantes, se debe mantener alejada de los tubos de la unidad, mediante un revestimiento refractario de alta densidad; la selección del refractario está condicionada por el combustible de la planta en cuestión.

Trituradores de carbón.- Se han mantenido sin cambios a lo largo del tiempo; al aumentar la utilización de los carbones subbituminosos, bajos en S y difíciles de quemar, y la necesidad de triturar el combustible tan fino como sea posible, se han recomendado unas normas de mantenimiento:

- Los tambores se ajustan y los molturadores se invierten con mucha más frecuencia en combustores ciclón de subbituminosos, que en las unidades de carbón estándar

- Los martillos de las trituradoras se desechaban a la mitad de su vida útil, para mantener su masa de impacto en valores de diseño

XV.11.- CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Polvo.- Para cumplimentar los modernos patrones de emisión de partículas, el precipitador de una caldera equipada con combustores ciclón debe ser del mismo tamaño que el de una unidad similar convencional de carbón pulverizado. La producción de más escoria y menos cantidad de polvo (ceniza volante), que una unidad similar de carbón pulverizado, puede ofrecer algunas ventajas útiles significativas; en muchos casos es más fácil deshacerse de la escoria del hogar, que del polvo.

Los compuestos minerales de la ceniza están fuertemente confinados en la escoria del combustor ciclón. Las propiedades físicas de esta escoria permiten su utilización como material de relleno, por ejemplo, en la construcción de carreteras o como material de chorreado, entre otras aplicaciones.

Algunos combustores ciclón usan la reinyección de polvo en el quemador para deshacerse de la ceniza con más facilidad, quemando el carbono residual de la ceniza y convirtiendo más polvo en escoria; debido al desgaste experimentado por el quemador y por el ciclón, la reinyección de polvo se minimiza. Debido a las mejoras logradas en los bloques de desgaste en quemadores y armazones de protuberancias planas, la reinyección de polvo se puede mantener como una opción más para minimizar los problemas del vertido de cenizas.

Reducción de SO_2.- Las emisiones de SO_2 procedentes del combustor ciclón, al igual que ocurre con otros sistemas de combustión, dependen del contenido en S del combustible utilizado; el método más fácil de reducir las emisiones de SO_2 consiste en cambiar el carbón por otro con menor contenido en S.

Para el cambio de combustible en calderas equipadas con combustores ciclón, se requieren algunos cuidados por cuanto el combustor ciclón es más sensible a
$$\begin{cases} \textit{la composición y cantidad de ceniza} \\ \textit{la humedad del carbón} \\ \textit{el poder calorífico} \end{cases}$$

Si hay que sustituir un carbón bituminoso de baja humedad, por carbones subbituminosos o lignitos de alta humedad, la instalación puede precisar de un sistema de combustión directa con presecado.

En el supuesto de que el carbón seleccionado cumplimente el valor T_{250} la caldera se modifica para que pueda manipular carbones subbituminosos o lignitos bajos en S y humedad, mediante una serie de cambios en los componentes físicos del equipo y en los procedimientos de operación; estas modificaciones se centran en
$$\begin{cases} \textit{- evitar finuras de carbón que puedan dañar el equipo} \\ \textit{- continuar con un intenso programa de mantenimiento} \\ \textit{- dotar los medios necesarios para procesar un desescoriado rápido} \end{cases}$$

Los sistemas de lavado del carbón se instalan para minorar el S pirítico. Aunque el lavado hace que el carbón sea más fácil de quemar en los combustores ciclón, porque eleva el parámetro T_{250}, la realidad es que las emisiones de SO_2 procedentes de un carbón lavado son siempre más reducidas.

Reducción de NO_x.- Las calderas equipadas con combustores ciclón producen niveles de emisión de NO_x relativamente altos, que van de $\begin{cases} 0{,}8 \div 1{,}9\ lb/10^6\ Btu \\ 1200 \div 2850\ mg/m^3\ N \end{cases}$, estando estas cifras corregidas al 3% de O_2.

La combustión en dos etapas puede reducir el nivel de los NO_x hasta el 50% como ocurre en las instalaciones que queman carbón pulverizado, aunque las condiciones de esta reducción en los combustores ciclón, tienen grandes probabilidades de provocar corrosiones inaceptables.

- En este sistema de control, el combustor ciclón opera en condiciones totalmente oxidantes, pero a menor carga, del orden del 65÷85% de la correspondiente al combustible y aire a plena carga

- El combustible restante se inyecta directamente en el hogar de la caldera, con un mínimo aire de transporte, para crear la zona reductora correspondiente a la recombustión

- En esta zona reductora, el combustible requemado crea un déficit de O_2 reduciendo el NO_x producido en el combustor ciclón, es decir, se descompone en nitrógeno molecular por medio de una serie de interacciones, con activa participación de los radicales de hidrocarburos libres

- Las portillas de $aire_{secundario}$ ubicadas encima de la zona de recombustión, facilitan la inyección del resto de $aire_{comburente}$, para lograr una estequiometría de 1,15÷1,20 y completar la combustión

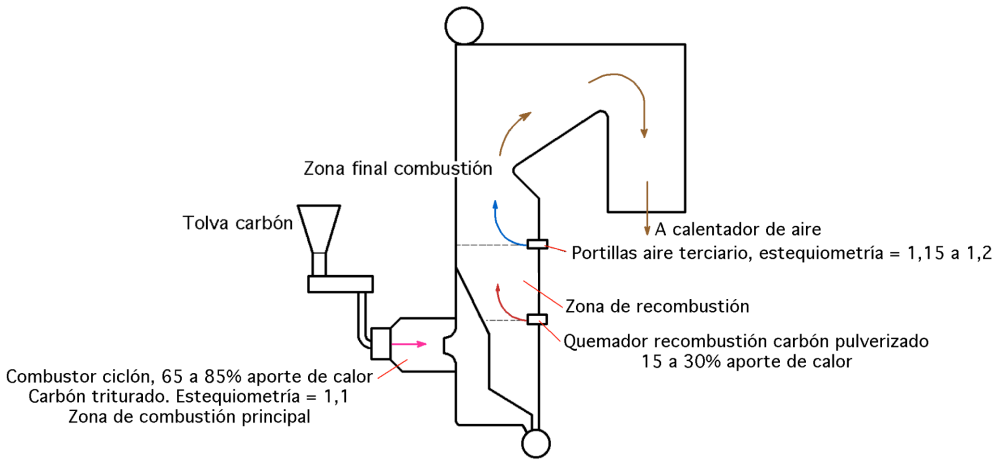


Fig XV.16.- Sistema de control para bajos NO_x por recombustión en combustor ciclón

La utilización de carbón, fuelóleo o gas como combustible de recombustión, depende de la valoración económica que se haga, comparando el capital invertido en un sistema basado en carbón, con el de operación cuando se emplea fuelóleo o gas. Las calderas con combustores ciclón van ganando en aceptación, debido a la posibilidad de quemar gran parte de las reservas existentes de carbón,

que no resultan adecuadas para su combustión en lecho suspendido, como carbón pulverizado.

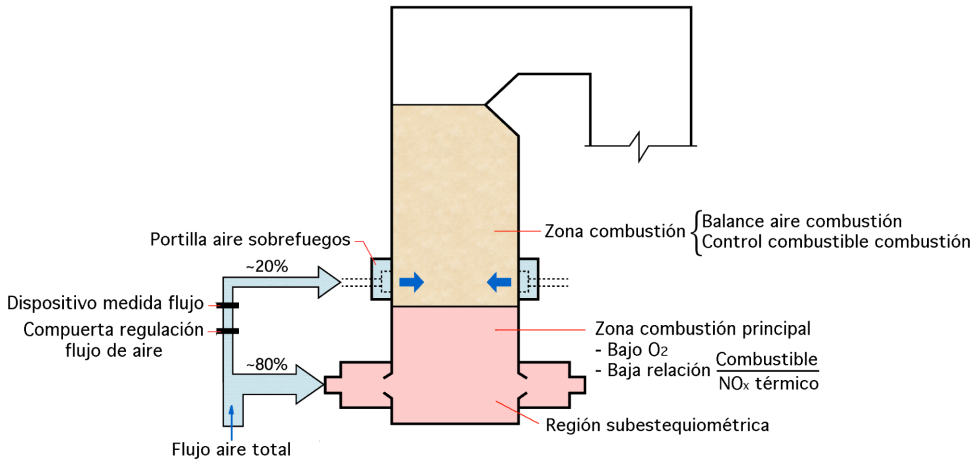


Fig XV.17.- Sistema de control para bajos NO_x, con inyección de aire en etapas en combustor ciclón

Las tecnologías de $\begin{cases} \text{- } \textit{recombustión en los combustores ciclón de bajo } NO_x \\ \text{- } \textit{postcombustión para reducción de los } NO_x \end{cases}$, permiten disponer de calderas equipadas con combustores ciclón, como componente principal de la producción de vapor en plantas

REFERENCIAS CAP XV.- COMBUSTORES CICLÓN

B&W.- STEAM: ITS GENERATION AND USE.- 40th Edition, Chapter 14, The Babcock&Wilcox Company, Barberton, Ohio, USA, (1992)

Fungtammasan B., Torero J., Joulain P.- AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE COMBUSTION CHARACTERISTICS OF SAWDUST IN A CYCLONE COMBUSTOR.- Laboratoire de Chimie-Physique de la Combustion Universite de Poitiers - UA 872 au CNRS .- ENSMABP 109-Site du Futuroscope.- 86960 Futuroscope Cedex, France

Jittrepit P.- THE BURNING CHARACTERISTICS OF ASAW DUSTJIRED CYCLONE COMBUSTOR.- M. Eng. thesis, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok, 1993.

Cheromisnoff N.A.- ENCYCLOPEDIA OF FLUID MECHANICS.- Vol. 4.- (Solidand Gas/Solid Flow), Guff Publishing, Houston, 1986.

Beer M., Chigier N. A.- COMBUSTION AERODYNAMICS.- Applied Science Publishers Ltd., 1972.