X.- PREPARACIÓN Y MANIPULACIÓN DE CARBONES

pfernandezdiez.es

Clasificación del carbón bruto	*377*
Equipos para reducir el tamaño del carbón	*379*
Triturador rotativo	*379*
Triturador simple	*380*
Triturador de doble tambor	*380*
Triturador con retención de martillos	*381*
Cribas	*381*
Criba de gravedad	*382*
Criba giratoria	*382*
Criba de sacudidas	*382*
Criba oscilante	*382*
Preparación y limpieza del carbón	*382*
Caracterización de impurezas del carbón	*383*
Operaciones de limpieza y preparación del carbón	*385*
Concentración húmeda	*385*
Concentración por gravedad en vía húmeda	*386*
a) Lavado con criba	*386*
b) Concentración en mesa hidráulica	*387*
c) Procesos de separación por medios densos	*387*
Concentración por flotación	*387*
Concentración por vía seca	*388*
Deshidratación	*388*
Manipulación y almacenamiento de carbón en centrales térmicas	*389*
Manipulación del carbón bruto	*390*
Descarga de vagones ferroviarios	*390*
Descarga de camiones	*391*
Almacenamiento	*391*
Almacenamiento en pila	*391*
Almacenamiento en silo	*392*
Almacenamiento en tolva	*392*
Diseño de los conductos de transferencia	*393*
Alimentadores	*393*
Alimentadores volumétricos y gravimétricos	*393*
Mezcla de carbones	*395*
Manipulación del carbón	*396*
Supresión de polvo	*396*
Oxidación	*396*
Carbón congelado	*397*
Incendio en pilas de carbón	*397*
Flujo en tolvas	*397*
Incendio en tolvas	*398*
Situación medioambiental	*398*
Manipulación de combustibles sólidos alternativos	*398*
Residuos sólidos municipales	*398*
Desechos de madera	*399*
Referencias	*400*

El carbón empleado en la generación de vapor requiere de diversas tecnologías en los procesos de producción, preparación, transporte y almacenamiento.

La minería extractiva constituye el primer escalón en el proceso de la producción del carbón, que en estado bruto se trata para eliminar impurezas y facilitar un suministro más uniforme a la caldera. La reducción en el contenido de ceniza y S, mejora las características de funcionamiento de la caldera y reduce las emisiones contaminantes.

El transporte de carbón hasta la central termoeléctrica representa a veces, la parte más importante del coste total del carbón puesto en la central, por lo que las plantas instaladas en bocamina reducen el coste ya que minimizan los de transporte.

El almacenamiento y manipulación de las grandes cantidades de carbón que se requieren en una planta termoeléctrica de generación de energía, implican una cuidadosa planificación para evitar posibles interrupciones en el servicio de la misma.

La limpieza y preparación del carbón cubren un amplio campo de actividades, que se extiende desde la reducción del tamaño inicial, cribado, eliminación de materiales extraños y clasificación, hasta procesos mucho más complicados para eliminar la ceniza, el S y la humedad.

X.1.- CLASIFICACIÓN DEL CARBÓN BRUTO

En las plantas termoeléctricas, la reducción del tamaño de los trozos de carbón se limita a la trituración y pulverización, aunque en algunas ocasiones resulta económico comprar pretriturados en el caso de unidades de poca potencia y, en particular, en hogares mecánicos. Cuando se limita la cantidad máxima de finos en el carbón, la degradación del tamaño de sus partículas que tiene lugar durante el transporte y manipulación, se debe tener en cuenta a la hora de establecer las especificaciones correspondientes al suministro, para evitar el peligro de incendio.

Para plantas que tienen unidades con *hogares mecánicos*, el carbón se compra calibrado.

Para calderas que operan con *hogares de carbón pulverizado*, se especifica un tamaño máximo de entrega y no se limita el porcentaje de finos, de forma que el carbón resulte aceptable para la trituración y pulverización.

El carbón se $\begin{cases} \text{- } \textit{tritura para reducir el tamaño de sus partículas} \\ \text{- } \textit{atomiza a otro tamaño más fino en el pulverizador} \end{cases}$

La trituración resulta adecuada para lograr tamaños bastos que se requieren en unidades que cuentan con quemadores ciclón, reduciendo el tamaño de las partículas de carbón pero siempre con una mínima producción de finos.

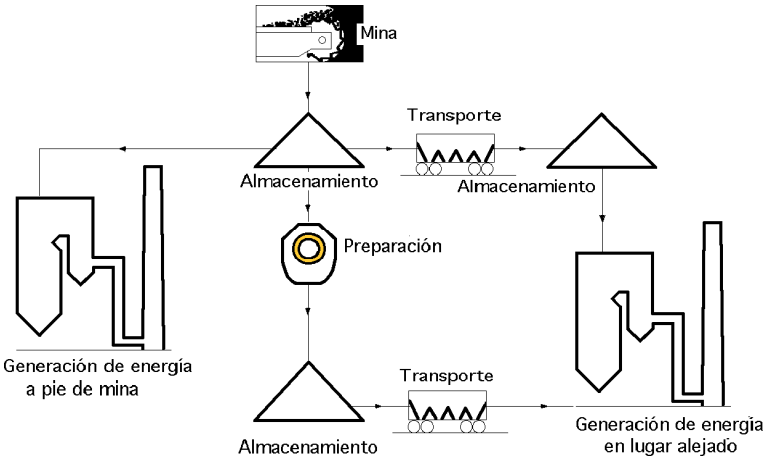


Fig X.1.- Cadena de suministro de combustible para generador de vapor que quema carbón

EQUIPOS PARA REDUCIR EL TAMAÑO DEL CARBÓN.- Se caracterizan por:

- El máximo tamaño de suministro que resulta aceptable

- El mayor tamaño deseado en el producto obtenido por el proceso de reducción

La relación que define la reducción es el cociente entre el tamaño de las partículas suministradas y producidas:

$$\frac{P_{suministro}}{P_{producto}} = \frac{El\ 80\%\ de\ las\ partículas\ suministradas\ pasa\ a\ través\ de\ una\ malla}{El\ 80\%\ de\ las\ partículas\ producidas\ pasa\ a\ través\ de\ una\ malla}$$

En los equipos trituradores de un paso, el carbón los atraviesa sólo una vez y se descarga sin apenas recirculación, minimizando la producción de finos.

Los trituradores rotativos y de tambor se utilizan para reducir el tamaño del carbón, sin producir una significativa cantidad de finos.

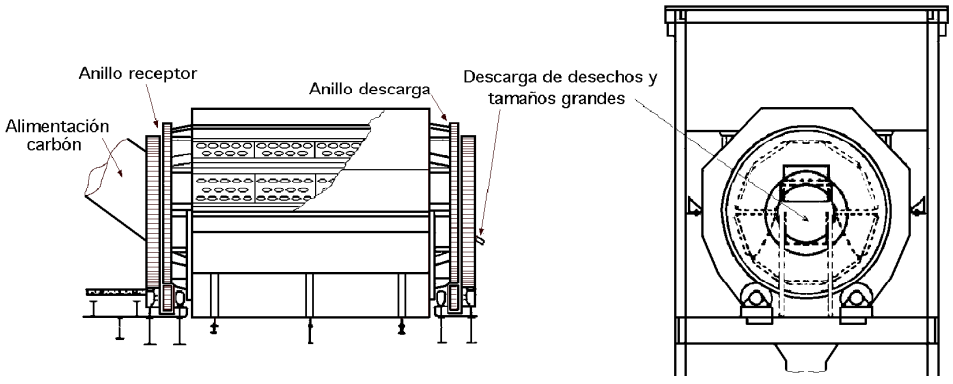


Fig X.2.- Triturador rotativo para usar en la mina y en plantas de energía

Triturador rotativo.- Reduce el tamaño del carbón desde un máximo determinado y rechaza los objetos de desecho de tamaño mayor, como maderas de entibación, piezas metálicas, etc, Fig X.2; consiste en un gran cilindro de eje horizontal construido con chapa de acero perforada, que gira a 20

rpm. El tamaño de los orificios de la chapa determina el tamaño máximo de las partículas de carbón.

Se pueden instalar en: { *bocamina*; *la planta de preparación*; *la planta generadora de vapor* }

Triturador simple.- Consta de un tambor dentado que lanza el carbón contra una placa para producir la trituración, Fig X.3; el tamaño máximo de partículas se determina por la separación entre el tambor y la placa. Para impedir el agarrotamiento debido a impurezas metálicas, el tambor se puede desplazar y la placa puede bascular, separándose ambas partes para permitir el paso de las impurezas. Éste es un modelo de triturador antiguo que se usa normalmente para reducir el carbón bituminoso *todo uno* (tal como sale de la mina), a un producto de tamaño máximo entre 1,25”÷ 6”= (31,8÷152 mm); la acción abrasiva entre el carbón y la placa produce algunos finos.

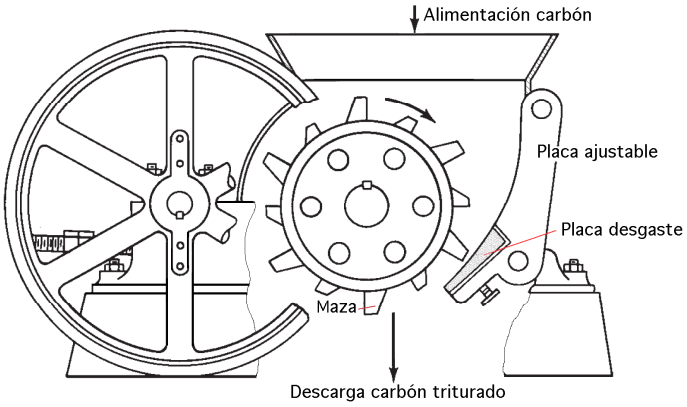


Fig X.3.- Triturador simple de mazas

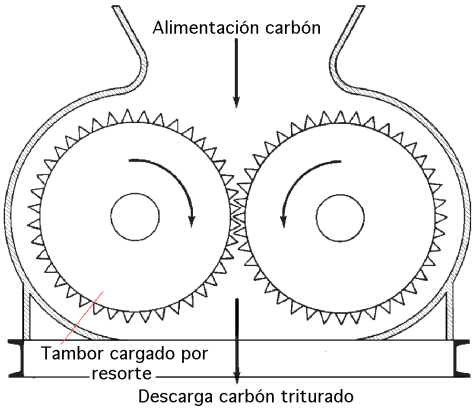


Fig X.4.- Triturador de doble tambor

Triturador de doble tambor.- En él se fuerza al carbón a pasar entre dos tambores dentados de ejes paralelos, que giran en sentidos opuestos Fig X.4.

Las superficies más próximas y enfrentadas de los tambores se mueven hacia abajo arrastrando el carbón hacia el triturador; el tamaño de los dientes y la separación entre los tambores determinan el tamaño máximo del producto obtenido. Uno de los tambores se carga por un resorte, con el fin de facilitar el paso de grandes impurezas duras; se usan para reducir el carbón *todo uno* a tamaños menores, en plantas de preparación y en plantas generadoras de vapor.

Triturador con retención de martillos.- El carbón se retiene en la zona de fragmentación hasta que es lo suficientemente fino como para pasar hacia la descarga a través de un tamiz, Fig X.5; se usa para reducir el tamaño del carbón *todo uno*, hasta un tamaño aceptable para alimentar un hogar mecánico o un pulverizador; la refragmentación produce una considerable cantidad de finos. El triturador rompe el carbón por impacto con los martillos montados sobre el rotor, los cuales pueden oscilar libremente durante su rotación; el carbón permanece en el molino y la fragmentación continúa hasta que las partículas son suficientemente finas como para pasar a través de la parrilla formada por los barrotes; van provistos de una trampa para recoger y eliminar restos metálicos.

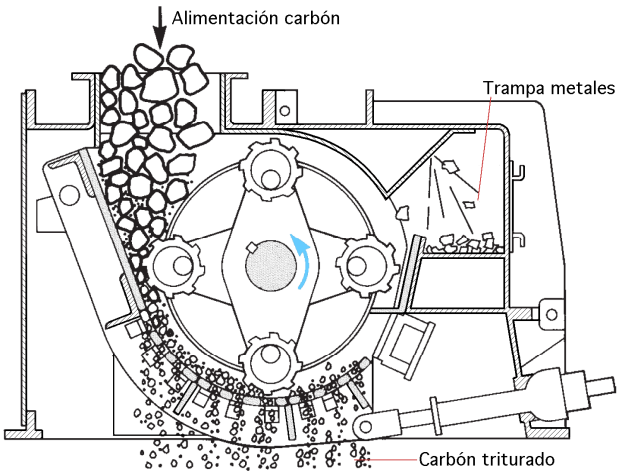


Fig X.5.- Triturador de martillos

CRIBAS.- El cribado se realiza en $\begin{cases} bocamina \\ plantas\ de\ preparación \end{cases}$ eliminando el material indeseable y calibrando el carbón antes de su envío a la planta correspondiente.

El carbón se hace pasar a través de una parrilla de barras de acero, criba grande, con el fin de eliminar la madera y otros materiales indeseables procedentes de la mina; el carbón bruto se separa en varias fracciones y tamaños, para cumplimentar las especificaciones de suministro inherentes a su posterior procesado en la planta de preparación.

Los tipos de cribas utilizadas para el carbón, son: $\begin{cases} Parrillas\ de\ gravedad\ (reja\ de\ barrotes) \\ Cribas \begin{cases} giratorias\ de\ tipo\ tambor \\ de\ sacudidas \\ oscilantes \end{cases} \end{cases}$

La ASTM en su norma D-431 especifica las cribas aceptadas con *carácter universal*.

Criba de gravedad.- Consiste en un conjunto de barras inclinadas y paralelas, de forma que su sección recta tiene forma de cuña. La distancia entre barrotes, su inclinación y longitud, determinan el tamaño final; la distancia entre barras contiguas es menor en el lado superior de entrada que en el inferior de salida de la sección, con el fin de evitar su atoramiento.

Criba giratoria.- Consiste en un cilindro $\begin{cases} de\ chapa\ perforada \\ con\ un\ recubrimiento\ de\ tela\ metálica \end{cases}$, que gira lentamente, con su eje ligeramente inclinado sobre el plano horizontal y paralelo al flujo de carbón.

El tamaño de las aberturas determina la del producto separado. Debido a la agitación del carbón a medida que se desplaza a lo largo del cilindro, se puede producir una considerable fragmentación, por lo que las cribas giratorias no se utilizan para tamaños mayores de 3”(76,2 mm). Como sólo una pequeña porción de la superficie de criba está cubierta de carbón, la capacidad de producción de una criba giratoria es relativamente pequeña.

Criba de sacudidas.- Consiste en una malla de alambre montada en un bastidor rectangular que está sometido a un determinado movimiento de vaivén; puede ser horizontal o estar ligeramente inclinada en el sentido descendente del flujo de carbón.

La fragmentación del carbón bituminoso se produce en configuraciones casi cúbicas.

Las impurezas asociadas de esquistos y pizarras se fracturan en forma de láminas delgadas alargadas, lo que posibilita la separación de las impurezas.

Criba oscilante.- Se utiliza para la clasificación y deshidratado preliminar de carbones, y es similar a la criba de sacudidas, salvo que utiliza un vibrador eléctrico de alta frecuencia y baja amplitud. La superficie de la criba está inclinada en el sentido descendente del flujo de carbón; la vibración ayuda a mantener las aberturas del tamiz libres de finos que están en contacto con la superficie de la criba.

Para el cribado de los finos de un *carbón húmedo* se utilizan rociadores de agua para baldear las partículas finas a través de la capa de carbón y de la superficie de la criba.

La separación de finos de un *carbón bruto* mejora la eficiencia en los posteriores procesos de limpieza y deshidratado del carbón; los finos se separan y limpian aparte y, posteriormente, se mezclan de nuevo con el carbón ya limpio.

X.2.- PREPARACIÓN Y LIMPIEZA DEL CARBÓN

La limpieza del carbón consiste en la reducción de los contenidos de ceniza y S.

Un *reducido contenido en ceniza* conduce a costes de transporte más bajos y a menores requerimientos en su manipulación, almacenamiento y mantenimiento, gracias a la eliminación de la pi-

rita y cuarzo, que son los abrasivos que le acompañan. La transferencia de calor en la caldera se incrementa como consecuencia de la menor deposición de ceniza en las superficies tubulares que configuran el generador de vapor.

Un *reducido contenido en la arcilla* presente en el carbón mejora su manipulación, pero hay que sopesar las consecuencias de un mayor contenido en finos y de una mayor humedad superficial.

Las distintas regulaciones medioambientales con las que se restringen las emisiones de SO_2 producidas por los generadores de vapor que queman carbón, ha incrementado la demanda de limpieza de carbones, lo que se justifica por la gradual reducción de la calidad del carbón tal como sale de la mina, como consecuencia del agotamiento de los yacimientos de mejor calidad y de la mecanización de la minería debida al incremento de la extracción de carbón.

CARACTERIZACIÓN DE IMPUREZAS DEL CARBÓN.- Las impurezas asociadas con el carbón pueden ser:

- Intrínsecas, porque no se pueden separar del carbón por procesos físicos, como el S orgánico

- Extrínsecas, que se pueden segregar parcialmente mediante procesos físicos de limpieza

El alcance con el que se pueden eliminar las impurezas viene determinado económicamente por $\begin{cases} \text{- El grado de diseminación de las impurezas en la matriz del carbón} \\ \text{- El grado de liberación del proceso seleccionado para la distribución de partículas} \\ \text{- Las limitaciones físicas correspondientes al equipamiento del proceso} \end{cases}$

Cuando el carbón se quema, la materia mineral asociada al carbón bruto forma la ceniza, que proviene de dos fuentes:

- La ceniza intrínseca consiste en elementos químicos procedentes de vegetales orgánicamente combinados con el carbón durante su formación geológica; esta materia mineral es < 2% de la ceniza total

- La ceniza extrínseca consiste en materiales que se han incorporado al yacimiento durante o después del proceso de carbonización, o que se extrajo con el carbón durante el proceso de laboreo

El S está siempre presente en el carbón y cuando éste se quema forma el SO_2; si no se elimina antes de la combustión, el SO_2 formado $\begin{cases} \text{escapa por la chimenea} \\ \text{se elimina por algún tratamiento de humos} \end{cases}$.

El S total puede variar desde algunas décimas hasta más del 8% en peso.

El S puede coexistir bajo tres formas diferentes:

a) El $S_{pirítico}$ es el combinado con el hierro, en forma de pirita FeS_2

b) El $S_{orgánico}$ está en la estructura del carbón combinado químicamente con sus moléculas

c) El $S_{sulfato}$ suele estar presente como sulfatos de Ca y de Fe, en una proporción inferior al 0,1%.

El $S_{pirítico}$ puede oscilar entre el 10%÷ 80% del total de S, aunque normalmente es inferior al 2% en peso, Tabla X.1. Las partículas más grandes de $S_{pirítico}$ se eliminan por limpieza física, pero si está finamente diseminado ó se trata de $S_{orgánico}$, es imposible tal eliminación.

La humedad se puede considerar como impureza, porque en cualquier caso reduce el poder calorífico del carbón bruto; varía con el tipo del carbón, aumentando desde un 1,2% en las antracitas, hasta el 45% ó más en algunos lignitos.

Tabla X.1.- Distribución en % del contenidos en S en algunos carbones USA

Localización mina	*Nombre capa carbón*	*Azufre total*	*Azufre pirítico*	*Azufre orgánico*
Henry, MO	*Bevier*	*8,2*	*6,39*	*1,22*
Henry MO	*Tebo*	*5,4*	*3,61*	*1,8*
Muhlenburgh, KY	*Kentaky 1*	*5,2*	*3,2*	*2*
Coshocton, OH	*Ohio 6*	*4,69*	*2,63*	*2,06*
Clay, IN	*Indiana 3*	*3,92*	*2,13*	*1,79*
Clearfield, PA	*Upper Freeport*	*3,56*	*2,82*	*0,74*
Franklin, IL	*Illinois 6*	*2,52*	*1,5*	*1,02*
Meigs, OH	*Ohio 8A*	*2,51*	*1,61*	*0,86*
Boone, WV	*Eagle*	*2,48*	*1,47*	*1,61*
Walker, AL	*Pratt*	*1,62*	*0,81*	*0,81*
Washington, PA	*Pittsburgh*	*1,13*	*0,35*	*0,78*
Mercer, ND	*Lignite*	*1*	*0,38*	*0,62*
McDowell, WV	*Pocahontas 3*	*0,55*	*0,08*	*0,46*
Pike, KY	*Freeburn*	*0,46*	*0,13*	*0,33*
Kititas, WA	*Big Dirty*	*0,4*	*0,09*	*0,31*

La humedad superficial se elimina mediante deshidratación mecánica o térmica.

Cuando se realiza el presecado, la oxidación atmosférica se incrementa, especialmente en el caso de carbones de baja calidad, como consecuencia de la mayor superficie de oxidación de las partículas de carbón que están carentes de humedad.

La distribución de la ceniza del S en una muestra de carbón se caracteriza mediante un proceso de flotación que consiste en la fragmentación del carbón bruto en tamaños que se seleccionan en fracciones de diferentes densidades, analizando cada una de ellas para determinar su contenido en ceniza y S y ver donde están concentradas las impurezas, pudiéndose establecer que:

- Las impurezas blandas se encuentran en las fracciones correspondientes a los tamaños más finos
- Las fracciones de menor densidad tienen el menor contenido en ceniza, Tabla X.2

La información proporcionada por estos ensayos se utiliza para predecir el posible grado de reducción en los contenidos de ceniza y de S, utilizando tecnologías de limpieza mediante flotación en líquidos densos; en general, cuanto más parecidas sean la densidad del material y la del medio de separación, tanto más difícil e ineficiente será ésta.

Tabla X.2.- % de contenido en ceniza para varios intervalos de densidad de carbones bituminosos

Intervalo de densidad relativa	*1,3 a 1,4*	*1,4 a 1,5*	*1,5 a 1,6*	*1,6 a 1,8*	*1,8 a 1,9*	*>1,9*
Contenido en ceniza, % en peso	*1 a 5*	*5 a 10*	*10 a 35*	*35 a 60*	*60 a 75*	*75 a 90*

Operaciones de limpieza y preparación del carbón.- Los pasos iniciales en el proceso de limpieza del carbón, incluyen:
- *La eliminación de todo tipo de materiales extraños*
- *La trituración del carbón todo uno*
- *El cribado para la separación y clasificación por tamaños*

Las operaciones que se exponen a continuación se utilizan para deshidratar y obtener un producto que tenga unos bajos contenidos en ceniza y en S; la Fig X.6 presenta un diagrama de la secuencia de operaciones relativas a una unidad para la limpieza de carbón.

CONCENTRACIÓN HÚMEDA.- El procedimiento más común para realizar la limpieza mecánica del carbón consiste en la concentración por densidad y la posterior separación y clasificación en múltiples productos; sucede que, a igualdad de tamaño, las partículas más pesadas se depositan mejor y más rápidamente que las más ligeras en el seno de un fluido; el carbón e impurezas se separan por su diferencia de densidad, tal como se indica en la Tabla X.3.

Tabla X.3.- Densidades relativas típicas de carbones e impurezas afines

Material	*Carbón bitumin.*	*Hulla pizarrosa*	*Esquisto bitum.*	*Pizarra*	*Arcilla*	*Pirita*
Densidad relativa	*1,10 a 1,35*	*1,35 a 1,70*	*1,60 a 2,20*	*2,00 a 2,60*	*1,80 a 2,20*	*4,80 a 5,20*

El fluido de separación consiste en:

- *Una suspensión de carbón bruto en agua o en aire*
- *Una mezcla de arena y agua*
- *Una lechada de carbón bruto y magnetita muy fina (es el medio de separación y clasificación más común)*
- *Un líquido orgánico con una densidad intermedia adecuadamente elegida*

Si la densidad del medio de separación es 1,5 las partículas con menor densidad se concentran en el carbón limpio, y las más pesadas van al desecho.

El carbón bruto se compone de una serie de partículas que representan una distribución continua de densidades y tamaños, siendo posible que una partícula grande y de poca densidad se comporte de forma similar a otra partícula de menor tamaño y mayor densidad; una partícula de pirita pequeña se puede depositar a la misma velocidad que una partícula de carbón mayor; la existencia de partículas con idéntica decantación puede hacer ineficaz el proceso de separación.

La pirita fina presente en el carbón limpio y el carbón bruto presente en la materia mineral, se denominan material mal colocado, y su cantidad se determina por la:

- *Distribución de las impurezas en el carbón bruto*
- *Densidad de separación*
- *Eficiencia en la separación física de los materiales segregados*

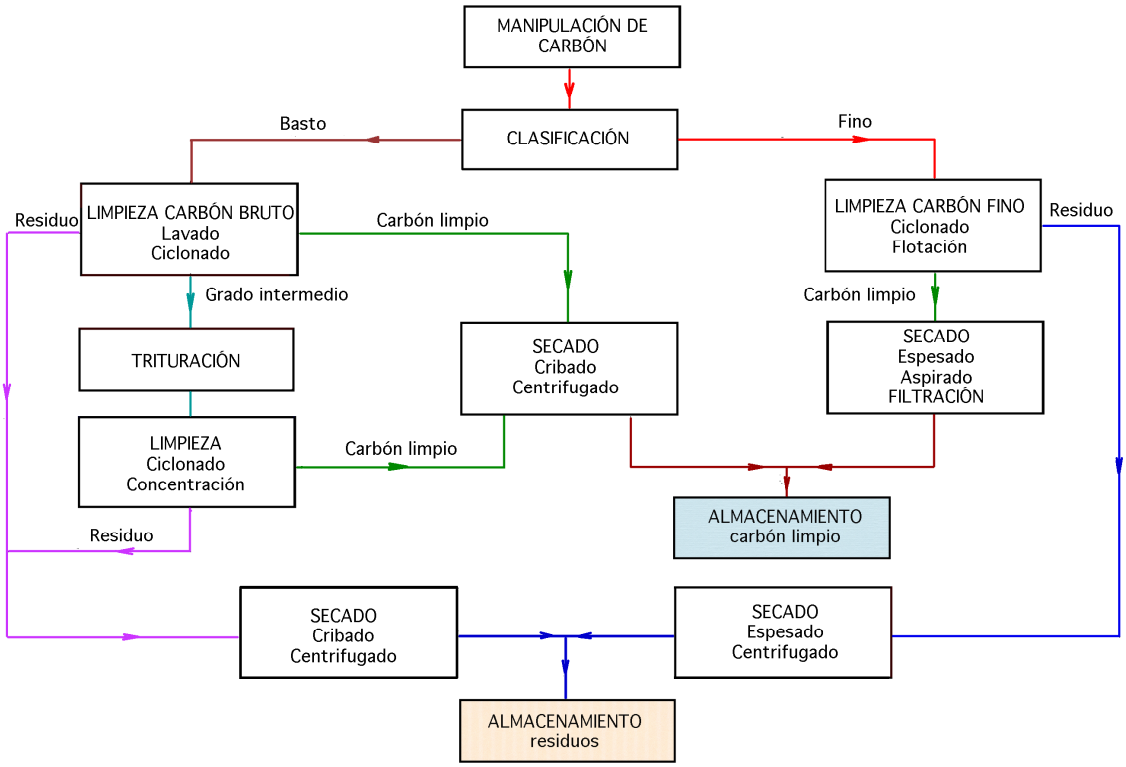


Fig X.6.- Secuencia de operaciones relativa a una unidad para la limpieza de carbón

Si la cantidad de material con densidad parecida supera el 15÷20% del carbón bruto total, es muy difícil una separación eficiente por gravedad.

Concentración por gravedad en vía húmeda.- Las técnicas más comunes son:

a) Lavado con criba
b) Concentración en mesa
c) Procesos en medios densos

a) Lavado con criba.- Sobre una criba hidráulica de carbón se proyecta, hacia arriba, un flujo de agua intermitente y periódico, creando un efecto impulsión/succión.

El *impulso ascendente* hace que el lecho se expanda y se convierta en una suspensión de carbón y de partículas de residuos que se mueven libremente y se separan por densidad y tamaño, de forma que las más pequeñas y ligeras se mueven hacia la parte superior del lecho expandido. La pulsación ascendente de agua se genera mediante la liberación controlada de aire comprimido.

La *succión descendente* hace que el lecho se colapse mejorando la separación, ya que las partes de material estéril mayores y más pesadas, se depositan más rápidamente que el carbón. Las capas separadas se desdoblan en el lado de descarga de la criba hidráulica para formar un carbón limpio y un residuo. En la Fig X.7 se presenta una criba hidráulica que se usa en un amplio campo de tamaños de alimentación, con una densidad que varía entre 1,4÷1,8; la eficiencia de la separación se mejora con un precribado que elimine los finos para procesarlos independientemente.

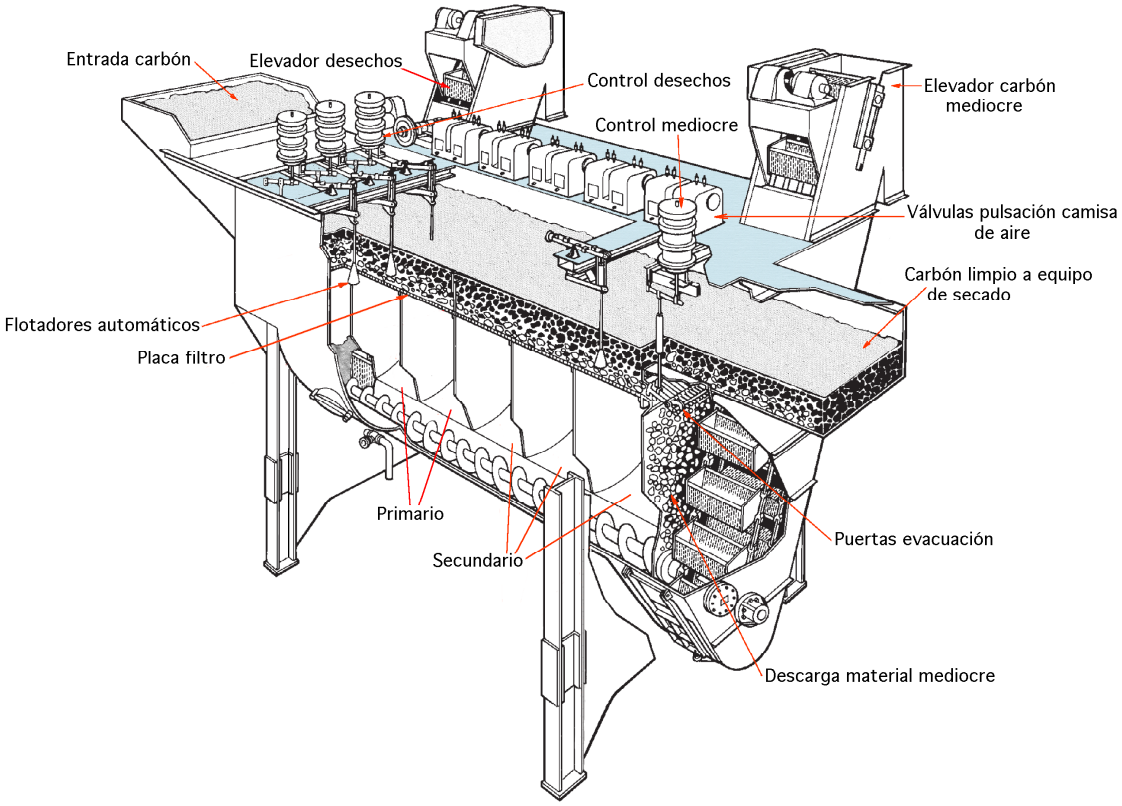


Fig X.7.- Clasificadora hidráulica BAUM para preparación de carbón

b) Mesa hidráulica de concentración.- Es una mesa inclinada que se monta de forma que oscile con frecuencia y amplitud variables y lleva una serie de barras diagonales espaciadas y perpendiculares al flujo de partículas. Por la parte superior de la mesa se introduce continuamente una lechada de *carbón+agua* produciéndose el lavado a medida que ésta atraviesa la mesa de concentración. La mezcla de *carbón+agua* junto con el movimiento de la mesa provocan un proceso de sedimentación, en el que las partículas de:

- Menor densidad ascienden a la superficie

- Mayor densidad quedan atrapadas detrás de las ondulaciones y se transportan hacia el borde de la mesa lejos de la descarga del carbón limpio

Las mesas hidráulicas de concentración se usan para tratar carbón de tamaños 0,375”$_x$ 0 = (9,53 mm $_x$ 0).

c) Procesos de separación por medios densos.- En estos procesos el carbón bruto se sumerge en un fluido que debe tener una densidad que se encuentre entre la del carbón y la de la materia mineral (residuo). La diferencia de densidad provoca que el carbón y el residuo emigren a regiones opuestas en el recipiente de separación. El fluido es una suspensión de magnetita fina en agua.

CONCENTRACIÓN POR FLOTACIÓN.- La separación de carbón y materia mineral me-

diante flotación por espuma, se lleva a cabo haciendo uso de la diferencia entre sus propiedades superficiales, en lugar de sus densidades. Se hacen pasar burbujas de aire a través de una suspensión acuosa de carbón y materia mineral, que la agitan para impedir la decantación de las partículas; las burbujas de aire atacan las superficies de las partículas de carbón que resultan más difíciles de mojar; en esta situación el carbón asciende hacia la superficie de la suspensión, donde se concentra en una espuma sobre la parte superior del agua; la materia mineral se mantiene en dispersión, Fig X.8.

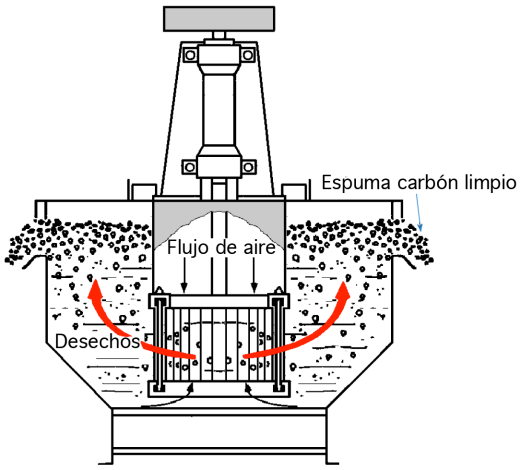


Fig X.8.- Celda de flotación

Para mejorar el ataque selectivo de las burbujas de aire a las partículas de carbón y permitir la formación de una espuma estable, se añaden reactivos espumantes. La flotación se usa para la limpieza de carbón con finura superior a la que corresponde al tamiz 48 mesh (300 micras).

La eficacia del proceso se mejora mediante:

- *Una cuidadosa selección del tipo y cantidad de reactivos*
- *Un cribado fino que genere* { *un carbón* ; *y unas partículas de desecho bien determinadas* }
- *La generación de partículas finas de aire*

CONCENTRACIÓN POR VÍA SECA.- El proceso de separación del carbón por vía seca (proceso neumático) se aplica sólo a carbones de tamaño inferior a 0,5”(12,7 mm) con baja humedad superficial.

Deshidratación.- Es un proceso clave en la preparación del carbón, ya que la reducción del contenido en humedad del combustible incrementa su poder calorífico.

El *carbón basto* con tamaño de partículas superior a 0,375” (9,53 mm) se puede deshidratar lo suficiente usando cribas oscilantes.

El *carbón de tamaño intermedio*, del orden de { *0,375 x 28 mesh* ; *9,53 mm x 600 micras* }, se deshidrata en cribas oscilantes seguidas de centrifugación.

La *deshidratación del carbón fino* implica el uso de un espesador que aumente el contenido de sólidos de la alimentación mediante un tanque de vacío, o una centrifugadora de alta densidad. La deshidratación del carbón fino sirve para clarificar el agua separada, con vistas a su reutilización en la planta de preparación del carbón. Los finos se separan del agua a reciclar, para maximizar la eficiencia de los diferentes pasos del proceso de separación.

La *deshidratación térmica* se utiliza para cumplimentar las especificaciones de humedad cuando el carbón bruto se ha limpiado con un tamaño muy fino, maximizando el rechazo correspondiente a la ceniza y S. Los secadores térmicos pueden ser cribas rotativas en cascada, y secadores de lecho suspendido y de lecho fluidificado.

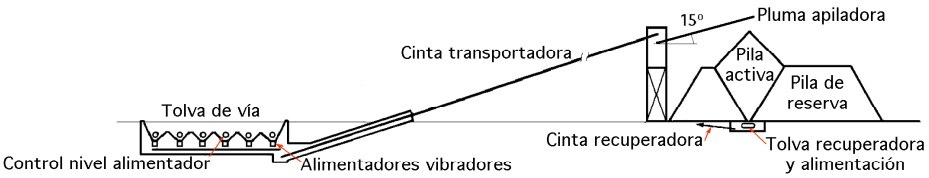
Los finos de carbón recogidos se reciclan para ayudar a las operaciones de secado del carbón.

X.3.- MANIPULACIÓN Y ALMACENAMIENTO DE CARBÓN EN CENTRALES TÉRMICAS

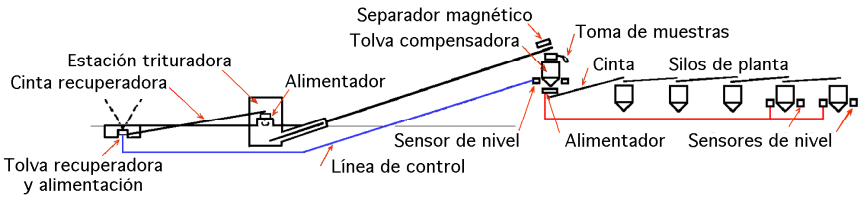
El almacenaje del carbón en una planta termoeléctrica es necesario para proveer un suministro continuo y seguro de combustible. Una planta de 100 MW quema 850 Tn/día, mientras que otra de 1300 MW requiere alrededor de 11000 Tn/día de carbón. En algunas centrales termoeléctricas hay que almacenar, por ley, una cantidad mínima de carbón equivalente al consumo de 60 a 90 días de operación a plena carga, por lo que el factor económico es la clave para determinar cuándo se debe comprar el carbón y cuánto se debe almacenar en la planta energética.

En plantas industriales pequeñas, el almacenamiento en silo se prefiere al almacenaje en pila, con ventajas que incluyen el abrigo frente a los agentes atmosféricos y la facilidad de recuperación. Comercialmente existen tanques y silos prefabricados, con capacidades que alcanzan 2700 m^3 y que pueden contener del orden de 2200 Tn de carbón. En la Fig X.9 se muestran los componentes de un sistema de almacenamiento y manipulación de carbón, para una planta termoeléctrica de 1000 MW.

El carbón se entrega en vagones de ferrocarril, con descarga automática por el fondo de los mismos a una pila grande; un sistema automático de recuperación recoge el carbón de la pila para su troceado y posterior distribución a los silos de almacenamiento del generador de vapor; este sistema automatizado puede manipular hasta 6500 Tn/día de carbón; todos los equipos, desde los alimentadores del sistema de recuperación, hasta los silos y tolvas del generador de vapor, carecen de personal y se controlan desde la sala de control de la central.



SUBSISTEMA DE DESCARGA Y APILADO



SUBSISTEMA DE RECUPERACIÓN, TRITURACIÓN Y DISTRIBUCIÓN

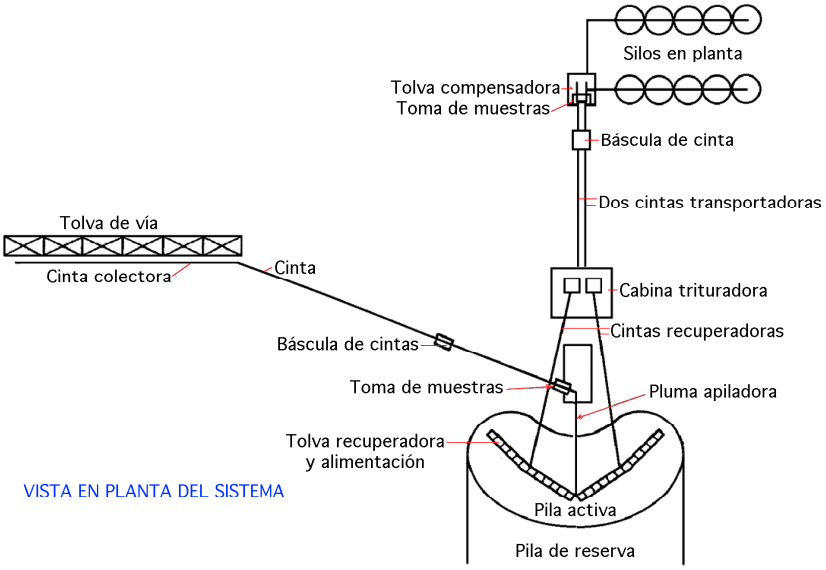


Fig X.9.- Manipulación de carbón para una central térmica

MANIPULACIÓN DEL CARBÓN BRUTO.- Para la descarga del carbón en la planta consumidora y su posterior distribución a los almacenajes en pila, silos y tolvas, se precisa de un equipamiento que depende de { *El método de entrega del carbón a la planta* / *El tipo de generador de vapor* / *La capacidad del carbón a manipular* }

Las plantas pequeñas usan transportadores móviles para { *Descargar vagones ferroviarios* / *Recuperar carbón de las pilas de almacenaje* / *Llenar los silos o tolvas correspondientes* }

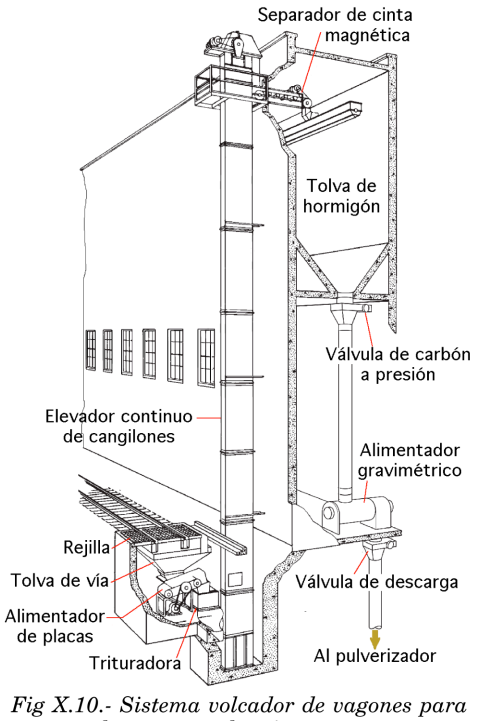


Fig X.10.- Sistema volcador de vagones para planta termoeléctrica pequeña

Las plantas grandes precisan instalaciones exclusivas para cumplimentar la demanda de un suministro continuo de combustible.

La capacidad del sistema de manipulación del carbón se determina por:

- *El régimen de utilización del carbón que tiene la caldera*
- *La frecuencia de las entregas de carbón a la planta*
- *El tiempo admitido para la descarga*

Descarga de vagones ferroviarios.- En los sistemas de volcadores giratorios para vagones, éstos se inmovilizan en un bastidor, mecánica o hidráulicamente, a continuación el bastidor se gira y el carbón cae en una tolva situada bajo las vías; en la Fig X.10, para planta termoeléctrica pequeña y en la Fig X.11 para una planta de gran potencia.

El carbón procedente de la tolva de descarga de vagones ali-

menta un triturador de tambor con carcasa perforada, en el que el carbón se trocea a tamaños más pequeños que se transporta a las tolvas de almacenaje, donde una cinta basculante lo distribuye a lo largo de ellas.

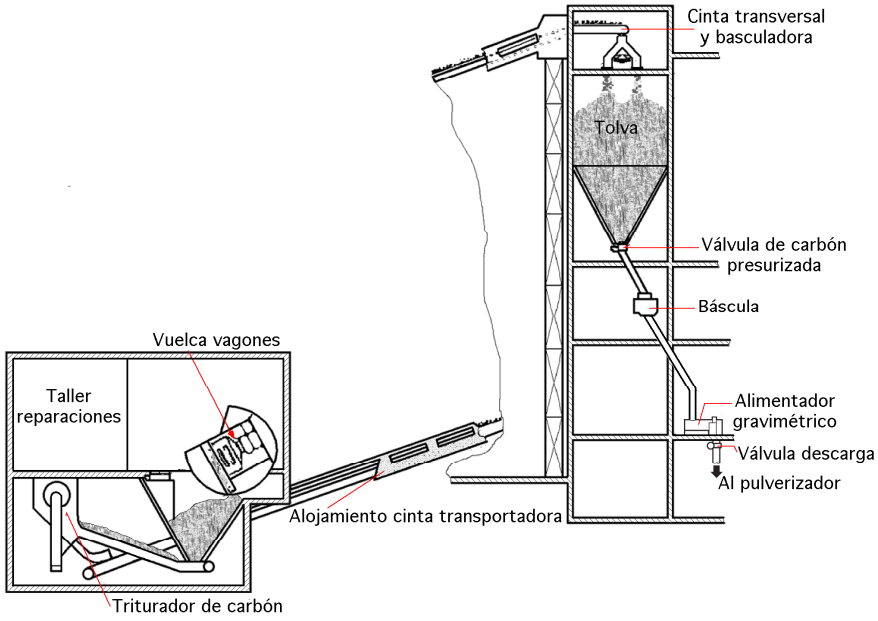


Fig X.11.- Sistema de descarga de vagones ferroviarios y de manipulación de carbón para plantas termoeléctricas grandes

Descarga de camiones.- Los camiones pueden volcar el carbón que transportan a través de una parrilla, cayendo directamente a una tolva del sistema de almacenamiento de la planta. En la Fig X.12 se muestra un sistema de descarga de carbón para camiones y su posterior manipulación, para una caldera de tamaño medio con hogar mecánico.

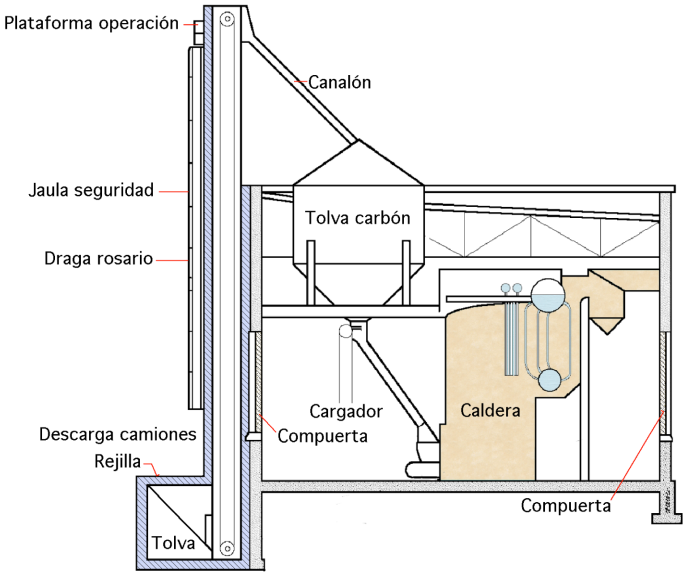


Fig X.12
Manipulación de carbón para entregas por camión

El elevador y la tolva de almacenaje se encuentran a la intemperie y no dispone de equipos de trituración ni de separación de metales. Los canalones de transferencia van inclinados 60º con respecto al plano horizontal, para disminuir la posibilidad de que el carbón se atasque.

X.4.- ALMACENAMIENTO

ALMACENAMIENTO EN PILA.- El lugar debe tener una adecuada accesibilidad para las entregas de carbón en gabarra, ferrocarril o camión; debe incluir una evaluación de la ubicación, la supervisión medioambiental y datos climáticos y meteorológicos, teniendo en cuenta:

- *El análisis de las características del suelo utilizado*
- *La estructura de las rocas subyacentes*
- *El esquema del drenaje local que se proyecte y la posibilidad de inundación de la parcela*

El carbón bituminoso, el subbituminoso y el lignito se apilan en capas múltiples horizontales.

Para reducir la posibilidad de una combustión espontánea, las pilas de carbón se compactan con el fin de minimizar las diversas canalizaciones que la masa de la pila ofrece al aire, que se comportan como chimeneas, y que pueden provocar un mayor flujo de aire a través de la pila cuando el carbón se calienta al entrar en combustión espontánea.

En un *carbón bituminoso* el apilado consiste en la colocación de una capa inicial de $\begin{cases} 1 \div 2\ ft \\ 0{,}3 \div 0{,}6\ m \end{cases}$ de espesor, que se compacta para eliminar espacios de aire en la pila.

Para el *carbón subbituminoso* y el *lignito* se requiere una capa inicial más delgada, que permita asegurar una buena compactación. Para un almacenamiento a largo plazo, la parte superior de la pila debe estar ligeramente abombada, para que pueda escurrir por ella el agua de lluvia. La superficie lateral de la pila y la parte superior se deben cubrir con una capa compactada de 1 ft (0,3 m) de espesor, compuesta fundamentalmente por finos que, a su vez, se debe recubrir con otra capa de 1 ft de espesor, formada por tamaños gruesos de carbón.

No resulta práctico sellar las pilas de *carbón subbituminoso* y de lignito, con carbón de tamaño grueso, ya que éste se puede disgregar y romper en tamaños más pequeños, en cortos períodos de tiempo. En plantas industriales pequeñas, para las que no se justifica la maquinaria pesada que requiere la compactación, el sellado de la superficie exterior de la pila se consigue mediante el rociado con una ligera capa de gasóleo.

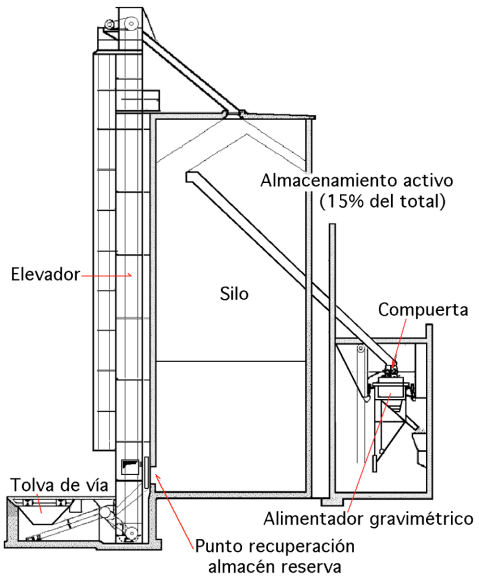


Fig X.13
Sistema de silo para almacenaje activo y de reserva

ALMACENAMIENTO EN SILO.- Para una capacidad dada, el almacenamiento en silo requiere un menor volumen construido en comparación con el correspondiente al almacenamiento en tolva de igual capacidad. La Fig X.13 presenta un diseño de silo en el que un componente interno (raqueta) facilita la máxima utilización del espacio disponible para el almacenaje. Cuando el carbón de la parte superior de la raqueta se ha utilizado, se recupera el carbón inferior de la misma que constituye el almacenamiento de reserva ubicado en la parte baja del silo.

ALMACENAMIENTO EN TOLVA.- Las tolvas facilitan un almacenaje a corto plazo, aguas arriaba de los

pulverizadores o de otros equipamientos propios para la alimentación del carbón hacia la zona de combustión. La complejidad del diseño de la tolva y de los canalones de transferencia aumenta con el tamaño de las calderas y con el régimen de consumo de carbón.

Cuando las tolvas y los tubos de transferencia se seleccionan y dimensionan adecuadamente, el factor dominante en la efectividad del sistema de suministro viene condicionado por el estado en que se encuentre el carbón. Un flujo de carbón fino es difícil de mantener cuando su humedad superficial es del $5 \div 10\%$. Las pequeñas canalizaciones que se pueden formar en las tolvas provocan un flujo intermitente e incluso una interrupción total del flujo de carbón.

La tolva de carbón forma parte de la estructura del edificio del generador de vapor; su capacidad debe ser suficiente para proveer unas 30 horas de suministro de carbón a plena carga.

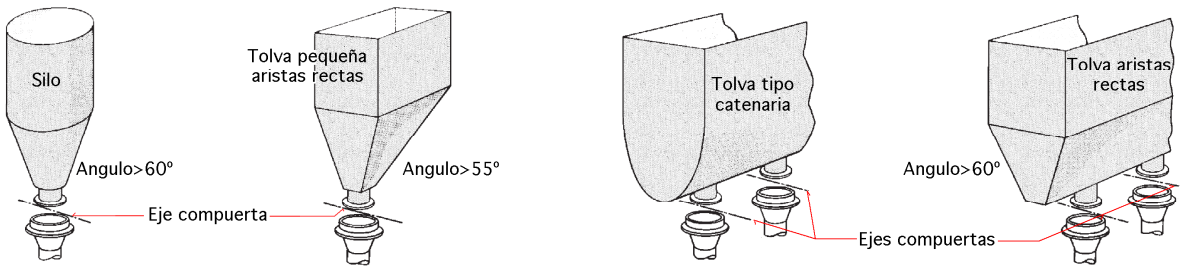


Fig X.14.- Perfiles usados en el diseño de tolvas de carbón

Las tolvas de carbón se construyen con baldosas, hormigón armado, chapas de acero al carbono, chapas revestidas de acero inoxidable, chapas recubiertas de hormigón resistente a ácidos, chapas revestidas de caucho, etc. En ellas hay que evitar bolsas en las que se restringe el flujo de carbón y que pueden contribuir a la ignición espontánea; en la Fig XIII.14 se muestran algunas formas de tolvas de carbón. que se colocan en los niveles superiores de la planta, para facilitar un flujo por gravedad hacia los alimentadores del pulverizador o hacia el hogar, que están situados a nivel más bajo.

Las tolvas de almacenamiento deben estar lo más lejos posible de
- *La salida de humos del hogar*
- *Los conductos de aire caliente*
- *Las tuberías de vapor*
- *Otras fuentes externas de calor*

que podrían contribuir a la ignición y combustión espontánea del carbón.

En algunos casos se necesita aislar la tolva y dotarla de una ventilación adecuada, que reduzca la posible transferencia de calor desde las tuberías de vapor o desde los conductos de aire o humos. Las tolvas se diseñan para conseguir un vaciado completo del carbón en el caso de una prolongada indisponibilidad de la unidad.

DISEÑO DE LOS CONDUCTOS DE TRANSFERENCIA.- Son de sección circular, longitud corta y disposición tan vertical como sea posible. Hay que evitar cualquier reducción de su sec-

ción transversal y los cambios bruscos de dirección. Si un flujo se bifurca en dos, sus direcciones deben formar un ángulo de divergencia lo menor posible. En aquellos casos en los que resulte imposible evitar un ángulo importante en un cambio de dirección, se utiliza un ensanchamiento brusco de la sección transversal del conducto con el fin de aliviar la presión lateral y la fricción en la canalización de transferencia.

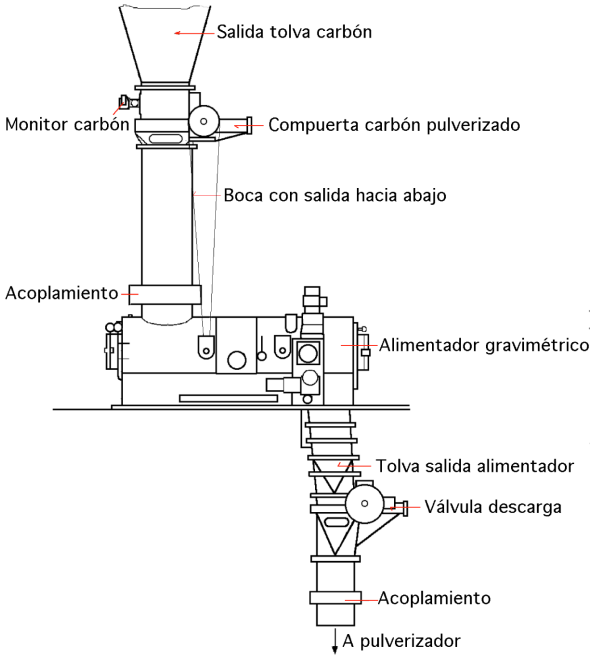


Fig X.15.- Descarga de tolva a pulverizador, mostrando su sistema de alimentación

En el caso de alimentar pulverizadores presurizados, hay que tener cuidado en el diseño de estos conductos de transferencia, dado que el carbón que se encuentra dentro del conducto sirve también como sellador, con vistas a evitar la pérdida del aire de presurización, desde el pulverizador hacia la tolva, por lo que se necesita una altura mínima (altura de sellado) dentro del tubo de transferencia, para sellar debidamente el sistema *conducto de transferencia+alimentador*; en este caso no se pueden utilizar disipadores.

En la Fig X.15 se muestra una tolva integrada en el sistema de un pulverizador, en la que se pueden observar los conductos de transferencia verticales de sección constante conectados con el alimentador y con el pulverizador. Este sistema se completa con los acoplamientos y válvulas adecuados.

X.5.- ALIMENTADORES

Los alimentadores se utilizan para controlar el flujo de carbón desde la tolva de almacenaje, y su selección se basa en el análisis de las propiedades del material como:

- *Tamaño máximo de partículas*
- *Distribución de tamaños*
- *Densidad*
- *Contenido en humedad y abrasividad*
- *Régimen y grado de control requerido por el flujo*

Los alimentadores de las modernas plantas que consumen carbón se clasifican en:

Alimentadores volumétricos, diseñados para facilitar un régimen controlado de volumen de carbón hacia el pulverizador; pueden ser alimentadores de paletas, de mesa, de alvéolos, de banda articulada y de cinta. Los alimentadores de cinta, anchura fija, son los más precisos, cuentan con una barra enrasadora para mantener el flujo de carbón con una altura constante, mientras que la

velocidad de la cinta determina la cantidad de carbón a través de la abertura disponible; este alimentador no compensa las posibles variaciones en la densidad del carbón, lo que produce variaciones en el aporte de energía hacia los quemadores, a través del pulverizador.

Alimentadores gravimétricos, que compensan las alteraciones de densidad debidas:

- *Al contenido en humedad*
- *Al tamaño de las partículas*
- *A otros factores inherentes al carbón basto*

Los alimentadores facilitan un régimen de flujo de carbón hacia el pulverizador más preciso y, por lo tanto, un aporte de energía más exacto hacia los quemadores y caldera, lo que es importante cuando se necesita un control exacto de la relación $\frac{combustible}{aire}$ con el fin de:

- *Minimizar la formación de* NO_x
- *Controlar el nivel de escorificación en el hogar*
- *Maximizar la eficiencia térmica de la caldera, reduciendo los excesos de aire*

En los alimentadores gravimétricos, el carbón se transporta por una cinta transportadora, de forma que una célula piezoeléctrica monitoriza el peso del carbón mediante el ajuste de la:

- *Altura de la barra enrasadora que controla el área de la sección recta correspondiente al flujo de carbón*
- *Velocidad de la cinta, si la sección recta correspondiente al flujo de carbón se mantiene constante*

X.6.- MEZCLA DE CARBONES

Cuando el generador de vapor se aprovisiona con carbones procedentes de varias fuentes, se requiere una mezcla efectiva de los mismos que facilite una alimentación uniforme a la caldera.

La utilización de carbones múltiples puede estar justificada por:

- *Motivos económicos*
- *El contenido de S en el carbón de referencia*
- *E efecto de los distintos carbones en la operación de la caldera*

El objetivo de la mezcla es facilitar un suministro de carbón con propiedades uniformes, que definan $\begin{cases} \text{- El contenido de S} \\ \text{- El poder calorífico} \\ \text{- El contenido de humedad} \\ \text{- La grindabilidad (triturabilidad)} \\ \text{- Cualquier otro parámetro característico del combustible} \end{cases}$

La mezcla de carbones puede tener lugar en $\begin{cases} \text{una ubicación remota} \\ \text{la propia planta generadora de vapor} \end{cases}$.

La mezcla realizada lejos de la planta consumidora elimina la necesidad de un almacenamien-

to independiente y de otras instalaciones que se precisan para la mezcla de los carbones.

La mezcla de carbones efectuada en la propia planta generadora de vapor se puede realizar por medio de tecnologías, como:

- La instalación de pilas de almacenaje separadas para cada fuente de carbón y el empleo de cucharas de carga frontal, para tomar las adecuadas cantidades de cada pila y dirigirlas hacia otra pila o tolva para su mezcla, antes de que ésta se dirija al triturador o pulverizador

- El carbón de cada fuente se puede almacenar en silos independientes, con un alimentador bajo cada silo, para dosificar las cantidades requeridas sobre una cinta común de transferencia

La mezcla de carbones en la planta generadora de vapor proporciona más flexibilidad para la obtención de un carbón mezcla y ajustar las variaciones que se puedan presentar en los carbones, las cuales influyen en el funcionamiento de pulverizadores, quemadores, sopladores de hollín y equipo de depuración de humos. Si no se produce una mezcla uniforme, las características operativas del pulverizador se pueden deteriorar, de forma que:

- La caldera puede experimentar gran escorificación y ensuciamiento
- La captación de partículas en los precipitadores electrostáticos puede disminuir de modo notable

X.7.- MANIPULACIÓN DEL CARBÓN

Supresión de polvo.- Los agentes para la supresión de las emisiones de polvo en la manipulación del carbón y en el transporte, son el $\begin{cases} \textit{- agua} \\ \textit{- aceite} \\ \textit{- cloruro de calcio } CaCl_2 \end{cases}$

Sobre el flujo de carbón se puede rociar agua o aceite en forma de niebla. El aceite es el agente más utilizado y reduce las emisiones de polvo provocando su adherencia a las partículas mayores del carbón, formando conglomerados que tienen menos facilidad para flotar en el aire. El empleo de $CaCl_2$ es más limitado, debido a sus perjudiciales efectos sobre la operación de caldera.

Oxidación.- Los diversos componentes que constituyen el carbón se oxidan cuando se exponen al aire; esta oxidación se puede considerar como un proceso de combustión muy lento a baja temperatura, dado que los productos finales son los mismos que los de la combustión del carbón en un hogar; aunque existen evidencias de que la acción bacteriana puede provocar un calentamiento del carbón, el calentamiento de éste se debe a una reacción química. Para evitar la combustión espontánea, el calor procedente de la oxidación se minimiza retrasando la oxidación o evacuando el calor generado. Las partículas más finas del carbón tienen más superficie para un volumen dado y se oxidan más rápidamente, fenómeno que se incrementa $\begin{cases} \textit{con el contenido en humedad del carbón, ó} \\ \textit{cuando está recién triturado o pulverizado} \end{cases}$

El régimen de absorción de oxígeno por el carbón a temperatura constante, decrece con el

tiempo. Una vez establecida una pila de almacenaje segura, la probabilidad de oxidación de la misma disminuye.

Carbón congelado.- Las dificultades asociadas a la manipulación de un carbón congelado se pueden evitar por $\begin{cases} \textit{- secado térmico o mecánico de los finos} \\ \textit{- rociado del carbón con una niebla de aceite de desecho o solución anticongelante} \end{cases}$

El empleo de $CaCl_2$ puede provocar una acelerada deposición de ceniza o una rápida corrosión de las superficies tubulares que forman los intercambiadores de la caldera, por lo que su utilización no es recomendable.

Incendios en pilas de carbón.- Una de las principales preocupaciones en el almacenamiento del carbón, es la combustión espontánea en algún punto de la pila, consecuencia de las propiedades de autocalentamiento que son características de algunos carbones. Un incendio en una pila se puede manejar de distintas formas, dependiendo de la extensión del fuego. La zona caliente se aisla del resto de la pila, lo que se consigue con un sellado de los lados y de la parte superior de la zona caliente, por medio de una capa estanca al aire de alquitrán o de asfalto. En un incendio de una pila de carbón, no se debe utilizar agua para el control de las llamas ya que el agua derramada en la pila humeante, que arde en rescoldo, produce chimeneas más pronunciadas y genera mayores flujos de aire a través de ellas.

Flujo en tolvas.- Los atascos de carbón fino provocan reducciones e interrupciones de flujo, y aparecen en las tolvas cuando la humedad superficial del carbón es del $5\% \div 10\%$ en peso.

Las medidas preventivas para minimizar los problemas del flujo en tolvas, se concretan en:

- Técnicas mejoradas de almacenaje a granel

- Una recuperación cuidadosa y adecuada del carbón

La alimentación de un carbón fino y húmedo desde la salida inferior de una tolva, tiende a formar chimeneas o canalizaciones de circulación preferente, que se prolongan hasta la superficie libre del carbón de la tolva; cuando esto ocurre, el flujo de carbón hacia los alimentadores que circula exclusivamente por estas chimeneas, se hace intermitente e incluso se puede interrumpir por completo. Las tolvas se pueden equipar con orificios en su extremo de salida, que permitan el empleo de lanzas o cañones de aire que restauren el flujo en toda la sección transversal de la tolva; si hay riesgo de incendio, estos cañones se cargan con gas inerte N_2 o CO_2 para evitar una explosión de polvo de carbón. Para revestir las tolvas y los tubos de transferencia se utiliza un poliuretano moldeable, a fin de aumentar la resistencia a la abrasión y reducir la resistencia al flujo.

Los $\begin{cases} \textit{- tolvines de tolvas} \\ \textit{- conos de silos} \end{cases}$ están revestidos con chapas de acero inoxidable laminadas en frío, con sus soldaduras rectificadas y pulidas hasta un grado equivalente al de la chapa laminada original.

La superficie pulida y resistente a la abrasión frena la formación de deposiciones susceptibles de facilitar posibles masas estacionarias de carbón que iniciarían los atascos en la tolva.

Incendios en tolvas.- Un incendio en una tolva de carbón constituye un peligro, tanto para el personal, como para el equipo, y siempre exige acción inmediata, parando la alimentación de carbón a la tolva afectada que se debe vaciar por completo; no se debe añadir carbón fresco hasta que la tolva se haya enfriado y no antes de que se haya determinado la causa del incendio. El fuego se puede ahogar empleando vapor o CO_2 que se asienta a través del carbón y desplaza al oxígeno del aire de la zona incendiada al ser más pesado que el aire.

El fuego se tiene que extinguir completamente antes de vaciar la tolva, lo que es prácticamente imposible debido a la $\begin{cases} \textit{- demanda de carga en la caldera} \\ \textit{- dificultad de eliminar el flujo de aire hacia el fuego del incendio} \end{cases}$

La temperatura del carbón se vigila con termopares instalados en la tolva.

Situación medioambiental.- El agua que se infiltra a través de la pila de almacenaje del carbón constituye una fuente de drenaje ácido que, eventualmente, puede contaminar los acuíferos locales. El agua de escorrentía de la pila se aísla dirigiendo ese drenaje a una balsa de retención, en la que se debe ajustar el valor del pH. El polvo suspendido en el aire que procede de las pilas de almacenaje del carbón, es una molestia pública, tiene efectos peligrosos en la vegetación de los alrededores y puede violar las normas sobre emisiones de polvo que se determinan por:

- Las características del carbón de la capa superficial (tamaño de partículas, humedad, etc.)

- El diseño de la pila de almacenamiento (área expuesta, altura, etc.)

- Las condiciones climáticas locales (velocidad del viento, precipitaciones, etc.)

X.8.- MANIPULACIÓN DE COMBUSTIBLES SÓLIDOS ALTERNATIVOS

Preocupaciones económicas y medioambientales han llevado a incrementar la generación de vapor a partir de combustibles sólidos obtenidos de subproductos y desperdicios $\begin{cases} \textit{residenciales} \\ \textit{comerciales} \\ \textit{industriales} \end{cases}$, como basuras sólidas municipales, maderas y biomasa.

Las propiedades de estos combustibles requieren unas condiciones específicas de $\begin{cases} \textit{almacenaje} \\ \textit{manipulación} \\ \textit{separación} \end{cases}$, que son diferentes de las que se aplican a los carbones.

Residuos sólidos municipales.- Se pueden quemar en un proceso de incineración en masa como combustible derivado de residuos; tal como se reciben en la unidad de incineración, se entregan en el área de descarga y almacenan en un foso de hormigón, que puede estar cerrado y sometido a una ligera depresión, para controlar los olores y emisiones de polvo; el foso está equipado con un

sistema de rociado de agua, para apagar posibles incendios que pueden aparecer por el calor generado en la descomposición de los residuos. La capacidad del almacenamiento es de 3 a 5 días, con el fin de acomodarse a períodos en los que hay menos residuos disponibles. No es recomendable, en ningún caso, el almacenamiento de los residuos sólidos municipales a largo plazo. Se pueden someter a un proceso con el fin de producir un combustible residual que cuente con más poder calorífico y menos ceniza.

Desechos de madera.- Comprenden la corteza, el serrín, las recuperaciones de subproductos de aserraderos y los rechazos madereros; se transportan en camión, hacia el generador de vapor ubicado en las proximidades de estos productos. El material se descarga directamente en la pila de almacenamiento; el equipo de descarga y de manipulación se diseña para un funcionamiento en condiciones extremadamente pulverulentas, sin olvidar que se trata de un material muy abrasivo. Los productos de madera se pueden almacenar en grandes pilas a la intemperie (por un período inferior a 6 meses), o en depósitos o silos (durante 3 a 5 días). Para manipular este combustible de madera en la planta se utilizan transportadores mecánicos de cinta, siendo también efectivos los sistemas neumáticos cuando se trata de un combustible limpio y finamente molido, como el serrín. En las modernas plantas que queman madera, se pueden consumir materiales con un contenido en humedad del 65%, tal como se recibe, aunque en algunos casos se puede necesitar una operación de presecado para la que se usan prensas mecánicas y secadores por gases calientes.

REFERENCIAS CAP X.- PREPARACIÓN Y MANIPULACIÓN DE COMBUSTIBLES SÓLIDOS

Pfleider E.P.- SURFACE MINING.- The American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, New York, (1968)

Yu A.T.- TRANSFER AND STORAGE.- Mining Engineering Handbook, Vol. 2, Section 18.6, Society of Mining Engineers, New York, (1979)

Given I.A.- MINING ENGINEERING HANDBOOK.- The American Institute of Mining, Metallurgical and Petro-leum Engineers, New York, (1979)

Scott R.H.- COMPETITIVE COAL TRANSPORTATION.- Coal Marketing Days Conference, Pittsburgh, (1983)

Edgar T.F.- COAL PROCESSING AND POLLUTION

Besset R.D.- COAL TRANSPORTATION.- Handbook of Energy System Engineering, Wiley, New York, (1985)

Mahr D.- COAL TRANSPORTATION AND HANDLING.- Power Engineering, pp. 38-43, November, (1985)

Schwieger R.G.- COAL HANDLING.- Standard Handbook of Powerplant Engineering, McGraw-Hill, New York, (1989)

Smitham J.B., Nicol S.K.- PHYSICO-CHEMICAL PRINCIPLES CONTROLLING THE EMISSION OF DUST FROM COAL STOCKPILES.- Powder Technology, Vol. 64, pp. 259-270, February, (1991)

B&W.- STEAM: ITS GENERATION AND USE.- 40th Edition, Chapter 11, The Babcock & Wilcox Company, Barberton, Ohio, USA, (1992)

Freme F.- U.S. COAL SUPPLY AND DEMAND: 2003 REVIEW.- United States Energy Information Agency, Department of Energy, Washington, D.C., 2004.

Bonskowski, R.- THE U.S. COAL INDUSTRY IN THE 1990S: LOW PRICES AND RECORD PRODUCTION.- United States Department of Energy, Washington, D.C., September, 1999.

Wilbur, L.C.- HANDBOOK OF ENERGY SYSTEMS ENGINEERING: PRODUCTION AND UTILIZATION.- John Wiley & Sons, New York, New York, October, 1985.