XXXIII.- ELIMINACIÓN DE PARTÍCULAS

pfernandezdiez.es

Cenizas	*1259*
Regulación de las emisiones de partículas y equipamiento para su control	*1262*
Características del combustible y ceniza	*1263*
Precipitadores electrostáticos secos (ESP)	*1263*
Carga, recolección, descarga, golpeado y retirada de la ceniza	*1264*
Dimensiones del precipitador	*1264*
Distribución del flujo	*1265*
Componentes del precipitador	*1266*
Electrodos de descarga	*1266*
Superficie colectora	*1269*
Sistema de golpeo	*1270*
Sistema de impulsos magnéticos	*1271*
Martillos inclinados para electrodos de descarga de bastidor rígido	*1271*
Vibrador eléctrico	*1271*
Cerramiento	*1272*
Tolvas	*1272*
Transportadores de tornillo, arrastre y neumáticos	*1273*
Control de la energía	*1274*
Aplicaciones y características funcionales	*1274*
Energéticas, industriales, pulpa y papel	*1274*
Mejora de las características funcionales	*1275*
Precipitadores electrostáticos húmedos	*1277*
Cámaras de filtros de sacos	*1278*
Fundamentos operativos	*1278*
Tipos de filtros de sacos	*1279*
De aire inverso	*1280*
Sistema de filtro	*1281*
Tecnología del chorro de pulsos	*1281*
Materiales de los sacos y soportes	*1281*
Colectores mecánicos	*1282*
Depuradores húmedos	*1283*
Depurador húmedo de aletas	*1284*
Depurador dinámico	*1285*
Depurador Venturi	*1285*
Depurador multi-Venturi	*1286*
Depurador torre de absorción	*1286*
Otros dispositivos	*1288*
Filtro de lecho móvil granular	*1288*
Filtro depurador electrostático Electroscrubber	*1288*
Filtros de tubos cerámicos	*1290*
Selección del equipo	*1290*
Referencias	*1292*

XXXIII.1.- CENIZAS

Todos los combustibles fósiles contienen alguna cantidad de ceniza o materia no combustible, con la excepción del gas natural, que constituyen la mayoría de partículas en suspensión transportadas por los humos, junto con el C no quemado.

En la mayoría de los sistemas generadores de vapor que utilizan combustibles no fósiles, también se producen partículas, por lo que se hace necesario un control para recogerlas y limitar su libre vertido a la atmósfera.

Todos los carbones contienen ceniza y su contenido depende de:

- El tipo de carbón; los carbones bituminosos del Este de EE.UU. contienen entre 5÷15% de ceniza en peso, mientras que los carbones subbituminosos del Oeste entre 5÷30%; los lignitos de Texas pueden contener un 30% de ceniza

- La ubicación geográfica

- La profundidad de la mina

- El método de laboreo que se utilice en la extracción y explotación de capas delgadas de carbón

Cuando el carbón se quema en calderas convencionales:

- Una parte de la ceniza cae y sale por la parte inferior del hogar (escoria)

- La parte restante de la ceniza abandona el hogar con los gases de combustión (ceniza volante en polvo), que es la que hay que recoger antes de que salga con los humos, a la atmósfera

Los distintos métodos de combustión influyen en la cantidad de ceniza que pasa a los humos, como partículas. El porcentaje de los principales componentes de la ceniza varía con el tipo de carbón y la ubicación del yacimiento minero.

- En una combustión de carbón pulverizado en lecho suspendido, la ceniza que sale de la caldera transportada por los humos es del 70÷80% del total

- Una unidad de hogar mecánico puede emitir polvo en los gases de combustión equivalente a un 40% de la ceniza total, junto con alguna cantidad de $C_{inquemado}$

- En los hogares ciclón los humos transportan sólo un 15÷30% de la ceniza total

- En las calderas de lecho fluidificado circulante, toda la ceniza junto con el material del lecho fluidificado, se arrastra por los humos

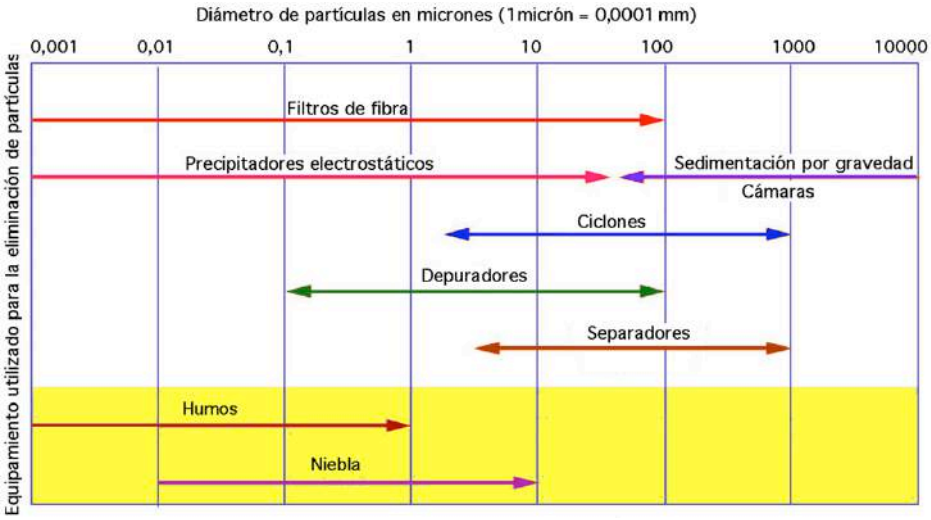

Fig XXXIII.1.- Equipamiento utilizado para la eliminación de partículas

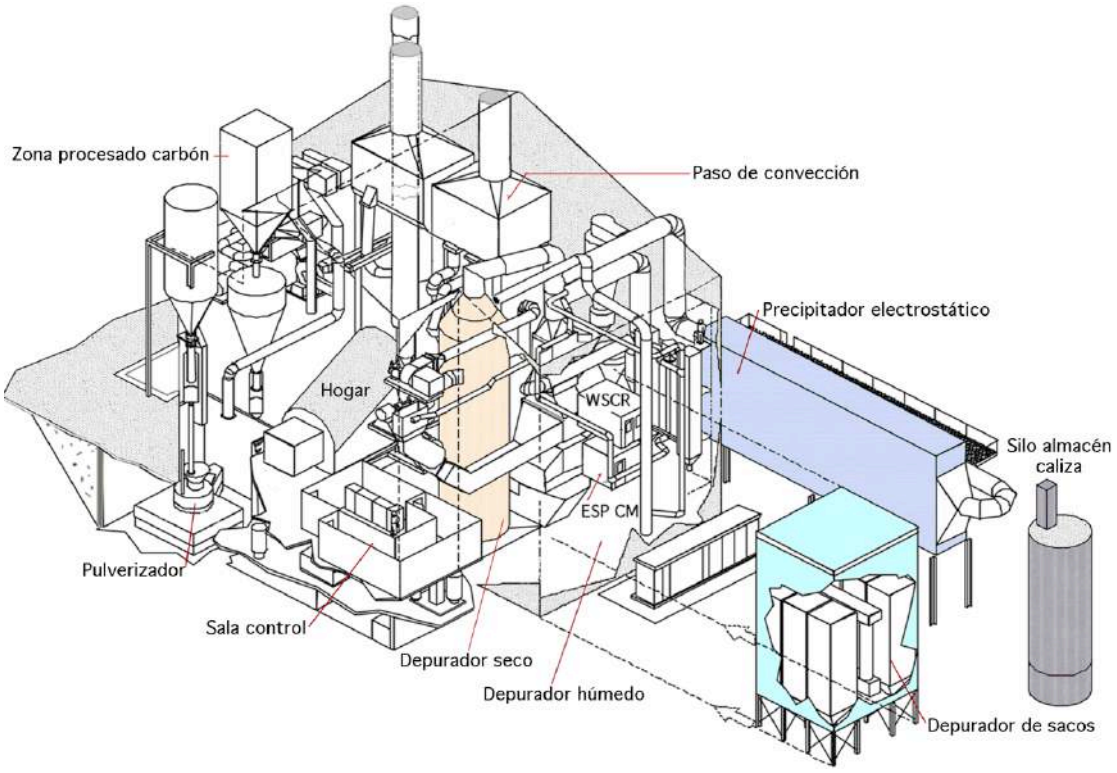

Fig XXXIII.2.- Instalación energética B&W de 100 MW_t/h, con equipos de control de partículas

Los constituyentes de la ceniza se suelen presentar en forma de óxidos como:

- *Dióxidos de Si, Ti y Al*
- *Óxidos de Fe, Ca, Mg, Na, K*
- *Trióxido de azufre y pentóxido difósforo*
- *Trazas de otros elementos químicos*

Otras propiedades significativas de la ceniza del carbón, que dependen del tipo de sistema de combustión, son:

- *El tamaño*
  - *las unidades de hogares mecánicos producen partículas de tamaño > 12 micras*
  - *las calderas que queman carbón pulverizado generan partículas esféricas 7÷12 micras*
  - *los hogares ciclón que queman carbón producen partículas esféricas aún más pequeñas*

- *La distribución*

- *El perfil de las partículas que la configuran; las unidades de combustión en lecho fluidificado producen un amplio tipo de partículas, menos esféricas, con una configuración que recuerda a los cristales*

El conocimiento de las propiedades de la ceniza es importante para la selección del equipo de control de partículas, ligado al tipo de sistema de combustión.

XXXIII.2.- REGULACIÓN DE LAS EMISIONES DE PARTÍCULAS Y EQUIPAMIENTO PARA SU CONTROL

En 1971, la Agencia de Protección Medioambiental (EPA), regulaba la cantidad de las emisiones y la opacidad *(porción de luz absorbida por las partículas cuando el haz luminoso de una fuente atraviesa la corriente del flujo de humos)* de la chimenea, limitando la:

- *Salida de emisiones de partículas a 0,1 lb / 10^6 Btu = (123 mg / m^3N), con 6% de O_2*

- *Opacidad de la chimenea a un 20%, para las unidades que superaran un aporte global de calor de $2{,}5.10^8$ Btu / h = 73,3 MW_t*

En 1979, las normas de nuevas fuentes (NSPS) de la EPA, sobre control de partículas, permitían un máximo de 0,03 lb/10^6 Btu = (36,9 mg/m^3N) con 6% de O_2; la opacidad permisible en chimenea se mantiene en el 20%.

Existen tres niveles para la clasificación de las unidades generadoras de vapor, por aporte de calor:
- *Nivel 1, para unidades superiores a $2{,}5.10^8$ Btu / h = 73,3 MW_t*
- *Nivel 2, para unidades comprendidas entre 108 y $2{,}5.10^8$ Btu / h = 29,3 y 73,3 MW_t*
- *Nivel 3, para unidades menores de 10^8 Btu / h = 29,3 MW_t*

Si una planta nueva se encuentra en una zona que no llega a la calidad de aire estandarizada, las emisiones de partículas y opacidad permisibles se verán notablemente reducidas.

Un equipo de control de partículas debe
- *retirar las partículas del flujo de humos*
- *impedir que se puedan reintegrar al flujo de humos*
- *descargar el material recogido*

Los equipos disponibles para el control de partículas son los:
- *precipitadores electrostáticos*
- *filtros de tela o cámaras de sacos*
- *colectores mecánicos*
- *depuradores Venturi*

Características del combustible y ceniza.- Los componentes de los combustibles y las cenizas que reducen la resistividad y favorecen la recolección de ceniza en el (ESP), comprenden: la humedad, el S, Na y K. En aplicaciones que cuenten con cantidad suficiente de estos componentes, los precipitadores son de tamaño moderado.

Los componentes que provocan problemas en $\begin{cases} \textit{- la recolección de polvo} \\ \textit{- el incremento en las emisiones de salida de humos} \end{cases}$ son el Ca y Mg. Altas concentraciones de estos elementos dan lugar a una ineficiente recolección de ceniza y a precipitadores mayores.

XXXIII.3.- PRECIPITADORES ELECTROSTÁTICOS SECOS (ESP)

Un precipitador electrostático carga eléctricamente las partículas de ceniza volante en polvo presentes en los humos, para su recolección y posterior evacuación. La unidad se compone de una serie de placas verticales entre las que circulan los humos; entre cada dos placas consecutivas, se encuentran los electrodos que facilitan el campo eléctrico debidamente centrados.

Las operaciones que se realizan son:

Carga.- Cuando los humos atraviesan el campo eléctrico, las partículas se cargan negativamente; el campo eléctrico se establece entre:

- Las placas colectoras conectadas a tierra y que constituyen el electrodo positivo

- Los electrodos de descarga inmersos en el flujo de humos, conectados a una fuente eléctrica de alta tensión, de 55 a 75 kV de corriente continua, con polaridad negativa

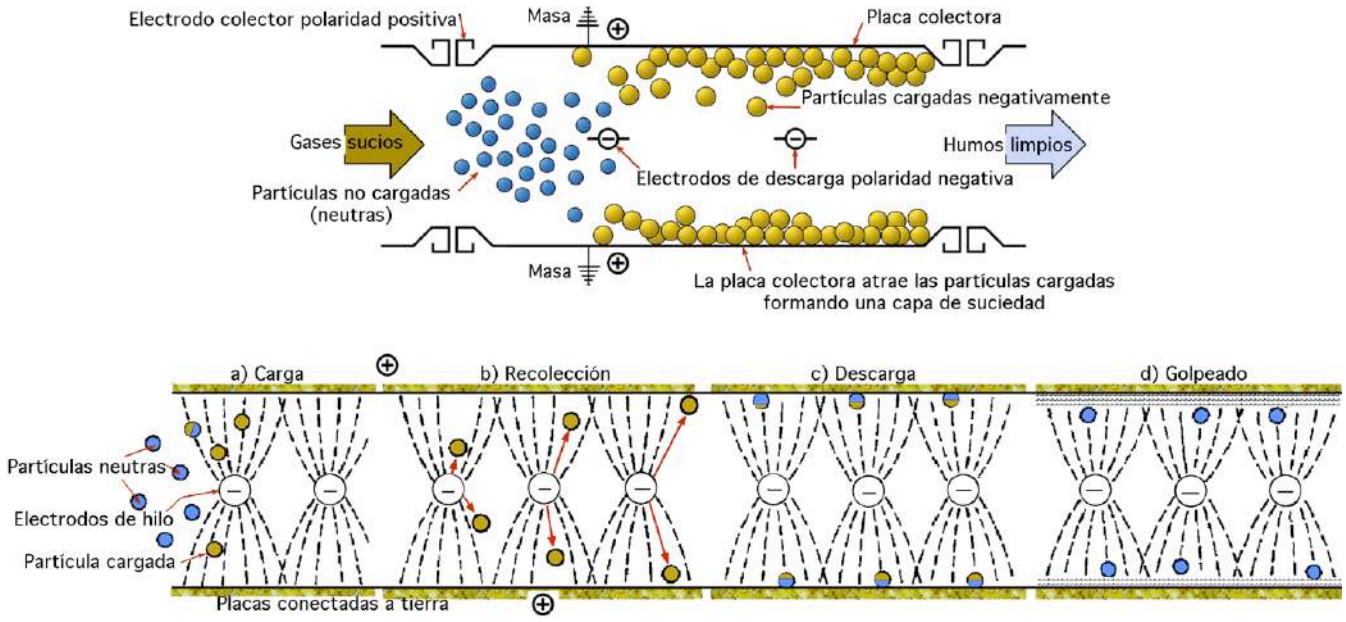

Fig XXXIII.3.- Carga y captura de partículas en un (ESP)

Captura.- Las partículas cargadas negativamente son atraídas por las placas colectoras conectadas a tierra, con polaridad positiva, y emigran a través del flujo de humos. Algunas partículas tienen dificultades para adquirir la carga eléctrica, por lo que se requiere una fuente energética de alto voltaje. Otras se cargan con suma facilidad y se dirigen rápidamente hacia las placas colectoras, pero también pueden perder fácilmente su carga eléctrica por lo que es necesario volverías a recargar y recolectar.

Descarga.- La velocidad de circulación de los humos entre las placas es un factor muy importante en el proceso de recolección, ya que las velocidades bajas permiten un tiempo mayor para que las partículas cargadas se desplacen hacia las placas colectoras, y se reduzca la probabilidad de ser arrastradas por los humos.

Las partículas de ceniza forman una capa, conforme se acumulan sobre las placas colectoras, y permanecen en éstas debido $\begin{cases} - \textit{ al campo eléctrico} \\ - \textit{ a las fuerzas moleculares} \\ - \textit{ a las fuerzas mecánicas de cohesión entre partículas} \end{cases}$; estas fuerzas tienden a formar aglomerados entre las diversas partículas.

Golpeado.- La capa de polvo de ceniza volante que se forma sobre las placas colectoras se elimina periódicamente, mediante un golpeteo instantáneo de la superficie colectora que fuerza el desalojo del polvo acumulado. Como las partículas tienden a aglomerarse, la capa de ceniza se desprende en escamas, forma que es muy importante para evitar un nuevo arrastre de partículas individuales por el flujo de humos. Mientras que la mayoría de las partículas se dirigen hacia la superficie de las placas colectoras, otras que resultan cargadas positivamente se adhieren a los electrodos de descarga, por lo que para su limpieza se utiliza otro sistema de golpeteo independiente.

Retirada de la ceniza.- Las partículas desalojadas de las superficies colectoras caen desde las placas al interior de unas tolvas.

DIMENSIONES DEL PRECIPITADOR.- Un precipitador electrostático (ESP) se dimensiona calculando la superficie colectora necesaria para cumplir con unas determinadas características funcionales y una eficiencia colectora de partículas. Una ecuación que correlaciona la eficiencia colectora con el tamaño de la unidad, la carga de partículas y la superficie de placas, es la de Deutsch-Anderson, de la forma:

$$E = \frac{\textit{Total polvo entrada - Total polvo salida}}{\textit{Total polvo entrada}} \; x \; 100 = 1 - exp\left(\frac{w\,A}{V}\right) \quad \Rightarrow \quad A = \frac{V}{w}\, ln\left(\frac{1}{1-E}\right)$$

$$\textit{siendo:} \begin{cases} E \textit{ la eficiencia de separación del (ESP), \%} \\ w \textit{ la velocidad de migración, ft/min (m/s)} \\ A \textit{ al área de la superficie colectora, } ft^2 \;\; (m^2) \\ V \textit{ el flujo de humos, } ft^3/min \; (m^3/s) \end{cases}$$

La velocidad de migración *w* depende de la facilidad conque la partícula se carga, y es la velocidad media teórica con la que las partículas cargadas eléctricamente se desplazan hacia la superficie colectora; los factores que afectan a la velocidad de migración y que influyen en la posibilidad de que las partículas acepten una carga eléctrica, son: $\begin{cases} \textit{- las características del combustible y de la ceniza} \\ \textit{- las condiciones operativas} \\ \textit{- el efecto de la distribución del flujo de humos} \end{cases}$

Las cenizas de alta resistividad dan lugar a bajas velocidades de migración y a grandes superficies colectoras, mientras que las cenizas con resistividad media dan unas superficies moderadas.

Las *condiciones operativas* relativas a $\begin{cases} \textit{- la caldera o al proceso} \\ \textit{- la cantidad de partículas que se envían al precipitador} \\ \textit{- el tamaño de las partículas} \end{cases}$, afectan al diseño, dimensionado y características funcionales del precipitador.

Como la curva de resistividad pone de manifiesto, la temperatura de los humos tiene un efecto directo sobre $\begin{cases} \textit{- la resistividad} \\ \textit{- el volumen de humos que pasan a través del precipitador electrostático (ESP)} \end{cases}$

En la Fig XXXIII.5 se comparan las eficiencias de captura global y el tamaño de las partículas, en una correlación para precipitadores electrostáticos (ESP) y filtros de tela.

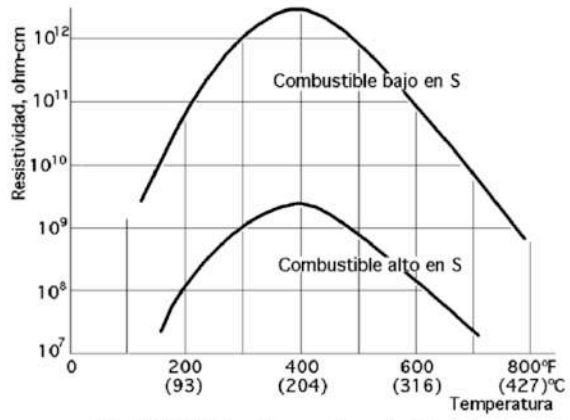

Fig XXXIII.4.- Curvas de resistividad para dos tipos de ceniza en polvo

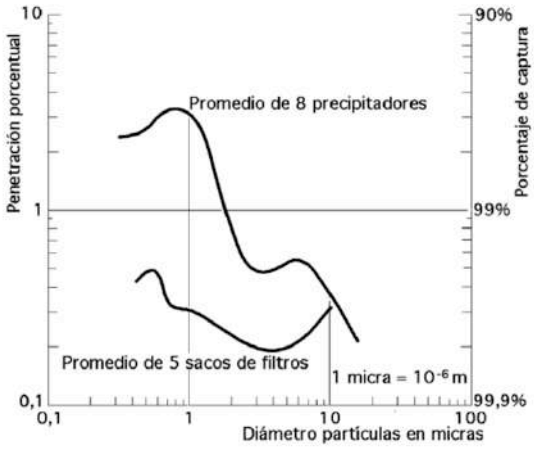

Fig XXXIII.5.- Captura de partículas

La curva que relaciona la distribución de tamaños de partículas con la eficiencia colectora, indica que un (ESP) es más eficiente para partículas mayores de 2 micras, que para partículas menores, por lo que las aplicaciones de precipitadores electrostáticos (ESP) que implican un alto porcentaje de partículas inferiores a 2 micras, requieren más superficie de precipitación y menor velocidad de humos.

Distribución del flujo.- La máxima eficiencia del (ESP) se alcanza cuando el flujo de gases se distribuye uniformemente a través de la sección transversal de la unidad. En los cálculos del ta-

maño del (ESP) se asume un flujo uniforme de humos, que se debe comprobar durante la etapa de diseño mediante la modelización del flujo, que debe incluir el precipitador y los conductos de entrada y salida. La uniformidad del flujo se alcanza mediante la instalación de dispositivos de distribución en las secciones de transición de los conductos de humos, inmediatamente aguas arriba y abajo del (ESP).

El diseño de las tolvas debe tener en cuenta las zonas de alta velocidad, para evitar que se produzca un arrastre de ceniza volante en polvo por el flujo de humos.

COMPONENTES DEL PRECIPITADOR.- Todos los precipitadores electrostáticos tienen diversos componentes comunes entre sí (electrodos de descarga, superficie colectora, sistemas de golpeo, cerramiento, tolvas, suministros y controles energéticos), Fig XXXIII.6, aunque existen diferencias en la configuración y tamaño entre las distintas unidades.

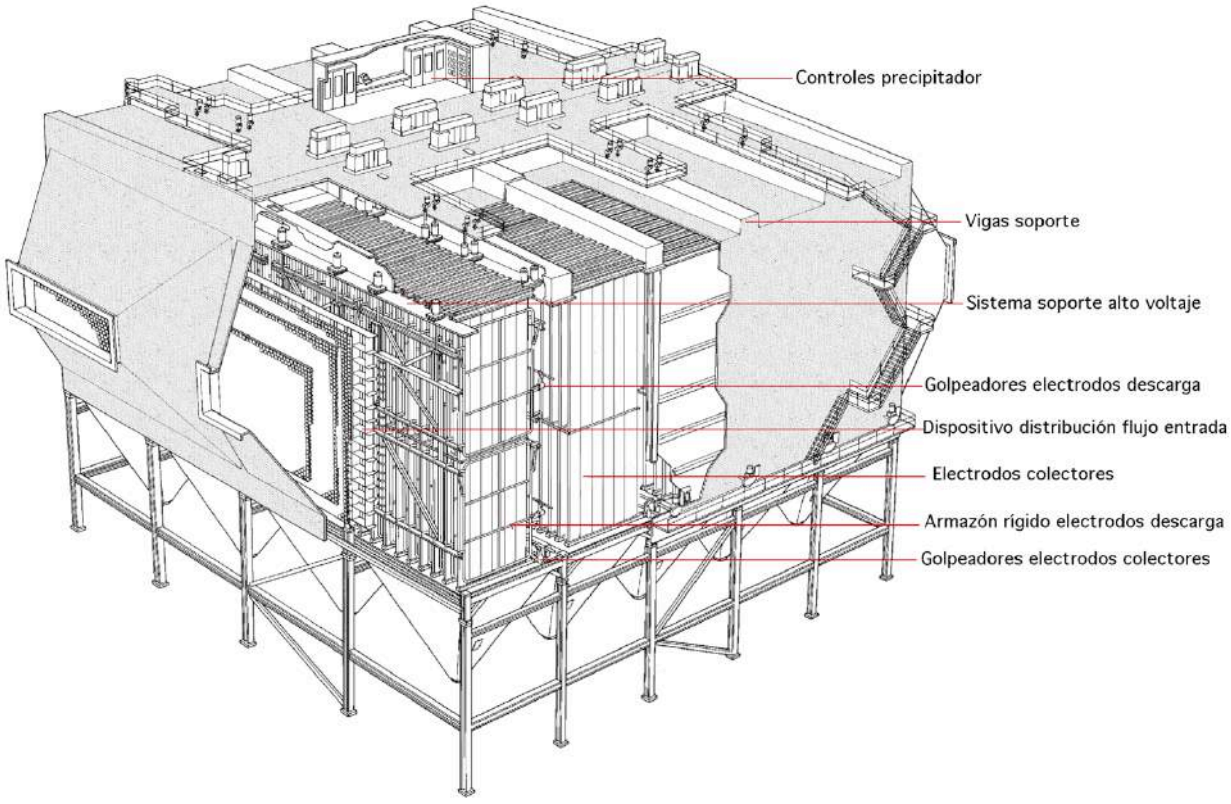

Fig XXXIII.6.- Precipitador electrostático seco de bastidor rígido B&W

a) Electrodos de descarga.- Los electrodos de descarga que se utilizaban en la mayoría de los diseños de precipitadores USA (antes de 1980) eran alambres delgados y redondos de diámetro del orden de 0,1" (0,25 cm) que, al ir lastrados se rompían, siendo ésto un problema, particularmente con longitudes de 30 ft (9,1 m) o más, lo que daba lugar a un deterioro de sus características funcionales.

Los electrodos de descarga cuelgan verticalmente, soportados por un bastidor de apoyo en la parte superior y manteniéndolos tensos mediante un peso (lastre) en la parte inferior. Los cables son de acero de alto contenido en carbono, pero también se han construido de acero inoxidable, chobre, aleación de titanio, aluminio, etc, y se mueven bajo la influencia de fuerzas aerodinámicas y eléctricas, estando sometidos a tensiones mecánicas. Los pesos colgados en la parte inferior de los alambres están unidos a bastidores guía para ayudar a mantener la alineación del alambre y para evitar que caigan en la tolva en el caso de que los cables se rompan; son de hierro fundido y pesan 25 lb (11,4 kg) o más.

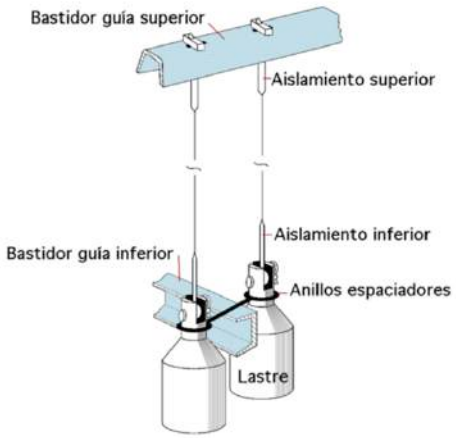

Fig XXXIII.7.- Bastidores guía con los electrodos lastrados

Fabricantes europeos de precipitadores y la mayoría de los sistemas modernos (desde 1980) realizadas por los fabricantes USA utilizan bastidores rígidos de soporte para los electrodos de descarga, que pueden ser alambres trenzados, alambres de sección transversal circular, triangular o cuadrada, alambres de púas, tiras dentadas, puntas de aguja, y otras configuraciones montadas sobre un soporte de apoyo. El propósito de la estructura rígida es eliminar el posible balanceo de los cables de descarga. Un electrodo de descarga de bastidor rígido típico se muestra en la Fig XXXIII.9a; otro tipo de electrodo de descarga puede ser un electrodo rígido, Fig XXXIII.9b, que se construye de una sola pieza de metal prefabricado; ambos diseños se conocen como electrodos de descarga de bastidor rígido.

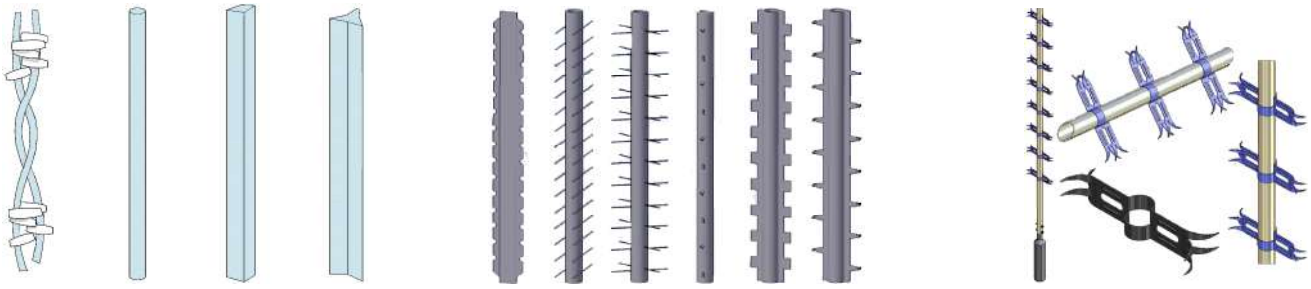
Típicos *Modernos* *Identificado como G-Spiker*

Fig XXXIII.8.- Formas del perfil de los electrodos de descarga

El bastidor rígido, Fig XXXIII.9, consiste en tiras de electrodo soportadas entre secciones de un bastidor tubular unido por ambos lados a una estructura portante, entrada y salida. El conjunto se soporta en aisladores eléctricos, que configuran un sistema de suspensión en cuatro puntos.

El electrodo rígido tiene un perfil especial y consta de una barra metálica suspendida por su extremo superior, que cuelga a lo largo de la altura del precipitador. La suspensión superior de este electrodo es un bastidor soportado por medio de aisladores; el extremo inferior dispone de un bastidor guía y de anillos espaciadores transversales.

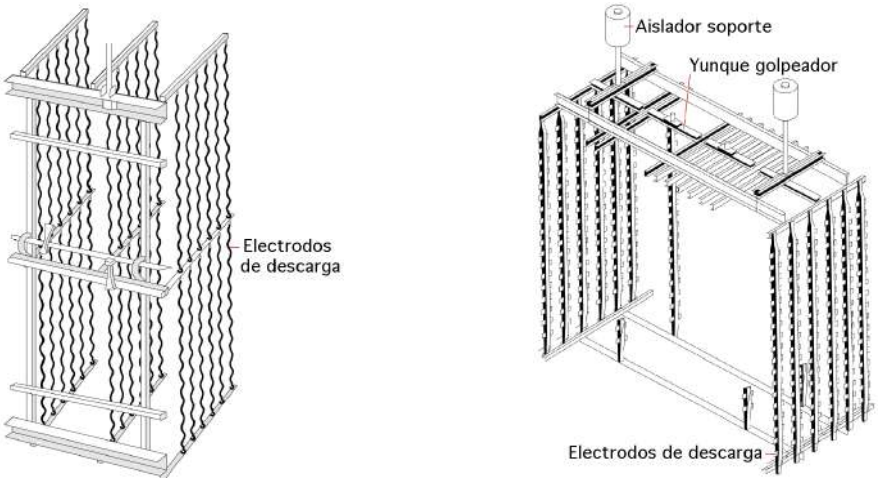

Fig XXXII 9.- Electrodos de descarga de bastidor rígido

El hilo lastrado es un electrodo de descarga redondo, soportado por su parte superior y que se mantiene estirado y tenso con un lastre colocado en el extremo inferior. La armadura superior está soportada por aisladores y, mediante un bastidor afianzador inferior, se guían y espacian los electrodos. La configuración del equipo del precipitador electrostático más fiable y común es la de bastidor rígido y la de electrodo rígido. Una desventaja importante del diseño de bastidor rígido es que un cable roto no puede ser sustituido sin necesidad de retirar todo el bastidor.

Un fabricante americano (United McGill) utiliza placas planas en lugar de cables para los electrodos de descarga, debido a que estas unidades pueden tratar grandes volúmenes de gases y están diseñadas para lograr una alta eficiencia de recolección; las placas planas que se muestran en la Fig XXXIII.10, $\begin{cases} \text{- } \textit{aumentan el campo eléctrico promedio utilizado para la recogida de partículas} \\ \text{- } \textit{proporcionan una mayor superficie de descarga y recogida de partículas} \end{cases}$

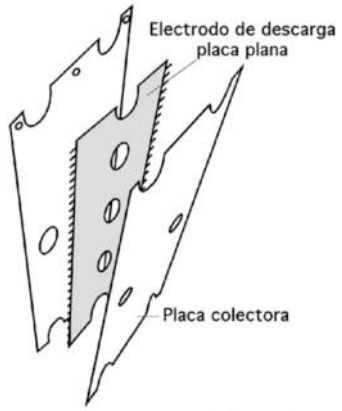

Fig XXXII 10.- Electrodo de descarga en forma de placa plana

La corona se genera en las puntas de unas agujas afiladas unidas a las placas. Estas unidades utilizan polaridad positiva para la carga de las partículas, funcionando normalmente con gases de combustión a baja velocidad para evitar el arrastre de partículas durante el ciclo de golpeo

Las placas se hacen generalmente de acero al carbono, de espesor 0,02÷0,8", (0,05÷2 cm)

El espaciado normal para los ESP de alta eficiencia (con cables) es de 8÷9" (20÷23 cm).

Para sistemas ESP con bastidor rígido o electrodos de descarga de placas, éstas están separadas entre 12÷15" (30÷38 cm), y tienen unas dimensiones del orden de 20÷40 ft (6÷12 m) de alto.

Los *electrodos de descarga* van conectados a una fuente de alta tensión, Fig XXXIII.11, se ubi-

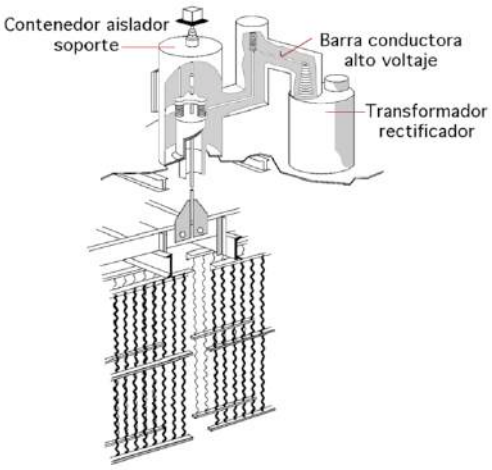

Fig XXXII 11.- Sistema de alto voltaje

can en el flujo de humos y sirven como elemento primario de descarga. Estos electrodos son los componentes principales del sistema de descarga, que están aislados eléctricamente de todas las partes del (ESP) puestas a tierra. Entre los electrodos de descarga y los componentes puestos a tierra a lo largo de todo el ESP, debe haber una separación de 6÷8" (152÷203 mm), dependiendo del espaciado entre placas colectoras. El transformador-rectificador va conectado a los electrodos de descarga por una línea de alta tensión, encerrada en un conducto, para protegerla del ambiente y para evitar que la línea se convierta en un peligro potencial para los trabajadores; los aisladores son de plástico no conductor o cerámicos.

b) Superficie colectora.- El área de la superficie colectora de la ecuación de Deutsch-Anderson es el área total de placas necesaria para una determinada recuperación de partículas.

La superficie colectora Fig XXXIII.12 está constituida por planchas colectoras compactas, ensambladas y reforzadas estructuralmente para aumentar la resistencia de la placa, configurando compartimentos y colgadas por su parte superior; en algunos casos, los refuerzos actúan como deflectores para ayudar a reducir las pérdidas de rearrastre de partículas. Los deflectores pueden proporcionar también una zona tranquila para que el polvo desprendido caiga minimizando el levantamiento de polvo.

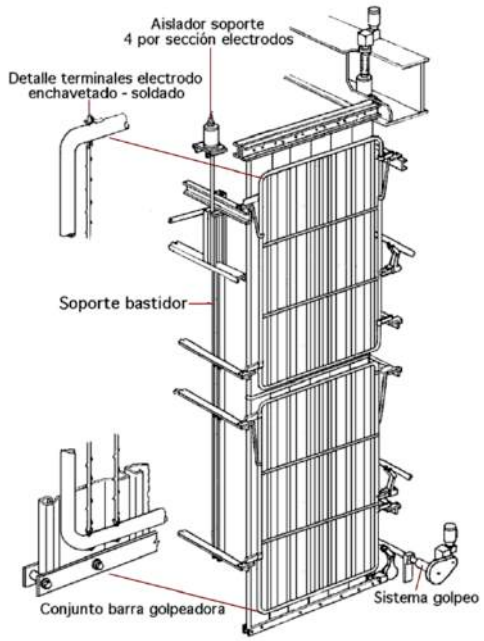

Fig XXXII 12.- Superficie colectora constituida por series de placas colectoras ensambladas

Este diseño minimiza el exceso de energía de golpeo requerida para desalojar el polvo de las placas de recogida, ya que la energía se distribuye uniformemente a través de la placa.

Los compartimentos de dimensiones 12"÷16"(305÷406 mm) cada uno, están divididos en filas longitudinales para el paso de humos a todo lo ancho del precipitador, y dispuestos eléctricamente en varios campos paralelos al flujo de humos.

Para calcular la superficie colectora, el conjunto de compartimentos se considera de forma que cada fila esté limitada por planos, cuyas caras se consideran como superficies activas. Las placas, conformadas por laminación, pueden tener hasta 50 ft (15,2 m) de longitud, con un espesor de 0,5"(12,7 mm).

Para alcanzar unas características funcionales óptimas, con un campo eléctrico uniforme y sin

formación de arcos eléctricos, la realineación entre placas y electrodos se debe mantener dentro de márgenes estrechos.

c) Sistema de golpeo.- El polvo que se ha acumulado en la recogida y descarga de los electrodos se elimina por el sistema de golpeo, que consiste en desalojar los depósitos de polvo por impulsos mecánicos o vibraciones, impartidas a los electrodos.

Un sistema de golpeo está diseñado para golpear ajustando la intensidad y frecuencia para diferentes condiciones de operación. Una vez establecidas las condiciones de funcionamiento, el sistema debe ser capaz de mantener un golpeo uniforme durante largos períodos de tiempo.

Los *electrodos colectores* se golpean por un sistema martillo/yunque o por impulsos magnéticos

Los *electrodos de descarga* de bastidor rígido se golpean por el volteo de martillos y los cables se golpean con vibradores.

El método más efectivo de limpieza de los compartimentos colectores es el golpeo uno a uno y en una secuencia paralela a la dirección del flujo de humos, que asegura que todos los componentes de cada compartimiento reciban una misma fuerza de golpeo. El sistema de golpeo consiste en un dispositivo que utiliza martillos dispuestos al tresbolillo montados en un eje de rotación, Fig XXXIII.13, que se prolonga a ambos lados del (ESP); el eje gira lentamente y se controla, para regular la frecuencia de golpeo y la limpieza óptima, por medio de temporizadores. A medida que el eje gira, los martillos caen (por gravedad) y empujan los yunques unidos a las placas de recolección. La intensidad del golpeo se controla por el peso de los martillos y por la longitud del brazo de montaje del martillo.

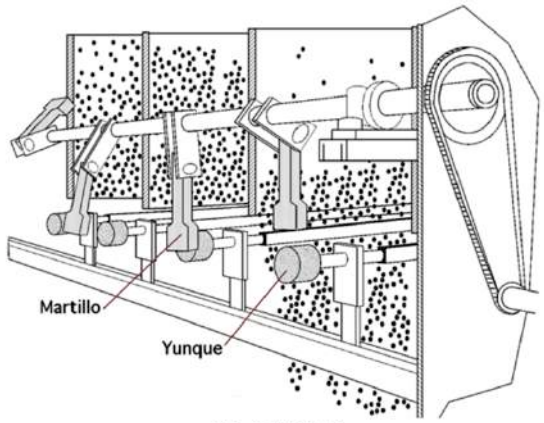

Fig XXXII 13
Sistema de golpeo martillo/yunque para placas colectoras

La frecuencia de golpeo se puede cambiar mediante el ajuste de la velocidad de los ejes giratorios. El sistema de golpeo se puede montar en la parte superior o en el lado de las placas de recogida. Dada la dificultad de la limpieza de las superficies colectoras sobre las que se ha acumulado la ceniza volante en polvo de alta resistividad y para asegurar que se transmiten a lo largo de todas las superficies colectoras las adecuadas fuerzas de golpeo, se ha establecido una aceleración mínima de 100 g aplicada en el punto de la superficie más alejado del punto de impacto.

El golpeo de los *electrodos de descarga de bastidor rígido* se realiza mediante un sistema de martillos volteadores, más pequeños que los utilizados en el golpeo del sistema de placas colectoras, montados al tresbolillo sobre un eje.

d) Sistema de impulsos magnéticos.- Otro sistema de golpeo utilizado en muchos diseños consta de impulsos de golpeo magnéticos para eliminar las capas de polvo acumuladas en las placas colectoras. Un golpeador de impulsos magnéticos consiste en un émbolo de acero que se eleva por un pulso de corriente en una bobina. El émbolo elevado cae por gravedad, golpeando una varilla conectada a un número de placas dentro del precipitador como se indica en la Fig XXXIII.14.

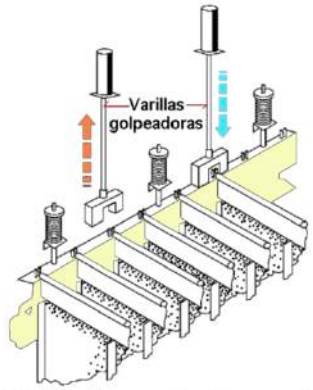

Fig XXXII 14.- Sistema de golpeo por impulsos magnéticos para placas colectoras

La frecuencia e intensidad del golpeo se regulan fácilmente por un sistema de control eléctrico y podría ser de un golpe cada cinco minutos; los golpeos de pulsos magnéticos suelen operar con mayor frecuencia y menor intensidad que el sistema martillo/yunque.

Martillos inclinados para electrodos de descarga de bastidor rígido.- Los electrodos de descarga de bastidor rígido se golpean por el volteo de martillos inclinados hacia adentro que, al caer, funcionan de manera similar a los martillos utilizados para eliminar el polvo de los electrodos colectores. Los martillos están dispuestos sobre un eje, de forma que al girar el eje golpean una barra de protección que transfiere el choque o vibración a los tubos centrales del sistema de descarga, haciendo que caiga el polvo Fig XXXIII.15.

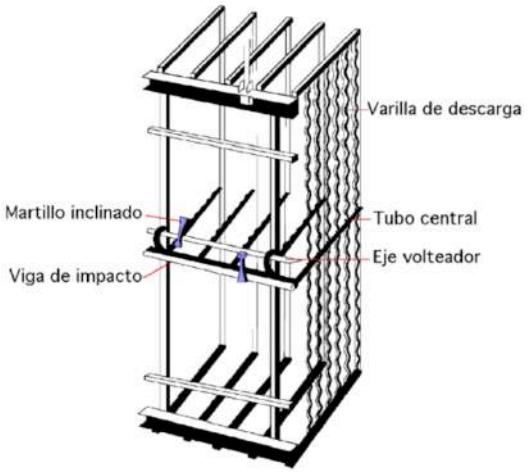

Fig XXXIII 15.- Sistema de golpeo para placas colectoras

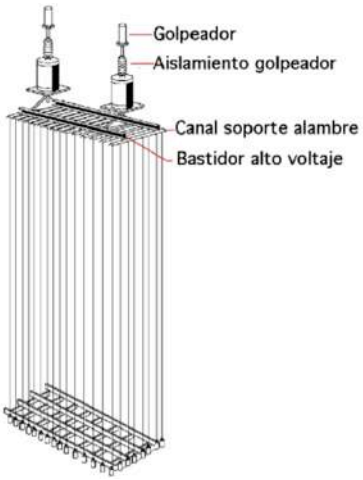

Fig XXXIII 16.- Golpeador vibrador eléctrico para electrodos de descarga de alambre

Vibrador eléctrico.- Los electrodos de descarga de alambre también deben ser golpeados para prevenir la excesiva acumulación de depósitos de polvo que pueda interferir en la generación de la corona, lo que se logra, en general, mediante el uso de vibradores de aire o eléctricos que hacen vibrar suavemente los cables de descarga. Estos vibradores se montan externamente en los techos del precipitador y están conectados por barras acanaladas a los bastidores de alta tensión que soportan los electrodos de descarga, Fig XXXIII.16. Un aislante, ubicado por encima de la barra, aísla

eléctricamente el golpeador mientras se transmite mecánicamente la fuerza de golpeo.

e) Cerramiento.- La estructura que configura los laterales y el techo de un precipitador electrostático (ESP) es un cerramiento metálico en forma de caja, totalmente estanco a gases, Fig XXXIII.7, y está limitada por una reja inferior, que sirve de base y que se puede mover para asumir las expansiones térmicas. Las placas colectoras y los electrodos de descarga van colgados del techo

El cerramiento se recubre con aislamiento térmico y una envolvente exterior al aislamiento; el acceso a los elementos internos del (ESP), se hace a través de puertas en la envolvente y pasillos entre los distintos campos eléctricos. Los materiales para el cerramiento y las partes internas del precipitador suelen ser de acero al C, porque los componentes de los humos no son corrosivos a la presión del gas y a la temperatura de las chapas.

f) Tolvas.- Las tolvas se diseñan para la recogida de partículas, durante cortos períodos de tiempo, cuando el sistema de retirada de ceniza está fuera de servicio. Son metálicas, de perfil piramidal, colgadas, construidas con chapas dotadas de nervaduras exteriores y constituyen la parte inferior del cerramiento global del (ESP), completando así el sellado a gases. Las caras laterales de las tolvas piramidales forman un ángulo mínimo de 60º con el plano horizontal.

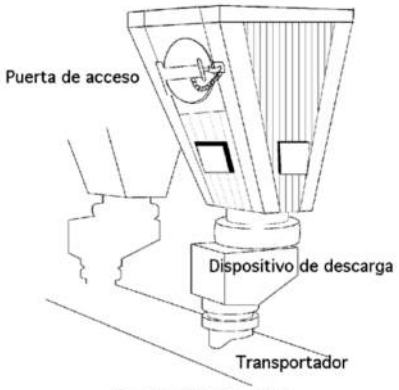

Fig XXXII 17.- Tolva

Como la mayor parte de los sistemas de retirada de ceniza son discontinuos, con las tolvas del precipitador se suministran equipos que aseguran una correcta retirada de partículas como:

- Calentadores de tolvas
- Vibradores electromagnéticos
- Detectores de nivel
- Sistemas fluidificadores de aire caliente para ayudar a la retirada de la ceniza, etc

Algunos dispositivos incluyen válvulas de doble descarga, Fig XXXIII.18a y válvulas esclusa rotativas, Fig XXXIII.18b.

En el sistema de *válvulas de doble descarga*, como el polvo se acumula en la tolva, su peso empuja hacia abajo el contrapeso de la solapa superior y descarga el polvo hacia abajo. La solapa superior se cierra, y la inferior se abre cayendo el material. Este tipo de válvula opera por gravedad y en versiones motorizadas

La *válvula esclusa rotativa* es similar a una puerta giratoria, Fig XXXIII.18b; cuando las palas se mueven lentamente accionadas por un motor, sellan herméticamente el contenedor, y descargan el polvo desde la tolva.

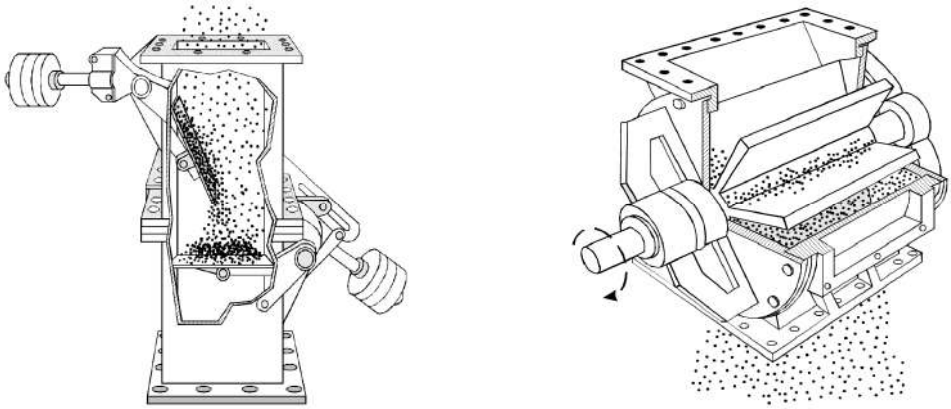

Fig XXXIII.18.- a) Sistema de válvulas de doble descarga; b) Sistema de válvulas esclusa rotativas

Transportadores.- Cuando el polvo sale del dispositivo de descarga se conduce a su destino mediante transportadores { *- de tornillo* / *- de arrastre* / *- neumáticos*

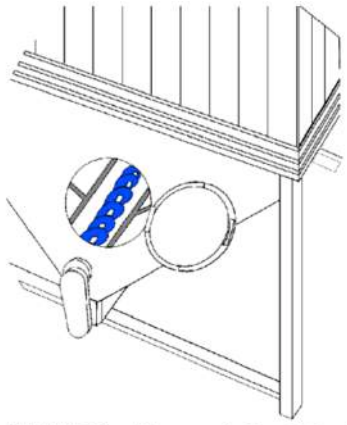

Fig XXXIII.19a.- Transportador de tornillo

El *transportador de tornillo* se puede utilizar como dispositivo de descarga cuando está situado en la parte inferior de la tolva, Fig XXXIII.19a, o como un sistema de transporte separado para mover el polvo después de descargado; utiliza un alimentador de tornillo giratorio que mueve el polvo a una cinta transportadora.

El *transportador de arrastre* utiliza palas conectadas a una cadena de arrastre para sacar el polvo a través de un canal transportador, Fig XXXIII.19b; se utiliza con frecuencia para el transporte de polvos pegajosos o higroscópicos tales como el polvo de cloruro de calcio generado a partir de la combustión de residuos municipales (gases ácidos/cenizas volantes).

El *transportador neumático* utiliza sopladores o compresores para mover el polvo a través de un tubo transportador, Fig XXXIII.19c.

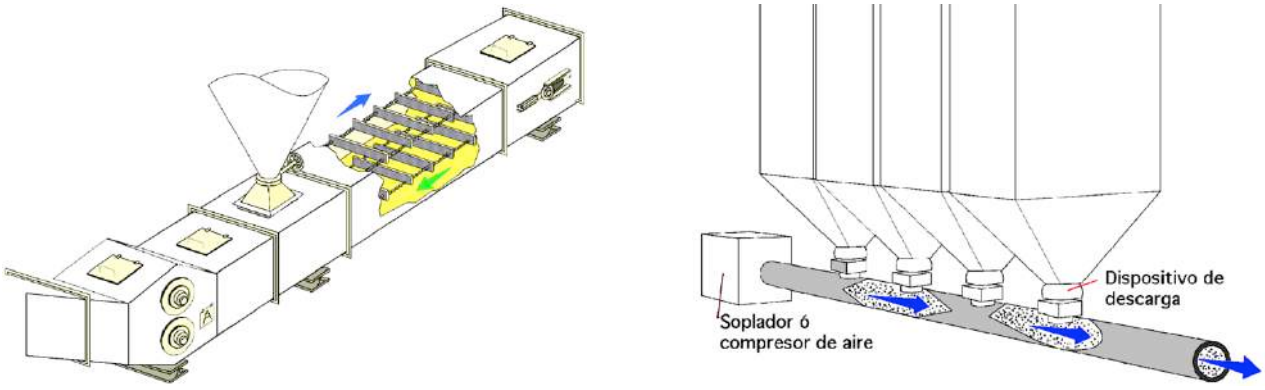

Fig XXXIII.19b.c.- Transportadores: a) de arrastre; b) neumático

Puede ser un sistema { *de presión positiva (el polvo se mueve por un soplador), ó* / *tipo vacío (el polvo es arrastrado por succión)*

g) Control de la energía.- La alimentación energética de alta tensión requerida por un precipitador se suministra a los electrodos de descarga por medio de un conjunto de transformadores rectificadores (TR); la alimentación en tensión monofásica de 480 V de corriente alterna (USA.) se regula por el controlador y se transforma de una tensión nominal de 55.000 a 75.000 V antes de que se rectifique a corriente continua hacia el sistema de descarga.

Eléctricamente, un precipitador (ESP) se parece mucho a una carga capacitiva; debido a esta carga y a la naturaleza de los componentes internos del precipitador, el (TR) se diseña para hacer frente a las puntas de intensidad provocadas por los arcos que, transitoriamente, se establecen entre los electrodos de descarga y las placas colectoras puestas a tierra.

Una bobina de reactancia en serie con el primario de los conjuntos de (TR) puede ayudar a limitar transitoriamente las puntas de intensidad.

Un regulador maximiza la tensión de entrada al precipitador, para lo cual, cuando se opera en las condiciones de diseño, el controlador debe subir periódicamente la tensión hasta el punto en el que el arco se ceba entre los electrodos de descarga y las placas colectoras; el controlador detecta la presencia de arcos y reduce la tensión para evitar el cebado de los mismos.

APLICACIONES Y CARACTERÍSTICAS FUNCIONALES

Energéticas.- Como el carbón es el combustible más común empleado en la generación de vapor, la utilización más extendida de un colector de partículas es la recogida de las partículas de ceniza del carbón, siendo el más utilizado el precipitador electrostático (ESP).

Para cumplimentar la normativa sobre el control de partículas establecida para plantas termoeléctricas, y considerando las elevadas eficiencias de captura, hay que prestar una especial atención a { *- Los detalles del dimensionado del precipitador* / *- Al sistema de golpeado* / *- La distribución del flujo de humos* / *- El bipaso de gas rodeando las placas colectoras*

En el caso de carbones con contenidos medios y altos en ceniza, son comunes eficiencias en la captura superiores al 99,9%, para unos niveles de emisiones de salida, entre 0,01 y 0,03 lb/10^6 Btu = (12,3 y 36,9 mg/m^3N al 6% de O_2), que son los habituales en la mayoría de los carbones.

Industriales.- En unidades de tipo industrial que no queman carbones, en las que los (ESP) han tenido éxito, son { *- los incineradores de basuras municipales* / *- las calderas que queman madera, cortezas y aceites*

Para estos combustibles, la resistividad de sus cenizas en humos es menor que la del carbón, por lo que las partículas se pueden colectar fácilmente con un (ESP) de tamaño modesto. El parámetro que más contribuye a la baja resistividad de sus cenizas, es el contenido en humedad de las basuras, maderas y cortezas, junto con el carbono, ceniza y combustible inquemado que tenga el residuo.

Pulpa y papel.- En la industria de la pulpa y del papel, los precipitadores electrostáticos se usan en las calderas energéticas clásicas y en las recuperadoras.

- Los requisitos de emisiones de partículas en calderas energéticas clásicas son los mismos que los aplicados a calderas industriales que utilicen los mismos combustibles.

- En las calderas recuperadoras, los precipitadores se utilizan para capturar el polvo de sal residual presente en los gases; una caldera recuperadora, en lo que al precipitador se refiere, constituye una aplicación singular debido a
- *el pequeño tamaño de las partículas*
- *la tendencia de la ceniza a aglomerarse entre sí*

La resistividad de las partículas es baja, de modo que se pueden colectar fácilmente en el (ESP). Como las partículas son muy pequeñas en tamaño, el bypass de los gases alrededor de las placas colectoras y el arrastre de las partículas golpeadas por los gases, son cuestiones a tener en cuenta en el diseño. El arrastre de partículas por los gases se minimiza con velocidades de humos menores.

La eficiencia de la captura de partículas es del 99,8% para cumplimentar una opacidad del 20% y los requisitos de emisiones.

Debido a las características de las partículas del *polvo de sal*, para retirar éste desde el precipitador se emplea un transportador de cadena con paletas, mejor que una tolva convencional, dispuesto en el suelo del precipitador. La corrosión de la chapa de cerramiento es un problema preocupante por lo que para reducir las pérdidas de calor se requiere un aislamiento mayor.

Con el fin de mejorar la fiabilidad del sistema se utilizan dos cámaras de precipitación, cada una de ellas capaz de manipular el 70% del flujo nominal de la planta.

Mejora de las características funcionales.- Una mejora de las características funcionales de un precipitador se justifica como consecuencia de
- *un cambio de combustible*
- *una modificación o actualizacion de la caldera*
- *una variación en la regulación*
- *el deterioro de las características funcionales*

Las técnicas de mejora incluyen
- *una superficie adicional de placas colectoras*
- *un acondicionamiento de humos*
- *un perfeccionamiento en la distribución del flujo*
- *una mayor calidad del control*
- *una sustitución de componentes internos*

El acondicionamiento de gases altera la resistividad mediante la adición de trióxido de azufre SO_3, amoniaco, humedad o compuestos sódicos, mientras que las demás modificaciones sólo implican cambios de componentes físicos.

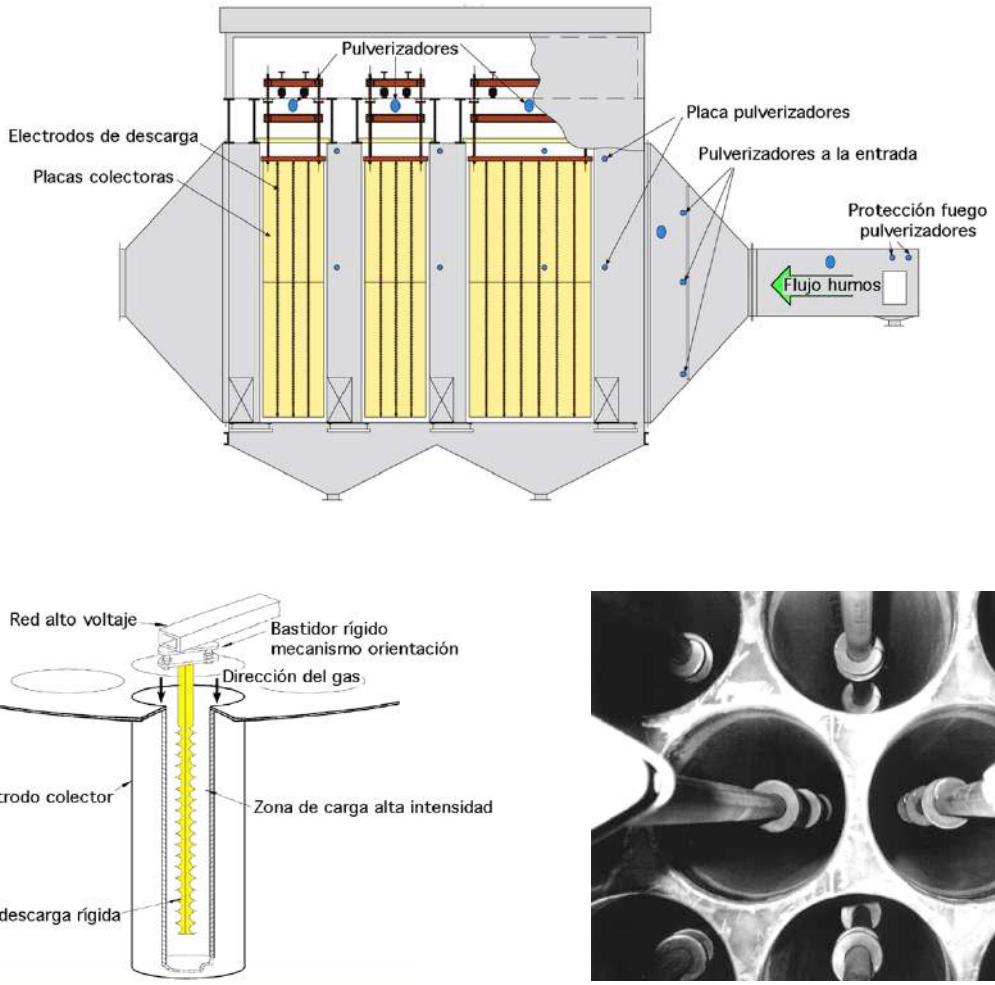

Fig XXXIII.20.- Disposición de flujo horizontal húmedo ESP, y detalle de electrodos

Para cumplimentar las necesidades de una mayor captura de partículas, se puede añadir superficie colectora, dispuesta en serie o en paralelo con la ya existente.

El acondicionamiento de gases se utiliza para:

- *Superar alguna deficiencia de la superficie colectora*
- *Mejorar la característica funcional de un determinado precipitador marginal*

Como indicativo de una posible distribución defectuosa hay que considerar:

- *Las grandes acumulaciones de polvo a la entrada al precipitador*
- *Las señales de paso del flujo de humos en las superficies colectoras*
- *Una diferencia entre velocidades longitudinales del flujo a lo ancho del precipitador*

XXXIII.4.- PRECIPITADORES ELECTROSTÁTICOS HÚMEDOS

En algunos procesos industriales, la captura de ciertos fluidos ácidos que se componen de partículas finas, se realiza por medio de precipitadores electrostáticos húmedos, que difieren de las unidades secas convencionales, en los materiales que componen el equipo, siendo el mecanismo de captura el mismo. La operación tiene lugar a la temperatura del punto de rocío del gas húmedo y con una carga de partículas que disminuye, comparada con la de las aplicaciones para calderas que queman carbón.

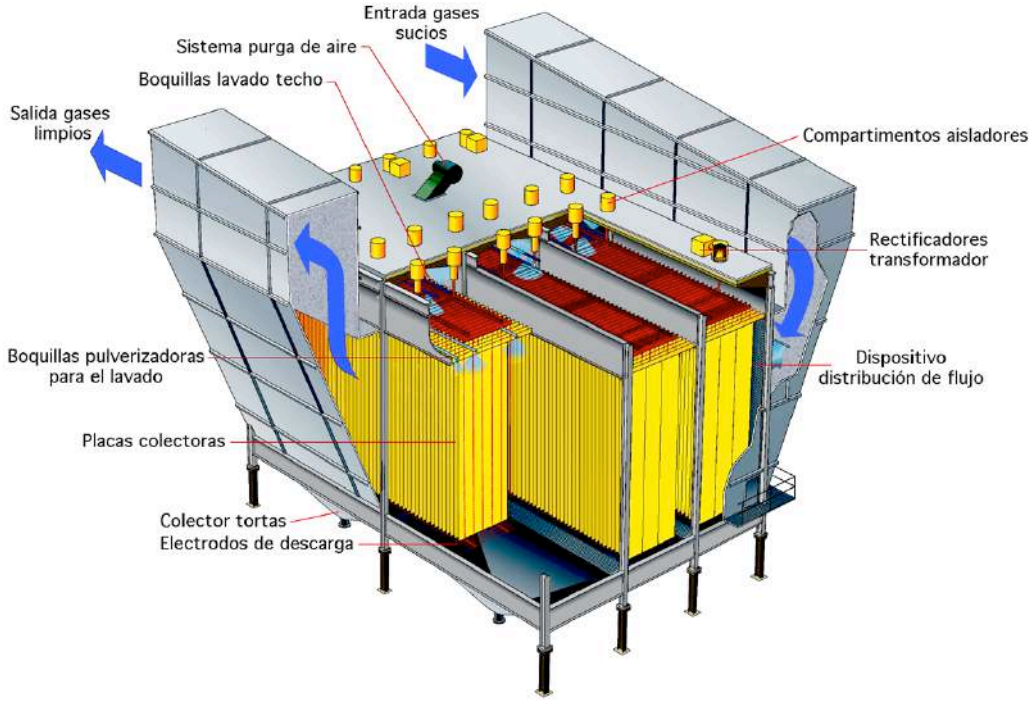

Fig XXXIII.21.- Precipitador electrostático húmedo B&W

Para soportar la atmósfera corrosiva, la selección de los materiales con los que se construye un (ESP) húmedo en contacto con los humos, es:

- *Superficie colectora, camisa de plomo o plástico*
- *Cerramiento, camisa de plomo, ladrillo ácido, plástico o revestimiento plástico*

En lugar de un sistema de golpeo, las partículas capturadas se retiran mediante agua pulverizada o película de agua.

Cuando los módulos del precipitador se colocan en serie la eficiencia de captura es del 99%

El dispositivo de limpieza capta la niebla ácida y reduce la emisión de partículas finas de menos de 2,5 micras. El sistema de lavado utilizado para la limpieza y modificación del pH, permite el empleo de aceros aleados de inferior calidad, reduciendo así el coste total. Se aplica a unidades de calderas por encima de 100 MW que queman combustibles que contienen azufre.

XXXIII.5.- CÁMARAS DE FILTROS DE SACOS

Un filtro de sacos captura partículas secas, a medida que los humos enfriados pasan a su través; se compone de un cerramiento de compartimentos múltiples, Fig XXXIII.22, cada uno de los cuales contiene varios miles de sacos de tela, largos, soportados verticalmente y de pequeño diámetro. Los humos pasan a través de los poros del material del saco, que retiene las partículas que arrastran los humos.

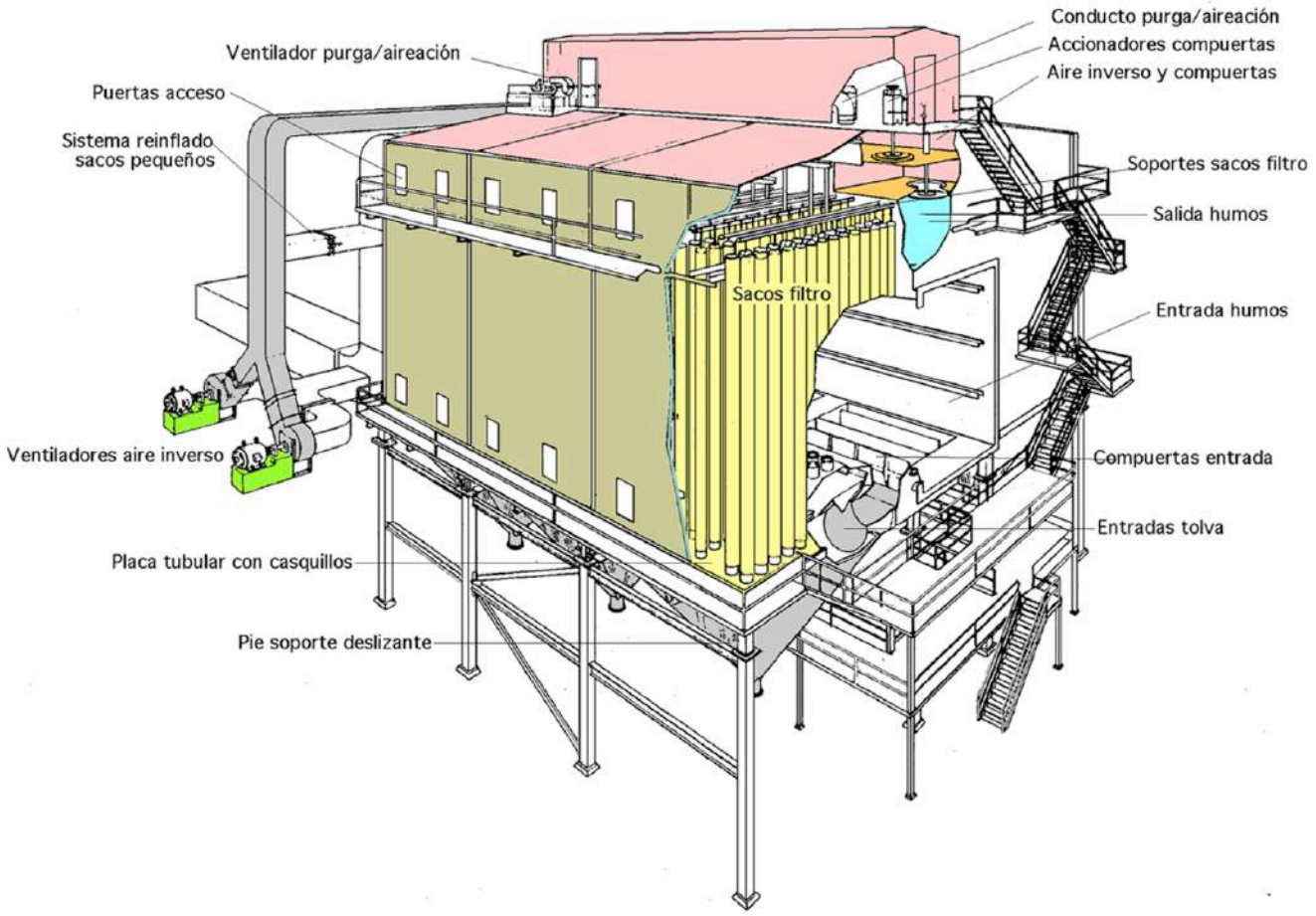

Fig XXXIII.22.- Cámara de sacos

Fundamentos operativos.- Los humos cargados de partículas que salen de una caldera que quema carbón, pasan por el calentador de aire y entran en la cámara de entrada del filtro de sacos, desde la que se distribuyen a cada uno de los compartimentos para su limpieza; en la salida de cada uno de los compartimentos se reúnen los gases ya limpios de partículas y se dirigen hacia la chimenea mediante un ventilador de tiro inducido. Para la limpieza y mantenimiento de los sacos, se incomunica cada compartimento, mediante cortatiros a la entrada y salida; cada compartimento tiene una tolva para el flujo de humos de entrada, y un equipo para la recolección y retirada de partículas.

Los sacos individuales están cerrados por uno de sus extremos y conectados a un manguito tubular por el otro, para permitir el paso de los humos a su través.

Las fuerzas principales que provocan la captura son el: $\begin{cases} \text{- } choque\ por\ contacto\ directo \\ \text{- } cribado\ de\ la\ torta\ de\ polvo \end{cases}$

Las fuerzas secundarias que ayudan a la captura son las: $\begin{cases} \text{- } de\ difusión \\ \text{- } electrostáticas \\ \text{- } de\ London\text{-}Van\ der\ Wall \\ \text{- } de\ gravedad \end{cases}$

La capa de polvo, que se recoge en los sacos se denomina *torta de polvo*, que se forma por la acumulación de partículas sobre los sacos; una vez formada, es ésta y no el material del filtro del saco, la que facilita la mayor parte de la captura de partículas.

Aunque la captura por choque es más efectiva para las partículas de mayor tamaño y la retención por cribado colecta todos los tamaños de partículas, la torta de polvo se debe formar para maximizar la captura global. Conforme la torta de polvo crece, la caída de presión del gas a través del filtro de tela aumenta, por lo que cuando ésta alcance un determinado valor, los sacos se tienen que limpiar, dejando un determinado residuo de polvo para mejorar la captura posterior.

Parámetros de diseño del filtro de tela: $\begin{cases} \text{- } relación\ \dfrac{Aire}{Tela} = \dfrac{A}{C} = \dfrac{Flujo\ volumétrico\ de\ gas}{Área\ de\ la\ superficie\ de\ saco\ expuesta} \\ \text{- } resistencia\ aerodinámica\ de\ cada\ compartimiento \end{cases}$

Tipos de filtros de sacos.- El método de limpieza determina el tamaño relativo, mediante la relación A/C y la superficie (interior o exterior) de filtración del saco en el que se realiza la retención.

Los métodos de limpieza con sacos distinguen tres tipos de filtros de tela: $\begin{cases} \text{- } aire\ inverso \\ \text{- } desinflado\ por\ sacudida \\ \text{- } chorro\ de\ pulsos \end{cases}$

Los métodos de $\begin{cases} aire\ inverso \\ desinflado\ por\ sacudidas \end{cases}$ son para filtración del lado interior del saco, es decir, el flujo de humos pasa desde el interior hacia el exterior del saco, Fig XXXIII.23

El *chorro de pulsos* es para filtrar desde el lado exterior del saco, con el gas a limpiar pasando del exterior al interior del mismo.

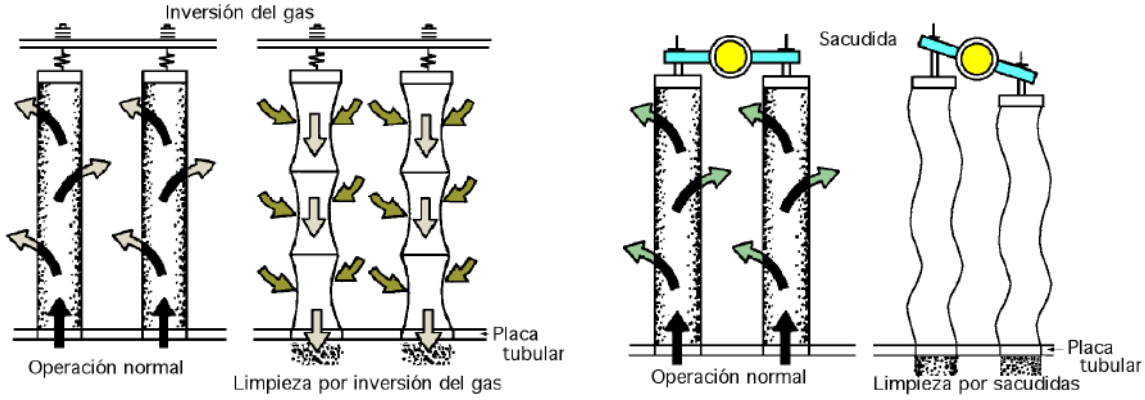

Fig XXXIII.23a.- Tipos de filtros de sacos

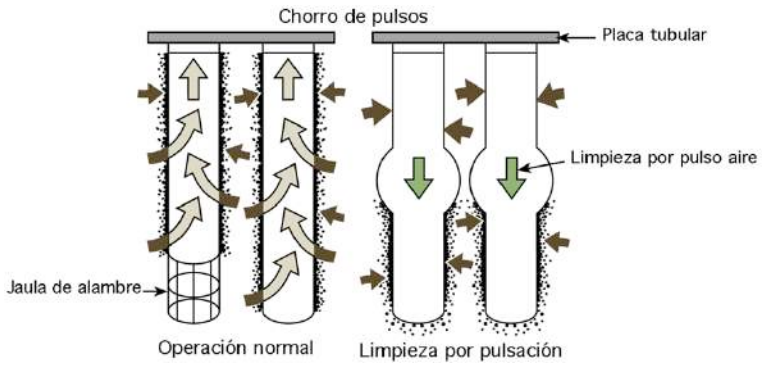

Fig XXXIII.23b.- Tipos de filtros de sacos

- En los filtros del lado interior, la placa tubular se sitúa debajo de los sacos

- En los filtros con limpieza por chorro de pulsos, la placa tubular está encima de los sacos

a) El filtro de ***aire inverso, o de gas inverso***, invierte el flujo de humos limpio, procedente de la cámara de salida de gas limpio, hacia el interior de cada compartimento, para desinflar mediante aplastamiento los sacos de un compartimento incomunicado y desalojar la torta de polvo.

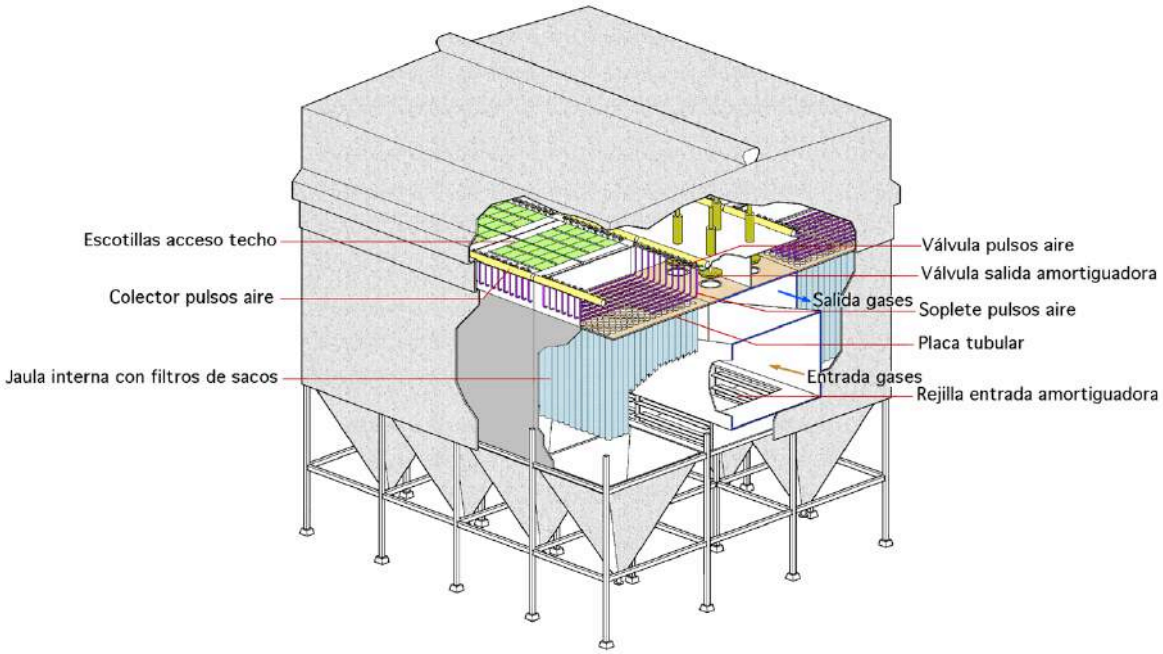

Fig XXXIII.24.- Depurador de filtros de sacos con chorros de pulsos de aire

Una vez que las partículas desalojadas caen en la tolva, los sacos se vuelven a inflar suavemente, antes de admitir el flujo de humos para su filtración.

Este sistema precisa de un ventilador de inversión de humos, que suministra el flujo de humos de limpieza, con sus correspondientes cortatiros para control

b) Con el ***sistema de filtro*** en algunas aplicaciones de ceniza volante en polvo, la limpieza con sólo gas inverso no facilita una aceptable caída de presión, por lo que algunas unidades incorporan emisores sónicos en cada compartimento, para ayudar a la limpieza.

Los filtros de desinflado por sacudida son similares a las unidades de aire inverso, en cuanto que
- *La limpieza tiene lugar en un compartimento previamente incomunicado*
- *Se usa una pequeña cantidad de gas limpio para desinflar ligeramente los sacos*
- *Para sacudir los sacos y desalojar la torta de polvo acumulada se puede utilizar un movimiento mecánico*

c) La ***tecnología del chorro de pulsos***, *Fig XXXIII.25,* es un método de limpieza riguroso, y se puede utilizar tanto si el compartimento está incomunicado como si está en servicio.

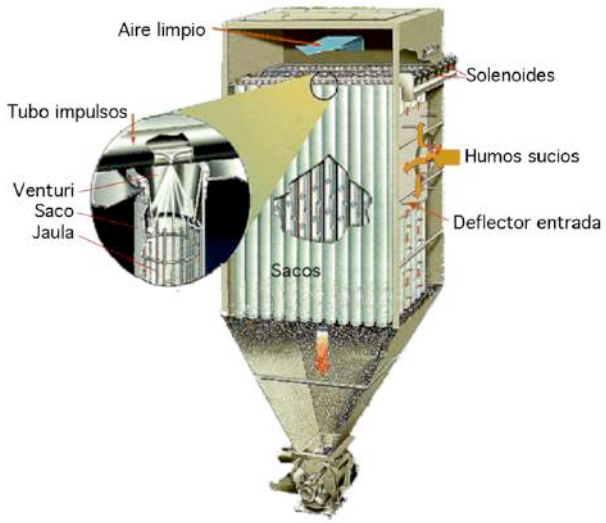

Fig XXXIII.25.- Tecnología del chorro de pulsos

Desde el extremo abierto del saco se dirige un impulso de aire comprimido hacia el interior, lo que provoca una onda de choque descendente a lo largo de toda la longitud del saco que desaloja la torta de polvo depositada en la superficie exterior del saco. El sistema de chorro de pulsos utiliza una armadura de tela metálica en cada saco, para impedir que éste se colapse durante la operación normal, por cuanto está colgado de la placa tubular.

Materiales de los sacos y soportes.- La flexibilidad durante la limpieza es el factor principal que afecta a la vida del saco. El taponamiento que se produce en los sacos, cuando pequeñas partículas quedan atrapadas en los intersticios del tejido, limita su duración al provocar una excesiva caída de presión en los humos. Para que algunos sacos sean más resistentes y mejorar la limpieza, se precisa de un cierto acabado de la superficie del saco. El material utilizado en los sacos con filtros de aire inverso y desinflado por sacudida, en unidades energéticas que queman carbón, es la fibra de vidrio.

- El tamaño del saco es de 12" (305 mm) de diámetro, con una longitud de $\begin{cases} 30 \div 36\ ft \\ 9{,}1 \div 11\ m \end{cases}$*, y vida media de 3÷ 5 años*

- La temperatura de operación máxima es de 500°F (260°C), para la mayoría de los sacos de fibra de vidrio

Como alternativa a la fibra de vidrio, se pueden utilizar filtros de materiales sintéticos, que tienen la ventaja de $\begin{cases} una\ mejor\ resistencia\ a\ la\ abrasión \\ mayor\ resistencia\ al\ ataque\ ácido \end{cases}$, y las desventajas $\begin{cases} un\ coste\ más\ elevado \\ unas\ temperaturas\ limitadas \end{cases}$

Para los filtros de chorro de pulsos, el tamaño de los sacos es $\begin{cases} - \ diámetro\ entre\ 5 \div 6'' = 130 \div 150\ mm \\ - \ longitud\ entre\ 10 \div 20\ ft = 3 \div 6\ m \end{cases}$

Tolvas.- Cada compartimento del filtro dispone de una tolva que recoge las partículas desprendidas de los sacos y las dirige hacia el sistema de retirada de ceniza. La mayoría de los filtros

utilizan la tolva como parte de la entrada de los humos a cada compartimento.

La tolva se diseña con superficies laterales escarpadas que favorecen la retirada de la ceniza, y con un sistema para una adecuada distribución del flujo de humos; otras características constructivas son:

Características funcionales y aplicaciones.- Los filtros de tela bien diseñados, en la retención de partículas alcanzan eficiencias por encima del 99,9%, con lo que cumplimentan todas las normativas de la (EPA).

Además de las aplicaciones en unidades energéticas que queman carbón, las cámaras de sacos se utilizan en:
- *La dotación de calentadores de tolvas*
- *Detectores de nivel*
- *Agujeros para picas*
- *Puertas de acceso*

La ventaja de los filtros de sacos es que la totalidad de los gases se limpian cuando pasan a través de la torta de polvo, que tiene una alta alcalinidad, empleándose para retener componentes ácidos de los humos, como el SO_2.

XXXIII.6.- COLECTORES MECÁNICOS

Los colectores mecánicos de polvo, son los ciclones que separan las partículas de tamaño superior a 10 micras suspendidas en los humos; para tamaños de partículas más pequeños, la eficiencia de captura cae por debajo del 90%. El flujo ciclónico de humos y la fuerza centrífuga dirigen las partículas hacia el exterior del flujo de humos Fig XXXIII. 26; las tolvas que se encuentran bajo los ciclones recogen las partículas y las llevan al sistema de retirada de ceniza. Los colectores mecánicos son adecuados cuando las normas sobre emisiones son menos restrictivas y cuando las técnicas habituales de combustión producen partículas de tamaños mayores. Se utilizaron para la reinyección de partículas, y mejorar la eficiencia de la unidad, en el caso de hogares mecánicos que quemaban carbón y biomasa; con normas más estrictas, no se pueden utilizar como dispositivos principales para el control de emisiones.

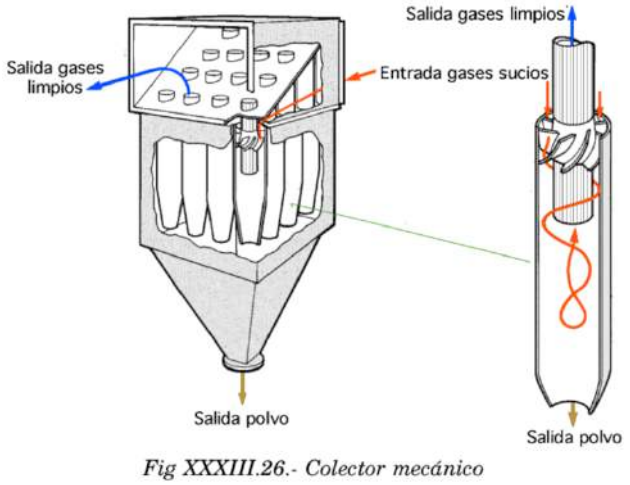

Fig XXXIII.26.- Colector mecánico

Con la aparición de las calderas de lecho fluidificado, los colectores mecánicos han resurgido para facilitar el reciclado del material del lecho. En este caso, se utiliza un colector de alta eficiencia, en serie con el colector mecánico, para cumplimentar los particulares requisitos de emisiones.

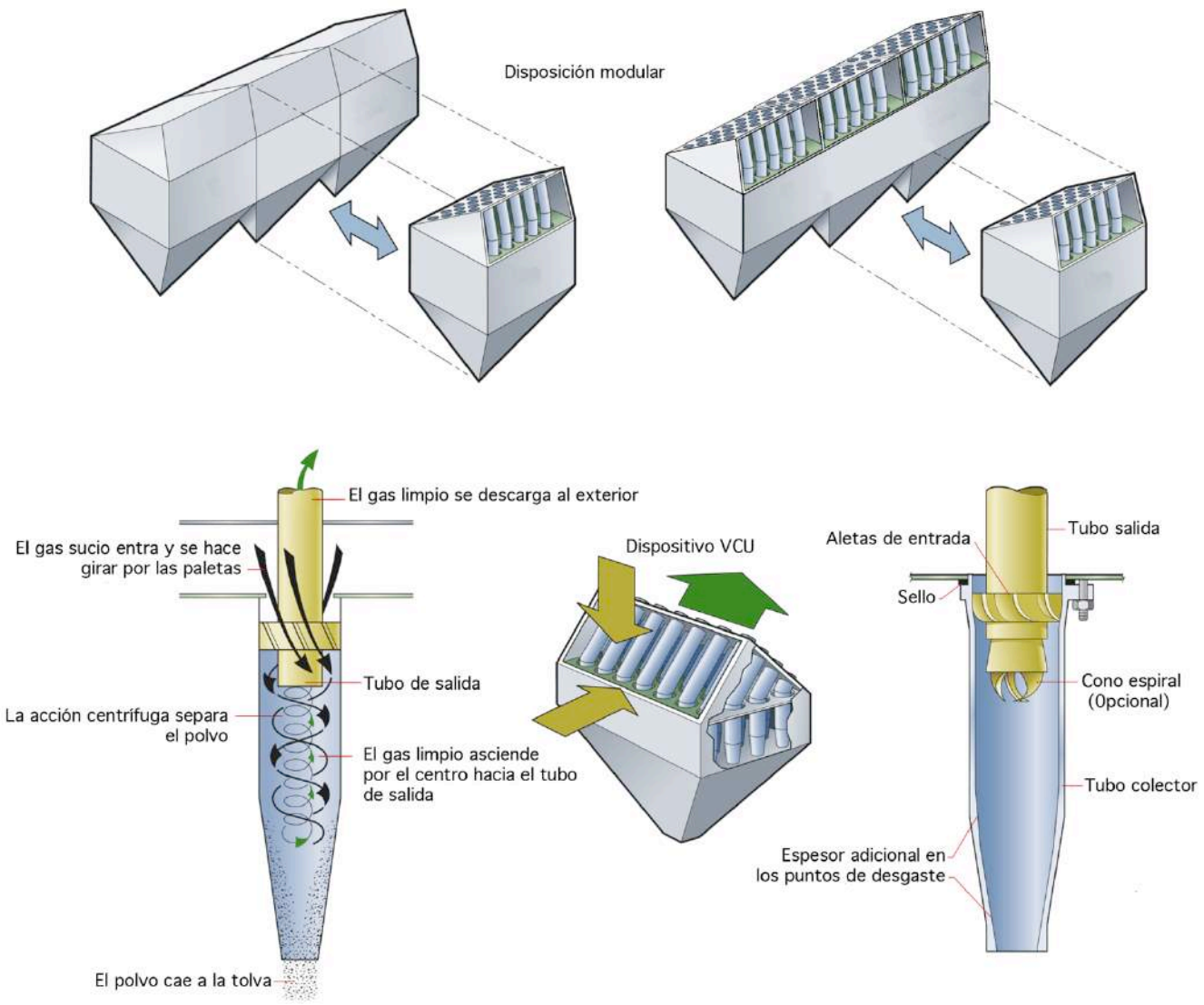

Fig XXXIII.27.- Colector mecánico VCU

XXXIII.7.- DEPURADORES HÚMEDOS

Un depurador húmedo se utiliza para recoger las partículas suspendidas en un flujo de humos, mediante el contacto íntimo entre el flujo de humos y un líquido depurador. En la operación de un depurador húmedo $\begin{cases} \text{- } la\ eficiencia\ de\ la\ captura \\ \text{- } el\ tamaño\ de\ las\ partículas \\ \text{- } la\ caída\ de\ presión\ del\ lado\ de\ humos \end{cases}$, están estrechamente relacionadas.

Para una eficiencia de captura dada, la caída de presión es inversamente proporcional al tamaño de las partículas de polvo, o lo que es lo mismo, para un tamaño dado de partícula, la eficiencia de captura aumenta cuando crece la caída de presión de la operación, Fig XXXIII.28.

Debido a la excesiva caída de presión y a la exigente normativa sobre partículas, los depuradores húmedos, como dispositivos principales de captura de partículas, se utilizan poco.

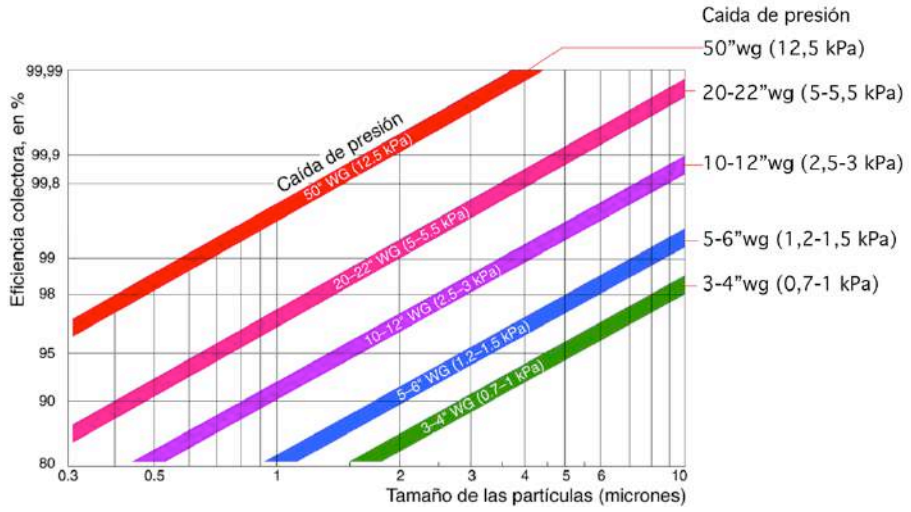

Fig XXXIII.28.- Relación entre la caída de presión, tamaño de partículas y eficiencia en un depurador húmedo

Sin embargo, en la mayoría de las aplicaciones que se refieren a unidades que queman carbón, los depuradores húmedos se utilizan en serie con colectores de alta eficiencia, para el control de las emisiones de gases ácidos, de modo que la captura extra de partículas es sólo una mejora añadida.

Para entender mejor el funcionamiento de este tipo de depuradores, analizaremos algunas de las técnicas que se aplican, como depurador
- *húmedo de aletas*
- *dinámico*
- *Venturi*
- *multi-Venturi*
- *torre de absorción*
- *Venturi-torre de absorción de 2 etapas*

a) En el ***depurador húmedo de aletas***, Fig XXXIII.29, el líquido depurador se introduce como un aerosol dirigido hacia abajo sobre una disposición circular que son las *aletas de limpieza*. A medida que el líquido pasa a través de las aletas, se van creando cortinas del líquido de limpieza, de forma que los humos cargados de polvo inciden sobre el depurador tangencialmente y chocan con las cortinas iniciándose la aglomeración de las partículas de forma que las de mayor tamaño se arrastran a la zona de mezcla generando un slurry que se evacúa al exterior.



Fig XXXIII.29.- Depurador húmedo de aletas

Un disco instalado en el sistema de limpieza de las aletas acelera la velocidad tangencial de los humos; esta acción combinada con la inundación del líquido atomizado del aerosol origina la formación de gotitas líquidas finas que encapsulan las macropartículas restantes, de menor tamaño, aglomerándolas.

Las gotitas más gruesas afectan a las aletas del eliminador de niebla (humedad) y las gotitas

más finas se fuerzan para caer en la suspensión por efecto de la gravedad y centrifugación, que actúan sobre la corriente de los humos en su salida al exterior.

b) En el ***depurador dinámico***, Fig XXXIII.30, Los humos cargados de polvo se incorporan tangencialmente por la parte inferior a la cámara del depurador, comunicando un efecto ciclónico a la corriente. Las partículas gruesas se eliminan por combinación de las fuerzas de gravedad y centrífugas. La corriente de humos en esta zona, se encuentra con el slurry descendente de la cámara superior, en un estado avanzado de formación, y se moja parcialmente, iniciándose la aglomeración.



Fig XXXIII.30.- Depurador húmedo dinámico

La corriente hace girar una serie de aletas del depurador, que captan las partículas de tamaño medio cuando chocan con las superficies mojadas de las aletas y se eliminan hacia abajo. La corriente de humos, que ya contiene sólo partículas de polvo fino, se traslada a una cámara adyacente que tiene un ventilador. El líquido de limpieza se pulveriza en el ojo del ventilador, reduciendo el tamaño de las gotitas que encapsulan las partículas de polvo finas, aumentando así la aglomeración. La corriente de humos fluye hacia la cámara superior tangencialmente a alta velocidad. Las partículas aglomeradas mojadas, forzadas por la acción ciclónica, alcanzan las paredes de la cámara y se escurren al cono-tolva interno de descarga. La corriente de humos ya seca, libre de gotitas líquidas, sale al exterior.

c) El diseño del ***depurador Venturi***, Fig XXXIII.31, consiste en un Venturi seguido de un separador de líquido. Los humos cargados de polvo entran en el Venturi y contactan con el líquido de limpieza introducido pulverizado, que se mueve hacia abajo sobre las paredes convergentes del Venturi.

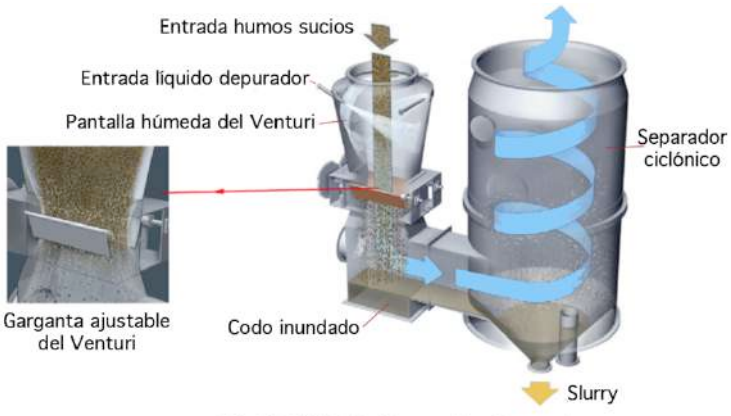

Fig XXXIII.31- Depurador Venturi

En la garganta del Venturi, las corrientes de los humos y del líquido se entrecruzan de forma que las gotitas de líquido atrapan partículas de polvo. Esta mezcla humos/líquido pasa a través de un codo inundado, y después entra en el separador de arrastre a través de una entrada tangencial. El efecto centrífugo elimina las partículas mojadas de la corriente del gas. Como alternativa, cuando los separadores requieren diámetros muy grandes, el líquido se separa pasando la corriente a través de un baffle eliminador de niebla. La mezcla polvo/lí-

quido se descarga en el canal de la parte inferior del separador y los humos limpios pasan a través de la tapa del separador.

d) En el ***depurador multi-Venturi***, los gases sucios se dirigen hacia unas barras que crean un efecto Venturi, Fig XXXIII.32, en donde se mezclan con el líquido depurador pulverizado conformando una corriente fluida. El agua depuradora se rocía a través de una serie de inyectores, a baja presión, distribuyéndola uniformemente sobre la cubierta de varillas.

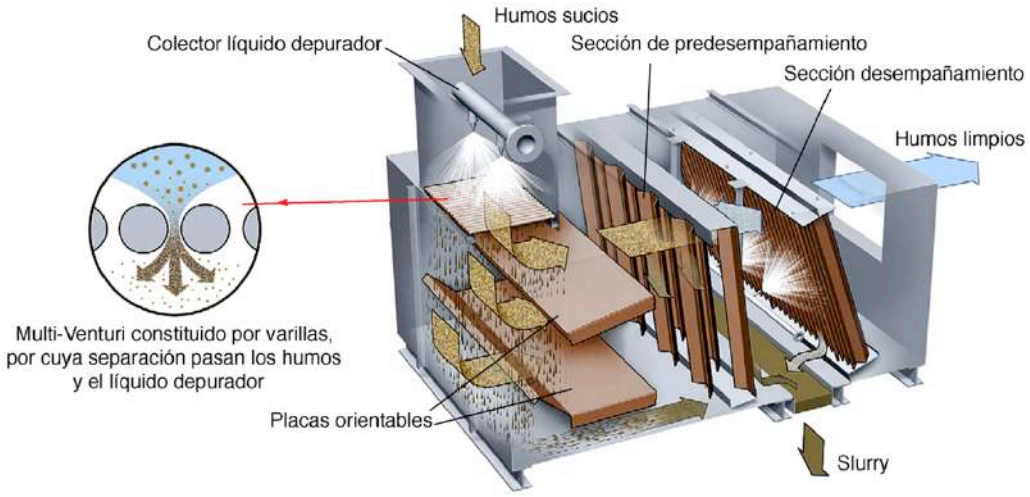

Fig XXXIII.32.- Depurador multi-Venturi

Los humos se aceleran rápidamente al pasar a través de la separación entre barras; esta acción crea gotitas más pequeñas, causando la encapsulación de las partículas y aumentando la eficacia de la colección de partículas. Tan pronto los humos abandonan la zona inferior de las barras Venturi, la velocidad se reduce y las gotitas cargadas de partículas más grandes se separan de la corriente y caen. Los humos, ya con partículas menores, se dirigen hacia una zona de dos etapas de desempañamiento mediante $\begin{cases} \text{- } \textit{baffles distribuidores} \\ \text{- } \textit{placas orientables} \end{cases}$, en donde:

- El desempañamiento primario de los humos ocurre en una zona que elimina el 90% del agua

- El resto de agua se quita por el choque de los humos con las placas orientables del desempañamiento final

El agua de la limpieza se recoge antes de la sección del desempañamiento fluyendo hacia la parte inferior del depurador al canal del drenaje. Los gases limpios y secos se envían al exterior del depurador.

e) En el ***depurador torre de absorción***, Fig XXXIII.33, los humos sucios entran por la parte inferior de la torre y ascienden por ella, entrando en contacto con el líquido de limpieza que se escurre a través de la columna llena. Puesto que la concentración del agente contaminador disminuye a medida que sube el gas hay constantemente un solvente más fresco disponible para el contacto, que-



Fig XXXIII.33.- Depurador torre de absorción

dando por resultado una eficiente separación de partículas.

Finalmente, las gotitas finas de humedad, todavía suspendidas en la corriente limpia de los humos, se separan mediante un eliminador de niebla. El líquido depurador se recoge en un depósito y se recicla a la torre. El líquido de relleno se introduce constantemente, y el reactivo se añade, cuando se solicite, mediante una bomba dosificadora controlada por un monitor del pH.

f) Se han desarrollado diversos diseños húmedos con depuración en dos etapas. El más general es una combinación de ***depurador Venturi simple y torre de absorción***, Fig XXXIII.34.

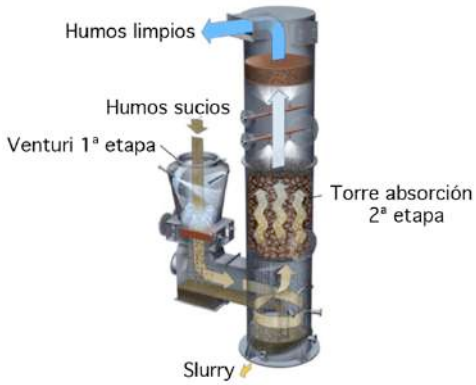

Fig XXXIII.34.- Depurador Venturi-torre de absorción

El diseño se optimiza usando:

- *un control del pH*
- *la separación líquida del circuito*
- *eliminadores de niebla para aumentar la eficiencia*

Otro diseño en dos etapas es una ***entrada multi-Venturi con un depurador dinámico***; utiliza la tecnología de la cubierta de barras del multi-Venturi como prelimpiador del depurador dinámico o como componente de la modificación a introducir para mejorar el funcionamiento de un depurador dinámico ya existente.

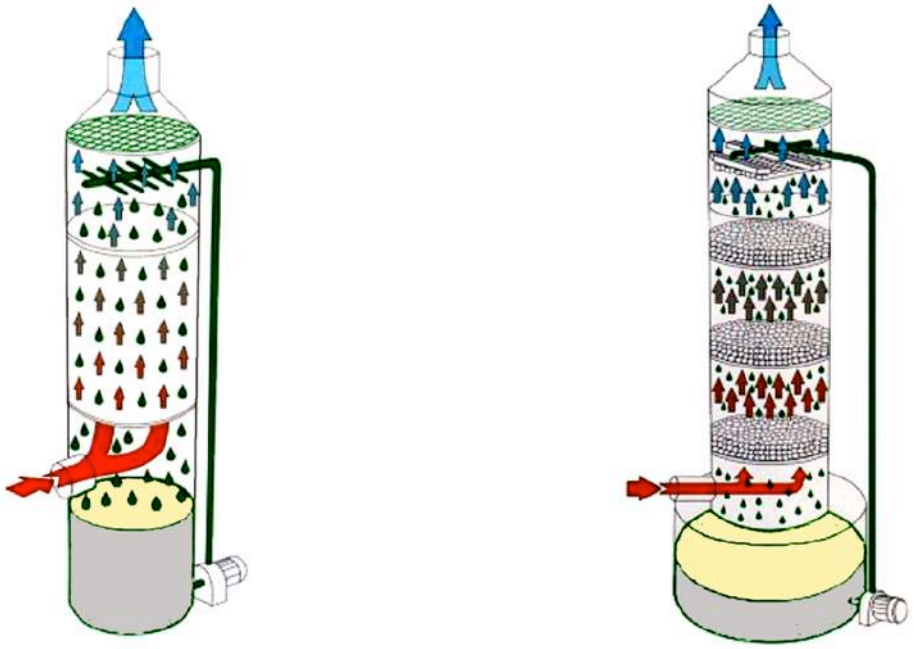
Fig XXXIII.35.- Otros esquemas de depuradores: a) húmedo ; b) de lecho fluidificado

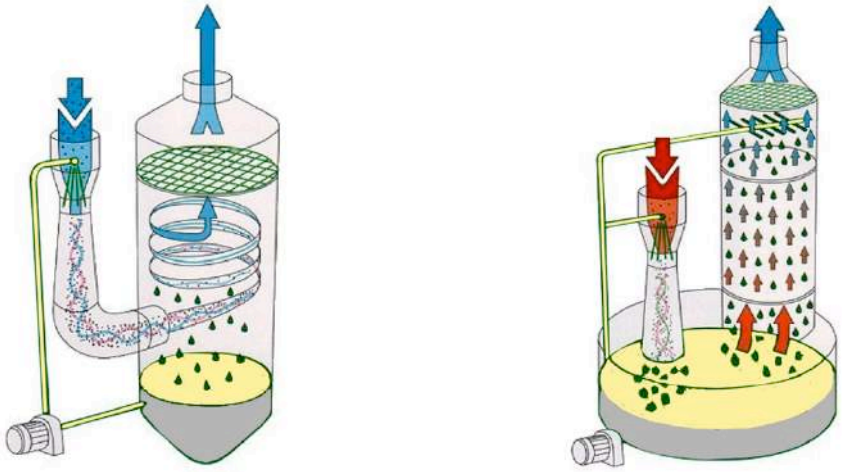

Fig XXXIII.36.- Depuradores Venturi húmedos de una y dos etapas

XXXIII.8.- OTROS DISPOSITIVOS

Otros dispositivos colectores para el control de la emisión de partículas más especializados, incluyen los filtros siguientes: { *- lecho móvil granular de flujos cruzados*; *- depuración electrostática Electroscrubber*; *- tubos cerámicos*

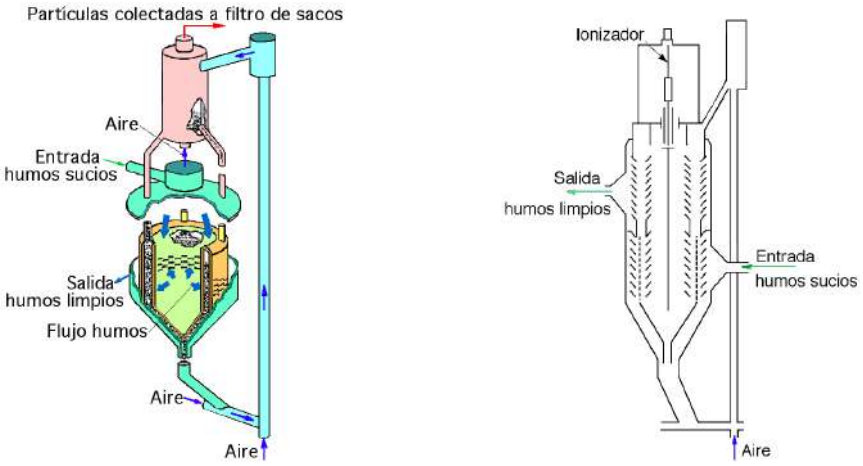

Fig XXXIII.37.- Filtro separador de lecho móvil granular de flujos cruzados (EFB)

Filtro de lecho móvil granular.- Se mueve hacia abajo con una velocidad pequeña, los componentes de la mezcla polvo-gránulos se separan, y los gránulos limpios se reciclan al filtro del lecho, Fig XXXIII.37. Con el fin de evitar la obstrucción del lecho, se instala una gruesa malla alrededor de una cuarta parte del mismo; en esta región, los gránulos se trasladan hacia abajo a un ritmo más rápido que en el resto del lecho, lo que impide su obstrucción por el rápido movimiento de los gránulos que tienen una mayor acumulación de polvo.

Filtro depurador electrostático Electroscrubber.- Combina las tecnologías de la filtración granular y la colección electrostática. Utiliza las fuerzas electrostáticas sobre las partículas, al

tiempo que los humos pasan a través de un lecho recirculante de grava. Las partículas de polvo cargadas se adhieren a la grava, que se limpia y desprende de las mismas cuando se recircula desde la parte inferior del lecho hacia la parte superior del mismo. El polvo colectado se envía al sistema de evacuación y el flujo de gas limpio a la chimenea. Este dispositivo colector se usa en unidades que queman maderas porque ayuda a prevenir incendios, provocados por la manipulación de rescoldos incandescentes.

La zona anular entre pantallas se llena de gránulos de grava de tamaño (3÷6 mm). A una rejilla electrostática en forma de jaula, Fig XXXIII.38, se la aplica un voltaje alto, y el campo eléctrico generado entre ésta y el conductor interior aumenta la eficiencia de recogida de partículas cuando el polvo de los humos pasa a su través.

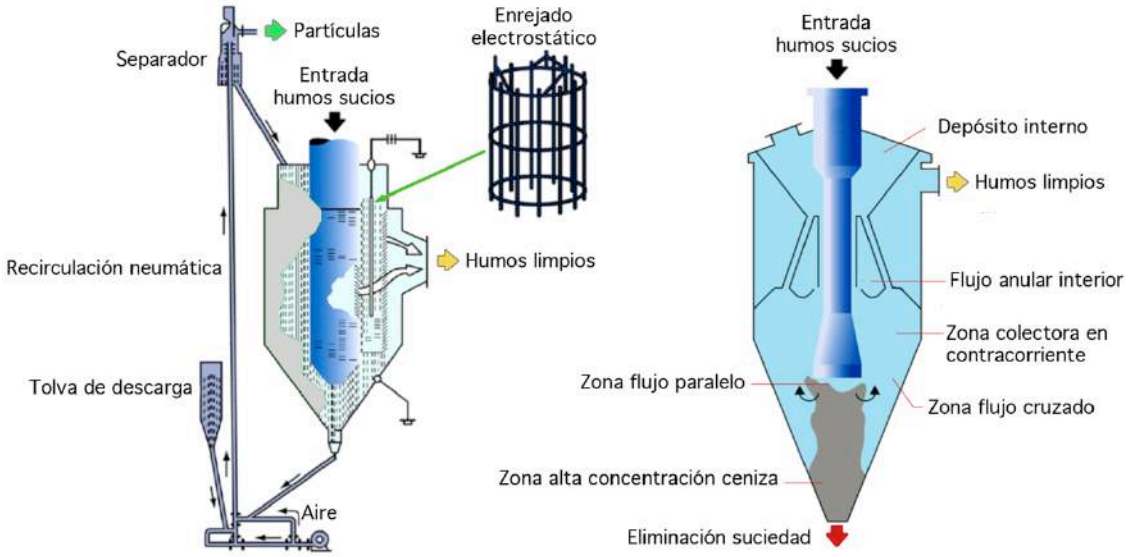

Fig XXXIII.38.- Filtro separador de lecho móvil granular de alta temperatura, Electroscrubber (CPC)

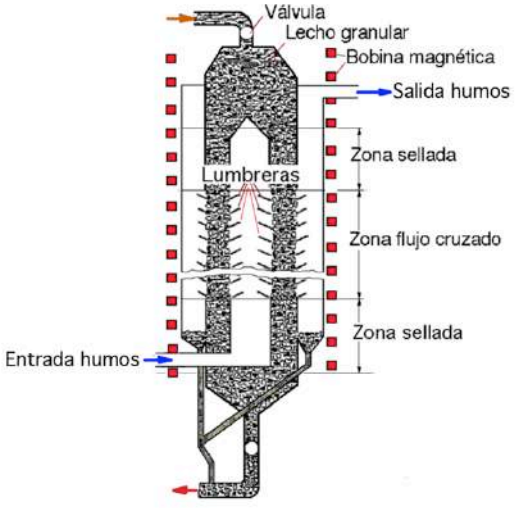

Fig XXXIII.39
Filtro de lecho granular estabilizado (EXXON)

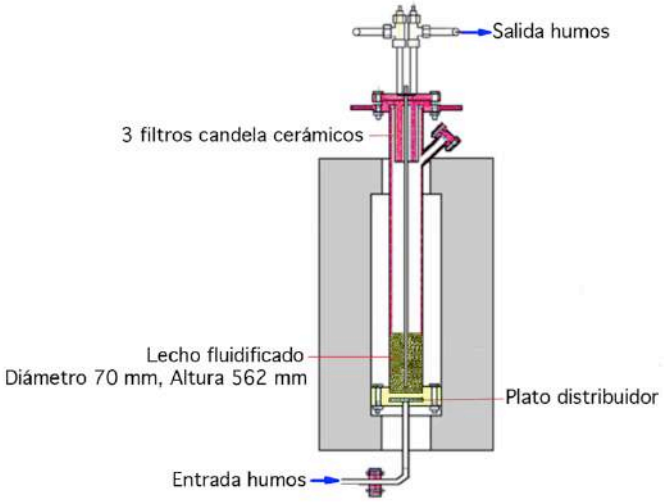

Fig XXXIII.40.- Filtro cerámico

El filtro del lecho se mueve continuamente hacia abajo y se devuelve al lecho después de su limpieza. Se ha comprobado que la rejilla electrostática aumenta la eficiencia colectora; para partículas submicrónicas, este aumento es muy pronunciado, del $65 \div 95\%$. Este hecho no se ha comprobado en condiciones de alta presión y temperatura; parece ser que la disminución de la resistividad de las partículas a altas temperaturas probablemente cause en la conducción por el lecho, una mejora en las pérdidas electrostáticas.

Filtros de tubos cerámicos.- Se han desarrollado para aplicaciones a alta presión y temperatura (1100ºC) y como las de los gasificadores de carbón y lechos fluidificados presurizados, Fig XXXIII.40

XXXIII.9.- SELECCIÓN DEL EQUIPO

Los factores a considerar, cuando se selecciona un equipo de control de partículas, son:

- *Requisitos de emisiones*
- *Condiciones de operación de caldera, con la* $\begin{cases} \text{- cantidad} \\ \text{- tamaño} \end{cases}$ *de las partículas resultantes del proceso*
- *Caída permisible de presión / Consumo de energía*
- *Requisitos combinados de control de contaminación*
- *Costes de capital invertido, de operación y de mantenimiento*

Para las nuevas unidades, la selección se reduce a comparar los precipitadores electrostáticos y las cámaras de sacos, ya que ambos sistemas corresponden a unidades de alta eficiencia y fiabilidad.

Para el reequipamiento o modernización de unidades, las características funcionales del equipo existente de control de partículas, así como las condiciones singulares del gas de combustión, pueden requerir equipos especializados.

Las ventajas de un *precipitador electrostático (ESP)* bien diseñado, son:

- *Una elevada eficiencia global de captura*
- *Una elevada fiabilidad frente a pequeñas pérdidas de presión del lado de humos*
- *Una resistencia frente a posibles variaciones de la humedad y temperatura*
- *Un mantenimiento reducido*

Las ventajas de una *cámara de sacos* son:

- *Una alta eficiencia de captura para cualquier tamaño de partículas*
- *Una elevada fiabilidad frente a variaciones del flujo de humos*
- *Un pequeño impacto de los componentes químicos de la ceniza sobre las características funcionales*

- Buenas características de la torta de polvo, para su combinación con el gas ácido seco retenido por el equipo

Una aplicación en la que predominen las partículas de pequeño tamaño se verá favorecida por un filtro de tela, para lograr el máximo control en la emisión de partículas, ya que el saco nunca se atasca.

Para aplicaciones en las que resulten técnicamente aceptables un precipitador electrostático (ESP) y una cámara de sacos, y se requieran altas eficiencias de captura, se pueden dar unas líneas generales sobre costes de inversión:

- En pequeñas unidades es más económico un filtro de chorro de pulsos

- En grandes unidades que queman carbón con contenidos medios o altos de S, es más económico un precipitador electrostático (ESP)

- En grandes unidades, que queman carbón con bajo contenido de S, un filtro de aire inverso puede ser el más económico

Cuando haya que considerar también los costes de operación y mantenimiento, no siempre el menor coste de inversión conduce al coste global mínimo, por lo que es importante realizar un estudio detallado, a fin de obtener un diagnóstico correcto sobre el coste real.

En el caso de nuevas unidades que queman basuras, se combina un desecador por pulverización y un filtro de tela.

REFERENCIAS CAP XXXIII.- ELIMINACIÓN DE PARTÍCULAS

H.J. White.- INDUSTRIAL ELECTROSTATIC PRECIPITATION.- Addison-Wesley, Reading .- Massachusetts, 1963

F.A. Bagwell, L.F. Cox , E.A. Pirsh.- DESIGN AND OPERATING EXPERIENCE WITH A FILTER-HOUSE INSTALLED ON AN OIL-FIRED BOILER.- Air Pollution Control Association.- June 1968

C.E. Billings.- HANDBOOK OF FABRIC FILTER TECHNOLOGY.- GCA Corporation .- Bedford, Massachusetts, December 1970

R.E. Bickelhaupt.- A TECHNIQUE FOR PREDICTING FLYASH RESISTIVITY.- Report EPA-600/7-79-204 .- U.S. Environmental Protection Agency.- Research Triangle Park, North Carolina, July 1979

J. Katz.- THE ART OF ELECTROSTATIC PRECIPITATOR.- Precipitator Technology, Inc..- Munhall, Pennsylvania, 1981

W.R. Lane, A. Koshla.- COMPARISON OF BAGHOUSE AND ELECTROSTATIC PRECIPITATOR FINE PARTICULATE, TRACE ELEMENT AND TOTAL EMISSIONS.- ASME-IEEE Joint Power Conference.- Indianapolis, Indiana, September 1983

M.G. Faulkner, J.L. DuBand.- A MATHEMATICAL MODEL OF ELECTROSTATIC PRECIPITATION (Rev. 3).- Report EPA-600/7-84-069 .- U.S. Environmental Protection Agency.- Research Triangle Park, North Carolina, July 1984

J.C. Bustard.- FABRIC FILTRES FOR THE ELECTRIC UTILITY INDUSTRY.- (Vol. 1) Report CS-5161 .- Electric Power Research Institute .- Palo Alto, California, 1988

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

M.A. Alvin.- PERFORMANCE AND STABILITY OF POROUS CERAMIC CANDLE FILTERS DURING PFBC OPERATION.- Materials at High Temperatures, 1997, 14 (3), 355-364.

ELECTROSTATIC PRECIPITATOR GAS FLOW MODEL STUDIES.- Publication No. EP-7, Institute of Clean Air Companies, Washington, D.C., Revised 1997.

R.C. Staehle, R.J.Triscori, K.S. Kumar.- THE PAST, PRESENT AND FUTURE OF WET ELECTROSTATIC PRECIPITATORS IN POWER PLANT APPLICATIONS.- Paper 207 presented to the Combined Power Plant Pollution Control Mega Symposium, Washington, D.C., May, 2003.