XIII.- PULVERIZADORES DE CARBÓN

pfernandezdiez.es

Pulverizadores verticales con extracción por chorro de aire	*481*
Principios operativos	*482*
Control del pulverizador	*485*
Requisitos de diseño	*486*
Pulverizadores tipos E y EL	*487*
Pulverizadores horizontales con extracción por chorro de aire	*490*
Pulverizadores horizontales de alta velocidad	*490*
Tecnología de molienda y secado	*490*
Pulverizadores de baja velocidad	*491*
Pulverizadores tubulares con carga de bolas	*492*
Quemadores de carbón	*493*
Combustión indirecta	*493*
Combustión directa	*494*
Ventiladores	*494*
Sistemas de control	*495*
Curvas de coordinación entre el pulverizador MPS y el quemador	*496*
Tamaño de las partículas	*498*
Temperatura de salida	*499*
Grindabilidad	*500*
Propiedades de desgaste	*501*
Abrasividad	*501*
Erosividad	*501*
Humedad	*502*
Selección del tamaño del pulverizador	*502*
Factor de corrección de la capacidad	*503*
Consumo energético	*503*
Mantenimiento	*504*
Materiales cerámicos	*504*
Incendios y explosiones	*505*
Interrupciones de servicio súbitas	*506*
Controles de seguridad en pulverizadores	*506*
Sistemas especiales de seguridad	*507*
Pulverizadores avanzados	*508*
Clasificadores giratorios	*508*
Mejoras en los pulverizadores de carbón MPS	*508*
Molienda ultrafina	*509*
Referencias	*511*

El desarrollo de la pulverización de carbón es paralelo al de la tecnología de combustión del carbón pulverizado; los primitivos sistemas utilizaban molinos con carga de bolas para pulverizar el carbón, y silos para el almacenaje antes de quemarlo.

La evolución tecnológica para eliminar los silos y quemar el carbón, transportado directamente por vía neumática desde los pulverizadores, requiere equipamientos más sensibles y fiables, necesidad que cumplimentan los pulverizadores verticales con extracción por chorro de aire.

Actualmente se dispone de una amplia gama de pulverizadores, como:

- Los tipos {*MPS, Fig XIII.2a* / *Loesche, Fig XIII.2b* *, que cubren las necesidades de las plantas termoeléctricas*

- El tipo EL, que cubre los requisitos industriales de cargas menores

que emplean elementos rodantes sobre mesas o platos giratorios que muelen finamente el carbón que se extrae del molino mediante aire, para su transporte directo a los quemadores.

Para mantener operativas las modernas plantas termoeléctricas que queman carbón, es fundamental disponer de unas características operativas fiables en los pulverizadores de combustible. Un pulverizador tiene que ser capaz de manipular una amplia variedad de carbones y de acomodarse a las oscilaciones de la demanda de la red eléctrica.

Una diferencia fundamental entre los sistemas de caldera y los pulverizadores de carbón, radica en que éstos se dimensionan y operan como máquinas de flujo másico, mientras que cualquier caldera se regula térmicamente, por lo que el poder calorífico del combustible juega un papel importante.

XIII.1.- PULVERIZADORES VERTICALES CON EXTRACCIÓN POR CHORRO DE AIRE

PRINCIPIOS OPERATIVOS.- En la Fig XIII.1 se indican los elementos que intervienen en un mecanismo molturador por rodadura; el rodillo pasa sobre una capa de material granular, que está sobre una mesa o plato giratorio, comprimiéndola.

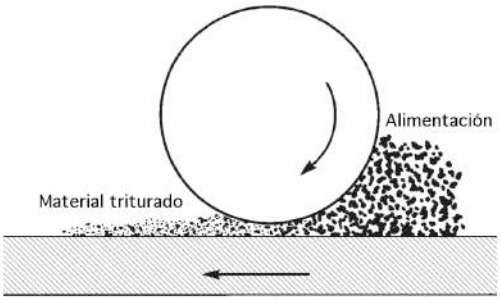

Fig XIII.1
Mecanismo de molienda en molino de rodillos

- El movimiento del rodillo provoca un desplazamiento entre partículas, al tiempo que la presión del mismo crea cargas de compresión sobre ellas

- El desplazamiento de las partículas bajo la presión aplicada provoca su trituración por fricción, que es el mecanismo dominante en este proceso de reducción de tamaños

- La capa granular comprimida tiene una influencia amortiguadora, que reduce la efectividad de la molienda y disminuye drás-

ticamente la velocidad de desgaste de los elementos molturadores

- En una zona de molturación, si las superficies de trabajo están muy próximas entre sí, con una separación cercana a las dimensiones de las partículas del producto, se aumenta el desgaste de las tres partes en contacto $\begin{cases} rodillo \\ partícula \\ plato \end{cases}$ *; la velocidad de desgaste anómalo se puede elevar hasta 100 veces la normal a ese combustible, en el campo de los pulverizadores*

- También se observa un elevado desgaste en los elementos (rodillo, partícula y plato), cuando hay una presencia significativa de rocas de cuarzo, con tamaños iguales o superiores al del espesor de la capa de molienda

Conforme se efectúa la pulverización del carbón, las partículas finas se evacúan del proceso para limitar excesos en la molturación, en el consumo energético y en el desgaste.

Las Fig XIII.2a.b presentan un pulverizador vertical MPS y otro Loesche mostrando los elementos esenciales del diseño con extracción por chorro de aire:

- Un plato gira accionado por su parte inferior y unos rodillos que ruedan sobre el plato

- El molino se alimenta con carbón bruto por la parte superior, de forma que el paso de las partículas bajo los rodillos reduce el tamaño del carbón

- El efecto combinado de la fuerza centrífuga y el desplazamiento de la capa de carbón por los rodi-llos, vierten parcialmente el carbón ya molido por el borde del plato molturador

- Un flujo ascendente de aire fluidifica y arrastra el carbón pulverizado

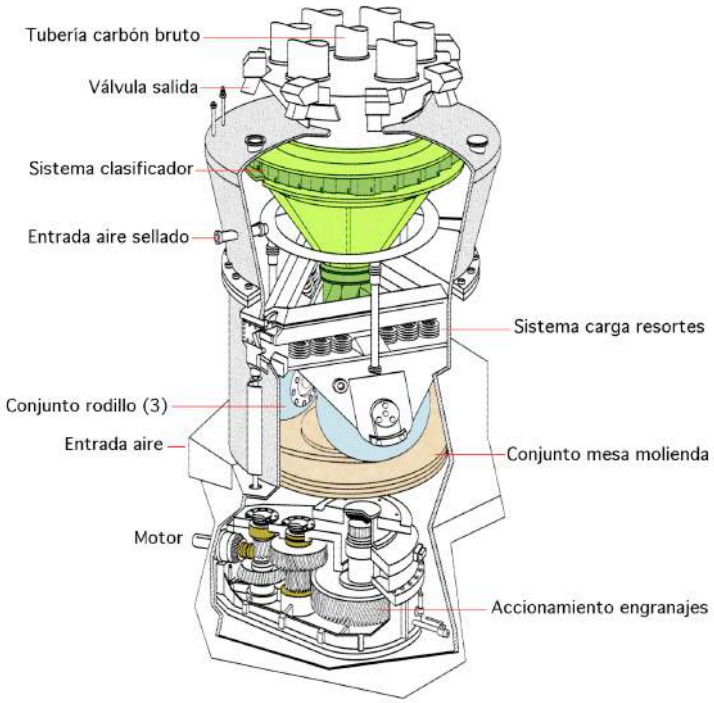

Fig XIII.2a.- Pulverizador vertical de rodillos tipo MPS

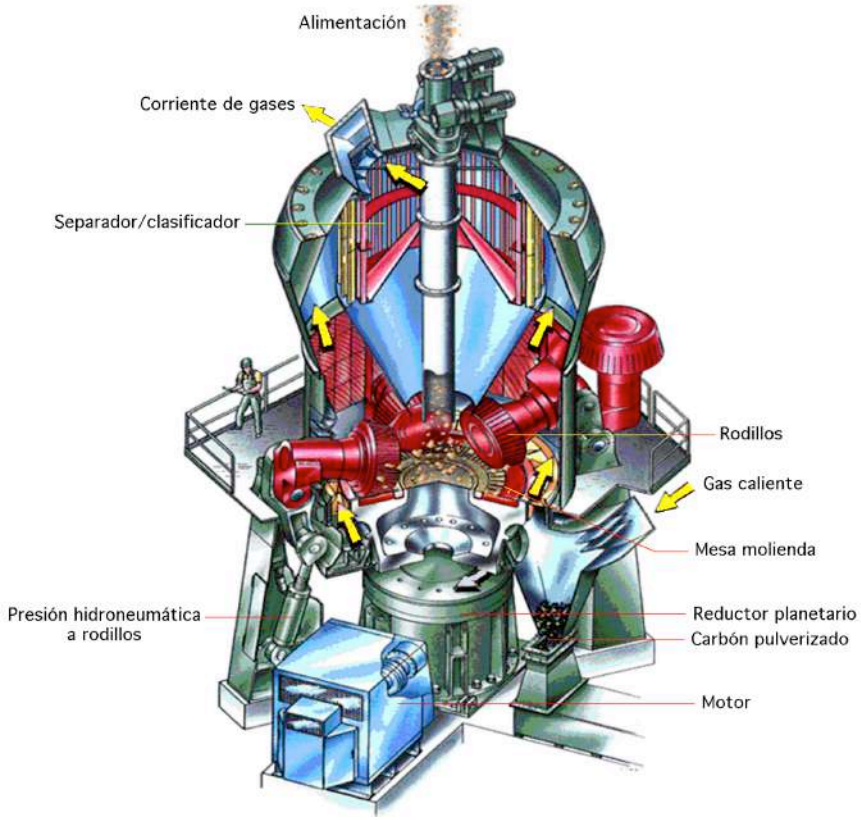

Fig XIII.2b.- Pulverizador vertical de rodillos Loesche

El aire se introduce por una puerta anular (anillo inyector); el flujo de aire ascendente mezclado con las partículas de carbón pulverizado, constituye la fluidificación por encima de la garganta.

- La velocidad del aire es lo suficientemente baja como para arrastrar sólo las partículas molidas más pequeñas, junto con las filtradas a través de la capa de carbón

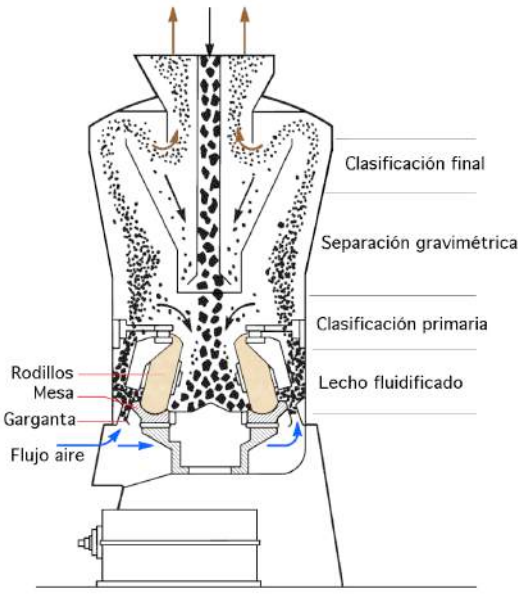

Fig XIII.3
Recirculación de carbón en un pulverizador vertical

- El flujo de aire +sólidos, que asciende como lecho fluidificado, configura el estado inicial de la clasificación de tamaños

- El flujo de aire precalentado sirve también para secar el carbón, lo que mejora el proceso de combustión

Los pulverizadores verticales son equipos efectivos para el proceso de secado del carbón dentro del pulverizador, en los que se han manipulado carbones con contenidos en humedad del orden del 40% en peso y temperatura del $aire_{primario}$ 750ºF (400ºC). También se pueden procesar carbones con mayores niveles de humedad, aunque la temperatura del $aire_{primario}$, más elevada, requiere de materiales estructurales especiales, al tiempo que se aumentan los

riesgos de eventuales incendios en el pulverizador.

Conforme el flujo de *aire + sólidos* va ascendiendo dentro del pulverizador, la sección de paso aumenta y la velocidad del flujo disminuye, facilitándose el retorno de las partículas mayores directamente hacia la zona de molienda. El estado final de la separación de tamaños se realiza mediante un clasificador, separador centrífugo, colocado en la parte superior del pulverizador.

- La mezcla carbón+aire fluye hasta unas aberturas en ángulo, en donde se la imprime una rotación y fuerza centrífuga inducida

- Las partículas más gruesas de la mezcla carbón+aire impactan en la periferia del clasificador, se separan de la suspensión y caen hacia la zona de molturación

- Las partículas más finas permanecen suspendidas en la mezcla y salen con ésta hacia los conductos de combustible a quemadores

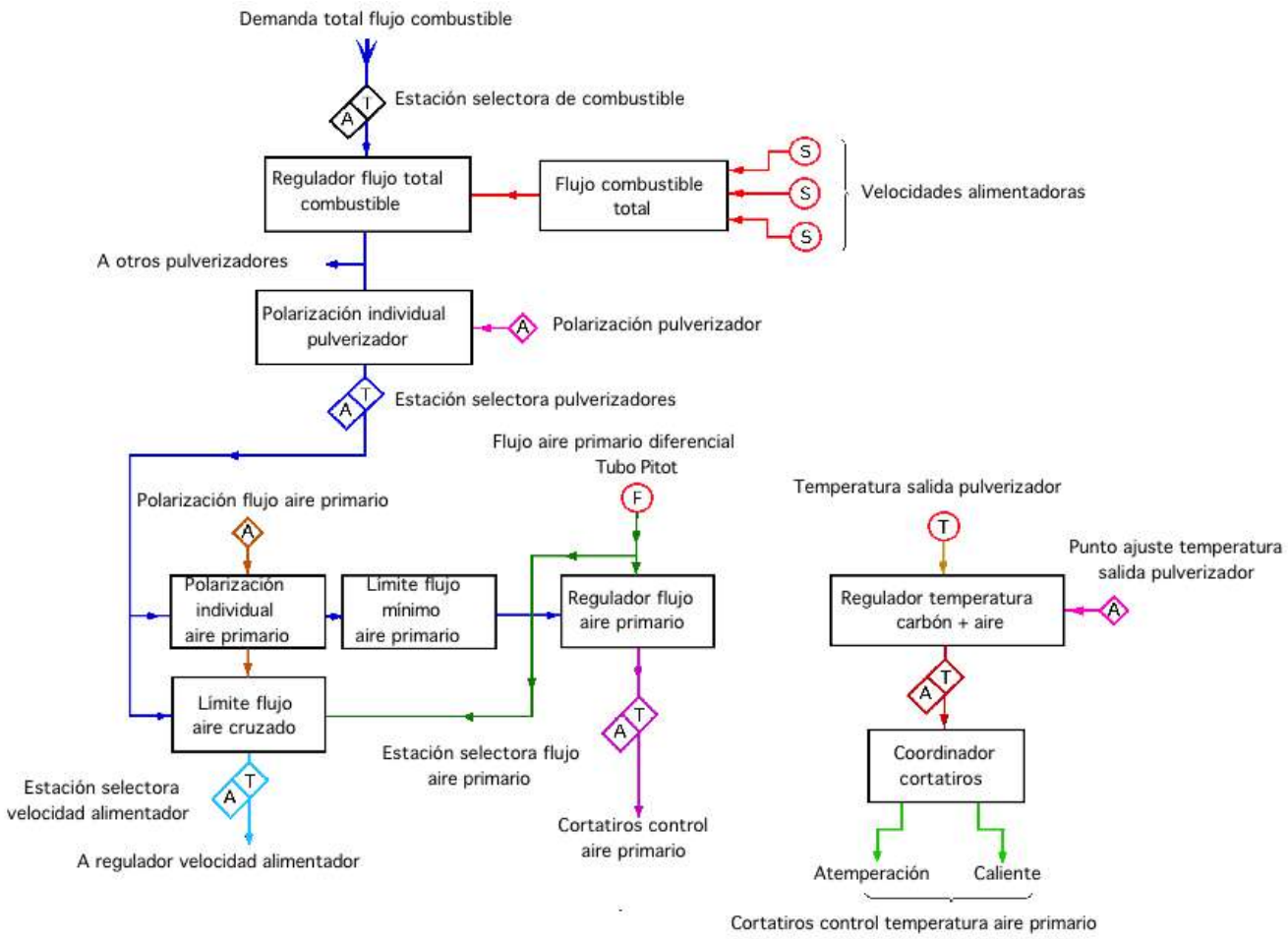

Fig XIII.4.- Esquema del sistema de control del pulverizador

Control del pulverizador.- En un pulverizador con extracción de carbón pulverizado por chorro de aire, hay dos flujos de entrada: el de aire y el de carbón, por lo que para conseguir una

operación satisfactoria del pulverizador hay que controlar y regular adecuadamente ambos flujos.

En la regulación del flujo de carbón se utilizan algunos métodos antiguos, que funcionan en la mayoría de los casos:

- *Se emplean cintas alimentadoras volumétricas y gravimétricas*
- *La medida exacta del flujo de carbón permite controlar el aire y el carbón al mismo tiempo*

Requisitos de diseño.- En los sistemas de combustión de carbón pulverizado se aplican diversos diseños de pulverizadores, que cumplen con unos objetivos específicos como:

- *Finura óptima para el carbón de diseño, en todo el campo operativo del pulverizador*
- *Respuesta rápida frente a los cambios de carga*
- *Operación estable y segura, para todo el margen de cargas*
- *Servicio continuado a lo largo de prolongados períodos de tiempo*
- *Mantenimiento aceptable, particularmente en los elementos molturadores*
- *Posibilidad de asumir variaciones en las características del carbón de diseño*
- *Facilidad de mantenimiento mínimo, número de partes móviles y acceso adecuado*
- *Mínimo espacio ocupado*

Durante muchos años, su desarrollo se concentró en la modificación de los elementos molturadores, (anillo, bolas pista y bolas). En la década de 1920 se introdujo el pulverizador tipo E y en la de 1950 se ensayó un diseño que utilizaba dos platos horizontales de eje vertical, tipo EL, Fig XIII.5:

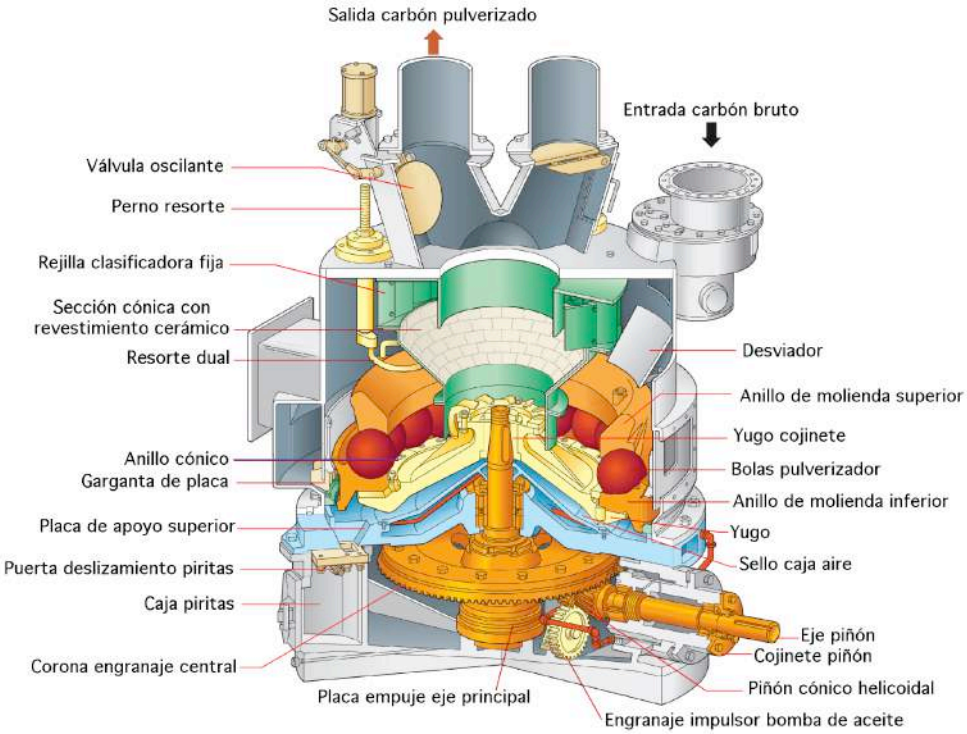

Fig XIII.5.- Pulverizadores de bolas tipo EL

- El plato inferior gira, mientras que el superior, sobre el que actúan resortes para crear una presión de molturación, es estacionario

- Entre estos platos, superior e inferior, se coloca un juego de bolas

- La fuerza ejercida por el plato superior empuja las bolas contra la capa de carbón que está sobre la pista del anillo inferior

Los pulverizadores tipos E y EL tienen identificaciones numéricas que indican el diámetro medio de la pista huella de molturación del plato inferior, en (“).

El tipo E se ha construido hasta el tamaño E-70, y capacidad de 17 ton/h (15 Tm/h).

El tipo EL se ha construido hasta el tamaño EL-76, y capacidad de 20 ton/h (18 Tm/h)

Las partes de mayor desgaste en ambos pulverizadores son los dos anillos plato y el conjunto de las bolas de molturación, que se fabrican con aleaciones resistentes a la abrasión y son sustituibles. En 1970 aparece el pulverizador tipo MPS, Fig XIII.2a, vertical, de rodillos rueda y extracción por chorro de aire, que difiere de los otros molinos de rodillos en que:

- Los rodillos rueda del MPS cargan las tres ruedas simultáneamente, mediante un sistema que permite un desplazamiento radial independiente en cada una de ellas, facilitando la continua alineación de los rodillos rodantes con la pista de molturación, conforme éstas se van desgastando

- Los rodillos rueda permiten el paso de grandes objetos extraños, como hierros o rocas, que puedan entrar en la zona de molienda

- Puede mantener las características operativas de diseño, incluso aunque los rodillos hayan perdido el 40% de su peso por el desgaste

Los MPS operan con una velocidad que produce una fuerza centrífuga (en la circunferencia media de la pista de molturación) del orden de 0,8 veces la aceleración de la gravedad; su baja velocidad contribuye a reducidos niveles de vibración y a la posibilidad de manipular grandes objetos extraños. Para su accionamiento incorpora unos engranajes que hacen posible las más complejas operaciones de reparación y sustitución de componentes, utilizando una amplia variedad de opciones, al tiempo que el molino se mantiene en servicio.

Los componentes principales de los pulverizadores MPS a sustituir a causa del desgaste, comprenden fundamentalmente:

- Los rodillos rueda molturadores
- Los segmentos que componen la pista de rodadura
- Otras partes menores, como son las placas guía
- Los recubrimientos de material cerámico
- Las piezas de la garganta o anillo de aire

Tabla XIII.1.- Características de pulverizadores tipos EL y MPS

Concepto	*"EL" (pista y bolas)*	*"MPS" (pista y rodillos)*
Rango de tamaños	*EL-71 a EL-76*	*MPS-56 a MPS-118*
Capacidad, ton/h (t/h)	*1,5 a 20 (1,4 a 18)*	*17 a 105 (15 a 95)*
Potencia motor, HP (kW)	*25 a 300 (18 a 224)*	*200 a 1.250 (149 a 933)*
Nivel de velocidad	*Medio*	*Bajo*
Velocidad plato, rev/min	*231 a 90*	*32 a 21*
Operación	*Presurizada*	*Presurizada*
Clasificador	*Interno, centrífugo*	*Interno, centrífugo*
Ajuste de clasificación	*Interno*	*Interno*
Límite de secado	*40% H_2O, ó temperatura aire primario 700°F (321°C)*	*40% H_2O, ó temperatura aire primario 750°F (399°C)*
Corrección carga / humedad	*Ninguna hasta límite temperatura*	*Correcc. carga con > 4% hum. superficial*
Límite máximo temperatura salida	*250°F (121°C)*	*210 F (99 C)*
Efecto desgaste sobre operación	*Ninguno si se añaden bolas rellenadas*	*Consumo +15% para desgaste completo*
Sistema control, aire/combustible	*Nivel molino con alimentador de plato Control paralelo con alimentador cinta*	*Control paralelo flujos aire y carbón*
Relación aire/combustible en peso	*1,75/1 a plena carga*	*1,75/1 a plena carga*
Inventario interior	*Medio, tras 2 ó 3 minutos de parada*	*Alto, tras 5 ó 6 minutos de parada*
Respuesta a demanda de carga	*> 10 % /minuto*	*> 10 % / minuto*
Consumo específico, kW/ton (kW/t)	*Bajo, 14 (15) con ventilador aire primario*	*Bajo, 14 (15) con ventilador aire primario*
Nivel de ruido, dB	*> 90*	*> 90, 85 (atenuado)*
Vibración	*Moderada*	*Baja*

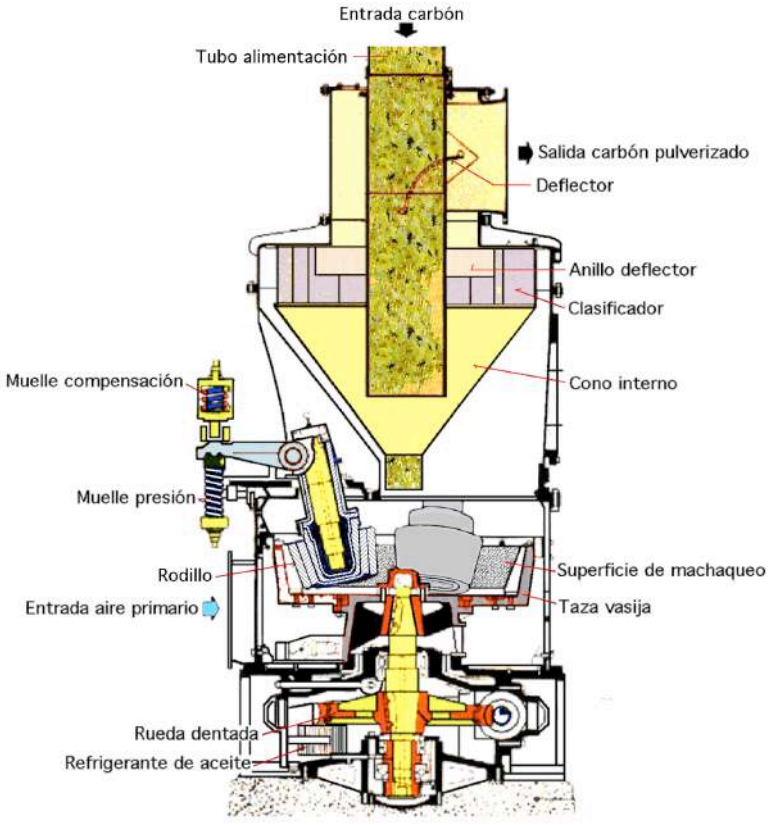

Fig XIII.6.- Pulverizador de pista y rodillos

La vida útil de todas las partes en contacto con el carbón, frente al desgaste, depende fundamentalmente de su abrasividad y puede ser del orden de 8000÷ 100000 horas. El tamaño de los pulverizadores MPS se basa en el diámetro medio de la pista o anillo de molturación.

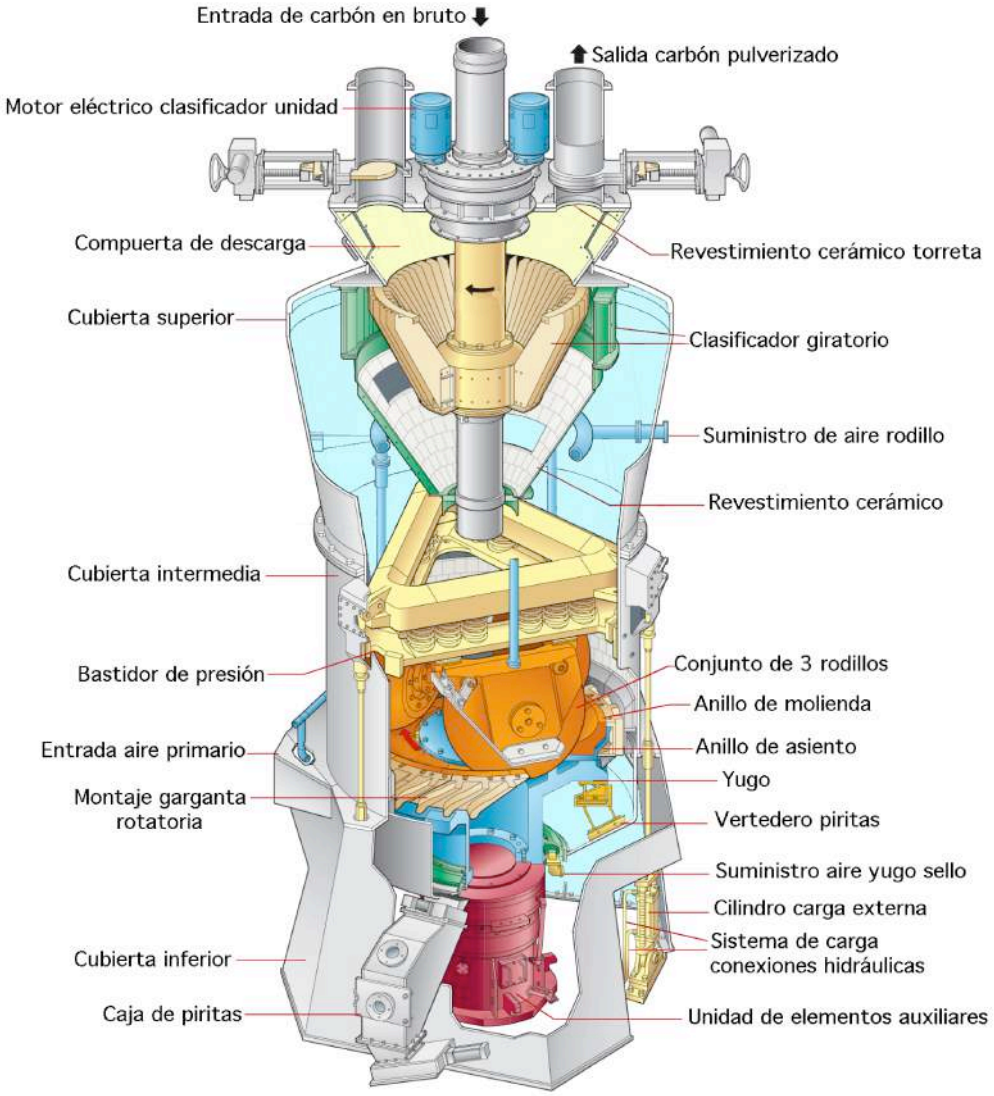

Fig XIII.7.- Pulverizador vertical de rodillos B&W ROLL WHEEL

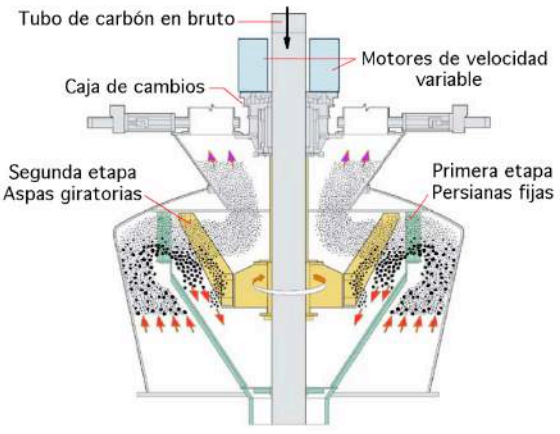

Fig XIII.7a.- Clasificador rotatorio

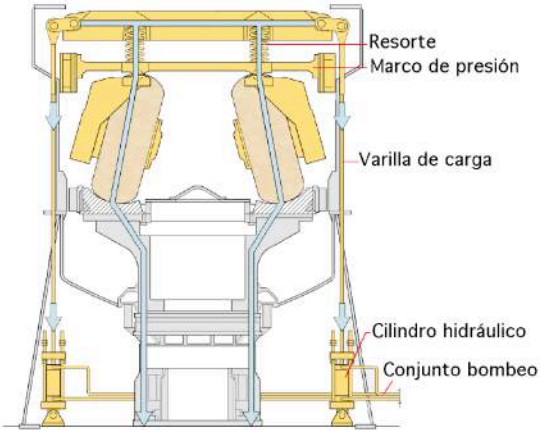

Fig XIII.7b.- Control del sistema de carga del pulverizador

XIII.2.- PULVERIZADORES HORIZONTALES CON EXTRACCIÓN POR CHORRO DE AIRE

Los pulverizadores horizontales se dividen en dos grandes grupos: de alta y baja velocidad.

Pulverizadores horizontales de alta velocidad.- Sirven para las mismas aplicaciones que los verticales; operan a unas 600 rev/min y muelen por $\begin{cases} \text{- } impacto \\ \text{- } aplastamiento \end{cases}$, de forma que:

- El carbón entra en la sección de impacto y experimenta inicialmente una reducción de tamaño pasando a continuación entre las partes molturadoras móviles y estacionarias para sufrir la reducción final de tamaño, Fig XIII.8

- En la fase final, un ventilador extractor exhaustor facilita un flujo de aire para el secado, y para el transporte del carbón pulverizado

- El carbón atraviesa el pulverizador muy rápidamente, de modo que sólo existe una pequeña cantidad de carbón en el mismo

- El pulverizador horizontal de alta velocidad limita su uso a carbones con una humedad máxima del 20%, debido al corto tiempo de residencia del carbón para su secado

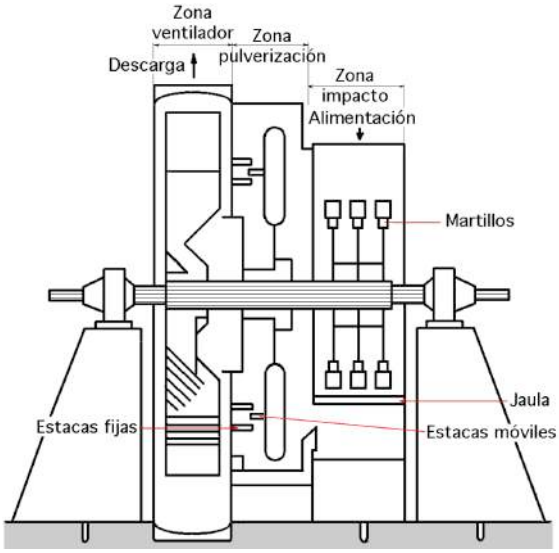

Fig XIII.8.- Pulverizador horizontal de alta velocidad

Tecnología de molienda y secado.- Otro pulverizador formado por un molino de *paletas + ventilador* se indica en la Fig XIII.9; este diseño es similar al anterior en algunos puntos; se emplea para el secado y molienda de carbones pardos lignitos, que son de muy baja calidad, con elevados contenidos en ceniza y humedad y bajo poder calorífico. El contenido de humedad (en peso) supera el 50% y la suma de la humedad y ceniza puede sobrepasar el 60%; los molinos de paletas muelen por $\begin{cases} impacto \\ trituración \end{cases}$, con un proceso de secado muy rápido.

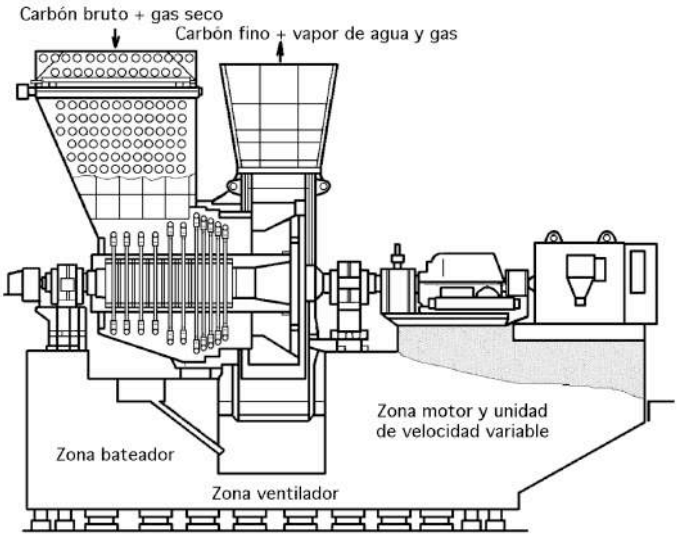

Fig XIII.9.- Pulverizador batidor con ventilador en eje único

Estos equipos cumplimentan el secado a pesar del corto tiempo de residencia, mediante la sustitución del $aire_{primario}$ por un gas con temperatura extremadamente alta, tomado de la parte superior del hogar de la caldera, a unos 1900ºF (1038ºC).

- El humo procedente de una zona fría, como puede ser la salida del calentador de $aire_{comburente}$*, se mezcla con humo más caliente para regular convenientemente la temperatura del flujo de mezcla que sale del pulverizador*

- El carbón se mezcla con el flujo de gases aguas arriba del pulverizador, con vistas a un secado previo y a una reducción de la temperatura de entrada del carbón en el molino

- El estado final del proceso tiene lugar en la sección del ventilador que mantiene constantemente una ligera depresión en el molino

Los pulverizadores de paletas funcionan con velocidad variable, con el fin de controlar las características operativas del molino en los regímenes de alimentación del carbón. Se emplean equipos de un eje para ofrecer más simplicidad ó de dos ejes para dar más flexibilidad

Debido a la baja calidad del carbón pardo lignito que los molinos de paletas suelen manipular, éstos tienen que procesar enormes cantidades de aire y, por tanto, se construyen en tamaños muy grandes.

En USA hay muy pocos yacimientos de carbón pardo lignito cuyas características requieran esta tecnología de *molienda+secado*; sin embargo, los yacimientos de Alemania, Australia, Europa del Este y Turquía hacen del carbón pardo lignito un combustible muy importante en la generación termoeléctrica.

Pulverizadores de baja velocidad.- Un modelo antiguo de pulverizador, todavía en uso para

ciertas aplicaciones, es el molino tubular con carga de bolas, que está constituido por un cilindro de eje horizontal cargado parcialmente con bolas de pequeño diámetro, Fig XIII.10.

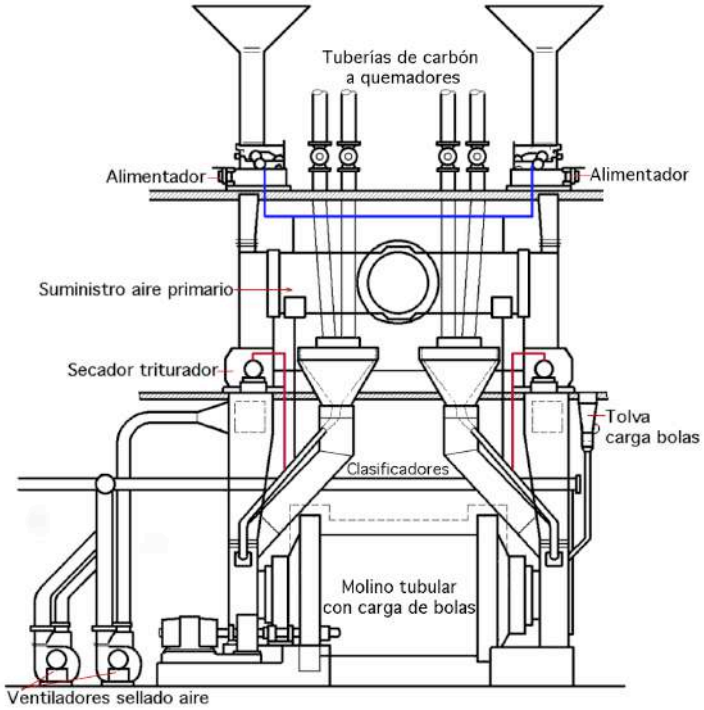

Fig XIII.10.- Sistema de pulverización de baja velocidad presurizada (molino tubular con carga de bolas)

- El cilindro está recubierto con un material resistente al desgaste y convenientemente perfilado para mejorar la acción de caída de las bolas, que constituyen su carga muerta

- La velocidad de rotación del cilindro es el 80% de la velocidad para la cual la fuerza centrífuga supera a la gravedad, nivel de velocidad con el que las bolas al girar quedan adheridas a la superficie del cilindro

- La molienda se produce por la acción de la caída de las bolas, entre las cuales quedan atrapadas las partículas de carbón que chocan entre sí

Los ***pulverizadores tubulares con carga de bolas*** pueden ser de simple y de doble flujo.

- En el molino de simple flujo, el aire y el carbón entran por uno de los extremos y la mezcla aire + carbón sale por el extremo opuesto

- El molino de doble flujo se alimenta con carbón y aire por ambos extremos, mientras que el carbón pulverizado y seco se extrae por ambos extremos del cilindro mediante aire

En ambos molinos tubulares con carga de bolas, los clasificadores son exteriores al molino, de forma que las partículas de carbón sobredimensionadas vuelven a él, junto con el carbón bruto alimentado; estos molinos no desarrollan una fluidificación similar como la de los pulverizadores verticales, por lo que en cierto modo, la mezcla pobre de aire y carbón limita la capacidad de secado. Cuando hay que moler carbones con más del 20% de humedad en peso se utilizan equipos auxilia-

res, como los secadores trituradores.

Los molinos tubulares con carga de bolas se han sustituido por pulverizadores verticales con extracción por chorro de aire
- *Requieren mayor espacio*
- *Consumen más energía que los molinos verticales*
- *Son más difíciles de regular*
- *Poseen un mayor desgaste de sus materiales*

Sin embargo siguen siendo los más adecuados para moler materiales extremadamente abrasivos, de baja humedad y con extrema dificultad de molienda, como por ejemplo el coque de petróleo. El amplio tiempo de residencia que caracteriza los molinos tubulares, los hace efectivos para una molienda muy fina.

QUEMADORES DE CARBÓN.- Los componentes que integran un sistema que quema carbón, se disponen conforme a factores de índole económica, teniendo en cuenta las propiedades específicas del carbón para el que se diseñan, junto con las características funcionales y operativas del proceso, como la
- *finura del producto carbón pulverizado*
- *temperatura de salida del molino de la mezcla carbón pulverizado+aire*
- *relación en peso aire / carbón*

Los pulverizadores de carbón que se integran en las plantas que lo queman, forman parte del siste-ma de combustión
- *directa*
- *indirecta*

Combustión indirecta.- En un sistema de combustión indirecta, el carbón pulverizado se separa de
- *el aire*
- *la humedad evaporada*
- *la energía térmica intrínseca*

, antes de ir al proceso de combustión



Fig XIII.11.- Quemadores de carbón pulverizado para bajos NO_x

Para realizar el proceso de combustión, el carbón pulverizado que se encuentra almacenado se inyecta en el quemador mediante un nuevo aire de transporte; este almacenaje intermedio en silos, rara vez se utiliza en la actualidad para la generación de vapor, pero sí se emplea en algunas tecnologías especiales, como en la
- *gasificación del carbón*
- *inyección de carbón en los hornos altos*

Combustión directa.- En un sistema de combustión directa, el $\begin{cases} carbón\ pulverizado \\ aire_{primario} \end{cases}$ que salen del molino, van directamente a los quemadores para el proceso de combustión.

También forman parte del proceso de combustión $\begin{cases} - \text{ el aire} \\ - \text{ la humedad evaporada} \\ - \text{ la energía térmica intrínseca} \end{cases}$ que entraron en el molino junto con el carbón pulverizado.

Más del 99% de los molinos tipo MPS emplean un sistema de combustión directa, que consta de:

a) Un alimentador que regula el flujo de carbón bruto procedente de un silo hacia el pulverizador

b) Una fuente térmica que precalienta el $aire_{primario}$ para conseguir el secado del carbón

c) Un ventilador de $aire_{primario}$ para el pulverizador, que puede ir ubicado en dos posiciones:

- Aguas arriba del molino pulverizador presurizado como soplante

- Aguas abajo del molino pulverizador en depresión, como exhaustor extractor

d) Un molino pulverizador configurado como una unidad $\begin{cases} presurizada \\ succionadora \end{cases}$

e) Un sistema de conductos por el que se transporta la mezcla de carbón y $aire_{primario}$ desde el pulverizador hasta los quemadores asociados al molino

f) Un conjunto de quemadores de carbón que mezclan el combustible con el resto de $aire_{comburente}$

g) Un sistema de control y dispositivos de regulación

componentes que se pueden disponer de varias formas, según sean las condiciones económicas asociadas al proyecto.

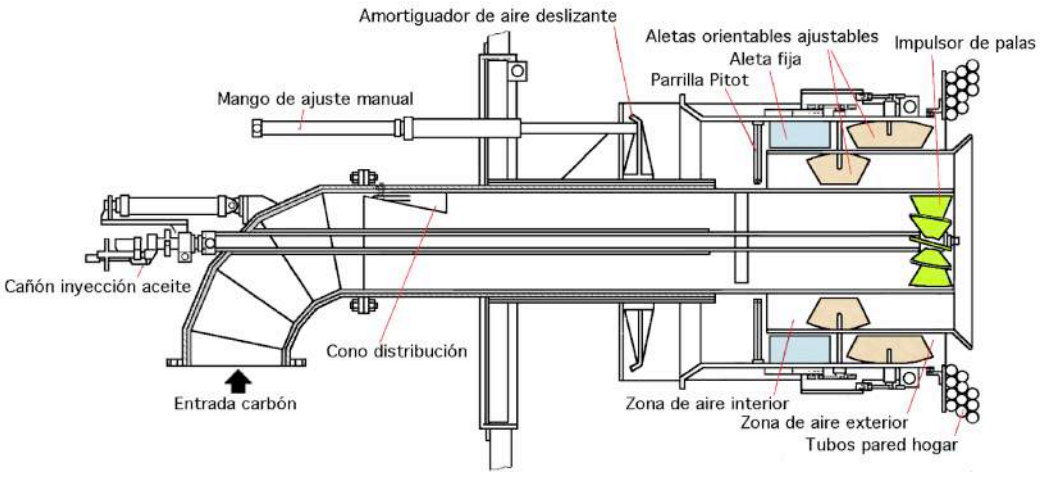

Fig XIII.12.- Perfil de un quemador de carbón pulverizado

VENTILADORES.- Cuando el sistema de combustión directa incorpora pulverizadores presurizados, se debe elegir entre las dos situaciones siguientes:

- Ventiladores de $aire_{primario}$ caliente, con un ventilador para cada uno de los pulverizadores, Fig XIII.13

- *Ventiladores de aire$_{primario}$ frío, para el conjunto de pulverizadores que tenga el generador de vapor, aguas arriba de un calentador de aire$_{primario}$, todo ello dentro de un sistema de suministro de aire caliente con un ramal individual para cada molino, Fig XIII.14*

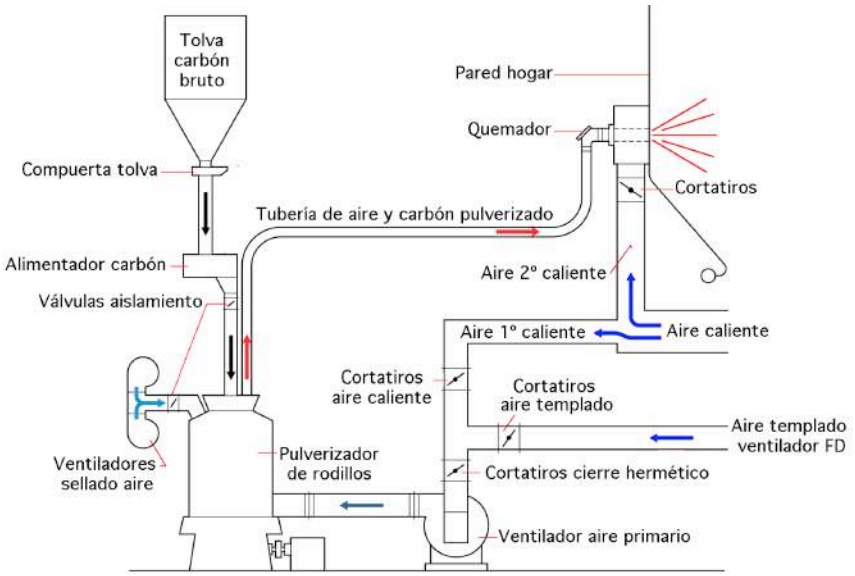

Fig XIII.13.- Sistema de carbón pulverizado con ventilador caliente para combustión directa

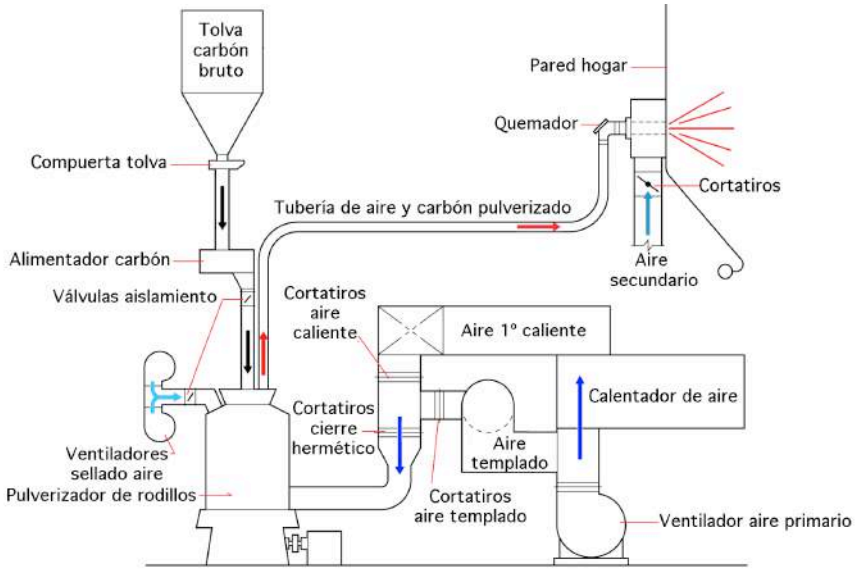

Fig XIII.14.- Sistema de carbón pulverizado con ventilador frío para combustión directa

Los *ventiladores calientes* son más baratos, porque no requieren de calentador de *aire$_{primario}$*.

Los *ventiladores fríos* tienen $\begin{cases} \text{- } menor\ coste\ de\ operación \\ \text{- } mayor\ coste\ de\ instalación \end{cases}$, especialmente cuando se trata de unidades para sistemas grandes.

Sistemas de control.- El *aire$_{primario}$* se controla para regular la velocidad y la temperatura, a la salida de cada molino; el control se realiza por medio de cortatiros:

- Dos de ellos, los de aire caliente y frío, regulan la temperatura del aire que entra en el pulverizador, y están conectados de forma que cuando uno se abre el otro se cierra

- El tercero es independiente y controla el volumen de aire$_{primario}$ global hacia el pulverizador correspondiente

Algunos fabricantes emplean sólo dos cortatiros, lo que provoca falta de estabilidad y una lenta respuesta frente a los cambios de carga.

Los pulverizadores para la combustión directa ligados al sistema de combustión, emplean un conjunto de curvas como $\begin{cases} \textit{- el flujo volumétrico} \\ \textit{- las velocidades en puntos críticos} \\ \textit{- las caídas de presión en el sistema} \end{cases}$ que relacionan las características de operación, a lo largo de todo el intervalo de cargas del generador de vapor, curvas que tienen en cuenta el número de molinos que se tienen en servicio y la capacidad de producción de cada uno Fig XIII.15.

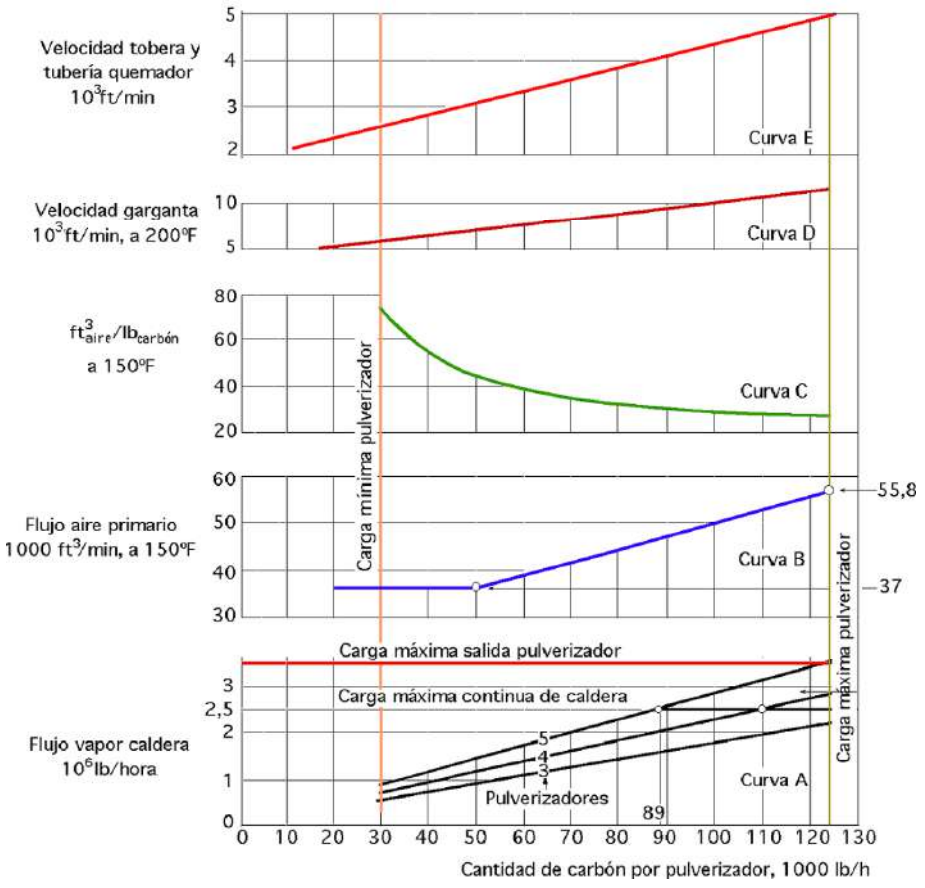

Fig XIII.15.- Curvas de coordinación entre el pulverizador MPS y el quemador

a) La curva A representa el flujo de vapor de la caldera en función de la salida de carbón del pulverizador; las líneas individuales indican el número de molinos en funcionamiento

A título de ejemplo, si la plena carga de la caldera con un flujo de vapor de $\begin{cases} 2{,}5.10^6\, lb/h \\ 315\, kg/seg \end{cases}$, se

alcanza con 5 molinos en servicio, dando cada uno de ellos $\begin{cases} 8{,}9.10^4\, lb/h \\ 112\ kg/seg \end{cases}$ de carbón, también se podría alcanzar la plena carga con 4 molinos, proporcionando cada uno de ellos $\begin{cases} 1{,}1.10^5\, lb/h \\ 140\ kg/seg \end{cases}$

Con 3 molinos, el máximo flujo de vapor sería del orden de $\begin{cases} 2{,}1.10^6\, lb/h \\ 265\ kg/seg \end{cases}$

La línea de carga mínima del pulverizador representa un límite basado en:

- Las propiedades del carbón

- La estabilidad de ignición

- El inicio de vibraciones mecánicas

Este límite es variable y el valor representado de $\begin{cases} 30000\ lb/h \\ 37{,}7\ kg/seg \end{cases}$ de carbón significa una relación de cargas $\frac{Máxima}{Mínima}$ relativamente elevada.

b) La curva B muestra el flujo de aire$_{primario}$ en las condiciones de salida del pulverizador.

El flujo máximo de aire es de $\begin{cases} 55800\ ft^3/min \\ 26{,}34\ m^3/s \end{cases}$, para un molino MPS-89, correspondiente a un flujo de carbón de $\begin{cases} 124.000\ lb/h \\ 15{,}6\ kg/s \end{cases}$

El flujo de *aire$_{mínimo}$* de diseño del equipo es un 55% del flujo máximo, $\begin{cases} 30700\ ft^3/min \\ 14{,}49\ m^3/s\ de\ aire \end{cases}$; para facilitar una operación estable del quemador, este flujo mínimo precisa de un ajuste, siendo el valor a corregir $\begin{cases} 37000\ ft^3/min \\ 17{,}46\ m^3/s \end{cases}$, que marca los mínimos que corresponden a las curvas D y E.

c) La curva C corresponde a la relación $\frac{aire}{combustible}$ que es crítica para la ignición estable a cargas bajas, y depende del tipo de carbón y de su finura.

Si la curva B permitiese realmente una mezcla *aire-combustible* inferior a la del límite de estabilidad, este límite se tomaría igual al valor correspondiente al del flujo mínimo del carbón.

d) La curva D proporciona la velocidad interna del pulverizador.- La velocidad en la garganta debe ser, al menos, de $\begin{cases} 7000\ ft/min \\ 35{,}56\ m/seg \end{cases}$, para evitar el derrame de carbón en la caja de viento del molino, calculada en las condiciones de entrada del aire al molino.

Con *carbones de alta humedad*, la elevada temperatura requerida para el secado da lugar a un volumen específico elevado y a una velocidad que raras veces constituye un problema con cargas bajas.

Con *carbón muy seco* se puede precisar $\begin{cases} el\ aumento\ del\ flujo\ mínimo\ de\ aire \\ la\ reducción\ de\ la\ sección\ de\ paso\ de\ la\ garganta \end{cases}$; las restricciones en el área de la garganta pueden provocar, a cargas elevadas, excesivas caídas de presión.

e) La curva E indica la velocidad del $aire_{primario}$ en tuberías hacia los quemadores, en función del flujo de carbón que hay en el molino, viniendo dada por la relación:

$$Velocidad\ aire_{primario} = \frac{Volumen\ del\ aire\ en\ las\ condiciones\ de\ salida\ del\ molino}{Superficie\ total\ del\ flujo\ en\ tuberías\ que\ le\ conectan\ con\ sus\ quemadores\ respectivos}$$

La velocidad mínima admisible es de $\begin{cases} 3000\ ft/min \\ 15{,}2\ m/s \end{cases}$, que es la que permite arrastrar el carbón pulverizado con el flujo de $aire_{primario}$; esta velocidad es importante en los tramos horizontales de tubería que sean particularmente largos; depende de la $\begin{cases} densidad\ y\ viscosidad\ del\ aire \\ carga\ de\ partículas\ y\ del\ tamaño\ de\ éstas \end{cases}$

Para el campo de tuberías de quemadores, el límite de velocidad de $\begin{cases} 3000\ ft/min \\ 15{,}2\ m/s \end{cases}$ se ajusta sólo por densidad y por carga de partículas $\frac{aire}{combustible}$

La Fig XIII.16 muestra una curva de corrección para la velocidad mínima.

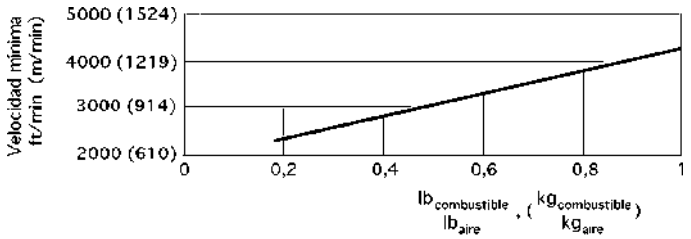

Fig XIII.16.- Curva de corrección para la velocidad mínima

TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS.- Uno de los requisitos que caracterizan el funcionamiento del pulverizador es el tamaño de las partículas que salen del mismo, siendo el más frecuente para la combustión del carbón, el que corresponde a la totalidad de partículas que pasan por las aberturas del tamiz estándar de 200 mallas por pulgada ó 200 mesh ó (74 micras).

La porción en peso del carbón pulverizado que pasa a través de este tamiz se emplea como medida de la capacidad que tiene el pulverizador, considerándose el tamaño de 74 micras el adecuado para una buena combustión en lecho suspendido y para un completo quemado del carbón.

El tamaño requerido en la finura de las partículas se determina combinando las características de la $\begin{cases} combustión\ del\ carbón \\ cámara\ de\ combustión\ del\ hogar \end{cases}$

Para *carbones bituminosos* quemados en recintos refrigerados por agua, la finura requerida es la que corresponde a un 70% ó más del tamiz estándar de 200 mesh (74 micras); este valor se ha fijado como una característica de la combustión, tras estudiar la utilización de quemadores para bajos NO_x y de la necesidad de menores temperaturas de llama que aumentan el tiempo de residencia en la cámara hogar de combustión.

Las partículas bastas, mayores que las que pasan por el tamiz de 100 mesh (150 micras), contribuyen a una alta pérdida por inquemados.

Tabla XIII.2.- Requisitos de finura del carbón pulverizado para varios sistemas de combustión (% que pasa a través del tamiz estándar de USA, 200 mesh (Btu / lb x 2,326 = kJ / kg)

Hogar o proceso	*Alto rango (Clasificación ASTM) % carbono fijo*			*Bajo rango (C_{fijo} < 69%) Poder calorífico, Btu / lb*		
	97,9 a 86,0	*85,9 a 78,0*	*77,9 a 69,0*	*> 13000*	*13000 a 11000*	*< 11000*
Caldera naval	-	*85*	*80*	*80*	*75*	
Refrigerado por agua	*80*	*87*	*70*	*70*	*65*	*60*
Horno de cemento	*90*	*85*	*80*	*80*	*80*	-
Horno alto	*No aplicable*	*No aplicable*	*No aplicable*	*80*	*80*	*No aplicable*

Tabla XIII.3.- Temperatura típica de mezcla a la salida del pulverizador, para diversos carbones

Tipo de combustible	*Contenido en volátiles sobre puro (seco y sin ceniza)*	*Temperatura salida °F (°C) **
Lignito y subbituminoso	-	*125 a 140 (52 a 60)*
Bituminoso, alto en volátiles	*30*	*150 (60)*
Bituminoso, bajo en volátiles	*14 a 22*	*150 a 180 (66 a 82)*
Antracita, carbón de escombrera	*14*	*200 a 210 (93 a 99)*
Coque de petróleo	*0 a 8*	*200 a 250 (93 a 121)*

** La capacidad del pulverizador se reduce con temperatura < 125°F ó (52°C), cuando se muelen lignitos de alta humedad*

Temperatura de salida.- El carbón con bajo contenido en volátiles requiere temperaturas más elevadas en la mezcla de *aire+carbón*, con el fin de asegurar una combustión estable, especialmente cuando hay $\begin{cases} \textit{menores aportes en el quemador} \\ \textit{bajas cargas en la caldera} \end{cases}$

La temperatura a la salida del pulverizador de la mezcla *aire+combustible* es del orden de 150ºF (66ºC). Si es necesario se pueden emplear temperaturas más altas, del orden de 212ºF (100ºC); cualquier temperatura superior a ésta plantea problemas en la lubricación; elevadas temperaturas de la mezcla a la salida significan también altas temperaturas de entrada al molino, lo que conlleva un mayor riesgo de incendio en el pulverizador.

Los sistemas de combustión indirecta:

- Implican un almacenaje intermedio del pulverizado en silo

- Requieren temperaturas más elevadas para asegurar un secado completo y evitar problemas de manipulación con el carbón pulverizado

Cuando el carbón tiene hasta un 10% de humedad en bruto, la temperatura de 180ºF (82ºC) es suficiente para asegurar su secado.

Para la combustión directa, los requisitos de temperatura de mezcla a la salida se determinan por $\begin{cases} \textit{- el contenido en volátiles que tenga el carbón} \\ \textit{- la necesidad de una combustión estable} \end{cases}$

XIII.4.- GRINDABILIDAD

Para determinar el tamaño que debe tener un pulverizador, la grindabilidad (triturabilidad o molturabilidad) es la característica física más importante del carbón a tener presente en la fase de diseño, que indica la facilidad con la que se puede moler.

El principio operativo del ensayo para determinar el Índice de Grindabilidad Hardgrove (HGI), se describe en la norma D-409 de la ASTM; consiste en la aplicación de una cantidad fija y determinada de trabajo molturador, sobre una muestra preparada y calibrada.

El equipo para determinar la grindabilidad es un pulverizador, Fig XIII.17, de no más de 50 cm de altura, y que gira un total de 60 vueltas por lo que desarrolla una cantidad fija de trabajo molturador sobre la muestra de carbón procesada.

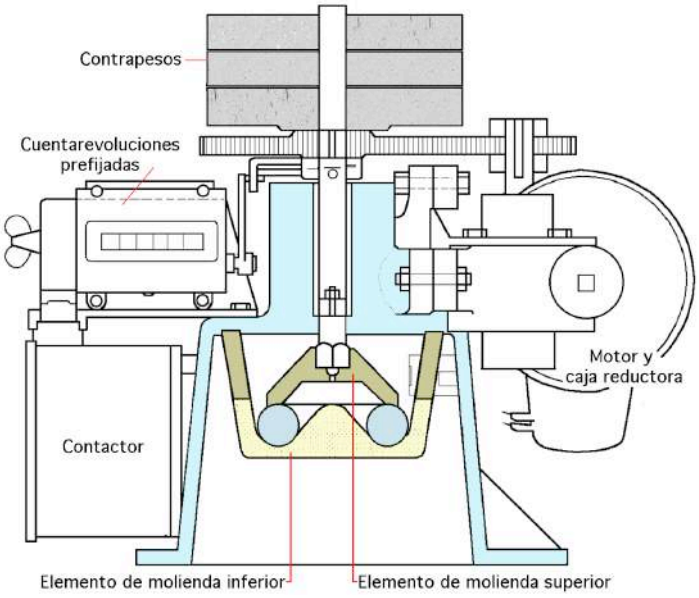

Fig XIII.17.- Equipo de ensayo de grindabilidad Hardgrove

El producto molido producido que pasa a través de un determinado tamiz estándar, es la medida de la facilidad de molienda o índice de grindabilidad del carbón considerado.

El valor nominal del índice de grindabilidad utilizado por los fabricantes de pulverizadores es HGI = 50; con este valor, para el carbón de referencia, el factor corrector de la capacidad del pulverizador es 1.

El índice (HGI) no tiene límite superior en la escala de grindabilidad.

La grindabilidad no depende de la dureza, por cuanto algunos materiales que tienen naturaleza fibrosa no son duros, y sin embargo son difíciles de moler; los materiales tenaces, viscosos o plásticos son de difícil molturación.

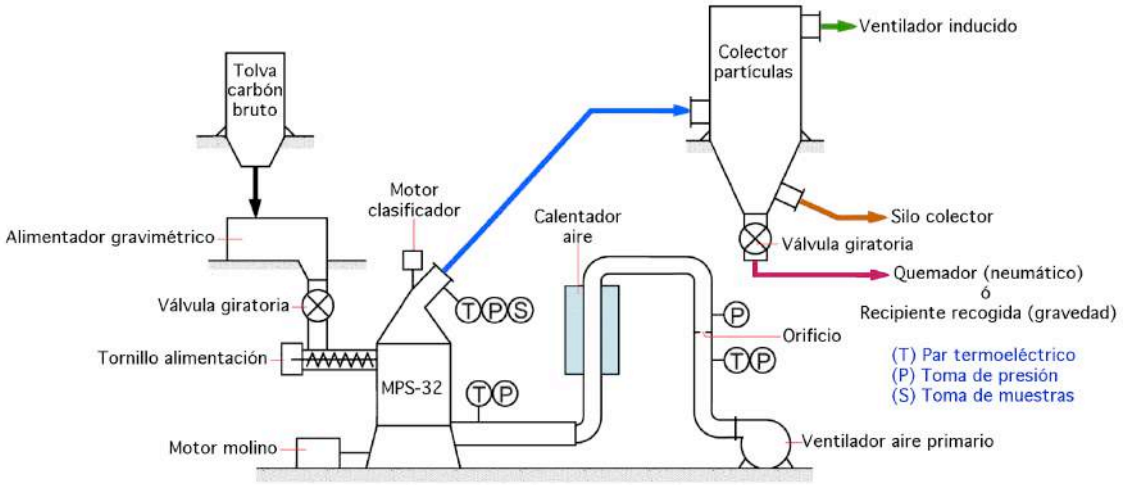

Fig XIII.18.- Equipo de ensayo MPS 32 de grindabilidad

PROPIEDADES DE DESGASTE.- En los pulverizadores de carbón, el desgaste es consecuencia de los efectos combinados de la abrasión y de la erosión. El mecanismo dominante en el desgaste de un componente de un equipo pulverizador, depende de:

- La función que tenga asignada el componente en cuestión

- Las propiedades del carbón a moler, como la abrasividad y erosividad, que son propiedades difíciles de medir y que influyen en el coste de mantenimiento del equipo

Abrasividad.- Proporciona una indicación del tiempo de vida de partes del pulverizador sometidas a desgaste, y está relacionada con la cantidad y distribución de los tamaños de $\begin{cases} cuarzo \\ pirita \end{cases}$ presentes en el carbón, mayores que el tamaño correspondiente a 100 mesh (150 μm).

Para determinar la cantidad de estos dos materiales presentes en una muestra, se dispone de métodos estándar como el $\begin{cases} ASTM\text{-}D2492\ para\ pirita \\ ASTM\text{-}D2799\ para\ cuarzo \end{cases}$; no existen métodos aceptados universalmente para determinar el tamaño de las partículas de cuarzo y pirita en el carbón.

Erosividad.- Erosión no es lo mismo que abrasión; la erosión es la eliminación progresiva de material de una superficie sobre la que impacta un flujo de partículas sólidas suspendidas en un fluido. Para una combinación dada de partículas y tipo de material de superficie, el régimen de desgaste por erosión crece con $\begin{cases} - \ la\ velocidad\ del\ flujo\ de\ fluido \\ - \ el\ tamaño\ de\ las\ partículas\ en\ suspensión \\ - \ el\ tipo\ de\ sólidos\ contenidos\ en\ el\ flujo\ de\ fluido \end{cases}$

En la superficie de desgaste de materiales dúctiles que admiten grandes deformaciones, la magnitud del desgaste por erosión crece con el ángulo de impacto hasta $35 \div 45^{o}$, a partir del cual disminuye. Para materiales frágiles, fácilmente quebradizos, el régimen de erosión aumenta hasta un ángulo de impacto de 70°, pero a partir de este valor el material rechazado interfiere con el impactante y la medida correspondiente es errónea.

Humedad.- El contenido de humedad en el combustible es un parámetro clave en el diseño de la unidad y, en particular, en el del pulverizador. La humedad en el carbón se determina según la norma ASTM-D3302.

Entre las diferentes clases de humedad que existen podemos considerar:

- La humedad estructural presente en el carbón en el yacimiento geológico; puede influir mucho en la grindabilidad, especialmente en el caso de carbones subbituminosos y lignitos, Fig XIII.19

- La humedad superficial es la aportada en las operaciones de manipulación, transporte, procesos diversos y almacenaje del carbón. La humedad global, suma de la superficial y de la estructural, influye mucho en el secado y, por tanto, en la temperatura del aire que entra en el pulverizador

- La humedad de equilibrio corresponde a la absorción de humedad atmosférica por parte del carbón secado térmicamente

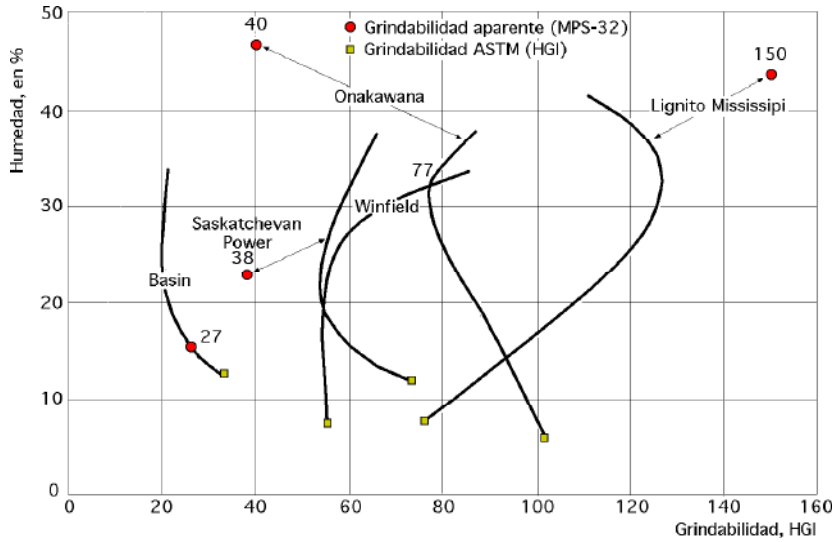

Fig XIII.19.- Índice de grindabilidad Hardgrove (HGI) en función del % de humedad del combustible

La humedad depende del tipo de carbón, más que de la cantidad de agua que se le haya podido aportar en procesos posteriores a su extracción de la mina.

Los carbones USA tienen una humedad estructural que varía entre:

- Un 2% para el carbón bituminoso Appalachian
- Un 40% para los lignitos

Cuando se trata de lignitos pardos, la humedad estructural puede llegar al 70%.

Selección del tamaño del pulverizador.- Lo último a realizar en el diseño de un pulverizador es la determinación del tamaño y número de molinos, que se precisan en el mismo.

Por lo que respecta al calor y al carbón a aportar al hogar, vienen determinados por los cálcu-

los de combustión y por el flujo de vapor en el generador.

$$\textit{La capacidad equivalente requerida en el pulverizador es} = \frac{\textit{Flujo de carbón}}{\textit{Factor de corrección de la capacidad}}$$

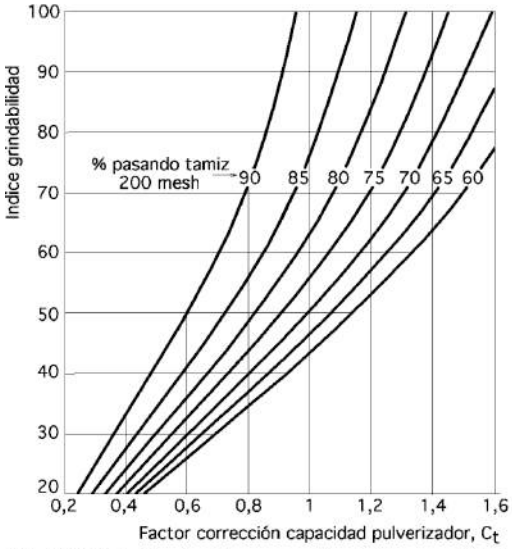

Fig XIII.20.- Factor de corrección de la capacidad del pulverizador en función de la grindabilidad

El ***factor de corrección de la capacidad*** incluye los factores de finura y grindabilidad que se muestran en la Fig XIII.20, y la corrección por la humedad del combustible.

La mayoría de los molinos con rodillos, incluyendo el MPS, requieren corregir su capacidad debido a la humedad, mientras que los pulverizadores tipo EL no precisan corrección alguna.

El número de pulverizadores se determina dividiendo la capacidad equivalente requerida, entre la capacidad nominal correspondiente al pulverizador seleccionado, basada en un 70% de paso a través de 200 mesh y grindabilidad HGI = 50

La capacidad nominal del pulverizador se toma de la información dada por el fabricante, junto con los datos y tamaño del pulverizador.

El posible intercambio de pulverizadores, entre $\begin{cases} \textit{- menos número de tamaños mayores} \\ \textit{- más número de tamaños menores} \end{cases}$, se establece después de contrapesar los costes de inversión y los requisitos de operación.

Se suele añadir un pulverizador de más para que la caldera pueda operar a plena carga cuando un molino se tenga que mantener fuera de servicio, para proceder a su revisión y mantenimiento.

La selección del tipo y tamaño del pulverizador se complica al considerar suministros de carbón de diversas fuentes y tener que cumplir con los requisitos de emisiones medioambientales; hay programas informáticos que analizan las características operativas del pulverizador para un extenso número de carbones, que ayudan en este proceso de selección. Si el carbón para el que se determinó el tamaño del pulverizador fuese muy diferente del previsto en el diseño, puede suceder que los pulverizadores estén sobredimensionados limitando el margen de regulación de la caldera contemplado previamente; en este supuesto, habrá que reconsiderar el mantener el carbón inicial como combustible.

XIII.5.- CONSUMO ENERGÉTICO

Los costes principales de operación de un pulverizador son el $\begin{cases} \textit{capital de inversión} \\ \textit{consumo energético} \\ \textit{mantenimiento} \end{cases}$

Los costes de energía y mantenimiento se expresan como costes referidos a la unidad de masa

de carbón pulverizado, y dependen de los métodos de operación de la planta.

Cuando se comparan diseños de pulverizadores, hay que tener en cuenta el consumo energético correspondiente al ventilador de $aire_{primario}$ y al pulverizador.

El consumo energético para los pulverizadores EL ó MPS, con sus respectivos ventiladores, para un carbón de $\begin{cases} HGI = 50 \\ finura\ 70\% \end{cases}$, es de 15 kW/Tm, cuando operan a la capacidad nominal y con elementos molturadores nuevos.

Cuando el poder calorífico disminuye, se gasta más energía en moler y manipular el material, y el consumo es superior a 24 kW/Tm.

Mantenimiento.- El coste de materiales y mano de obra depende de la vida útil frente al desgaste, parámetro que varía con la abrasividad del carbón. El coste de mantenimiento depende también de los procedimientos de operación propios de la planta. La vida de desgaste de los molinos MPS se sitúa entre 25.000÷ 60.000 horas, y los costes promedios del mantenimiento anual pueden variar ampliamente con el tamaño del molino, ya que el coste de las piezas es inversamente proporcional al tamaño del pulverizador, siendo más caras cuanto más pequeño sea el molino.

Para el pulverizador MPS-67, el coste de mantenimiento es:

- El 60% del coste de la energía consumida, para una vida de desgaste del orden de 25.000 horas

- El 20% para una vida útil de 60.000 horas

Para el pulverizador MPS-89, los porcentajes a aplicar para los tiempos citadas son del 40% y del 10%, respectivamente.

En una estimación inicial, los costes de mantenimiento se pueden tomar igual a:

- La mitad de los costes de energía para pequeños

- La tercera parte de los costes de energía para molinos grandes

Materiales cerámicos.- La utilización de losetas cerámicas para reducir la erosión disminuye el gasto de mantenimiento. La resistencia a la erosión del material cerámico con 97% de alúmina, es del orden de 8 veces la que tiene un espesor equivalente de acero al C.

Las *chapas metálicas revestidas de materiales cerámicos* se emplean en los siguientes componentes: $\begin{cases} \text{- conos clasificadores} \\ \text{- carcasas por encima del nivel de la garganta} \\ \text{- torre de descarga en los molinos MPS} \end{cases}$

El *revestimiento cerámico* se utiliza en $\begin{cases} codos\ de\ tuberías\ de\ carbón\ pulverizado\ a\ quemadores \\ escudos\ de\ desgaste\ de\ soportes\ de\ rodillos\ de\ pulverizadores\ MPS \end{cases}$

Las losetas cerámicas se colocan con cuidado para evitar el socavamiento y pérdida del propio revestimiento, no siendo adecuadas para algunos tipos de erosión, ya que ángulos de choque eleva-

dos resultan destructivos para materiales frágiles.

Incendios y explosiones.- Un pulverizador de carbón muele el combustible hasta dejarlo en el tamaño y forma requeridos para alcanzar una buena combustión; a veces, la combustión en el pulverizador se presenta y desarrolla en zonas no previstas con resultados desastrosos.

Los *incendios* en pulverizadores se tratan por procedimientos de urgencia bien planificados, ya que la sorprendente velocidad con la que se puede desarrollar un incendio exige siempre una acción inmediata. Los incendios en pulverizadores se pueden producir en zonas de alta temperatura de los molinos, o en zonas de baja temperatura ricas en carbón.

Como norma, no se deben producir deposiciones de carbón en las zonas que se encuentren aguas arriba de la garganta ya que son zonas de alta temperatura.

- Una acumulación de carbón en la cámara de viento del pulverizador puede provocar un flujo insuficiente de aire o el desgaste de la garganta; si el carbón no se elimina con rapidez hacia el sistema de eliminación de piritas, puede entrar en ignición con el $aire_{primario}$ *a alta temperatura.*

- El carbón puede entrar también en la cámara de viento del pulverizador cuando se quita de servicio de una forma anormalmente rápida, en donde puede arder sin peligro alguno e incluso puede que pase desapercibido este tipo de incendio.

- Los incendios en zonas frías y ricas en combustible se pueden desarrollar con más lentitud, pero estos incendios están alimentados con enormes cantidades de carbón y pueden destruir rápidamente las partes internas del pulverizador

El detector más común de un incendio es la temperatura de la mezcla *aire-combustible* a la salida del molino. Se puede obtener información útil sobre peligros potenciales observando el funcionamiento, especialmente en instalaciones con pulverizadores múltiples:

a) Si todos los pulverizadores están operativos con idéntico régimen de alimentación de carbón, y el $aire_{primario}$ *está en automático, todos los molinos deben tener la misma relación* $\frac{aire}{combustible}$

b) En estas condiciones, una diferencia de temperatura significativa entre la salida y entrada del pulverizador, puede indicar la existencia de un incendio, hecho que se debe investigar inmediatamente

c) Otras posibles causas de temperaturas diferentes entre los diversos pulverizadores, pueden ser:

- *Una defectuosa calibración del alimentador*
- *Un incorrecto flujo de* $aire_{primario}$
- *Una variación de la humedad del carbón que llega a cada uno de los molinos*

También se pueden provocar grandes daños por incendio cuando se alimenta un carbón ardiendo desde los silos o tolvas; este tipo de incendio se controla mediante un rápido vaciado del carbón que está ardiendo a través de:

- Una tubería de transferencia o canalón independiente

- El apagado del carbón con agentes de extinción de fuegos aplicados sobre la superficie del carbón

Interrupciones de servicio súbitas.- En las interrupciones de servicio súbitas, como el disparo de un pulverizador, la repentina pérdida del flujo de aire provoca el colapso del lecho fluidificado que se encuentra sobre el nivel de la garganta del molino, por lo que el carbón cae en la caja de viento y entra en contacto con diversas superficies metálicas que están normalmente muy calientes; en esta situación:

a) Los carbones de baja calidad empiezan a quemar en estado de rescoldo sin llama, a los pocos minutos de estar a 450°F (232°C)

b) Tras la agitación provocada por la acción mecánica de las paletas de piritas al tratar de poner nuevamente el molino en servicio, o por el restablecimiento del flujo de aire$_{primario}$ previo a la nueva puesta en servicio del pulverizador, las nubes de carbón pueden provocar explosiones, peligro que se minimiza retirando el carbón acumulado bajo estrictas condiciones a controlar, como:

- Garantizar la seguridad del personal, evacuando a los operarios de todos aquellos puestos de trabajo que puedan resultar afectados por una eventual explosión, que origine la rotura de la carcasa del molino o de los conductos a quemadores

- Aislar el pulverizador de todo flujo de aire, inyectando en su interior un fluido inerte o vapor de agua para crear una atmósfera inerte

c) Una vez el carbón está aislado e inertizado, se desplaza hacia el sistema eliminador de piritas; la atmósfera inerte impide, en las nubes de polvo levantadas por el funcionamiento del pulverizador, la aparición de cualquier rescoldo de carbón.

Una explosión tiene lugar con alguna frecuencia
- *durante la operación*
- *en períodos de cambio de carga*
- *en las puestas o en las retiradas de servicio*

Durante la puesta en servicio de un pulverizador, la mezcla *aire+carbón* en el recinto del molino pasa desde *una situación en que es muy pobre en combustible, hasta otra final en que es rica en combustible*, por lo que existe una mezcla transitoria intermedia, ideal para una explosión de polvo de carbón, si existe una fuente ignitora suficientemente fuerte, como la que podría provocar el rescoldo que se desarrolla en el carbón residual que queda en la zona caliente del molino, tras un disparo ó interrupción súbita de operación.

Controles de seguridad en pulverizadores.- El Código de Normas para el diseño y aplicación de sistemas pulverizadores de carbón, es el de la Asociación Nacional de Protección contra Incendios (NFPA) USA, y la norma NFPA-8503, que recoge los valores mínimos para los controles de seguridad, que se deben usar en los pulverizadores.

- El flujo de aire$_{primario}$ inferior al mínimo establecido por el fabricante dispara el sistema pulveriza-

dor, que a su vez dispara el $\begin{cases} alimentador\ de\ carbón \\ flujo\ de\ aire_{primario} \end{cases}$

- El cierre de todas las válvulas de tuberías a quemadores dispara el $\begin{cases} alimentador\ de\ carbón \\ flujo\ de\ aire_{primario} \\ pulverizador \end{cases}$

Otros indicativos de mal funcionamiento que pueden requerir el disparo manual del pulverizador son:

- Una temperatura de salida del molino muy alta, probablemente indica un incendio

- La imposibilidad de mantener la temperatura de salida por encima de 125°F (52°C) implica una pérdida de capacidad de molienda

Sistemas especiales de seguridad.- El procedimiento de eliminar el carbón residual tras un disparo del pulverizador, cuando no se dispone del adecuado flujo de $aire_{primario}$, requiere de un by-pass de control independiente que circunvala una parte de la lógica del control, la que impide operar al motor de accionamiento del pulverizador. Para impedir el mal uso de la característica que facilita el by-pass, la eliminación del carbón residual es posible por la actuación de la lógica de disparo del molino.

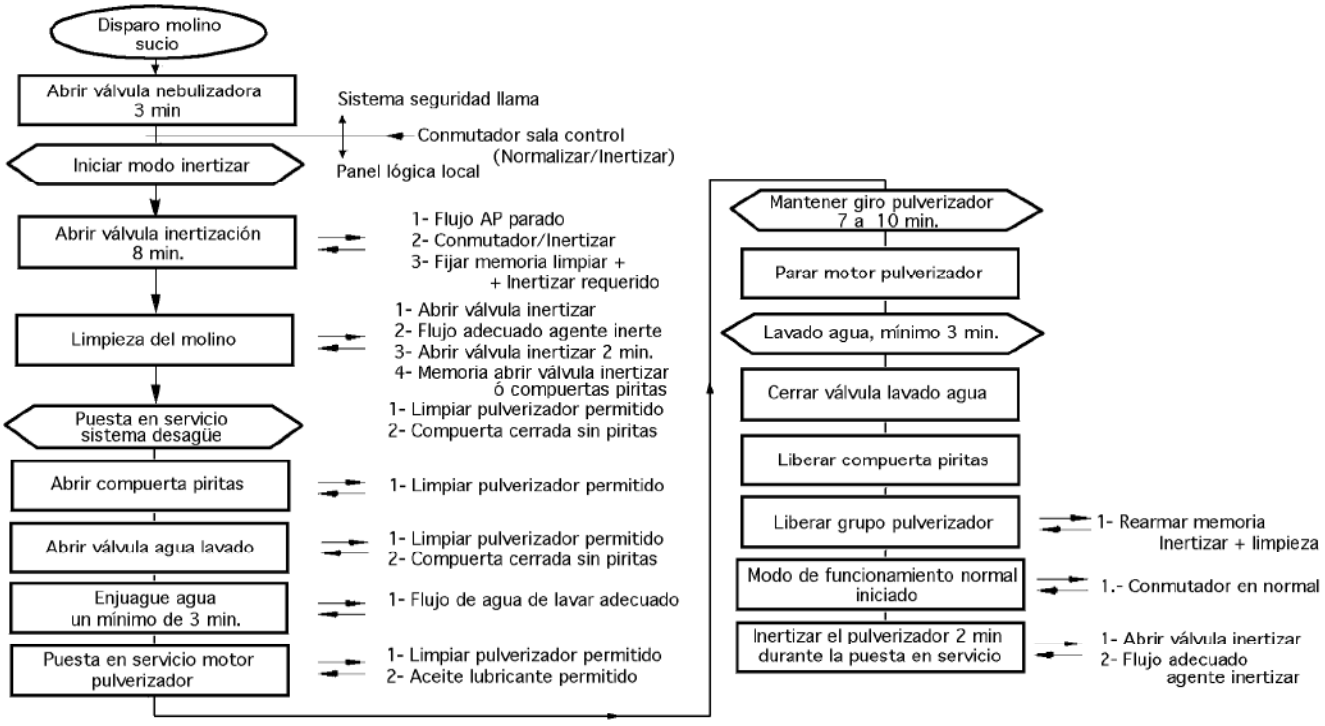

Fig XIII.21.- Diagrama esquemático del sistema de seguridad

Se ha desarrollado un sistema especial para hacer frente a un fenómeno observado en conductos tras la actuación de un disparo, que consiste en la presencia de una fina capa de carbón en polvo, en la zona del sistema de $aire_{primario}$; esta capa se debe a una nube turbulenta de polvo de carbón,

que persiste después de haberse colapsado el lecho fluidificado; se puede interceptar mediante una disposición de toberas rociadoras de agua bajo la garganta del molino que actúan con la señal de disparo del molino.

Junto con este sistema de rociado automático durante el ciclo de inertización y limpieza, puede funcionar otro conjunto de toberas tangenciales de lavado, de accionamiento manual, que mejora la eliminación del carbón residual de la trampa de piritas.

XIII.6.- PULVERIZADORES AVANZADOS

Clasificadores giratorios.- En la actualidad, para el sistema de combustión directa, se está reconsiderando la finura estándar del 70% que pasa a través del tamiz de 200 mesh. Si el porcentaje se eleva hasta el 80% se cumplimentan los límites de emisiones establecidos en la década final del siglo XX. Los porcentajes de finura pueden superar el 95% pasando a través de 200 mesh, pero estos niveles tan altos sólo se alcanzan cuando se utiliza un clasificador giratorio.

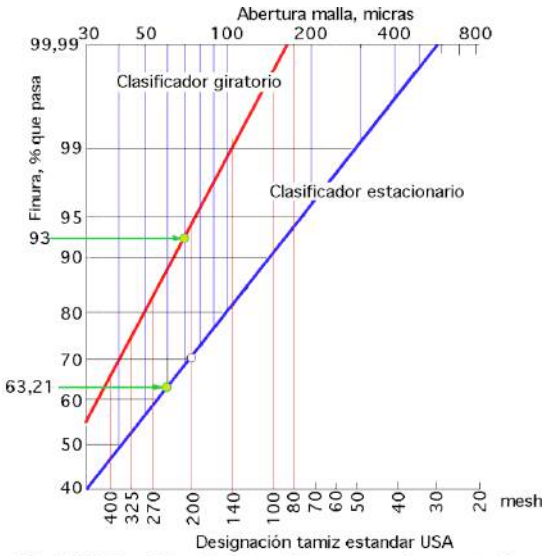

Fig XIII.22.- Distribución del tamaño de partículas

La Fig XIII.22 indica el interés de este clasificador giratorio, más efectivo en la reducción del tamaño de las partículas bastas, que en reducir aún más el tamaño de las más finas.

Se observa que la finura correspondiente al 93% pasando a través del tamiz de 200 mesh, está muy cerca del límite para grandes pulverizadores verticales.

Otras configuraciones de rotores clasificadores son de:

- *jaula de ardilla*
- *diversos tipos de paletas*
- *dos etapas, la 1ª de tipo estacionario*

Cada uno de estos clasificadores rotatorios es una solución para problemas relacionados con:

- *la actualización de unidades*
- *la distribución del tamaño de partículas*
- *el consumo energético del accionamiento*
- *las características operativas del pulverizador*

Mejoras.- En los pulverizadores de carbón MPS, las mejoras más importantes han sido:

- La introducción de la segmentación en los anillos de la parte giratoria de la garganta, lo que ha reducido los costes relacionados con el desgaste por erosión

- La mejora del sistema de carga variable mediante muelles resorte

Lo normal es hacer funcionar los sistemas de carga de los resortes de los molinos verticales,

con una carga prefijada constante; si esta carga se modifica con la carga de la alimentación de carbón al molino, tal como se muestra en la Fig XIII.23, los beneficios se concretan en:

- *Un reducido consumo energético a bajas cargas*
- *La posibilidad de operar a carga baja sin vibración alguna*
- *La pérdida reducida de presión a altas cargas, cuando se incrementa la carga de resortes por encima de los valores prefijados*

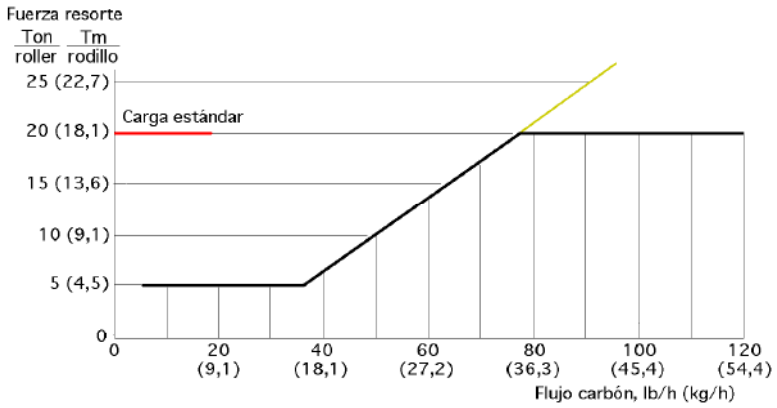

Fig XIII.23.- Carga / Fuerza resorte, en MPS-89 respecto al flujo de carbón

XIII.7.- MOLIENDA ULTRAFINA

Los molinos verticales de rodillos tienen un límite práctico, que corresponde al paso del 95% del producto molido a través del tamiz de 200 mesh. Conforme más fino es el producto, el material reciclado en la cámara de molienda también es más fino, por lo que la capa comprimida del carbón que se muele se hace más fluida y menos estable.

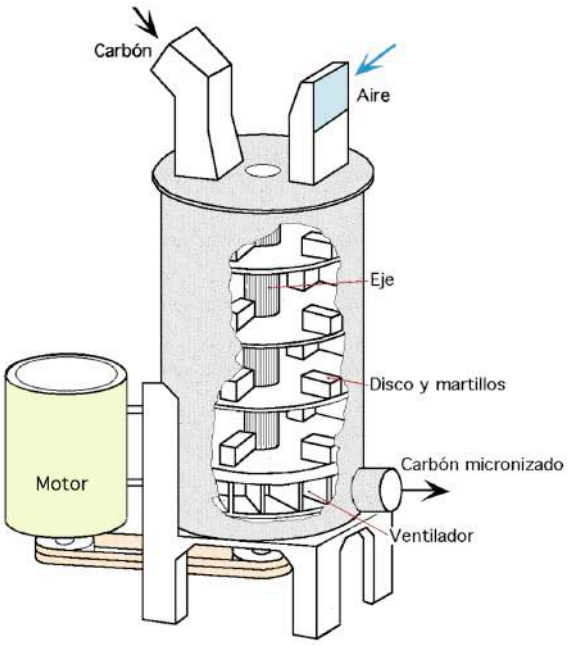

Fig XIII.24.- Configuración de la cámara de molienda de un molino de fricción a alta velocidad

Para una molienda muy fina se necesitan otros equipos, como el pulverizador tubular con carga de bolas, que ofrece un prolongado tiempo de residencia lo que propicia un producto extremadamente fino; se construyen en tamaños grandes, que son los que se precisan en sistemas de combustión directa.

Una aplicación interesante de la molienda muy fina consiste en alimentar con combustible sólido a los ignitores especiales que queman carbón, reduciendo así durante la operación de puesta en servicio y durante los períodos de estabilización de fuegos en las operaciones a bajas cargas, el consumo de combustibles líquidos (fuelóleos).

Los molinos que emplean bolas, generalmente para molienda húmeda, cuentan con una pequeña carga de bolas en el interior de un recipiente cilíndrico que se agitan por rotación; la pulverización se produce por la molienda de los sólidos que fluyen a través de la zona de carga de las bolas.

En los molinos que trabajan por fricción a alta velocidad, Fig XIII.24, el rotor tiene una serie de discos, dotado cada uno de barras de impacto que configuran una etapa de mo-lienda; muelen combinando dos factores:

- *En el primero hay etapas en las que predomina el impacto*
- *En el segundo destaca la etapa final de fricción*

Estos molinos han atraído la atención para la preparación de un combustible adecuado para su combustión en ignitores especiales, que sustituyan a los clásicos mecheros de fuelóleo utilizados para el encendido y estabilidad de la llama.

Las etapas que se integran en la molienda están separadas por diafragmas, en las que el carbón, para pasar de una etapa a la siguiente, se mueve hacia el centro, contra la fuerza centrífuga.

El carbón capturado en cada etapa constituye una superficie que protege a la carcasa del molino de un rápido desgaste; estos molinos se construyen con capacidades que llegan a las 4,5 Tm/h y pueden ser de un paso, o estar equipados con clasificadores centrífugos externos para el control de tamaños.

El carbón micronizado es un carbón pulverizado tal que su 100% pasa a través de un tamiz estándar de 315 mesh. La salida de los molinos de fricción a alta velocidad tiene una finura que se corresponde con $\begin{cases} \text{- la que pasa el 98\% a través del 200 mesh} \\ \text{- y el 86\% a través del 325 mesh} \end{cases}$

Un carbón molido con estas características es tan fino que se puede encender fácilmente sin necesidad de precalentar el $aire_{primario}$ comburente.

BIBLIOGRAFIA.- CAP XIII.- PULVERIZADORES DE CARBÓN

R.R. Piepho & D.R.Dougan.- GRINDABILITY MEASUREMENTS ON LOW RANK FUELS.- Proceedings, Coal Technology 81, vol. 3, pp. 111 a 121, (1981)

T.D. Johnson & al..- PULVERISED FUEL SYSTEM EROSION.- EPRI Conference on Coal Pulverizers, pp. 18˜22, Central Electricity Generating Board , England, (1985)

R.G. Zalosh.- REVIEW OF COAL PULVERIZAR FIRE AND EXPLOSION INCIDENTS ASTM-ST958, p. 194., American Society for Testing and Materials , Philadelphia, (1987)

R.T. Donais, A.L. Tyler & W.T. Bakker.- THE EFFECT OF QUARTZ AND PYRITE ON ABRASIVE WEAR IN COAL PULVERIZERS.- International Conference on Advances in Material for Fossil Fuel Plants, Proceedings of the American Society for Metals, p. 643, (1987)

Draft Standard ISO/DIS-9931.- COAL: SAMPLING OF PULVERIZED COAL CONVEYED BY GASES IN DIRECT FIRED COAL SYSTEMS.- International Standards Organization, (1989)

A.C. Wiley.- MICRONIZED COAL FOR BOILER UPGRADE/RETROFIT.- Proceedings on Power-Gen 90, p. 1155 a 1170, Houston, (1990)

B&W.- STEAM: ITS GENERATION AND USE.- 40th Edition, Chapter 12, The Babcock & Wilcox Company, Barberton, Ohio, USA, (1992)

DEMONSTRATION OF COAL REBURNING FOR CYCLONE BOILER NO_x CONTROL, Los Alamos National Laboratory, Clean Coal Technology Compendium

Combustion Engineering.- COMBUSTION: FOSSIL POWER SYSTEMS.- 3rd ed. Windsor. 1981.

Esa Vakkilainen.- LECTURE SLIDES AND MATERIAL ON STEAM BOILER TECHNOLOGY, 2001

CFB ENGINEERING MANUAL, extract supplied by Foster Wheeler

CYCLONE FIRED WET BOTTOM BOILERS, IEA COAL RESEARCH CENTRE, Web Page, http://www.iea-coal.org.uk/CCTdatabase/cyclone.htm , read 15.8.2002

Sebastian Teir.- MODERN BOILER TYPES AND APPLICATIONS.- Helsinki University of Technology Department of Mechanical Engineering.- Energy Engineering and Environmental Protection

B&W QUALITY PRODUCTS FOR THE POWER GENERATION INDUSTRY.- Boilers and Steam Generating Equipment, Environmental Equipment. Auxiliary Equipment