XXIV.- ELEMENTOS AUXILIARES DE CALDERA

pfernandezdiez.es

Sopladores	*897*
Medios de limpieza	*899*
Presión máxima de impacto y velocidad del chorro	*900*
Tipos de sopladores: de posición fija y retráctiles de carrera corta	*900*
Retráctil de carrera larga	*901*
De lanza de agua	*902*
Para limpieza de calentadores de aire	*903*
Aplicación a diversos tipos de calderas	*905*
Calderas que queman carbón pulverizado	*905*
Calderas que queman aceite, calderas recuperadoras de calor de procesos y calderas que queman basuras	*906*
Calderas de lecho fluidificado	*907*
Medios de control	*907*
Válvulas de seguridad y desahogo	*908*
Sistemas de manipulación de ceniza	*910*
Sistemas de escoria, ceniceros llenos de agua	*911*
Transportador de cadena sumergida	*912*
Sistemas de piritas	*913*
Sistema de ceniza del paso de convección de la caldera	*913*
Sistemas de manipulación de ceniza seca en polvo	*914*
Transporte neumático	*914*
Presurizado y en fase densa	*914*
Por vacío y colector de cenizas primario	*917*
Equipos de desempolvado	*918*
Transporte mecánico	*919*
Transportadores de cadena, de masas, de tornillo y elevadores de cangilones	*919*
Almacenamiento de ceniza y descarga	*919*
Cortatiros de aire y de humos	*920*
Cortatiros de persianas, de compuerta y de lenteja	*920*
Chimeneas, pérdida de tiro	*922*
Efecto chimenea; ejemplo de cálculo	*923*
Chimeneas metálicas y de hormigón, pérdidas por flujo y dimensiones	*927*
Agentes externos que afectan a la altura de la chimenea; mantenimiento	*931*
Ventiladores; potencia	*932*
Curvas características de funcionamiento	*934*
Características aerodinámicas	*935*
Control de ventiladores centrífugos a la salida, (por cortatiros y por velocidad variable)	*937*
Accionamiento de ventiladores	*938*
Ventiladores de tiro forzado y de tiro inducido	*939*
Ventiladores de recirculación de humos, y de aire primario	*940*
Ventiladores axiales	*941*
Características operativas y de control	*941*
Funcionamiento de ventiladores axiales en paralelo y zona de inestabilidad	*942*
Ruido	*946*
Sistema atemperador de condensación	*946*
Referencias	*949*

Para que un sistema de generación de vapor funcione eficientemente no sólo precisa de los elementos que se integran en la unidad principal generadora de vapor, sino de otros componentes auxiliares de caldera que son imprescindibles y que merecen especial atención, como:

- Los sopladores que se emplean para limpiar las superficies de transferencia de calor, con lo que se consigue que la caldera opere a su máxima eficiencia

- Las válvulas de seguridad que son componentes críticos para garantizar una operación segura de la caldera

- El sistema de manipulación de ceniza, que retira y acondiciona la ceniza de la combustión

- Los cortatiros, chimeneas y ventiladores, que proporcionan y controlan los flujos de aire y de humos que se requieren para una buena combustión

- El condensador que se utiliza para proveer al atemperador atomizador de agua de alta pureza, en aquellas calderas industriales en las que no exista agua en ese estado

XXIV.1.- SOPLADORES

Los sopladores son dispositivos mecánicos utilizados durante el funcionamiento, para la limpieza de las deposiciones de ceniza del lado de humos de la caldera (escoria y polvo), de forma periódica.

Para retirar las deposiciones y mantener la eficiencia de la transferencia de calor, al tiempo que previenen las obstrucciones de los pasos de humos, estos aparatos proyectan a través de sus toberas, un medio de limpieza contra la ceniza acumulada en las superficies de transferencia de calor.

El funcionamiento de un soplador en una determinada aplicación varía con:

- Su localización en la caldera

- La cobertura de limpieza requerida

- La severidad de la acumulación de las deposiciones

Un soplador se compone de:

- Un elemento tubular o lanza, que se introduce en el interior de la caldera y que transporta el medio de limpieza

- Unas toberas en el extremo de la lanza, para acelerar y dirigir el medio de limpieza

- Un sistema mecánico para introducir o girar la lanza

- Un sistema de control

Medios de limpieza.- Los utilizados en sopladores son
- *Vapor saturado*
- *Vapor sobrecalentado*
- *Aire comprimido*
- *Agua*
- *Mezclas de agua-vapor o de agua-aire*

En la mayoría de los casos se prefiere el vapor sobrecalentado, porque la experiencia indica que la humedad del vapor saturado puede erosionar las superficies de los tubos. Un kg de vapor sobrecalentado, comparado con un kg de vapor saturado, tiene un mayor potencial de limpieza, debido a la mayor velocidad a través de las toberas del soplador, que compensa la desventaja de la pérdida energética del chorro debido a la menor densidad.

En calderas grandes se utiliza aire comprimido con compresores:

- *Alternativos de alta presión, entre* *350÷500 psig* / *24,1÷34,5 bar*
- *Centrífugos de elevadas relaciones de flujo, a presiones de* *150÷225 psig* / *10,3÷15,5 bar*

Dependiendo de la deposición a retirar y del tipo de soplador, las presiones normales de toberas para sopladores oscilan:

- *Para el vapor entre* *70÷350 psig* / *4,8÷24,1 bar*

- *Para el aire entre* *60÷220 psig* / *4,1÷15,2 bar*

La presión en las tuberías del sistema se controla mediante válvulas y sistemas reductores de presión insertos en las mismas.

El vapor para el soplado se puede tomar de colectores
- *Intermedios de sobrecalentador*
- *De salida del*
  - *sobrecalentador secundario*
  - *recalentador*
- *De entrada del recalentado frío*

El agua, con presiones de entrada al soplador de *150÷300 psig* / *10,3÷20,7 bar*, se puede utilizar como medio de limpieza, sola o mezclada con vapor o aire; también se puede inyectar en los sopladores para refrigerar la lanza del soplador, cuando está expuesta a altas temperaturas en zonas de humos.

La elección del medio de limpieza
- *aire*
- *vapor*

, se basa en el análisis económico de los costes de operación y en cuestiones técnicas afectados por las siguientes diferencias:

- *Los sopladores de vapor se diseñan para permitir:*
  - *el calentamiento de las tuberías del sistema*
  - *el drenaje del condensado presente en las tuberías*
  - *la protección contra heladas, corrosión y erosión*

- Los sopladores de vapor pueden requerir un coste de mantenimiento mayor que los sopladores de aire comprimido

- El incremento de la capacidad de un sistema de vapor es fácil de obtener, porque el suministro de vapor desde la caldera está limitado sólo por la presión de las válvulas reductoras

- Los sistemas de aire necesitan un flujo mayor para refrigerar los sopladores retráctiles de largo recorrido, debido a las mejores características de transferencia de calor que tiene el vapor

En algunos carbones bajos en S y a elevadas temperaturas, las deposiciones tienen un estado plástico o están fuertemente adheridas a los tubos, no siendo efectivos ni el vapor, ni el aire; en estos casos, se utiliza agua para retirar la deposición.

Presión máxima de impacto.- Es una medida de la energía proyectada sobre la deposición, a una distancia dada de la tobera del soplador, y constituye un parámetro fundamental que depende del tamaño y configuración de la tobera, y de la presión, temperatura y calidad del vapor.

Velocidad del chorro.- Depende de la
- *velocidad de rotación de la tobera*
- *velocidad de traslación*
- *distancia a la superficie termointercambiadora*

TIPOS DE SOPLADORES

Soplador de posición fija.- Es un soplador no retráctil, Fig XXIV.1, rotativo o no, utilizado para retirar el polvo o ceniza ligeramente adherida a los bancos tubulares o a los conductos de humos; es más económico de instalar y funciona mejor que el soplador retráctil.

Sólo se utiliza en zonas de baja temperatura y en los casos en que no se requiera la elevada energía propia de grandes toberas. El tamaño de las toberas es del orden de 0,3125" (8 mm).



Fig XXIV.1.- Soplador de posición fija G9B

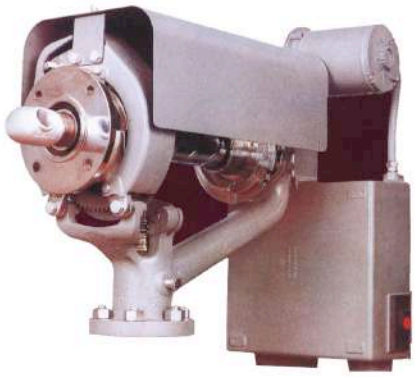


Fig XXIV.2.- Soplador rotativo de pared retráctil de carrera corta IR-3D

Soplador retráctil de carrera corta.- Una unidad retráctil de carrera corta que se utiliza para la limpieza de los tubos de la pared de agua del hogar, se presenta en la Fig XXIV.2. La posi-

ción de la tobera, cuando el soplador está completamente extendido, se encuentra a 1,5" (38 mm) de la cara de los tubos.

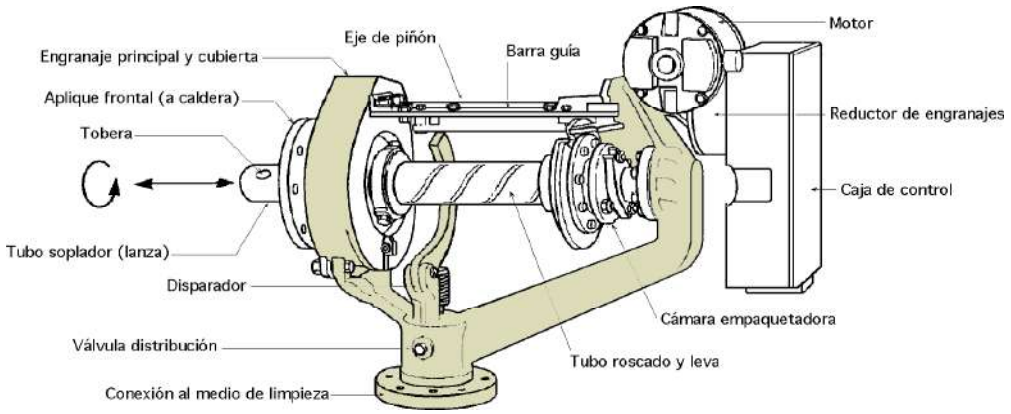


Fig XXIV.3.- Soplador rotativo de pared retráctil de carrera corta IR-3D

El mejora de la limpieza depende de la: $\begin{cases} \text{- presión y tipo de tobera} \\ \text{- naturaleza de la deposición} \\ \text{- superficie a la que está adherida} \end{cases}$

La zona de limpieza efectiva está en un contorno ovalado, cuyo eje vertical es de 12 ft (3,66 m), y el horizontal de 10 ft (3,05 m), a la presión de $\begin{cases} 150\ psig\ (10,3\ bar)\ para\ el\ aire \\ 200\ psig\ (13,8\ bar)\ para\ el\ vapor\ saturado \end{cases}$.

El tamaño de la tobera es de ≈ 1".

Soplador retráctil de carrera larga.- Se utiliza en calderas de recuperación de la industrial química, Fig XXIV.4. Para la limpieza de bancos tubulares, el extremo de la lanza tubular lleva un juego de toberas según el medio de limpieza, que se extiende hasta el interior de la cavidad de la caldera; este tipo de soplador tiene un recorrido entre $\begin{cases} 2\ ft \div 56\ ft \\ 0,6\ m \div 17,1\ m \end{cases}$

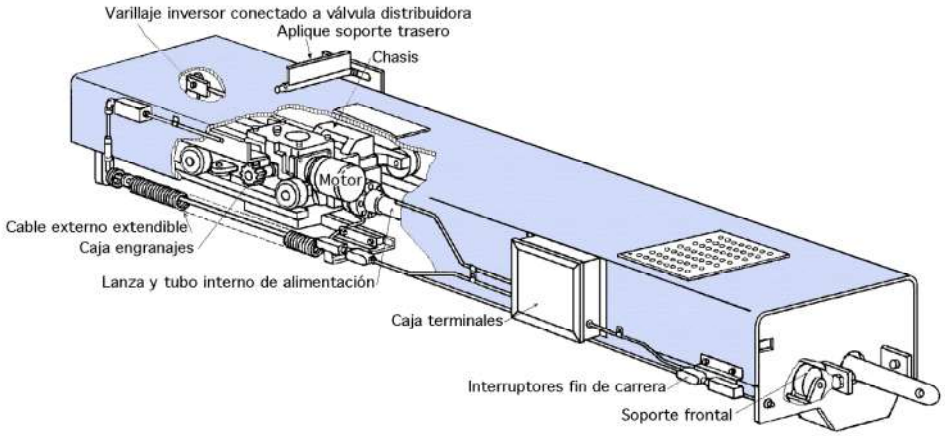


Fig XXIV.4.- Soplador retráctil de carrera larga IK-SD

Los sopladores retráctiles de carrera larga se aplican en cavidades horizontales y verticales, y utilizan aire o vapor como medio de limpieza. Cuando las deposiciones son difíciles de retirar se em-

plean toberas especiales que usan agua como medio de limpieza. La velocidad de traslación de la lanza cuando se introduce en la caldera es de $\begin{cases} 35 \div 200\ (") / min \\ 0{,}89 \div 5{,}1\ m / minuto \end{cases}$

El paso de la configuración helicoidal debida a las velocidades de traslación y de rotación, es normalmente de $\begin{cases} 4", 5", 6", 8" \\ 102, 127, 152, 203\ mm \end{cases}$, dependiendo de los detalles de diseño y de la longitud del tubo de la lanza.

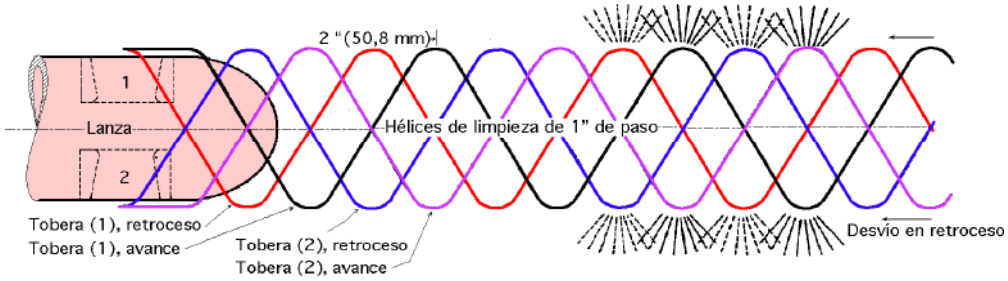


Fig XXIV.5.- Recorrido de limpieza de la tobera

Para carreras largas, hasta de 45 ft (13,7 m), la lanza distancia los pasos de hélice de los chorros del medio de limpieza, en su carrera de regreso, para limpiar un área mayor. En cada ciclo de soplado, el paso helicoidal fijo se puede desplazar ligeramente para que el chorro del medio de limpieza impacte en una posición diferente. Las presiones utilizadas en un soplador retráctil de carrera larga, varían para el aire de $\begin{cases} 60 \div 180\ psig \\ 4{,}1 \div 12{,}4\ bar \end{cases}$, y para el vapor de $\begin{cases} 70 \div 350\ psig \\ 4{,}8 \div 24{,}1\ bar \end{cases}$, dependiendo de:

- *El medio de soplado*
- *La dimensión de la tobera que para el* $\begin{cases} aire\ es\ de\ 0{,}625"\ (15{,}9\ mm) \\ vapor\ es\ de\ 0{,}875" \div 1" = (22{,}2 \div 25{,}4\ mm) \end{cases}$
- *El área de aplicación*
- *Las características de la deposición*

Los valores de la presión del vapor son superiores a los del aire porque el vapor se utiliza para las deposiciones más difíciles de limpiar, como las que se producen en la combustión de lignito, o de carbón subbituminoso y en las plantas de fabricación de pulpa de papel.

Cuando las lanzas están expuestas a humos a alta temperatura, se requiere un flujo adicional parra refrigerar la lanza.

Soplador de lanza de agua.- La lanza de agua con velocidad variable se utiliza en las superficies de las paredes del hogar, Fig XXIV.6, cuando las deposiciones de escoria no se pueden retirar por los sopladores de pared convencionales, de aire o de vapor.

Se utilizan en instalaciones que queman lignitos o carbones subbituminosos, que tienen cenizas de alta reflectividad.

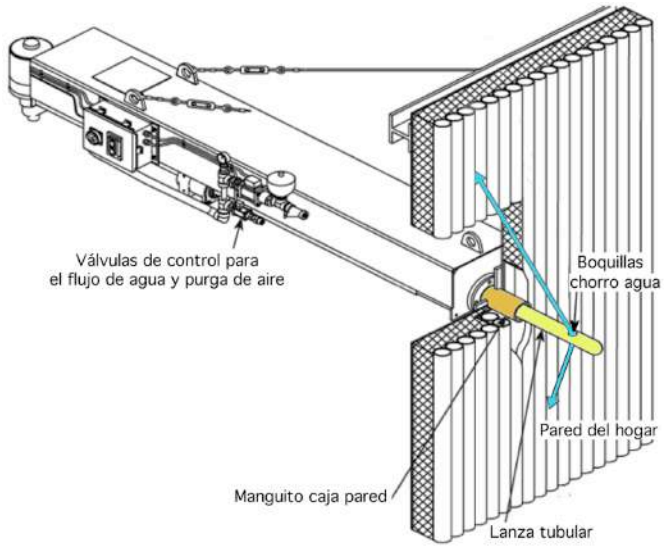


Fig XXIV.6.- Soplador de lanza de agua

Las velocidades de desplazamiento y de rotación varían durante el ciclo de limpieza para obtener un tiempo uniforme de reposo (velocidad de progresión del chorro), con el fin de optimizar el uso del agua en la limpieza y limitar el choque térmico.

El agua se emplea únicamente durante la etapa de entrada (inserción) de la lanza, para evitar el choque térmico sobre los tubos limpios en la etapa de salida (retracción) de la misma.

Sopladores para limpieza de calentadores de aire.- Los calentadores de aire tubulares se limpian con un soplador especial de carrera larga, no rotativo, que lleva un elemento multitobera soportado interiormente, similar a las toberas utilizadas en los sopladores rotativos de posición fija. Estos sopladores se identifican como sopladores IK de línea recta o sopladores rastrillo. Se ubican en el lado de salida de humos del calentador de aire, con las toberas posicionadas para que soplen dentro de los extremos abiertos de los tubos. Este elemento en T se mueve adelante y atrás, paralelamente a la cara de la placa tubular, y tiene entre uno y tres elementos en paralelo, que están alimentados por la lanza móvil. El número de toberas por elemento se determina por la disposición de los tubos del calentador de aire, y por el área de las toberas de los elementos que no debe exceder la capacidad del tubo de la lanza para proveer el fluido de soplado que puede ser aire comprimido o vapor.



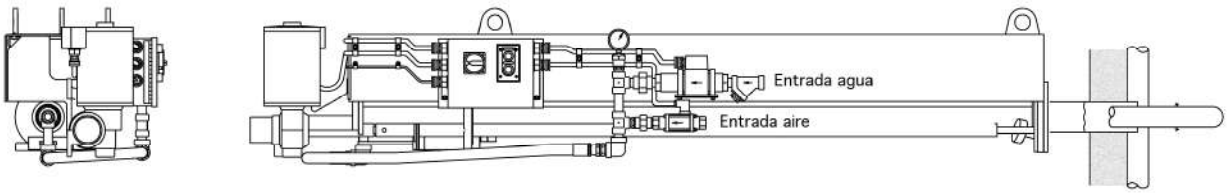


Fig XXIV.7.- Soplador de lanza de agua con velocidad variable IK-4M-WL

Para reducir la humedad que entra en el lado frío de los tubos del calentador de aire, se utiliza vapor sobrecalentado a una presión en tobera de 125 psig (8,6 bar), y entalpía 1377 Btu/lb (3203 kJ/kg). El medio de soplado no penetra en la longitud total del tubo, aunque mantiene abierta la sección fría de los tubos. Para la limpieza de toda la longitud del tubo es necesario un lavado con agua, con la instalación fuera de servicio.



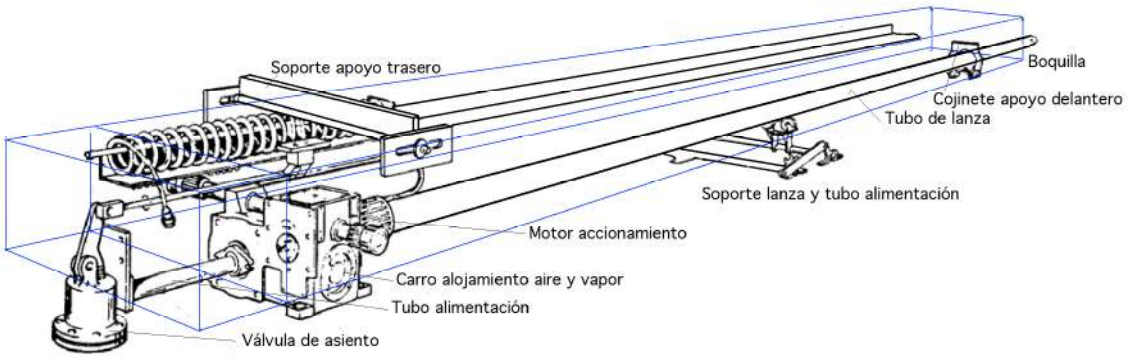
Fig XXIV.8.- Sopladores para limpieza de calentadores de aire

El calentador de aire regenerativo se limpia con una lanza desplazable, soportada internamente, y dotada de toberas especiales. Este mecanismo se acciona lentamente a través de las cestas del calentador mediante un soplador de carrera larga, no giratorio, de forma que toda la superficie se limpia conforme giran las cestas del calentador; como medio de soplado se puede utilizar aire o vapor y tiene que alcanzar una presión máxima en tobera de 200 psig (13,8 bar).

Si las temperaturas del metal caen por debajo del punto de rocío, las cestas se pueden taponar y corroer, por lo que el suministro de vapor debe tener, al menos, una temperatura de 300ºF (167ºC), lo que requiere de una fuente independiente de vapor para la limpieza del calentador de aire.

Diseños especiales.- Para determinadas aplicaciones se han desarrollado otros equipos de soplado como:

- Sopladores oscilantes, en los que para concentrar la energía del chorro en un área selectiva las toberas giran un arco limitado



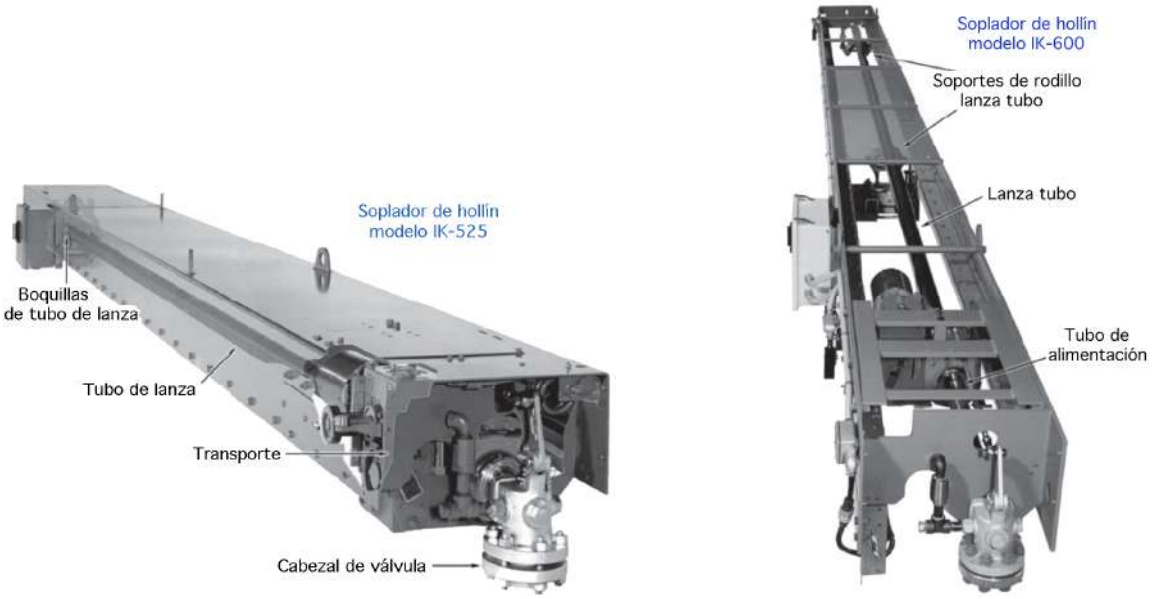


Fig XXIV.9.- Sopladores de hollín IK-525 y 600

- Sopladores de polvo que se encuentran en los conductos de humos y aire

- Sopladores para los recalentadores del sistema de desulfuración de humos

- Limpiadores ventiladores, montados sobre sopladores retráctiles verticales que permiten su utilización en ubicaciones de difícil acceso

APLICACIÓN A LOS DIVERSOS TIPOS DE CALDERAS

Calderas que queman carbón pulverizado.- En la Fig XXIV.10 se muestra la sección transversal de una caldera de servicio público que quema carbón pulverizado, en la que se indican las ubicaciones de los diversos sopladores.

La escoria y las deposiciones de ceniza en polvo sobre las paredes del hogar se retiran mediante sopladores de pared IR de carrera corta, cuya ubicación se determina por el carbón que se esté quemando.

Para un *carbón bituminoso*, la separación vertical de las filas de sopladores es de $\begin{cases} 10 \div 14\ ft \\ 3{,}0 \div 4{,}3\ m \end{cases}$, con unos espaciados laterales entre $\begin{cases} 7 \div 10\ ft \\ 2{,}1 \div 3\ m \end{cases}$

Para un *lignito de escorificación severa*, la separación vertical de las filas de sopladores se reduce a 10 ft (3 m), siendo el espaciado horizontal, igual al anterior, entre $\begin{cases} 7 \div 10\ ft \\ 2{,}1 \div 3\ m \end{cases}$

Para algunos lignitos y carbones subbituminosos con $\begin{cases} - \text{ escorificación severa} \\ - \text{ deposiciones de ceniza reflectiva} \end{cases}$, se puede instalar el soplador IK de lanza de agua, en lugar del soplador de pared IR.

Las lanzas de agua han demostrado ser unidades de limpieza efectivas. Las secciones colgadas

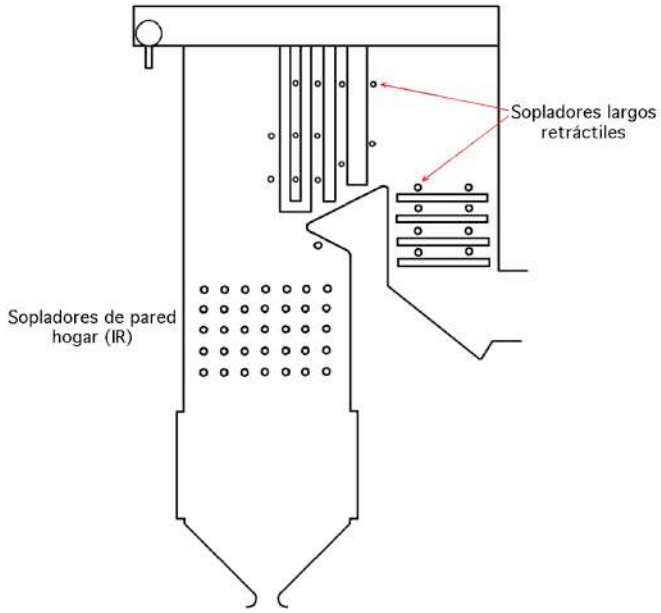


Fig XXIV.10

Ubicación de sopladores en una gran caldera que quema carbón

del sobrecalentador y del recalentador, así como la sección de convección de tubos horizontales, se limpian generalmente con sopladores retráctiles de carrera larga.

El espaciado vertical depende de la temperatura de los humos y de las características de la ceniza del carbón, y suele estar entre $\begin{cases} 12 \div 14\ ft \\ 3{,}7 \div 4{,}3\ m \end{cases}$

Calderas que queman aceite.- No utilizan sopladores IR de pared, porque la ceniza del aceite tiene una temperatura de ablandamiento muy baja y, por lo tanto, las áreas del hogar están recorridas normalmente por ceniza fundida.

Los sopladores retráctiles IK de carrera larga, no se usan en zonas con temperaturas de humos superiores a los 1750ºF (954ºC), a no ser que se emplee un aditivo químico (óxido de aluminio, carbonato de calcio y magnesio, óxido de magnesio) para elevar la temperatura de deformación inicial de la ceniza y que se utilizan siempre con fuelóleos que tengan altos contenidos de Va.

El grado de limpieza del chorro de un soplador en una caldera que queme sólo aceite, es el mismo que el de las calderas que queman carbones con alto ensuciamiento.

Calderas recuperadoras de calor de procesos.- En estas calderas no se utilizan sopladores de pared IR, ya que son ineficaces para retirar las deposiciones de ceniza con baja temperatura de deformación inicial, pero sí los sopladores retráctiles que utilizan vapor como medio de soplado que se usan en el sobrecalentador, en el banco de caldera y en el economizador.

Calderas que queman basuras.- Pueden ser de dos tipos, las que queman:

- *Basuras a granel*
- *Combustibles derivados de residuos*

Para mantener despejados el hogar y el paso de convección y prevenir cualquier obstrucción y excesivas pérdidas de tiro se utilizan sopladores de vapor. La frecuencia de operación se tiene que vigilar cuidadosamente; la superficie puede quedar demasiado limpia y eso puede plantear problemas, ya que se facilita la corrosión de los tubos por los constituyentes de los humos (cloruros), y la erosión debida a la ceniza volante en polvo.

Los sopladores retráctiles de carrera larga se utilizan para retirar deposiciones de ceniza en el sobrecalentador y banco de caldera; en el economizador se pueden instalar sopladores retráctiles de

carrera larga o sopladores rotativos de ubicación fija.

Los sopladores retráctiles están espaciados en sentido vertical entre $\begin{cases} 8 \div 10\ ft \\ 2{,}4 \div 3{,}0\ m \end{cases}$ y suelen tener unos valores de flujo de limpieza comparable a la de los que se utilizan en calderas que queman carbón bituminoso.

Calderas de lecho fluidificado.- En estas calderas, las deposiciones de ceniza sobre las superficies tubulares son ligeras y fáciles de retirar; no obstante, hay situaciones en las que las acumulaciones crecen en superficies de tubos horizontales, que pueden reducir la transferencia de calor y provocar obstrucciones en los pasos de humos. En estos casos se necesitan sopladores retráctiles de carrera larga para vapor, o sopladores rotativos de posición fija.

MEDIOS DE CONTROL.- Los sistemas de control de sopladores tienen características constructivas y enclavamientos, para proteger el equipo mecánico y garantizar el funcionamiento, como:

- Alarmas y enclavamientos de presión del medio de soplado, para prevenir que el equipo pueda funcionar sin éste en condiciones adecuadas

- Alarmas de flujo alto / bajo del medio de soplado para advertir del mal funcionamiento del equipo

- Alarma de parada de motores

- Alarma del tiempo transcurrido para garantizar una adecuada operación del equipo

- Enclavamientos generales de sopladores para impedir que se produzca una demanda instantánea del medio de soplado a la fuente de suministro

- Enclavamientos del fallo del medio de soplado para proteger las lanzas de carrera larga en sopladores retráctiles

- Protección y alarma de sobrecarga de motores, para indicar su mal funcionamiento

- Protección en el caso de un disparo de caldera

Junto a los paquetes informáticos, se han aplicado técnicas de autómatas programables a los sopladores, en los que la operación y secuencia de sopladores selectivos se basan en la medida y cálculo de las condiciones de limpieza de las superficies individuales termointercambiadoras de la caldera, permitiendo un uso más económico del medio y de la energía para la limpieza.

Sistemas ópticos vigilan la limpieza de las superficies mediante técnicas de imágenes por infrarrojos que miden la emisividad de las paredes del hogar, con sondas conectadas a un dispositivo de control, obteniendo:

- Imágenes de la superficie interior del hogar de la caldera

- Tendencias de la limpieza de las superficies de transferencia de calor

- Una guía para el operador de dónde y cuándo hay que limpiar

XXIV.2.- VÁLVULAS DE SEGURIDAD Y DESAHOGO

La válvula más crítica en una caldera es la de seguridad; su misión es limitar la presión interna de la caldera en un punto que esté dentro de un nivel seguro de operación; para ello se instalan una o más válvulas de seguridad en el sistema de partes a presión de la caldera, sin que se puedan aislar del recinto que ocupa el vapor.

Las válvulas tienen que estar taradas para que se activen a las presiones aceptadas para el punto de ajuste, y para que se cierren cuando la presión caiga hasta una determinado nivel. Cuando el juego de válvulas de seguridad se abre, tiene que manejar todo el caudal de vapor que la caldera es capaz de generar, sin sobrepasar la presión especificada.

El Código (ASME) de Calderas y Recipientes a presión, en su Sección I, señala los requisitos mínimos para las válvulas de $\begin{cases} seguridad \\ desahogo \end{cases}$, aplicadas en nuevas calderas energéticas estacionarias de tubos de agua, distinguiendo válvulas de $\begin{cases} - \textit{ seguridad (safety valve), que se usan para gas o vapor} \\ - \textit{ desahogo (relief valve), que se usan para líquidos} \\ - \textit{ seguridad y desahogo, aptas para gases o líquidos} \end{cases}$

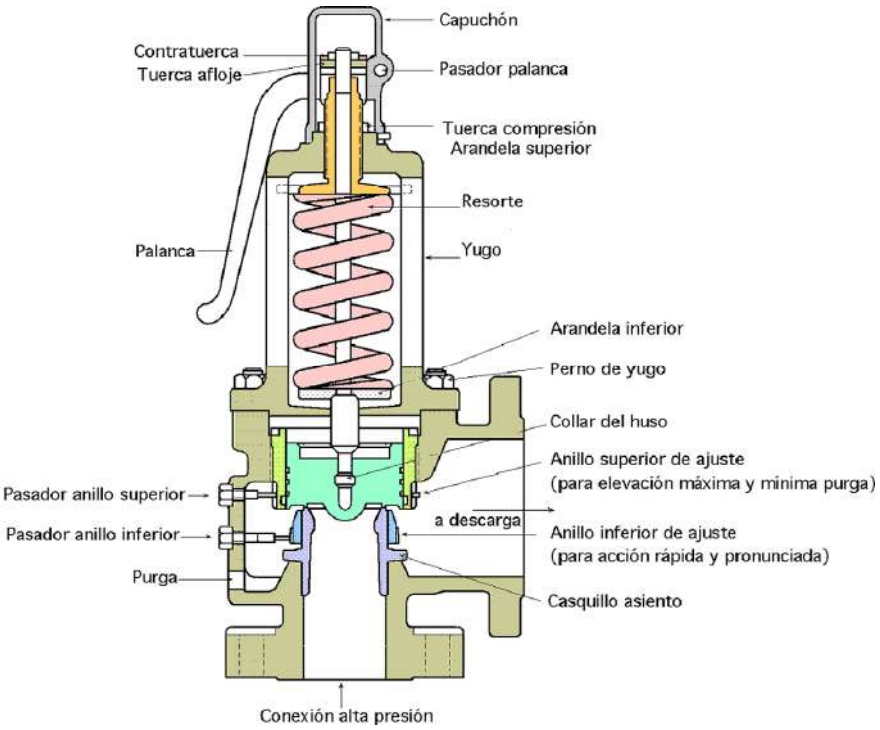


Fig XXIV.11.- Válvula de seguridad para vapor, cargada por resorte

- Esta válvula se instala independientemente y ha de $\begin{cases} - \textit{ cerrar} \\ - \textit{ sellar} \end{cases}$ *las partes a presión sin que intervenga ninguna otra válvula en el lado de descarga*

- La abertura de la tobera de entrada no debe ser menor que el área de entrada a la válvula, evitándose todos los accesorios de tubería que no se necesiten

- Estas válvulas se diseñan para:

- Una amplia apertura inicial por encima del punto de ajuste de presión estática

- La máxima capacidad de descarga con una presión superior al 103% de la del punto de ajuste

La Fig XXIV.12 muestra una válvula de seguridad accionada energéticamente; estas válvulas se abren completamente a la presión del punto de ajuste, mediante un controlador cuya fuente energética puede ser aire, electricidad, fluido hidráulico o vapor.

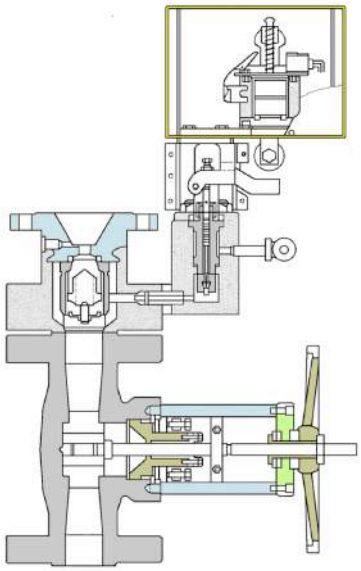


Fig XXIV.12.- Válvula de seguridad de presión accionada energéticamente

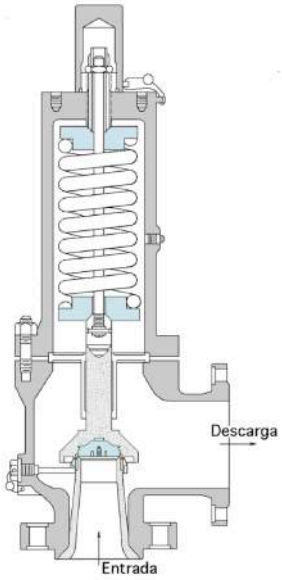


Fig XXIV.13.- Válvula de desahogo de presión accionada por resorte

La Fig XXIV.13 muestra una válvula de desahogo cargada por resorte, que opera con líquidos, diseñada para una pequeña apertura inicial a la presión del punto de ajuste, seguida de más apertura cuando la presión supera la del ajuste para prevenir una nueva subida de presión.

- Las válvulas motorizadas pueden computar capacidades del 10÷30% de la total requerida por el Código ASME para válvulas de seguridad

- Las válvulas de desahogo motorizadas deben tener comunicación directa con la caldera; su control y accionamiento están integrados en la red de servicios esenciales de la planta

- Para el mantenimiento de la válvula de desahogo motorizada se instala una válvula especial de retirada de servicio

Con estos requisitos cumplimentados, la capacidad restante exigida a las válvulas de desahogo se cubre con válvulas cargadas con resorte, taradas al 117% de la presión principal, que se debe indicar en la placa de la caldera.

Las válvulas del sobrecalentador son parte del conjunto de válvulas de desahogo motorizadas; su capacidad es el 10% de la presión máxima de vaporización de la caldera, 6 lb/h.ft^2 (0,008 kg/s.m^2).

La purga de las válvulas cargadas por resorte no se debe producir a menos del 8%, ni a más del 10% de su presión de ajuste.

XXIV.3.- SISTEMAS DE MANIPULACIÓN DE CENIZA

La ceniza y residuos de la combustión de combustibles sólidos se descargan en diferentes puntos del flujo de humos de la caldera, Fig XXIV.14:

- Parte inferior del hogar

- Paso posterior de caldera

- Calentador de aire

- Aparato de recogida de partículas de ceniza volante en polvo

- Molinos de pulverización en los que se recoge una pequeña cantidad de piritas en la ceniza del combustible

El punto en el que las partículas dejan de ser arrastradas por el flujo de humos depende del tamaño, densidad, velocidad y disposición física de las partículas de ceniza en dicho flujo. La ceniza recogida en la parte baja del hogar (a veces como escoria), que en calderas de carbón pulverizado y en hogares mecánicos puede llegar hasta una temperatura de 2400ºF (1316ºC), se enfría en agua conforme sale del hogar, hasta una temperatura que sea aceptable para el equipo de manipulación de la ceniza.

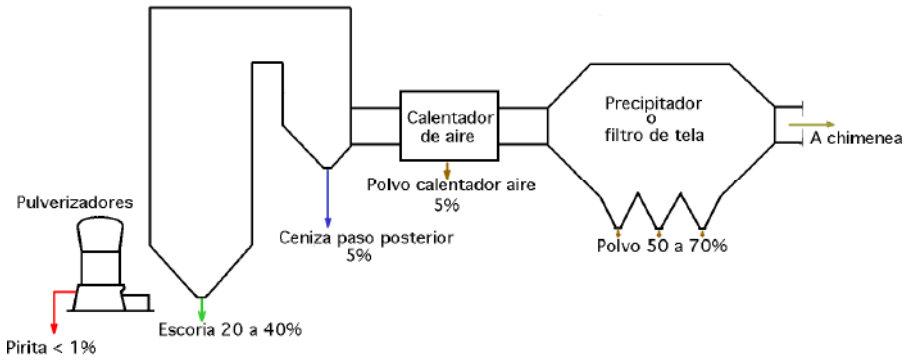


Fig XXIV.14.- Descargas de ceniza en caldera quemando carbón y cantidades porcentuales aproximadas

Las descargas de ceniza volante en polvo se producen a temperaturas bastante más bajas, por lo que no requieren refrigeración; estas cenizas se transportan hasta unos silos, para su almacenamiento y posterior destino final.

Los sistemas que manipulan y transportan cenizas se diseñan teniendo en cuenta las características específicas de cada uno de los flujos de ceniza, que incluyen:

- El tamaño de las partículas

- Su velocidad, temperatura, composición química y propiedades superficiales

El sistema de manipulación de cada flujo de ceniza se dimensiona para más del 100% de la ceniza esperada y producida por el combustible de diseño, para asumir la posible combustión de combustibles con más ceniza.

SISTEMAS DE ESCORIA.- Los sistemas de manipulación de la escoria del fondo del cenicero se pueden clasificar en dos grandes grupos { *- intermitentes* ; *- continuos*

*- El sistema de cenicero lleno de agua es **intermitente**, con períodos fuera de servicio (la escoria se almacena hasta varias horas antes de ser retirada), y en servicio.*

*- El transportador de cadena sumergido que retira la escoria a medida que se descarga de la caldera es **continuo**.*

a) Ceniceros llenos de agua.- De tipo intermitente, se pueden utilizar con calderas de fondo seco (ceniza sólida); existen variantes que se utilizan en { *- calderas de carbón pulverizado* ; *- hogares* { *- ciclón* ; *- mecánicos*

El sistema se compone de una o más tolvas (ceniceros) llenas de agua, ubicadas bajo la garganta que se configura en la parte inferior del hogar, Fig XXIV.15:

- La cota de la garganta inferior del hogar está a 25 ft (7,6 m) sobre el nivel del suelo de la planta, para dejar espacio suficiente para los ceniceros de recogida de la escoria

- La escoria del fondo cae dentro del cenicero lleno de agua, en el que el agua la apaga

- En la parte superior del cenicero se coloca una artesa de sellado hidráulico, con las placas de sellado colgadas de la parte inferior, sumergidas en el agua de la artesa, para mantener un cierre estanco a gases

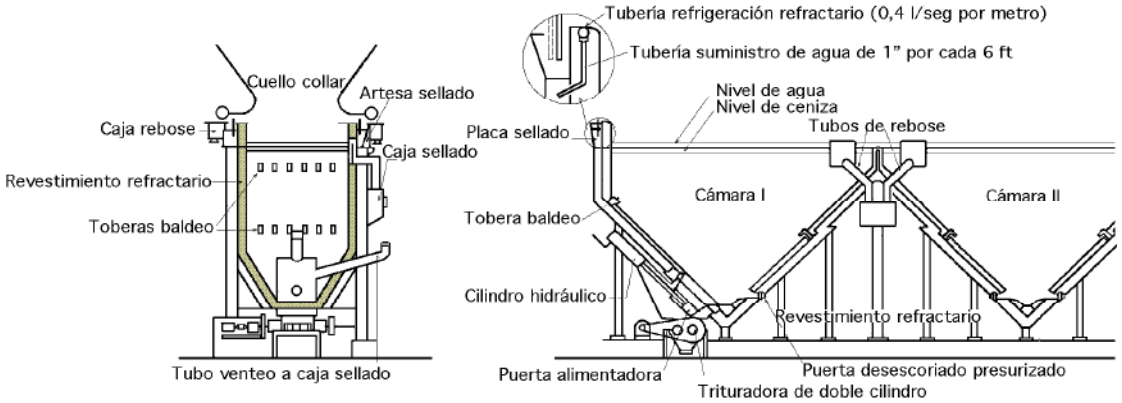


Fig XXIV.15.- Cenicero lleno de agua

Cuando la tolva cenicero alcanza su capacidad de almacenamiento, la escoria se evacúa del mismo, pasando a través de un triturador que reduce la ceniza a tamaños aceptables para su procesado y retirada aguas abajo.

El agua de transporte pasa a través de bombas de $\begin{cases} \text{- } chorro\ (eyector\ de\ agua\ de\ baja\ eficiencia) \\ \text{- } succión\ resistentes\ a\ la\ abrasión \end{cases}$ para sacar de cada cenicero la mezcla de agua y escoria triturada, que se conduce a través de tuberías resistentes a la abrasión, hasta una zona de vertido lejos de la caldera; la escoria se puede descargar en extensas balsas utilizando el agua como medio de transporte desde el cenicero.

Cuando las balsas de ceniza $\begin{cases} \text{- } no\ son\ factibles \\ \text{- } o\ se\ requiere\ una\ escoria\ sin\ agua \end{cases}$, la mezcla *ceniza-agua* se descarga en grandes sistemas deshidratantes.

b) Transportador de cadena sumergida.- De tipo continuo, se puede aplicar a los mismos diseños que el sistema de cenicero lleno de agua, Fig XXIV.16 y 17; es un transportador mecánico que cuenta con una artesa superior llena de agua y otra artesa inferior seca; uno de los extremos del transportador tiene una inclinación que emerge del agua, lo que facilita la separación del agua y de la ceniza. Las placas de sellado sujetas a la parte inferior del hogar, se sumergen en el agua de la artesa superior para mantener la estanqueidad a gases.

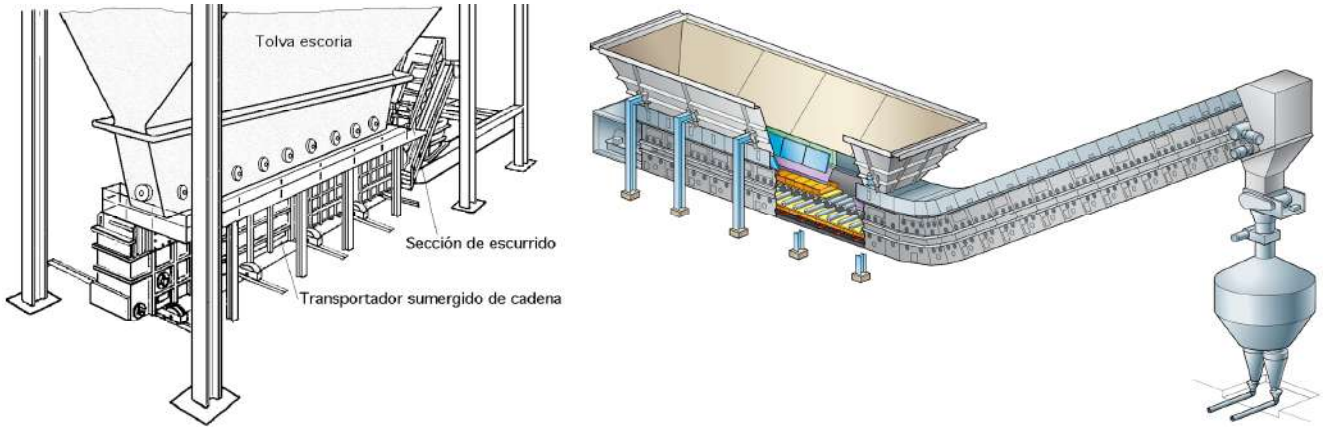


Fig XXIV.16.- Transportador sumergido de cadena

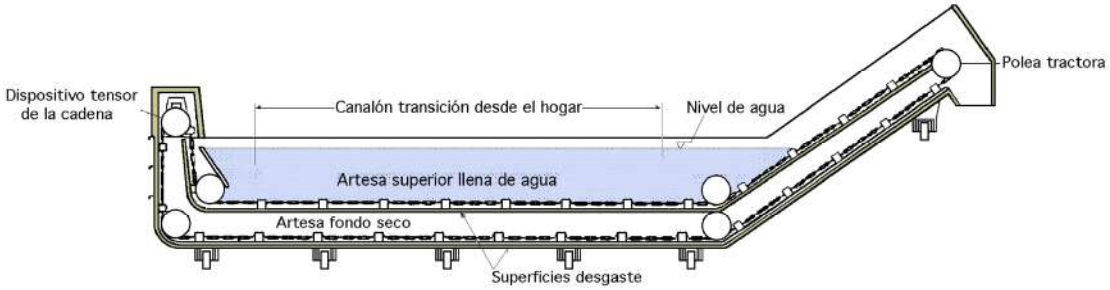


Fig XXIV.17.- Transportador de cadena sumergida para ceniza inferior (escoria)

La escoria de la parte inferior del hogar cae a la artesa superior llena de agua y se transporta lentamente por los eslabones arrastrados por dos cadenas. Para mantener la temperatura del agua en la artesa, muchas plantas emplean un sistema de refrigeración en circuito cerrado. La velocidad de la cadena de transporte es lenta para minimizar su desgaste y maximizar el agua escurrida.

El contenido en humedad de la ceniza escurrida es del orden del 30% en peso, cifra que varía según el destino y consistencia de la misma.

La ceniza sin agua procedente del transportador se manipula y procesa de varias formas, según sean los requerimientos de la planta:

- Si hay espacio disponible en la descarga del transportador, la escoria se deposita en una balsa para su transporte posterior

- Si no existe la posibilidad de disponer de este espacio, se pueden usar cintas transportadoras para alejar la escoria hasta el punto de vertido adecuado

El agua de transporte en la artesa hay que mantenerla a 140ºF (60ºC), para evitar la oxidación a altas temperaturas. Si se requiere más agua de refrigeración que la de aporte necesaria, el sistema transportador rebosa, lo que hay que tener en cuenta en el diseño de la planta; el agua que ha rebosado se puede transferir a una balsa de ceniza.

Algunos tipos de escoria son muy porosos; cuando grandes trozos de escoria caliente caen en el agua, ésta penetra en ellos y se vaporiza tan rápidamente que puede explotar, lo que se evita sumergiendo lentamente la escoria en el agua.

Una variante es el transportador de cinta metálica que consiste en una banda continua de paneles para transportar la ceniza, en lugar de eslabones situados entre dos cadenas; esta cinta metálica transporta un lecho continuo de ceniza y tiene la posibilidad de transportar grandes cantidades de escoria o de residuos procedentes de unidades que quemen basuras o residuos sólidos municipales.

SISTEMA DE PIRITAS.- Las piritas son trozos de hierro y rocas extraídas con el carbón, que se separan de éste en los pulverizadores; se pueden retirar manual, hidráulica o neumáticamente.

En el *sistema hidráulico*, el agua de transporte pasa a través de una bomba de chorro (eyector) y recoge las piritas de un tanque, que se arrastran por tubería hasta el área de vertido; dada la naturaleza abrasiva de las piritas, la tubería que se use tiene que ser resistente a la abrasión.

En el *sistema neumático*, el aire de transporte procede de un sistema de vacío o de un sistema a presión, y transporta las piritas hasta la zona de vertido.

Las piritas se pueden transportar, para su vertido, a
- *un silo de escurrido del agua*
- *una balsa de cenizas*
- *un sistema de recogida de escoria*

SISTEMA DE CENIZA DEL PASO DE CONVECCIÓN DE LA CALDERA.- Existen muchas variantes de manipulación de cenizas del paso posterior de la caldera, porque éstas ni son tan finas como la ceniza volante en polvo, ni tan bastas como la escoria del fondo del hogar.

- Algunas plantas amplían el sistema de manipulación de ceniza volante en polvo, para su recogida y transporte

- Otras las transportan hacia el sistema de escorias del fondo del hogar

- Otras mantienen separadas las cenizas, tanto del sistema de escoria como del sistema de polvo

Los sistemas de manipulación de cenizas del paso posterior de caldera utilizan medios de transporte hidráulicos, neumáticos o mecánicos.

SISTEMAS DE MANIPULACIÓN DE CENIZA SECA EN POLVO.- Consisten en un sistema de tubería, como el de transporte de la escoria. La ceniza volante en polvo se acumula en tolvas y se descarga en el sistema de transporte de ceniza. La ceniza y el polvo del paso posterior de la caldera se acumulan en tolvas y se descargan en el sistema de transporte de escoria.

a) TRANSPORTE NEUMÁTICO.- En este medio de transporte de la ceniza en polvo se utiliza una corriente de aire a través de un sistema de tuberías; puede ser de dos tipos, $\begin{cases} \text{- } presurizado \\ \text{- } de\ vacío \end{cases}$

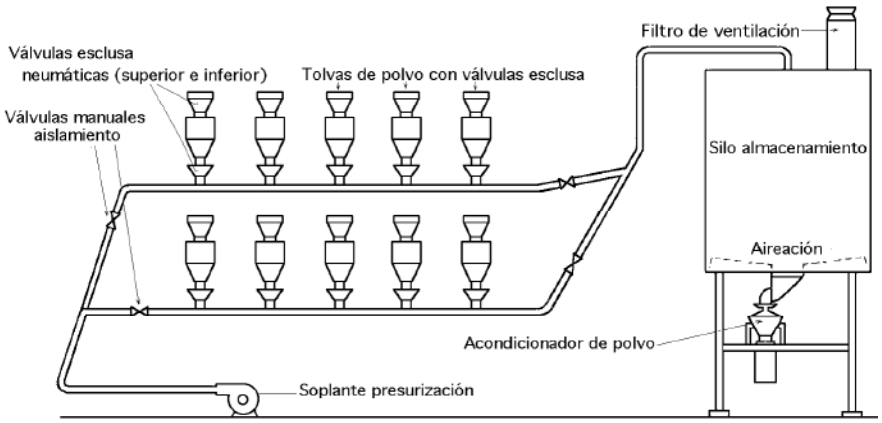


Fig XXIV.18.- Sistema neumático de presión, de transporte de ceniza volante en polvo

- En el ***transporte presurizado***, Fig XXIV.18, el generador del aire de transporte (soplante) se encuentra al comienzo de la línea; opera a una presión por encima de la atmosférica, pasa por debajo de cada tolva de recogida de polvo y dispone de un sistema de sellado de aire en cada punto de alimentación de polvo. La ceniza en polvo se transporta hasta un silo de almacenamiento que dispone de un filtro de descarga que retiene las partículas más finas arrastradas por el aire de transporte y facilita la salida del aire desplazado por el llenado del silo.

- En el ***transporte por vacío***, el generador del aire de transporte (soplante, ventilador, eyector de vapor o de agua) se encuentra en el extremo de descarga, o en el silo, creando así un vacío en la tubería de transporte; como las líneas de transporte están en depresión, para incomunicar y controlar la alimentación del polvo en cada punto de toma, sólo se necesita una válvula. La línea de transporte de polvo de ceniza entra en un primer colector separador de polvo y, a continuación, en

un segundo separador en el que el aire de transporte se separa del polvo, que se descarga al silo, Fig XXIV.19.

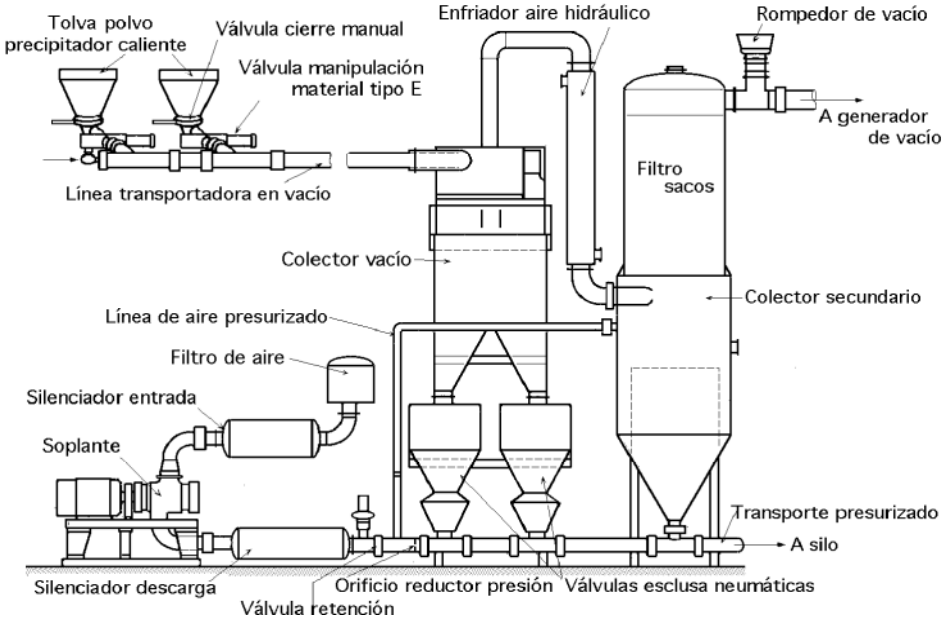


Fig XXIV.19.- Equipo colector para el sistema presión-vacío de cenizas volantes calientes

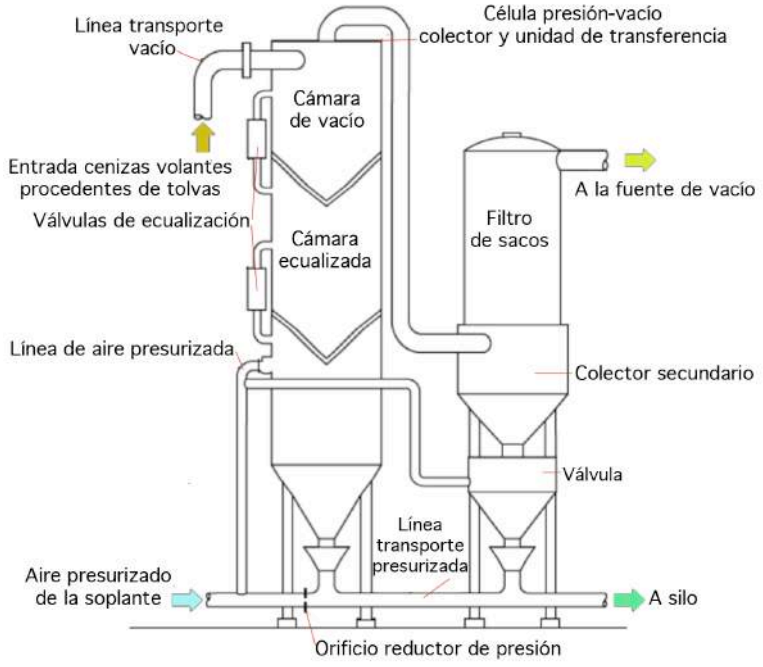


Fig XXIV.20a.- Equipo colector para el sistema presión-vacío de cenizas { *- volantes* / *- volantes calientes*

Una variante del sistema a presión lo constituye el ***transporte en fase densa***, Fig XXIV.21, en cuyo diseño la relación $\frac{aire}{sólidos}$ utilizada es menor; la ceniza recogida en la tolva, como una pastilla densa, se descarga en el dispositivo transportador a la presión del aire de transporte.

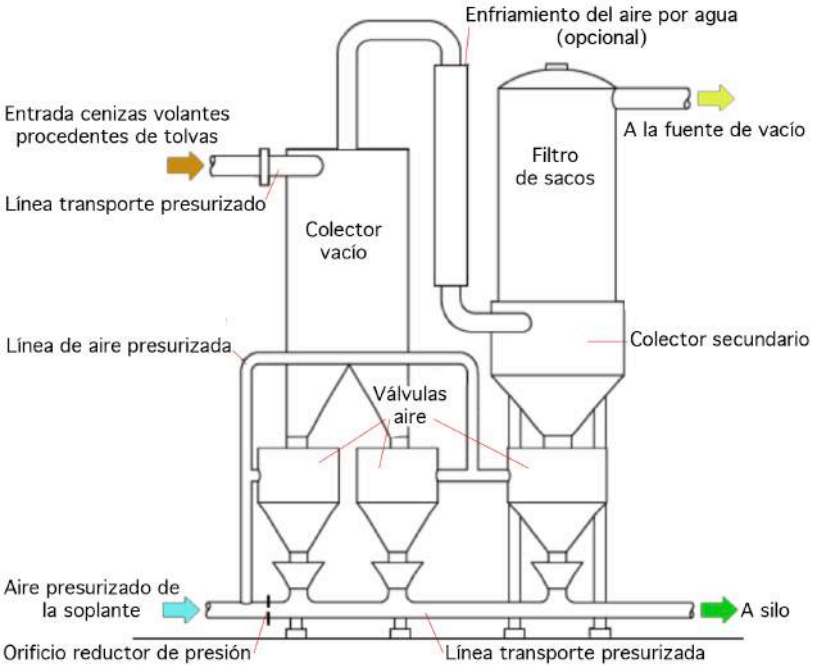


Fig XXIV.20b.- Equipo colector para el sistema presión-vacío de cenizas { *- volantes* / *- volantes calientes*

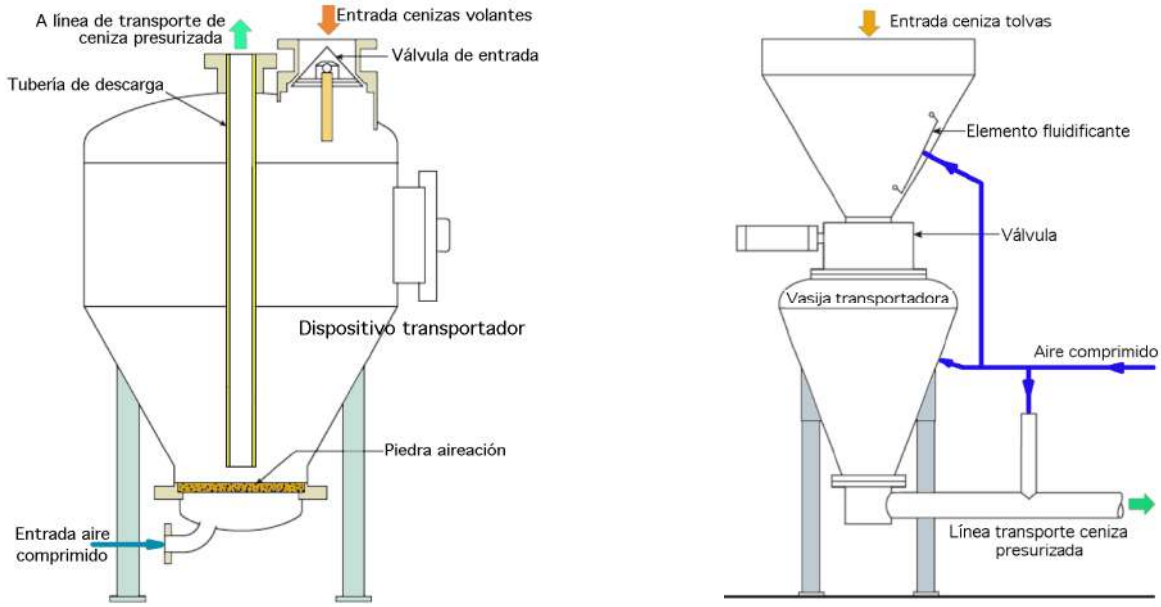


Fig XXIV.21.- Dispositivo transportador con descarga { *a) superior* / *b) inferior* *para el sistema de fase densa*

El concepto de fase densa queda limitado a materiales con partículas de pequeño tamaño, como la ceniza volante en polvo; materiales compuestos por partículas de tamaños mayores se puede transportar en fase densa, a distancias de transporte más cortas. El sistema neumático ofrece mucha flexibilidad en el diseño, debido a la facilidad de recorrido que los sistemas de tuberías ofrecen en comparación con los transportadores mecánicos; sin embargo, un sistema de transporte neumático es propenso a atascos por partículas sobredimensionadas de ceniza.

Un flujo de ceniza en polvo que pueda llegar a tener un alto contenido en humedad, como por ejemplo el que sale de un lavador de humos, puede taponar un sistema neumático.

Los sistemas neumáticos considerados son de fase diluida, ya que la relación $\frac{aire}{sólidos}$ es muy alta.

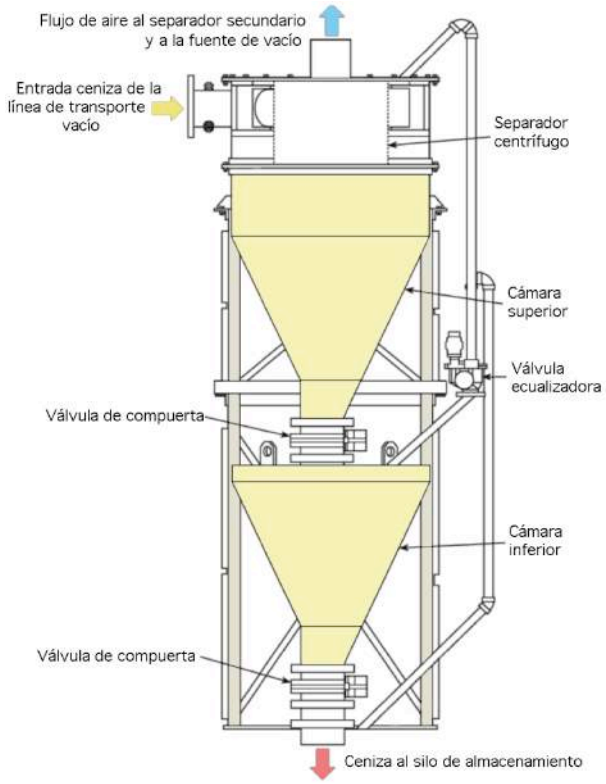


Fig XXIV.22.- Colector de ceniza primario

Una variante del ***sistema de vacío*** es un ***colector de cenizas primario*** que transfiere ceniza de baja presión a la línea de transporte de vacío al silo, que está a una presión ligeramente superior a la atmosférica. El colector es un dispositivo de dos cámaras instaladas en el techo del silo, Fig XXIV.22. La cámara superior es un separador centrífugo y depósito de almacenamiento. Una puerta entre las cámaras superior e inferior se abre periódicamente para vaciar la ceniza a la cámara inferior, una vez que las presiones de la cámara se hayan igualado; con la puerta cerrada la presión en la cámara inferior se eleva hasta igualar a la del silo, mediante una válvula de compuerta entre la cámara inferior y el silo. La ceniza recogida desemboca en el silo por gravedad, mientras que la cámara superior sigue recogiendo continuamente la ceniza de la línea de transporte.

Una alternativa al diseño del colector de cenizas primario, consiste en reemplazar la sección separadora centrífuga por un tubo a la entrada de una caja de piedra aireadora que dirige la ceniza hacia abajo en la sección de almacenamiento de la cámara superior. Encima de la cámara superior se encuentra un filtro de sacos que elimina cualquier partícula de polvo fino de la corriente de aire de transporte cuando este viaja hacia la fuente de vacío.

El aire extraído por el separador centrífugo del colector primario se envía al filtro de sacos para eliminar cualquier partícula fina de polvo. Se suele instalar, a veces, un colector secundario aguas arriba del filtro de sacos. La fuente de vacío extrae el aire desde el filtro de sacos, que mediante una posterior conexión a través de los colectores primario y secundario fuerza al sistema de transferencia de vacío.

Los silos de almacenamiento suelen almacenar durante tres días la ceniza producida por la caldera a plena carga. Grandes calderas tienen silos de cenizas instalados a pares, de modo que uno puede descargar o estar en servicio, mientras el otro recoge cenizas.

Los silos pueden estar construidos con acero al C o con hormigón armado; tienen forma de cono y llevan dispositivos de aireación instalados en su interior para asegurar que la ceniza fluya libremente cuando se descarga al silo; pueden tener alturas de hasta 75 ft (23 m), altura que tiende a comprimir la ceniza, si no se mantiene una buena distribución de la aireación. Se pueden utilizar calentadores para calentar el flujo de aire de aireación y evitar la humedad.

Para que la ceniza se cargue correctamente en un transporte, el silo está equipado con un descargador que consiste en una tolva retráctil y un tubo telescópico central que dirige hacia abajo la ceniza almacenada. Durante la descarga del silo, la ceniza se humedece para eliminar las partículas finas, que de otra forma serían aerotransportadas; el procedimiento consiste en añadir y mezclar suficiente agua para arrastrar el polvo hacia abajo, evitando la posibilidad de que se pueda formar cemento por la adición de demasiada agua a los compuestos de calcio de la ceniza. La cantidad apropiada de humedad depende de la composición de las cenizas.

Los ***equipos de desempolvado*** se dividen en dos tipos:

- *Lotes de mezcladores,* que son recipientes que recogen una carga de ceniza, revuelven las cenizas mezclándolas con unas paletas y rascan la pared con raspadores, añadiendo agua poco a poco hasta obtener una ceniza bien humedecida lista para la descarga; el contenido de humedad se tiene que controlar cuidadosamente para evitar problemas de cementación, bolsas secas de ceniza, o bolsas de agua.

- *Mezcladores continuos*, que son de capacidad más pequeña y más baratos, y que permiten que los camiones, uno tras otro, se puedan llenar en cuestión de minutos.

Cuando se procede desde el silo a la carga de cenizas de los primeros camiones, la altura de ceniza en el silo puede ser del orden de $40 \div 50$ ft ($12 \div 15$ m), por lo que simplemente con abrir una válvula en la parte inferior del silo se descargaría a gran velocidad, lo que no se podría controlar.

Los mezcladoras continuos utilizan un motor rotativo, una compuerta de alimentación a la entrada, o un dispositivo de entrada que limite la velocidad a la entrada. Las cenizas entrante se airean en la tolva de alimentación antes de entrar en el tambor. La ceniza cae al tambor giratorio, pasando por una serie de raspadores y por una boquilla pulverizadora del colector. Este tipo de descargador continuo puede actuar hasta con 8000 ft^3 (226 m^3) de cenizas volantes por hora, pero pueden ser más susceptibles a la influencia del polvo.

La cámara de mezcla de la mezcladora es un canal en forma de U con un motor que acciona dos ejes con paletas para mezclar y propulsar la ceniza desde la entrada hasta la salida. Las boquillas de aspersión van distribuidas dentro de la cámara de humectación que está orientada con una ligera inclinación hacia abajo para ayudar al movimiento de las cenizas y para drenar la mezcladora cuando se limpie manualmente.

b) TRANSPORTE MECÁNICO.- El transporte mecánico del flujo de ceniza en polvo seco se realiza utilizando alguna combinación de transportadores de $\begin{cases} \text{- } cadena \\ \text{- } masas \\ \text{- } tornillo \end{cases}$ o elevadores de cangilones.

Debido a la temperatura y naturaleza pulverulenta de los flujos de ceniza en polvo no se aplican las cintas transportadoras.

- Los ***transportadores de cadena*** con eslabones se utilizan para la manipulación y desplazamiento horizontal de la escoria o en planos inclinados; son de diseño similar a los que se utilizan en los sistemas de cadena sumergida. La cadena y los eslabones se encuentran dentro de una carcasa estanca al polvo, alimentando la ceniza en polvo a través de aberturas en la parte superior de la carcasa. Para el cierre se utilizan dispositivos de esclusas de aire, como alimentadores rotativos sellados o válvulas basculantes. El volumen de la ceniza en polvo transportada viene determinado por la altura de los eslabones.

- Los ***transportadores de masas*** son de diseño similar a los anteriores y ocupan totalmente la sección transversal del transportador.

- Los ***transportadores de tornillo*** se recomiendan para la manipulación de ceniza en polvo en longitudes de transporte que no dispongan de soportes intermedios, debido a la naturaleza altamente abrasiva del polvo de ceniza y consiguiente desgaste; se pueden seleccionar transportadores de tornillo de diámetro suficiente, manteniendo el nivel de llenado del polvo de ceniza bastante bajo para que se minimice la exposición del cojinete, lo que hace que los transportadores de tornillo no sean atractivos económicamente para estas aplicaciones.

- Los ***elevadores de cangilones*** facilitan medios mecánicos para transporte en vertical. Como consecuencia de las características fluidas de la ceniza en polvo, el ángulo de inclinación de otros transportadores se limita a 30º.

La manipulación mecánica de ceniza en polvo es ventajosa en aquellas calderas que queman combustibles cuyos niveles de inquemados, en las diversas corrientes de flujos de ceniza (escoria y polvo), son notables, como sucede en las unidades que queman madera o basuras. Estos inquemados pueden entrar en ignición cuando se exponen a la corriente de aire de un transportador neumático, dando lugar a explosiones y combustiones en el sistema de transporte o en el silo de almacenamiento. Los sistemas de transportadores mecánicos son más aptos para partículas grandes de ceniza, que se pueden producir en la operación normal, como consecuencia de desviaciones transitorias de la combustión.

ALMACENAMIENTO DE CENIZA Y DESCARGA.- La ceniza en polvo seca se transporta hasta un silo para su almacenamiento, antes de descargarla en camiones o en vagones para su

transporte; esta descarga se puede realizar $\begin{cases} en\ estado\ de\ polvo\ seco \\ acondicionando\ su\ humedad \end{cases}$.

La *carga en seco* utiliza vehículos de transporte cerrados; durante la operación de carga el material queda completamente estanco respecto al medio ambiente, minimizando las emisiones de polvo.

El sistema de *acondicionamiento de la humedad* se utiliza con más frecuencia; el polvo de ceniza se descarga desde el silo hacia un mezclador mecánico de tambor rotativo o molino amasador, que recibe el agua precisa para producir una ceniza no polvorienta con un contenido en agua del 15 $\div$20%, en peso. Hay que tener cuidado con la ceniza volante en polvo de alto contenido en Ca, evitando un exceso de agua, que podría provocar la consolidación del polvo en un producto parecido al cemento.

XXIV.4.- CORTATIROS DE AIRE Y DE HUMOS

Los cortatiros se utilizan para controlar $\begin{cases} -\ el\ gasto \\ -\ la\ temperatura\ del\ aire\ y\ humos \end{cases}$, y para aislar un equipo que queda fuera de servicio o requiere algún trabajo de mantenimiento.

a) ***Los cortatiros de aislamiento*** pueden ser de $\begin{cases} -\ cierre \\ -\ fuga\ nula \end{cases}$

- Los cortatiros de cierre se emplean en aplicaciones en las que se puede tolerar una fuga limitada

- Los cortatiros de fuga nula se diseñan para impedir fugas de cualquier tipo, lo que se consigue presurizando con aire de sellado, la periferia de los sellos de las láminas de sus persianas, siendo más convenientes las compuertas de tipo guillotina

b) ***Los cortatiros de control*** facilitan una restricción del flujo y presentan diversas variantes:

- Cortatiros de compensación, que se emplean para distribuir el flujo entre dos o más conductos

- Cortatiros de posición prefijada, que normalmente están abiertos o cerrados, y que en general se pueden mover a una posición predeterminada

- Cortatiros de modulación, que están diseñados para adoptar cualquier posición entre totalmente abierto o totalmente cerrado, en respuesta a una señal neumática o eléctrica

Cortatiros de persianas.- Un cortatiros de persianas, Fig XXIV.23, se caracteriza por disponer de una o varias láminas, que basculan sobre cojinetes ubicados en un bastidor rígido. Uno de los extremos del eje de una lámina se prolonga lo suficiente hacia fuera del bastidor, para que en él se pueda montar el accionamiento encargado de la operación del cortatiros. El perfil de las láminas de la persiana depende de la caída de presión que se puede tolerar a través del cortatiros. Una chapa

plana es el perfil más simple de lámina, pero ofrece mayores caídas de presión; láminas con perfil aerodinámico tienen menores caídas de presión.

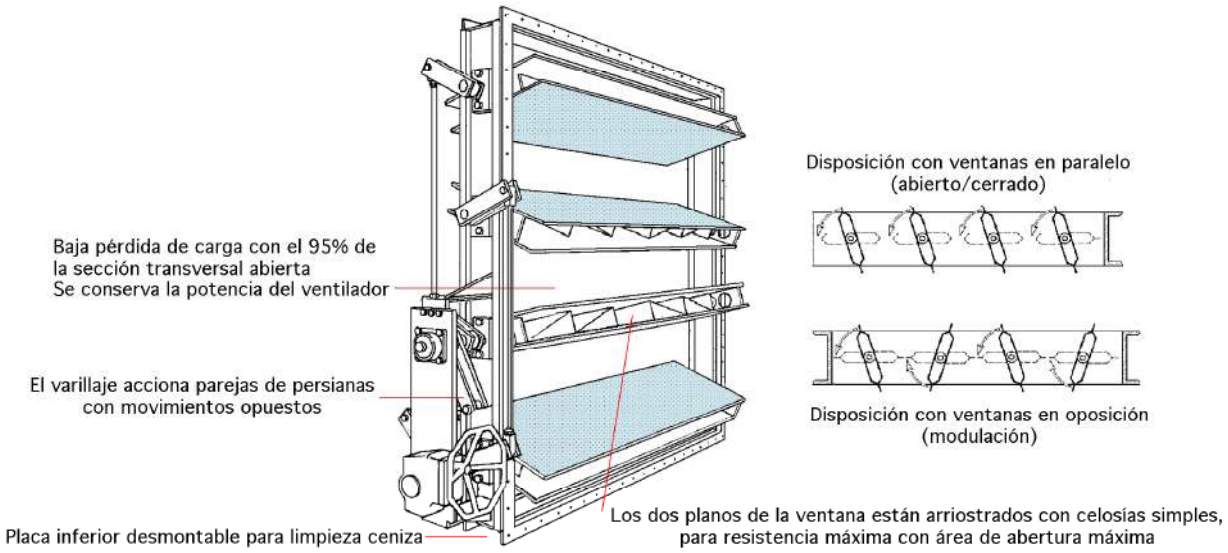


Fig XXIV.23.- Cortatiros de persianas y opciones de posición

Cuando aguas abajo del cortatiros se requiere una distribución del flujo uniforme, se emplean cortatiros de persianas con láminas de rotaciones opuestas; en los demás casos se utilizan cortatiros de hojas con rotaciones paralelas.

Según sea la aplicación, los cortatiros de persiana pueden tener cojinetes interiores o exteriores.

- *Los cojinetes interiores son de fundición mecanizada,* { *- con dispositivo de autolimpieza* / *- no requieren lubricación* }

- *Los cojinetes exteriores son lisos con* { *- auto alineación* / *- auto lubricación* } *y requieren de una caja de empaquetadura para el sellado de aire*

Cortatiros de compuerta.- Tienen un bastidor externo y un sistema de accionamiento que puede meter y sacar la compuerta, que actúa como una placa en toda la sección transversal del conducto, Fig XXIV.24.

La periferia de la compuerta está rodeada por unas bandas de cierre de metal flexible, a ambos lados aguas arriba y aguas abajo de la misma, contra las cuales se aprieta la compuerta para minimizar las fugas.

Las compuertas se accionan por una cadena y rueda dentada, cilindro neumático, cilindro hidráulico, o un mecanismo de tornillo, conectado a una unidad montada en el bastidor. Son de gran tamaño con grosores de compuerta de 0,75” (19 mm) y se utilizan para el servicio de aislamiento, preferentemente en conductos horizontales.

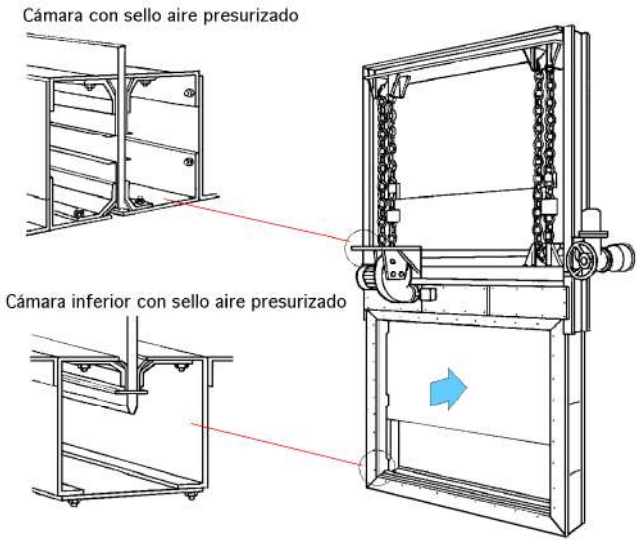


Fig XXIV.24.- Compuerta de guillotina

Cortatiros de lenteja.- Son circulares en forma de lenteja, Fig XXIV.25, y se pueden usar para servicio de control y cierre; debido a los elevados límites de velocidad, estos cortatiros son más pequeños que los de persiana y la relación $\frac{\textit{perímetro de sellado}}{\textit{área de paso}}$ es menor, lo que les hace más eficientes para aplicaciones de cierre.

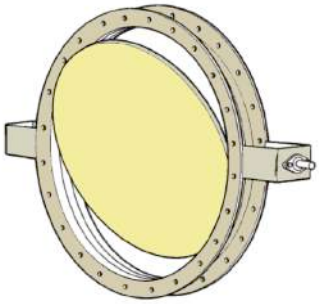


Fig XXIV.25.- Cortatiros de lenteja

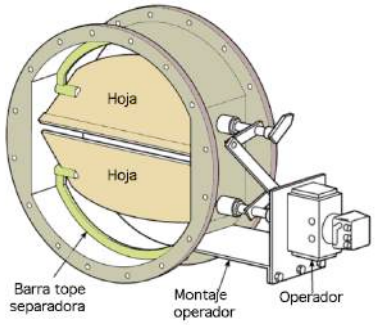


Fig XXIV.26.- Cortatiros de dos hojas

XXIV.5.- CHIMENEAS

Para lograr la combustión completa del combustibles se necesitan unos flujos de aire y de humos adecuados, que se crean y mantienen por medio de chimeneas y ventiladores que producen la diferencia de presión necesaria. El tiro es la diferencia entre la presión atmosférica y la presión estática de los humos en el hogar, en el paso de humos de la caldera, en un conducto o en una chimenea.

El flujo de gases a través de la caldera se logra de cuatro formas diferentes, según el tiro sea

- *forzado*
- *inducido*
- *natural*
- *equilibrado*

a) Las calderas con *tiro forzado* operan manteniendo el aire y los productos de combustión a presión superior a la atmosférica. Los ventiladores a la entrada del sistema de caldera proporcionan la presión suficiente para forzar la circulación del aire y humos a través del sistema; cualquier abertura en los cerramientos de caldera facilita el escape del aire o humos, a no ser que se presurice también la abertura.

b) Las calderas con *tiro inducido* operan con una presión estática de aire y de humos inferior a la atmosférica; la presión estática disminuye conforme se progresa desde la entrada de aire hasta el ventilador de tiro inducido.

c) Las calderas con *tiro natural* funcionan con un flujo de humos y se logra con una chimenea; en las calderas modernas es necesario disponer de un ventilador a la salida del sistema que proporcione el tiro preciso para establecer el flujo de gases (aire y humo) a través de la caldera.

d) Las calderas con *tiro equilibrado* tienen un ventilador de tiro forzado a la entrada al sistema y un ventilador de tiro inducido a la salida del mismo. La presión estática a la salida del ventilador de tiro forzado es superior a la atmosférica y decrece hasta alcanzar la presión atmosférica en un punto del sistema, que es el punto de tiro equilibrado; la presión estática sigue decreciendo conforme los gases recorren el trayecto entre el punto de equilibrio y el ventilador de tiro inducido: este esquema reduce la presión de humos y la tendencia a fugas de los gases calientes, produciéndose un ahorro energético, porque los ventiladores de tiro forzado requieren menor flujo volumétrico y, por tanto, menor energía para un flujo másico dado.

La ***pérdida de tiro*** es la reducción de la presión estática de un gas, causada por el rozamiento y por otras pérdidas de presión asociadas a las condiciones reales del flujo de gas.

La presión estática está relacionada con la presión total en un punto, de la forma:

$$p_{total} = p_{estática} + p_{dinámica} = p_{est.} + \frac{V^2}{2\, g_c\ v}$$

siendo, g_c *la constante de conversión* = $32{,}17\ lb_m ft/s^2 lb_f = 1\ kgm/s^2 N$

EFECTO CHIMENEA.- Es la variación de presión debida a la diferencia de cotas entre dos puntos de conductos o pasos verticales que transportan gases calientes, lo que se justifica por la diferencia de densidades del aire y los gases calientes.

El efecto chimenea es independiente del flujo de gases y no se puede medir con un manómetro de tiro, ya que éste combina el efecto chimenea y las pérdidas debidas al flujo.

La distribución e intensidad de esta diferencia de presión dependen de la:

- *Altura*
- *Disposición de los conductos*

- Temperatura media del gas en el conducto y del aire ambiente

El efecto chimenea total se define en la forma:

$$\Delta p_{efecto\ chimenea} = \frac{g}{g_c} Z (\rho_a - \rho_g) = \frac{g}{g_c} (\frac{1}{v_a} - \frac{1}{v_g})$$

en la que:

Z es la diferencia de cotas entre los puntos 1 y 2

ρ_a *y* v_a *son la densidad del aire y su volumen específico en condiciones ambientales*

ρ_g *y* v_g *son la densidad media del gas y su volumen específico medio*

g es la aceleración de la gravedad = 32,17 ft/s^2 *(9,8* m/s^2*)*

g_c *= 32,17* $lb_m\, ft/s^2 lb_f$ *(1* $kgm/s^2 N$*)*

Las unidades inglesas que se usan para cálculos de tiro, son:

- (“) wg , pulgadas de columna de agua, para pérdidas de presión de tiro

- ft para la altura de la chimenea

El efecto chimenea de pérdida de presión, en (“) por ft de altura de chimenea), se evalúa en la forma:

$$Efecto\ chimenea = \frac{1}{5,2} (\frac{1}{v_a} - \frac{1}{v_g}) \frac{in}{ft}$$

En la Tabla XXIV.1 se facilita el volumen específico del aire y de los gases de combustión a la presión de 1 atmósfera y temperatura absoluta de 1000ºR (556ºK).

Tabla XXIV.1- Volúmenes específicos de muestras a 1000°R (556°K) y 1 atmósfera

GAS	*Aire seco*	*Aire comburente*	*Humos*		
Volumen específico		$0,013 lb_{agua}/lb_{aire\ seco}$	*3% agua en peso*	*5% agua en peso*	*10% agua en peso*
ft^3/lb	*25,2*	*25,4*	*24,3*	*24,7*	*25,7*
m^3/kg	*1,57*	*1,58*	*1,5*	*1,54*	*1,6*

Si se asume que el aire y el humo se pueden considerar como gases ideales, la ley de los gases perfectos permite calcular el volumen específico en condiciones cualesquiera:

$$v = v_f \frac{T_f}{T_{referencia}} \frac{p_{referencia}}{p_{barométrica}} = v_f \frac{T_f}{1000^oR} \frac{30" Hg}{p_{barométrica}}$$

$$en\ la\ que \begin{cases} v_f = volumen\ específico\ en\ condiciones\ T_f\ y\ p_{barom}\ , ft^3/lb\ (m^3/kg) \\ T_f = temperatura\ media\ del\ fluido, ^\circ R\ , ^\circ(K) \\ p_{bar} = presión\ barométrica, (") Hg, Tabla\ XXIV.2 \end{cases}$$

Tabla XXIV.2.- Efecto de la altura en la presión barométrica.

Altitud sobre el nivel del mar, en ft	*0*	*1000*	*2000*	*3000*	*4000*	*5000*	*6000*	*7000*	*8000*	*9000*	*10000*	*15000*
Presión (") Hg	*29,92*	*28,86*	*27,82*	*26,82*	*25,84*	*24,9*	*23,98*	*23,09*	*22,22*	*21,39*	*20,58*	*16,89*

Tabla XXIV.3.- Valores del efecto chimenea , (“) wg/ft altura chimenea, a la presión de 1 atm

$$\text{Condiciones de referencia} \begin{cases} \text{Aire: } 0{,}013\ lb_{agua}/lb_{aire\ seco} \Rightarrow 13{,}7\ ft^3/lb,\ 80°F,\ 30"Hg \\ \text{Humo: } 0{,}04\ lb_{agua}/lb_{humo\ seco} \Rightarrow 13{,}23\ ft^3/lb,\ 80°F,\ 30"Hg \\ \text{Presión barométrica: } 30"Hg \end{cases}$$

Temp. aire ambiente	*Temperatura media humos o chimenea, °F*					
°F	*250*	*500*	*1000*	*1500*	*2000*	*2500*
40	*0,0041*	*0,007*	*0,0098*	*0,0112*	*0,012*	*0,0125*
60	*0,0035*	*0,0064*	*0,0092*	*0,0106*	*0,0114*	*0,0119*
80	*0,003*	*0,0059*	*0,0087*	*0,01*	*0,0108*	*0,0114*
100	*0,0025*	*0,0054*	*0,0082*	*0,0095*	*0,0103*	*0,0109*

El efecto del tiro total teórico de una chimenea o de un conducto, para una altitud dada sobre el nivel del mar, se calcula a partir de la ecuación:

$$p_{total} = p_{estática} + p_{dinámica} = p_{est.} + \frac{V^2}{2\,g_c v}$$

o con:

$$Tiro\ chimenea = Z\ (Efecto\ chimenea)\ \frac{p_{bar\ altitud}}{p_{bar\ nivel\ del\ mar}}$$

en la que:
- *Z es la altura de la chimenea, ft (m)*
- *el efecto chimenea se mide en, (")/ft , Tabla XXIV.3*
- *la presión barométrica se toma a la altitud dada, Tabla XXIV.2*
- *la presión barométrica a nivel mar es 29,92"Hg*

La temperatura media del gas (aire o humos) en estos cálculos se asume igual a la media aritmética de las temperaturas de entrada y de salida en la sección de chimenea o conducto que se considere.

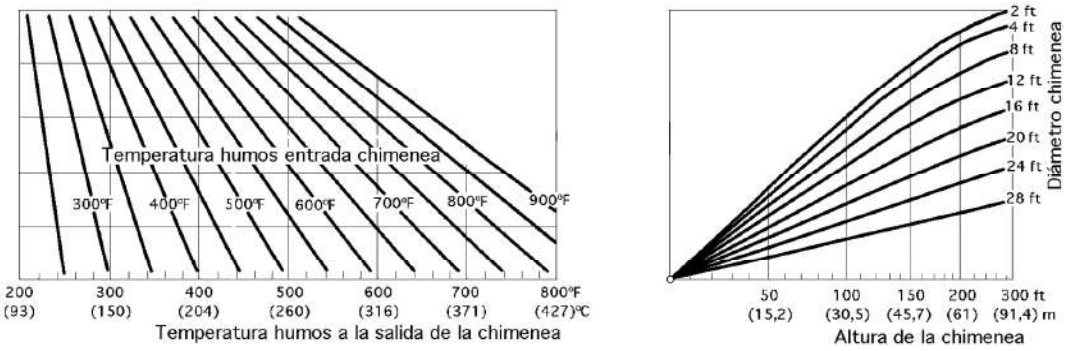
Para los humos que fluyen a través de una chimenea, existen pequeñas pérdidas de calor hacia el aire ambiente, a través de la estructura de la chimenea, y alguna infiltración de aire frío.

La pérdida total en la temperatura de una chimenea depende de:

- *El tipo, diámetro y altura de la chimenea*
- *La velocidad de los humos*
- *Las variables que influyen sobre la temperatura de la superficie exterior de la chimenea*

La Fig XXIV.27 indica una temperatura aproximada en la salida de chimenea, en función de:

- *Su altura y diámetro*
- *La temperatura de entrada de los humos a la misma*



XXIV.27.- Correlación aproximada entre la temperatura de los humos a la salida de la chimenea y las dimensiones de la chimenea

Ejemplo de cálculo del efecto chimenea.- En la Fig XXIV.28 se presenta, a nivel del mar, el procedimiento de cálculo del efecto chimenea, que ayuda o se opone al flujo de gases a través de la unidad, según sus particularidades. Los tres pasos de gases están a diferentes temperaturas y se puede suponer presión atmosférica en el punto D, (tiro = 0).

El efecto chimenea ayuda al flujo de gases cuando éste es ascendente, y se opone cuando es descendente; a los flujos ascendentes se les asigna el signo (+) y a los descendentes el (-).

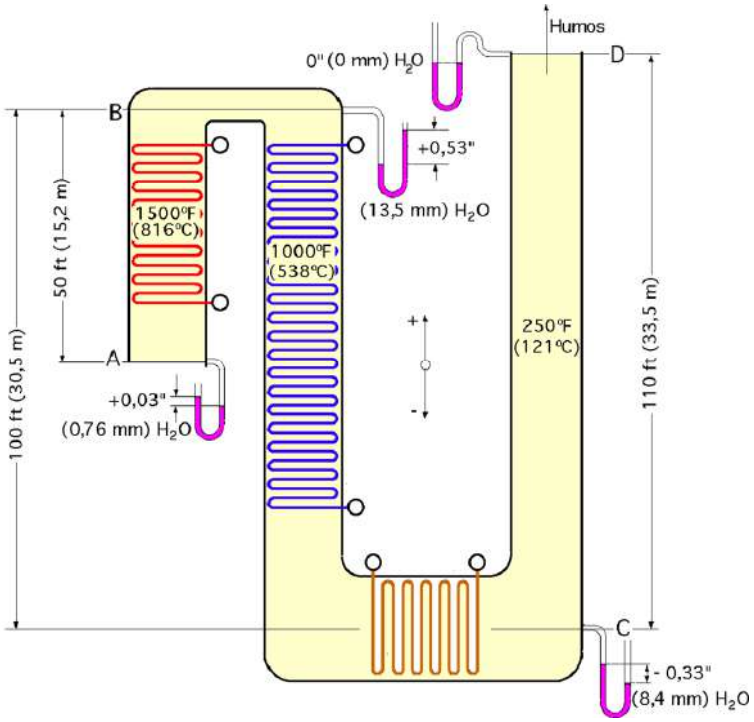


Fig XXIV.28.- Efecto chimenea en tres pasos verticales dispuestos en serie
(Condiciones ambientales 80°F (27°C) y 29,92"Hg (101 kPa)

Haciendo uso de la Tabla XXIV.3, para una temperatura del aire ambiente de 80ºF, el efecto chimenea para cada uno de los pasos es:

$$\begin{cases} de\ C\ a\ D = +\ (110 \times 0{,}0030)" = +\ 0{,}33"\ wg \\ de\ B\ a\ C = -\ (100 \times 0{,}0086)" = -\ 0{,}86"\ wg \\ de\ A\ a\ B = +\ (50 \times 0{,}0100)" = +\ 0{,}50"\ wg \end{cases}$$

Si se colocan manómetros de tiro, con uno de sus extremos abierto a la atmósfera, y con el otro

en las ubicaciones correspondientes a los puntos A, B, C y D, las lecturas correspondientes a flujo cero son:

Tiro en D = 0" wg

Tiro en C = tiro en D menos efecto chimenea de C a D = 0"wg - (+ 0,33)"wg = - 0,33" wg

Tiro en B = tiro en C menos efecto chimenea de C a B = - 0,33"wg - (- 0,86)"wg = + 0,53" wg

Tiro en A = tiro en B menos efecto chimenea de A a B = + 0,53"wg - (+ 0,50)"wg = + 0,03" wg

El cálculo del efecto chimenea, en este ejemplo, se realiza en sentido opuesto al flujo de humos, de modo que el efecto se resta de las presiones estáticas o tiros. Si el efecto chimenea se calculase en el mismo sentido que el flujo de humos, el efecto chimenea se debería sumar (con sus signos correspondientes), para obtener la correspondiente presión estática.

El efecto chimenea neto desde A hasta D es la suma de los tres efectos chimenea parciales correspondientes a los tramos (C-D), (B-C) y (A-B), cuyo valor en el ejemplo es - 0,03"wg. Por esta razón, los ventiladores o la altura de la chimenea, se deben seleccionar no sólo teniendo en cuenta el tiro necesario para vencer las pérdidas de tiro del flujo a través de la unidad, sino también para descontar el efecto chimenea neto del sistema.

En algunos cerramientos de caldera, los gases fugan desde las partes superiores, especialmente cuando la unidad está operando a cargas muy bajas o cuando se está retirando de servicio. La fuga puede ocurrir, incluso, aunque el flujo de salida pueda mostrar un sustancial tiro negativo. El ejemplo ilustra esta condición con una succión (presión negativa) en la parte inferior del tramo (C-D), y presiones positivas en los puntos A y B.

CHIMENEAS METÁLICAS Y DE HORMIGÓN.- Las antiguas calderas operaban con tiro natural, que facilitaban por sí solas el efecto chimenea en unidades modernas pequeñas. Para las grandes unidades equipadas con sobrecalentadores, economizadores y calentadores de aire, no es práctico ni económico hacer funcionar la unidad sólo con el tiro inducido que proporciona una chimenea, por lo que se utilizan ventiladores.

La unidad completa se presuriza con $\begin{cases} \text{- un ventilador de tiro forzado} \\ \text{- ventiladores de tiro} \begin{cases} \text{forzado} \\ \text{inducido} \end{cases} \end{cases}$ *para operar en tiro equilibrado*

La combinación de chimenea y ventilador de tiro no se suele utilizar

La altura y diámetro de la *chimenea metálica* para unidades de tiro natural, dependen de:

- Las pérdidas de tiro a través de la caldera, desde el punto de tiro equilibrado hasta la entrada a la chimenea

- La temperatura $\begin{cases} \text{media de los humos que ascienden por la chimenea} \\ \text{del aire circundante} \end{cases}$

- El flujo de humos requerido en la chimenea

- La presión barométrica

no existiendo formulación que tenga en cuenta, satisfactoriamente, todos los parámetros que intervienen en la determinación de la altura y diámetro de la chimenea.

Puntos importantes a considerar son:

a) La temperatura de la atmósfera circundante y de los humos que entran en la chimenea

b) La caída de temperatura en los gases que circulan por la chimenea, consecuencia de la:

- Pérdida de calor hacia la atmósfera

- Infiltración del aire exterior hacia el interior de la chimenea

c) Las pérdidas de tiro de la chimenea asociadas al flujo de humos, debidas a la fricción interior en la chimenea y a la energía cinética de los humos a la salida de la misma

Pérdidas por flujo en chimeneas.- El tiro neto de la chimenea, o tiro inducido disponible a la entrada de la misma, es la diferencia entre el tiro teórico y la pérdida de presión debida al flujo de gases a través de la chimenea. La ecuación de la pérdida por fricción, más la pérdida a la salida, en altura de velocidad, $\frac{G^2 v}{2 g_c}$, proporciona:

Pérdida por flujo en la chimenea =

$$= \Delta p_{chimenea} = Pérdida\ por\ fricción + Pérdida\ a\ la\ salida = \lambda\ \frac{L}{d}\ \frac{G^2 v}{2 g_c} + \frac{G^2}{2 g_c}\ V = \frac{G^2}{2 g_c}\ (\frac{\lambda\ L\ v}{d} + V)$$

En unidades inglesas sería:

$$Pérdida\ por\ flujo\ en\ la\ chimenea = \Delta p_{chimenea} = \frac{2{,}76}{p_{barométrica}}\ \frac{T_g}{d_i^4}(\frac{G_g}{10^5})^2\ (\frac{\lambda\ L}{d_i} + 1)\ (\text{“wg})$$

en la que:

- λ *es el factor de fricción (0,0914÷0,017)*
- *L y d son la altura y diámetro de la chimenea*
- *G es la velocidad másica por segundo =* $\frac{m}{a}\ (\frac{lb}{ft^2 s})$ *ó* $(\frac{kg}{m^2 s})$*, con m en* $\frac{lb}{seg}$ *ó* $\frac{kg}{seg}$*, respectivamente*
- *A es el área de la sección transversal en,* ft^2 (m^2)
- *v es el volumen específico a la temperatura media,* ft^3/lb (m^3/kg)
- T_g *es la temperatura absoluta media de los humos en* $°R$

Las pérdidas por flujo en la chimenea en unidades de tiro natural son menores que el 5% del tiro teórico. La energía cinética irrecuperable es del orden de $3 \div 7$ veces la de fricción, según sean la altura y diámetro de la chimenea.

Dimensiones de la chimenea.- Los valores para el diámetro y altura de la chimenea se calculan con ayuda de las Fig XXIV.27, 30 y 31, asumiendo una temperatura de humos a la salida de la

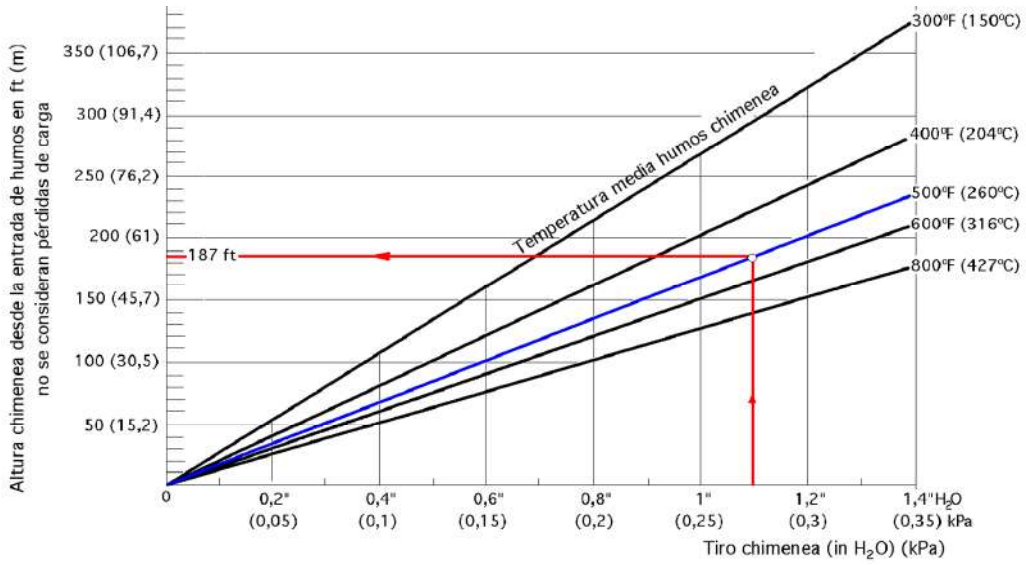
chimenea, (en la Tabla XXIV.4 se asumen 450ºF). A posteriori se efectúan las correcciones necesarias sobre los valores obtenidos:

- *Verificando la temperatura de humos asumida a la salida de la chimenea*
- *Comprobando la pérdida por flujo en la chimenea*
- *Ajustando la altura de la chimenea, en caso de que fuese necesario*

Para proceder al dimensionado tendremos en cuenta las especificaciones de la unidad, que se indican en la Tabla XXIV.4, en donde el tiro requerido en la chimenea se considera desde el punto de tiro equilibrado hasta la entrada de humos en la chimenea, igual a 1"wg

Tabla XXIV.4.- Especificaciones de la unidad

Combustible	*Carbón pulverizado*
Vapor generado, lb/h	*360.000*
Flujo de humos a la chimenea, lb/h	*450.000*
Temperatura de los humos a la entrada de la chimenea	*550°F*
Tiro requerido en la chimenea, (") wg	*1*
Altitud de la planta	*Nivel del mar*
Temperatura de los humos a la salida de la chimenea	*450°F*

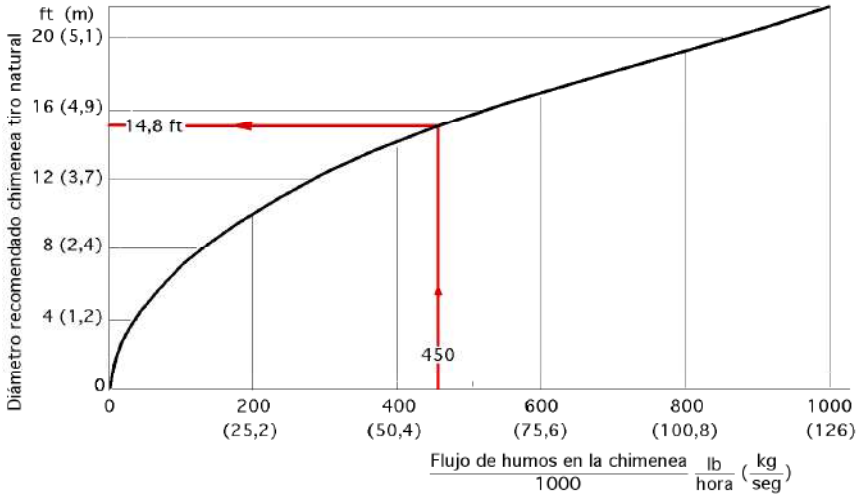


$$Tiro\ chimenea = 7{,}84\ L\ (0{,}00179 - \frac{1}{T_g})\ \frac{B}{30}\ ,\ con \begin{cases} L\ altura\ chimenea\ en\ ft \\ B\ presión\ barométrica,\ in\ Hg \\ T_g\ ,\ temperatura\ media\ gases\ chimenea,\ ^oR \end{cases}$$

$$Curvas\ basadas\ en\ aire\ standard\ \ 0{,}013\ \frac{lb_{agua}}{lb_{aire\ seco}}\ \ a\ 80°F\ y\ 30\ in\ Hg$$

Fig XXIV.29.- Altura requerida de chimenea para diversos tiros de chimenea y temperaturas medias de humos en chimenea

Si no se especifica el flujo de humos en la chimenea, se pueden utilizar las siguientes relaciones aproximadas, referidas a la cantidad de vapor generado:



Curva basada en una pérdida por flujo chimenea del 5%

Fig XXIV.30.- Diámetros de chimenea recomendados para un flujo de humos en la chimenea del 5%

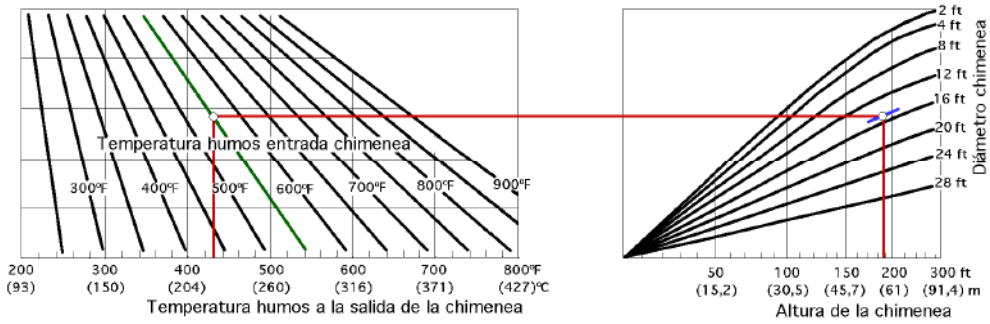


Fig XXIV.31 (28.bis).- Correlación entre la temperatura de los humos a la salida de la chimenea y las dimensiones de la chimenea

$$\text{Relación } \frac{\text{Peso de los humos}}{\text{Flujo de vapor}} = \begin{cases} \text{Aceite o gas} = 1{,}15 \\ \text{Carbón pulverizado} = 1{,}25 \\ \text{Hogar mecánico} = 1{,}50 \end{cases}$$

- Para un flujo de humos en la chimenea de 450.000 lb/h, la Fig XXIV.30 proporciona un diámetro de 14,8 ft = 4,5 m

- Para un tiro de chimenea de 1" (aumentado a 1,1" por seguridad) y una temperatura media de humos de 500°F, calculada a partir de la temperatura de entrada de 550°F y de la asumida de salida de 450°F, la Fig XXIV.29 proporciona una altura, en primera aproximación, de 187 ft = 57 m

- La comprobación de la temperatura de los humos a la salida de la chimenea, se obtiene de la Fig XXIV.27, a partir de la altura aproximada de 187 ft, el diámetro de 14,8 ft y la temperatura de entrada de 550°F. El resultado es de 430°F, lo que proporciona una temperatura media de humos de 490°F y un tiro de 1,1"wg

- Para la temperatura media de 490°F se calcula de nuevo la altura de la chimenea en la Fig XXIV.27, despreciando las pérdidas por flujo en la misma, obteniéndose 190 ft. A esta altura hay que añadir las pérdi-

das por flujo en la chimenea, del orden del 5%, por lo que la altura de ésta sería de $\frac{190}{0,95} = 200\ ft = 61\ m$

La pérdida por flujo en chimenea se comprueba empleando los valores obtenidos del diámetro, altura, temperatura media de humos y flujo de humos, en la ecuación:

$$\Delta p_{chim.} = \lambda \frac{L}{d} \frac{G^2 v}{2 g_c} + \frac{G^2}{2 g_c} V = \frac{G^2}{2 g_c} \left(\frac{\lambda L v}{d} + V \right)$$

La comprobación del tiro neto disponible, (efecto chimenea), utilizando la ecuación

$$\Delta p_{efecto\ chimenea} = \frac{g}{g_c} Z (\rho_a - \rho_g) = \frac{g}{g_c} \left(\frac{1}{v_a} - \frac{1}{v_g} \right)$$

indica que el tiro de chimenea supuesto de 1"wg se cumple ampliamente.

Si la planta no estuviese situada a nivel del mar, el tiro de la chimenea se incrementa multiplicándolo por el factor de altitud $\frac{30}{p_{barom}}$.

Agentes externos que afectan a la altura de la chimenea.- La chimenea se utiliza también para dispersar los humos, efecto que se incrementa con la altura de la misma. En valles estrechos o en zonas donde exista concentración industrial, puede ser necesaria la instalación de chimeneas con alturas aumentadas. Algunas plantas térmicas situadas en las inmediaciones de aeropuertos, tienen prohibido utilizar chimeneas con altura suficiente para lograr una buena dispersión; en estos casos, la sección de salida tiene que disminuir el diámetro para incrementar la velocidad de descarga (altura dinámica), simulando así el efecto de una chimenea de mayor altura; el rebaje de la sección de la chimenea aumenta de forma notable la resistencia al flujo, que se asume por un sistema de tiro mecánico.

La selección de los materiales de la chimenea viene influenciada por:

- *Los costes de material y de montaje*
- *La altura de la chimenea*
- *El medio de soporte:* { *- estructura de acero (stack)* / *- fundación (chimney)*
- *Los constituyentes corrosivos y erosivos de los humos.*

Una vez seleccionado el material, hay que comprobar la chimenea desde el punto de vista estructural, efectuando análisis de cargas estáticas y dinámicas (viento, terremoto, etc).

Mantenimiento de la chimenea.- Todas las conexiones a la chimenea tienen que ser estancas al aire y se tienen que incomunicar cuando no se utilicen.

Cuando la chimenea está operativa, las fugas de aire frío hacia su interior reducen la tempe-

ratura media del humo y el efecto chimenea, e incrementan el flujo de humos y la erosión.

Una chimenea está sujeta a $\begin{cases} \textit{- la acción erosiva de las partículas} \\ \textit{- la corrosión ácida de los productos derivados del S} \\ \textit{- el deterioro por agentes atmosféricos} \end{cases}$

La erosión se produce en: $\begin{cases} \textit{- las cajas de humos de entrada a la chimenea} \\ \textit{- la garganta} \\ \textit{- las secciones de diámetro rebajado} \\ \textit{- las zonas donde hay cambios de dirección o de velocidad de los humos} \end{cases}$

ubicaciones en las que los materiales resistentes a la abrasión pueden reducir el mantenimiento de la chimenea.

XXIV.6.- VENTILADORES

El ventilador aumenta la energía de una corriente fluida, moviendo una cantidad de aire o gas; consta de un impulsor dotado de paletas, que es el que efectúa el trabajo y una carcasa que recoge y dirige el aire o gas descargado por el impulsor.

POTENCIA.- La potencia depende de $\begin{cases} \textit{- el volumen de aire o gas movido en la unidad de tiempo} \\ \textit{- la presión diferencial a través del ventilador} \\ \textit{- su eficiencia} \\ \textit{- el tipo de accionamiento} \end{cases}$

La potencia en el eje del ventilador viene dada por:

$$N = k\,\frac{\Delta p\; v}{\eta_{mec}\; C}\;,\; \textit{en la que:} \begin{cases} N \textit{ es la potencia en } hp\,,(kW) \\ \Delta p \textit{ es el aumento de presión a través del ventilador}\,,(")wg\,,(kPa) \\ v \textit{ es el flujo volumétrico a la entrada}\,,ft^3/min\,,(m^3/seg) \\ k \textit{ es el factor de compresibilidad}\,,\textit{Tabla XXVI.5} \\ C = 6.354\,,(1 \textit{ en el } S.I.) \end{cases}$$

La eficiencia se calcula a través de: $\begin{cases} \textit{- el rotor del ventilador} \\ \textit{- la carcasa del ventilador (entre la entrada y la salida)} \\ \textit{- la carcasa, con las pérdidas en conductos de entrada y salida} \end{cases}$

Valores aproximados del rendimiento mecánico de ventiladores y factores de compresibilidad, se dan en las Tablas XXIV.5.

Tabla XXIV.5.- Rendimiento mecánico de ventiladores.

Ventiladores centrífugos	*Álabes de paleta*	*45 - 60 %*
	Álabes curvados hacia delante	*45 - 60 %*
	Álabes curvados hacia atrás	*75 - 85 %*
	Álabes radiales	*60 - 70 %*
	Canales de aire	*80 - 90 %*
Ventilador de flujo axial		*85 - 90 %*

	Factores de compresiblidad aproximados para el aire						
Δp / p	*0*	*0,03*	*0,06*	*0,09*	*0,12*	*0,15*	*0,18*
k	*1*	*0,99*	*0,98*	*0,97*	*0,96*	*0,95*	*0,94*

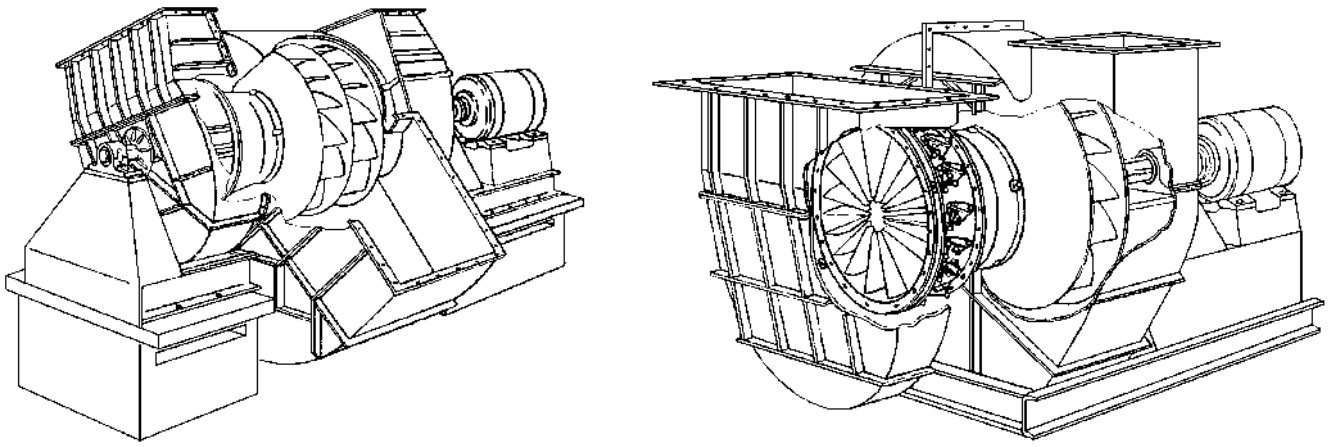
Otra forma de calcular la potencia utiliza el concepto de altura adiabática, que se calcula si se conoce la elevación total de presión, dada por la expresión:

$$H_{adiabática} = \frac{k\ \Delta p\ C}{\rho}\ \text{, siendo:}\ \begin{cases} H_{adiab}\ \text{la altura adiabática desarrollada en columna de gas, } ft, (m) \\ k\ \text{el factor de compresibilidad} \\ \Delta p\ \text{el aumento total de presión, (")wg, } (kPa) \\ \rho\ \text{la densidad real, } lb/ft^3\ \ (kg/m^3) \\ C = 5,29\ (1\ \text{en el S.I.}) \end{cases}$$

$$\text{Potencia aplicada al eje: } N = \frac{Q\ H_{adiab}\ C}{\eta_{mec}}\ \text{, en la que:}\ \begin{cases} Q\ \text{es el flujo de gas, } lb/h, (kg/h) \\ C = 0{,}505.10^6\ , (2{,}724.10^6\ \text{en el S.I.}) \end{cases}$$

Tabla XXIV.6.- Formulación para ventiladores.

Denominación	*Formulación*
Ecuación de Bernoulli	$p_1 + \rho\frac{c_1^2}{2} - \Delta p_z + \sum \Delta p_r = p_2 + \rho\frac{c_2^2}{2}$
Ecuación de Euler	$\Delta p_{u_\infty} = \rho\ (u_2 c_{2u} - u_1 c_{1u})$
Entrada sin circulación	$\Delta p_{u_\infty} = \rho\ u_2 c_{2u}$
	$\Delta p_{u_\infty} = \rho\ u\ (c_{2u} - c_{1u})$
Ventilador axial *Grado de reacción ideal*	$\sigma = \frac{\Delta p_{est.rod_\infty}}{\Delta p_{u_\infty}}$
Ventilador axial *Grado de reacción real*	$\sigma_{real} = \frac{\Delta p_{est.rod}}{\Delta p_{u\ (\ total\ )}}$
Presión suministrada por el ventilador	$\Delta p_{total} = p_s - p_e + \rho\ \frac{c_s^2 - c_e^2}{2}$
Presión estática	$\Delta p_{estática} = p_s - p_e$
Presión dinámica	$\Delta p_{dinámica} = \rho\ \frac{c_s^2 - c_e^2}{2}$
Rendimiento hidráulico	$\eta_h = \frac{\Delta p_{total}}{\Delta p_u}$ (Δp_u - *nº finito ideal de álabes*)
Potencia suministrada	$N = Q\ \Delta p_{total}$
Rendimiento total en condiciones totales	$\eta_{total} = \frac{Q\ \Delta p_{tot}}{N_{accionamiento}} = \frac{Q\ \Delta p_{tot}}{N_a}$
Rendimiento total en condiciones estáticas	$\eta = \frac{Q\ \Delta p_e}{N_a}$
Coeficiente de presión	$\Psi = \frac{\Delta p_{total}}{\rho\ u^2\ /2}$



(a) (b)

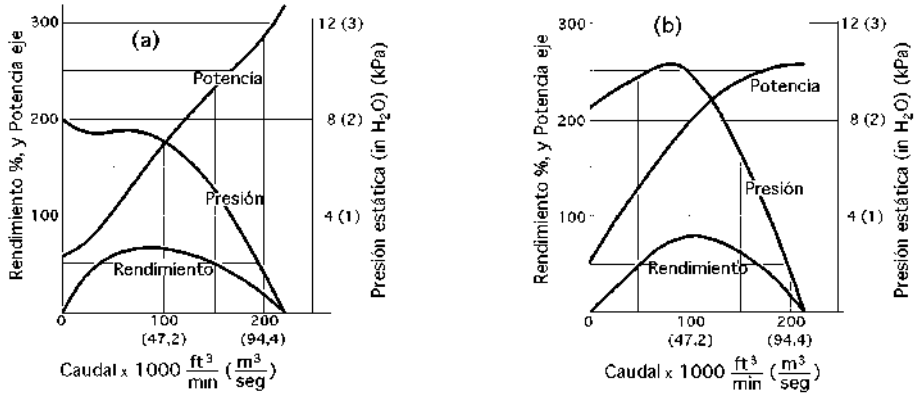
Fig XXIV.32.- a) Ventilador centrífugo de doble entrada y doble ancho, con álabes curvados hacia atrás
b) Ventilador centrífugo de simple entrada con álabes curvados hacia atrás y control por paletas de entrada

CURVAS CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMIENTO.- Las chimeneas casi nunca facilitan el tiro natural suficiente para cubrir las necesidades de las modernas unidades de calderas, que tienen elevadas pérdidas de tiro, por lo que para cumplimentar los requisitos especificados se dispone de dos tipos fundamentales:

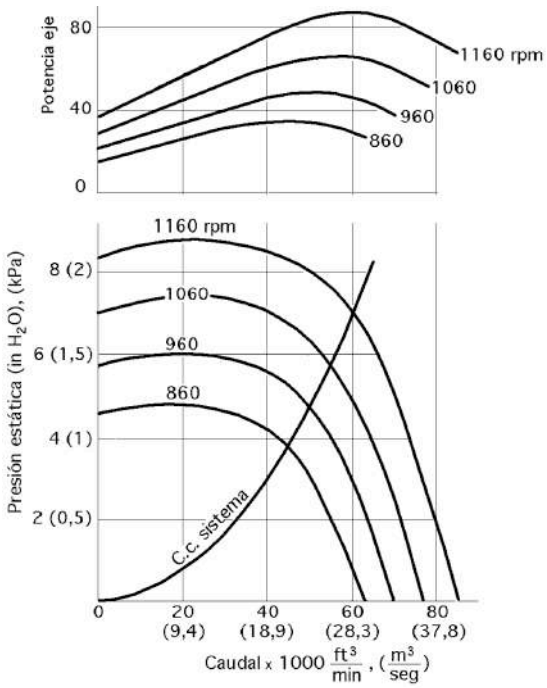
- El ventilador centrífugo, en el que el aire o gas se aceleran radialmente hacia el exterior, desde la base hacia la punta de los álabes, y se descarga en una carcasa

- El ventilador de flujo axial, en el que el fluido se acelera paralelo al eje del ventilador

Las curvas características del ventilador, Fig XXIV.33, facilitan la presión estática, la potencia en el eje y el rendimiento en función del flujo volumétrico.



a) Ventilador de tiro inducido, con temperatura de humos 660°F (349°C)
b) Ventilador de tiro forzado, con temperatura del aire 105°F (41°C)
Fig XXIV.33.- Curvas características de dos tipos de ventiladores centrífugos operando a 5.500 ft de altitud y 965 rev/min



XXIV.34.- Familia de curvas características para diferentes rpm y puntos de funcionamiento

La operación del ventilador, para una capacidad dada, tiene que emparejar determinados valores de altura y potencia sobre las curvas características, por lo que es necesario establecer un balance entre la presión estática del ventilador y la resistencia del sistema, Fig XXIV.34; las variables operativas de los ventiladores se pueden predecir (semejanza) en función de la variación:

***a) De la velocidad del ventilador**:*

- La capacidad, ft^3/min ($m^3/minuto$), varía directamente con la velocidad

- La presión varía directamente con el cuadrado de la velocidad

- La potencia varía directamente con el cubo de la velocidad

***b) Del tamaño del ventilador**:*

- La capacidad y potencia varían con el cuadrado del diámetro del rotor

- La velocidad (rev/min) varía inversamente con el diámetro del rotor

***c) De la densidad de los gases**:*

- La capacidad permanece constante

- La presión y potencia varían directamente con la densidad

Los dos factores principales de las características funcionales $\begin{cases} \text{- velocidad} \\ \text{- altura} \end{cases}$ se relacionan mediante los conceptos de velocidad específica y diámetro específico:

- La velocidad específica $n_s = \dfrac{n\sqrt{G}}{p_{estática}^{3/4}}$ *es el nº de rpm a la cual operaría un ventilador para dar 1 ft^3/min de aire en condiciones estándar, a una presión estática de 1"wg*

- El diámetro específico $d_s = \dfrac{d\sqrt[4]{p_{estática}}}{\sqrt{G}}$ *es el diámetro requerido por un ventilador para dar 1 ft^3/min de aire en condiciones estándar, contra una presión estática de 1"wg*

CARACTERÍSTICAS AERODINÁMICAS.- Para determinar el ventilador más económico con unas determinadas características de funcionamiento, la Fig XXIV.35 presenta un diagrama de selección de ventiladores para una caldera de 500 MW, que quema carbón y cuenta con parejas de ventiladores de tiro inducido y forzado, y aire primario.

Cuando la velocidad específica aumenta, la relación $\dfrac{diámetro\ específico\ d_s}{diámetro\ real\ d}$ tiende a la unidad.

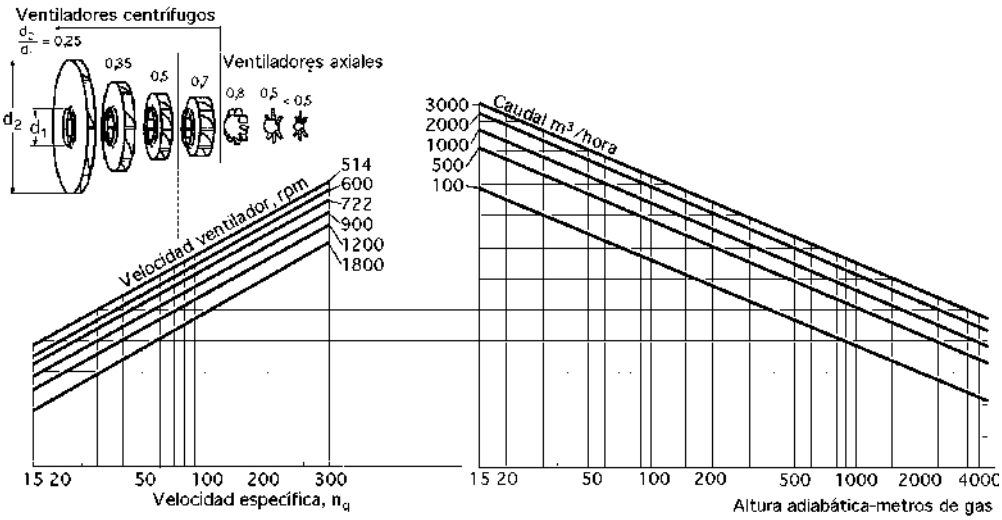


Fig XXIV.35.- Diagrama para seleccionar el tipo de ventilador

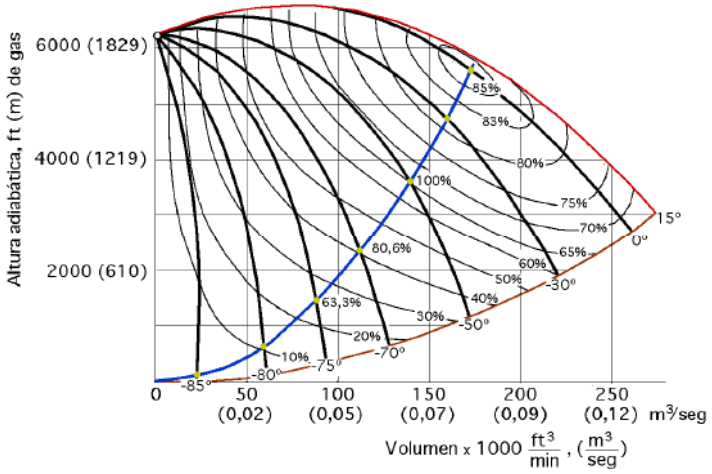


Fig XXIV.36.- Control por paletas a la entrada

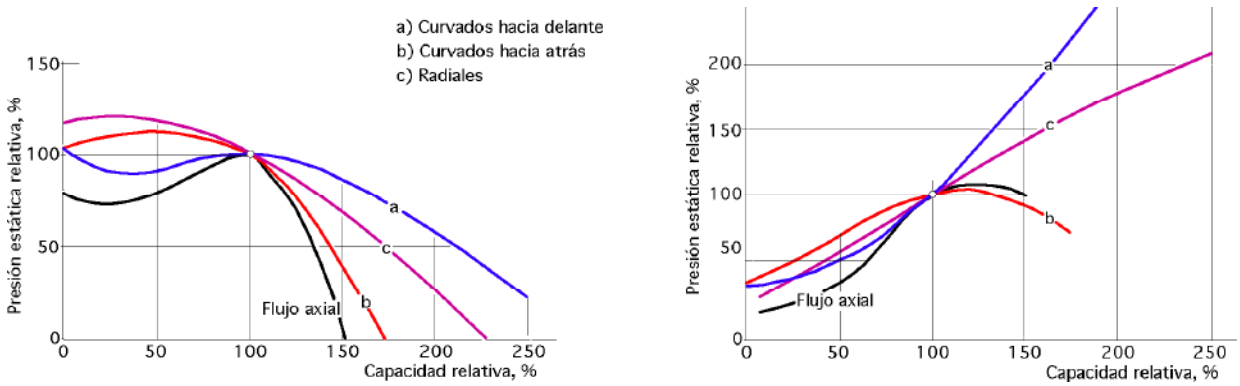


Fig XXIV.37.- Curvas características de ventiladores centrífugos y axial

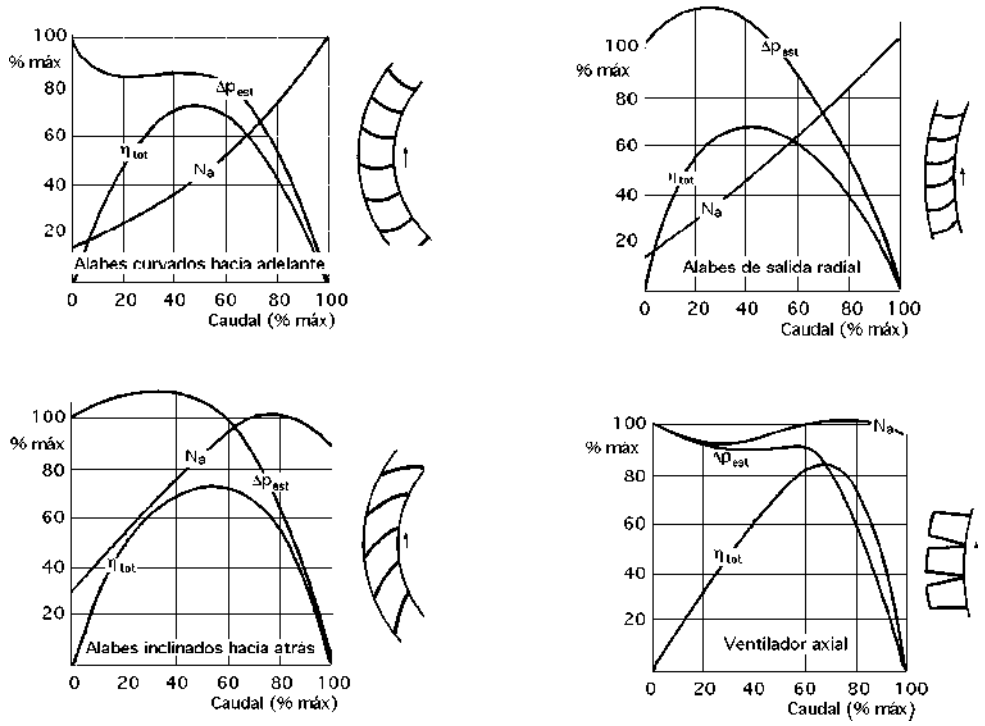


Fig XXIV.38.- Curvas características típicas de un ventilador, a) Con álabes curvados hacia adelante; b) Con álabes de salida radial; c) Con álabes curvados hacia atrás; d) Con álabes axiales.

Si se representan gráficamente las curvas características en %, se ponen de manifiesto algunas diferencias en diferentes tipos de diseño de ventiladores, Fig XXIV.38.

- Los ventiladores centrífugos tienen curvas características con mucha pendiente y, por tanto, son muy interesantes para aplicaciones de elevada presión estática y bajos caudales; requieren altas velocidades periféricas, para una altura dada, y están equipados con forros de desgaste, cuando hay mucha carga de polvo en el gas que manipulan

- Los ventiladores axiales tienen curvas características más planas, y resultan adecuados para situaciones en que los requisitos de presión estática tiendan a disminuir, cuando el flujo decrece; su aplicación a sistemas en los que los requisitos de presión pueden aumentar súbitamente, se debe revisar cuidadosamente para asegurar que el cambio en la presión estática no provoque la inestabilidad del ventilador

- Algunas curvas características de potencia tienen la concavidad hacia arriba, mientras que otras la presentan hacia abajo; éstas tienen la ventaja de ser autolimitadoras, por lo que el peligro de que se pueda quemar un accionamiento es pequeño y no es necesario sobredimensionar el motor

CONTROL A LA SALIDA DE VENTILADORES CENTRÍFUGOS.- Hay pocas aplicaciones que permiten operar a los ventiladores de forma continuada, a la misma presión y volumen de descarga; para cumplimentar las condiciones del sistema, se requieren medios que modulen la salida de los ventiladores, como el control por $\begin{cases} \text{- } cortatiros \\ \text{- } velocidad\ variable \end{cases}$

a) El ***control por cortatiros*** introduce la suficiente resistencia en el sistema, como para alte-

rar la capacidad de salida del ventilador, conforme se solicite.

Sus ventajas son:
- *mínima inversión de capital inicial entre todos los tipos de control*
- *facilidad de operación y de adaptación al control automático*
- *accionamiento del ventilador de mínimo coste, con un motor de corriente alterna*
- *control continuo en todo el campo operativo del ventilador*

El control por cortatiros provoca un derroche de energía, ya que el exceso de energía de presión hay que disiparla por estrangulamiento; el control más económico se consigue mediante paletas o cortatiros a la entrada, diseñadas para su utilización con aire sucio y limpio.

La experiencia con ventiladores de tiro forzado, de $aire_{primario}$ y tiro inducido, ha demostrado que el control con paletas a la entrada es fiable y reduce los costes de operación; con este sistema, el control regula el flujo de aire que entra en el ventilador y exige menor potencia a cargas parciales que el control con cortatiros a la salida del ventilador.

El control con paletas a la entrada ofrece mejor rendimiento a cualquier carga reducida, en comparación con los cortatiros a la salida, resultando más efectivo con cargas moderadas próximas a la nominal. El coste inicial del control con paletas a la entrada es mayor que el de un control con cortatiros a la salida, e inferior al coste de un control con velocidad variable.

b) Los motores de ***velocidad variable*** rebajan la velocidad de giro para flujos reducidos, pero requieren de un coste inicial más alto, que no se compensa con las correspondientes potencias más reducidas. El control de la velocidad da lugar a pérdidas en el rendimiento del motor, ya que no hay ningún accionamiento de velocidad variable que pueda operar con rendimiento constante en todo el campo de cargas del ventilador.

Los controles con velocidad variable son:
- *el acoplamiento hidráulico*
- *el motor de corriente continua de velocidad variable*
- *la turbina de vapor de velocidad variable.*

ACCIONAMIENTO DE VENTILADORES.- Los ventiladores funcionan accionados por motores eléctricos de inducción de jaula de ardilla, porque son más baratos, fiables y eficientes que otros tipos de accionamientos en un amplio campo de cargas.

- En instalaciones de velocidad variable de gran potencia, se usan acoplamientos
- *magnéticos*
- *hidráulicos*

- En instalaciones de velocidad variable de menor potencia, se usan motores de inducción con rotor devanado

El accionamiento con turbina de vapor es más caro que el de un motor con jaula de ardilla para velocidad fija. La turbina de vapor es más económica en plantas que necesiten el vapor de escape para procesos, o en plantas térmicas que usan el vapor de escape para el calentamiento del agua de alimentación del ciclo.

VENTILADOR DE TIRO FORZADO.- Las calderas de tiro $\begin{cases} \text{- } forzado \\ \text{- } inducido \end{cases}$ utilizan el ventilador de tiro forzado para impulsar el aire a través del sistema de suministro de $aire_{comburente}$ hacia el hogar.

El ventilador de tiro forzado tiene una presión de descarga bastante alta para equilibrar la resistencia total de los conductos de aire, calentador de aire, quemadores, lecho de combustible y cualquier otra resistencia entre la descarga del ventilador y el hogar, *lo que hace de éste el punto de tiro equilibrado* o de presión cero. La capacidad volumétrica del ventilador de tiro forzado a la salida debe ser igual a la cantidad total de aire comburente necesario, más las fugas del lado de aire esperadas en el calentador de aire.

En muchas instalaciones se obtiene mayor fiabilidad repartiendo la capacidad total entre dos ventiladores que operen en paralelo. Si uno de ellos queda fuera de servicio, el otro puede llevar un 60% o más de la carga nominal de la caldera, dependiendo de cómo se hayan dimensionado los ventiladores.

Para establecer las características del ventilador de tiro forzado se calculan:

- La resistencia del sistema desde el ventilador hasta el hogar, para determinar el peso de aire necesario para la combustión

- Las fugas en el calentador de aire, basando los cálculos a una temperatura del aire a la entrada del ventilador de 80°F (27°C).

La selección de un ventilador de tiro forzado debe tener en cuenta lo siguiente:

Fiabilidad.- Las calderas tienen que operar sin interrupción durante largos períodos, lo cual implica que el ventilador debe tener $\begin{cases} \text{- } el\ rotor\ y\ la\ carcasa\ robustas \\ \text{- } los\ cojinetes\ con\ cargas\ conservadoras \\ \text{- } los\ álabes\ perfilados\ de\ modo\ que\ no\ acumulen\ polvo \end{cases}$ y estar bien equilibrado

Rendimiento.- Se necesita un alto rendimiento en un amplio campo de capacidades, porque las calderas operan en condiciones de carga variables muy diversas.

Estabilidad.- La presión del ventilador debe variar uniformemente en función del flujo volumétrico, para todo el campo de capacidades, lo que facilita el control de la caldera y asegura una mínima perturbación en el flujo de aire, cuando la resistencia del sistema se modifica por pequeños ajustes en el equipo de combustión del combustible.

Sobrecarga.- Es conveniente que los ventiladores accionados por motor tengan características autolimitadoras de la potencia consumida, y así no se pueda sobrecargar el motor; ésto significa que la potencia alcanza un máximo y posteriormente declinará cerca del punto correspondiente a la plena carga del ventilador.

VENTILADOR DE TIRO INDUCIDO.- Las unidades que operan con tiro equilibrado, o sin ventilador de tiro forzado, precisan un ventilador de tiro inducido para mover los gases de combustión; el peso de los gases utilizados en el cálculo del tiro inducido comprende:

- Los gases de combustión, correspondiente a la máxima carga de caldera

- Las infiltraciones de aire en el cerramiento de la caldera desde la atmósfera circundante

- Las fugas en el calentador de aire, desde el lado de aire hacia el de humos

Un ventilador de tiro inducido tiene los mismos fundamentos que un ventilador de tiro forzado, excepto que éste manipula gases a mayor temperatura, que pueden contener ceniza erosiva; la temperatura de los humos se calcula para la caldera a plena carga. Los cojinetes, normalmente refrigerados por agua, disponen de escudos contra la radiación térmica, situados en el eje entre el rotor y los cojinetes, para evitar el recalentamiento de los mismos.

VENTILADORES DE RECIRCULACIÓN DE HUMOS.- Se utilizan para controlar la temperatura del vapor, la absorción de calor en el hogar y la escorificación en las superficies termointercambiadoras; se ubican a la salida del economizador para extraer los humos e inyectarlos en el hogar, en zonas que dependen de la función pretendida, lo que condiciona su dimensionado.

La selección del ventilador puede estar condicionada por:

- Una presión estática alta, para la atemperación de las temperaturas del hogar a plena carga

- Un volumen alto, para el control de las temperaturas de vapor a cargas bajas de la unidad

Los ventiladores de recirculación de humos tienen los mismos requisitos que los ventiladores de tiro inducido, a los que hay que añadir otros factores:

- Opera a mayor temperatura que el de tiro inducido, de forma que una operación intermitente puede provocar choques y desequilibrios térmicos

- Cuando el ventilador está retirado de servicio, hay que proveer unas compuertas de cierre estancas y aire de sellado, para impedir el flujo de retorno de los gases calientes del hogar y, a veces, un virador en ventiladores grandes, para el giro lento del rotor con el fin de evitar distorsiones

VENTILADORES DE AIRE$_{primario}$.- En las calderas que queman carbón pulverizado, los ventiladores de *aire$_{primario}$* suministran a los molinos el aire necesario para secar el carbón y transportarlo al hogar de la caldera. Los ventiladores de *aire$_{primario}$* se especifican para un servicio similar al de los ventiladores de tiro forzado, y se pueden ubicar en el circuito de aire:

- Antes del calentador de aire (sistema de aire$_{primario}$ frío); tiene la ventaja de operar con un menor flujo volumétrico, para un flujo másico dado; este método presuriza el lado de aire del calentador de aire y provoca fugas de aire hacia el lado de humos

- Aguas abajo del calentador de aire (sistema de aire$_{primario}$ caliente); evita las fugas en el calentador de aire$_{primario}$, pero requiere una temperatura mayor de diseño del ventilador y un mayor régimen de flujo volumétrico

VENTILADORES AXIALES.- Un procedimiento de reducir la potencia en los servicios auxiliares de los sistemas de generación de energía que queman combustibles fósiles, es instalar ventiladores axiales de paso variable. La Fig XXIV.39 compara el consumo de potencia en ventiladores de *aire$_{primario}$*, de tiro forzado y de tiro inducido, para una unidad de 500 MW que quema carbón, utilizando ventiladores:

- Axiales de paso variable

- Centrífugos con álabes curvados hacia atrás, controlados por cortatiros de paletas a la entrada

Al 100% de la carga, los ventiladores axiales de paso variable ahorran un 7% del consumo en auxiliares.

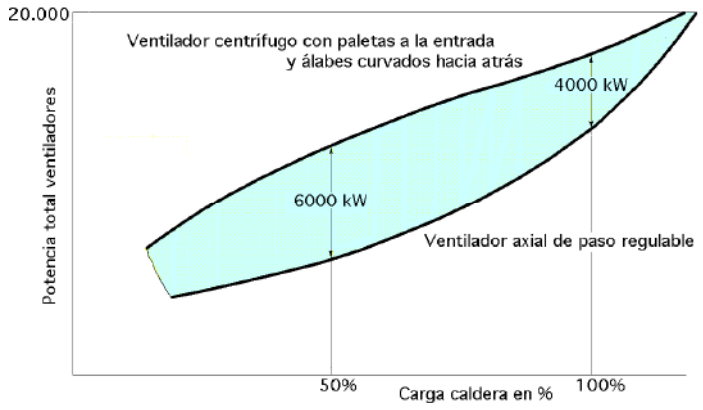
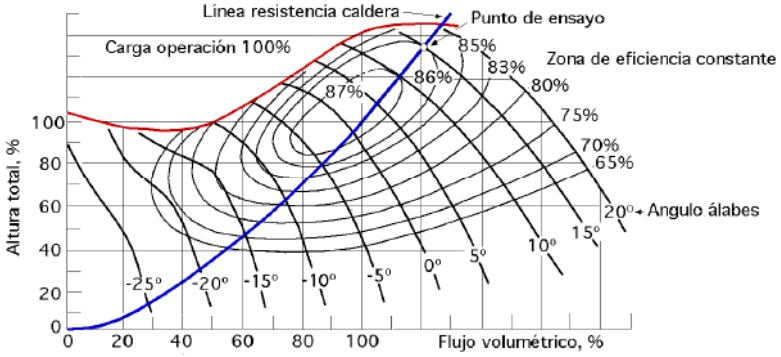


Fig XXIV.39.- Ahorro de energía en ventiladores



XXIV.40.- Colinas de rendimientos para un ventilador axial de paso variable

Características operativas y de control.- La Fig XXIV.40 presenta las curvas características de un ventilador de flujo axial de paso variable.

Se observan las siguientes ventajas:

- Las colinas de rendimiento discurren paralelamente a la línea de resistencia de la caldera, lo que da lugar a una alta eficiencia en un amplio intervalo de cargas de la caldera

- Existe un extenso campo de control, por encima y por debajo del área correspondiente a la colina de mayor rendimiento, lo que permite diseñar el ventilador con las condiciones de la caldera, quedando el punto de ensayo dentro del intervalo de control

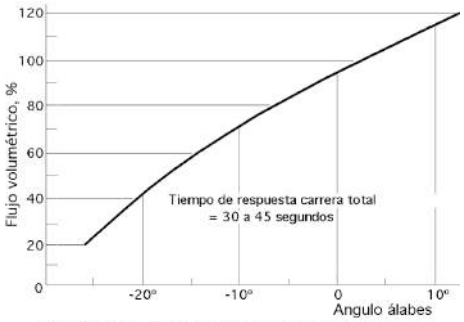


Fig XXIV.41.- Características del control de álabes de paso variable

- Las líneas correspondientes al ángulo de paso de los álabes, son curvas características de ventiladores individuales que tienen ese ángulo de paso; como estas líneas son de mucha pendiente, una modificación de la resistencia de la caldera provoca cambios muy pequeños de caudal

- Como el ángulo de paso se puede ajustar a cualquier valor, entre el mínimo y el máximo, la variación de caudal es continua y casi lineal, como se aprecia en la Fig XXIV.41

Estas dos últimas particularidades facilitan estabilidad en el control del ventilador y de la caldera.

Funcionamiento de ventiladores axiales de paso variable en paralelo.- Los ventiladores de flujo axial de paso variable pueden operar en paralelo, evitando que cualquiera de ellos se sitúe en la zona de inestabilidad.

Con dos ventiladores operando en paralelo, la línea de resistencia para uno de los ventiladores está influenciada por el otro y también por las condiciones de la caldera. Los dos ventiladores deben proporcionar conjuntamente la presión requerida para vencer la resistencia de la caldera, aunque sus flujos volumétricos no tienen por qué ser iguales.

Para alcanzar el funcionamiento más eficiente de los ventiladores y para evitar el funcionamiento en zonas próximos a la línea de inestabilidad, lo mejor es mantener ambos ventiladores operando en sus condiciones de diseño.

En ventiladores axiales de paso variable con tiro $\begin{cases} \text{- forzado} \\ \text{- inducido} \end{cases}$ *, el control recomendado para el arranque y puesta en servicio, retirada de servicio y supervisión de la operación, es muy similar al de los ventiladores centrífugos*

Zona de inestabilidad.- En el ventilador de flujo axial se puede producir el desprendimiento de la capa límite del fluido de la superficie del álabe, que es un fenómeno que se presenta cuando se fuerza al ventilador a operar fuera de sus características de diseño; si ésto ocurre, el ventilador entra en inestabilidad y ya no vuelve a operar sobre su curva característica normal, produciendose

imprevisibles vibraciones del flujo que pueden dañar los álabes rotativos.

En la Fig XXIV.42, las curvas A son las características normales de funcionamiento del ventilador, correspondientes a cada ángulo que se asume en el paso variable de los álabes. Cada una de estas curvas tiene un punto individual S de inestabilidad . La curva C une todos los puntos de inestabilidad S, y se conoce como línea o curva de inestabilidad.

Cada una de las tres líneas B, es la característica de inestabilidad correspondiente a un ángulo determinado del paso variable de los álabes, e indica los puntos recorridos por el ventilador, cuando opera en condiciones inestables.

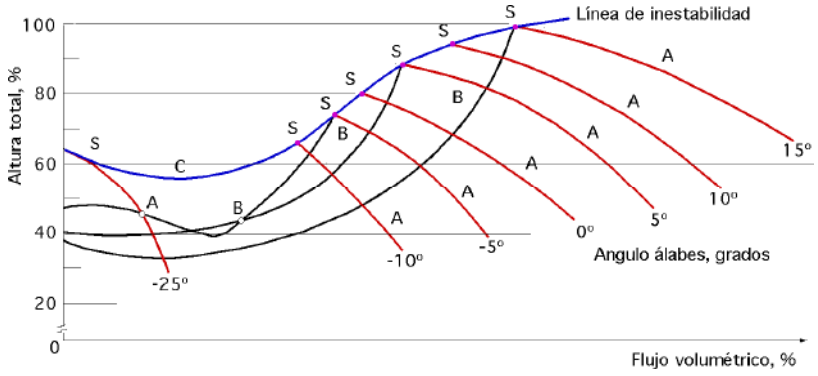


Fig XXIV.42.- Curvas reales de inestabilidad

La Fig XXIV.43 explica el fenómeno de la inestabilidad del sistema *ventilador-caldera*:

- Si la resistencia del sistema de caldera, curva B, aumenta por cualquier razón, por ejemplo, por oscilación de la presión en el hogar tras un disparo de combustible, el punto de funcionamiento normal X cambiará, para encontrarse en un nuevo valor más elevado de resistencia del sistema, curva B_1

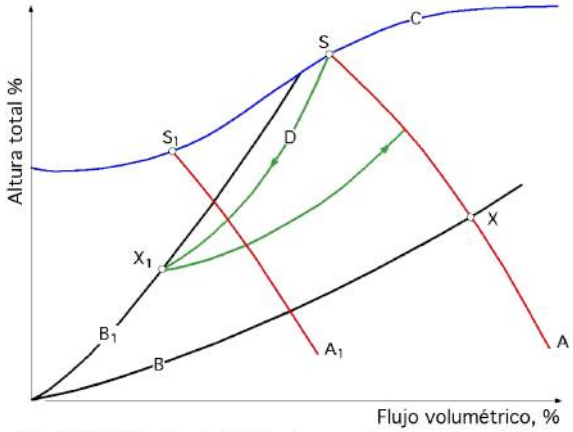


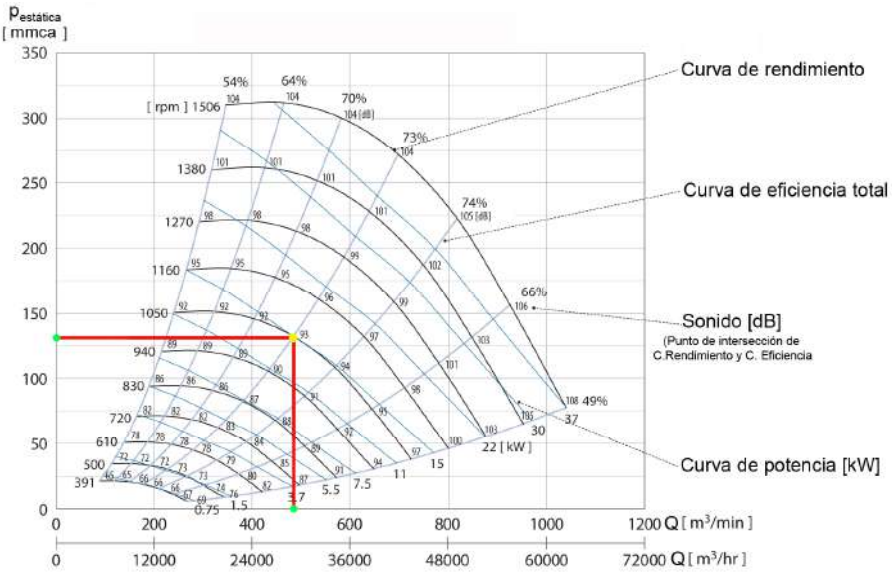
Fig XXIV.43.- Inestabilidad con relación a la caldera

- El desplazamiento del punto X se verifica a lo largo de la curva característica de funcionamiento, curva A, correspondiente al ángulo del paso variable con el que está operando el ventilador

- Si durante el desplazamiento, el punto de operación llega al punto de inestabilidad S el ventilador se hace inestable

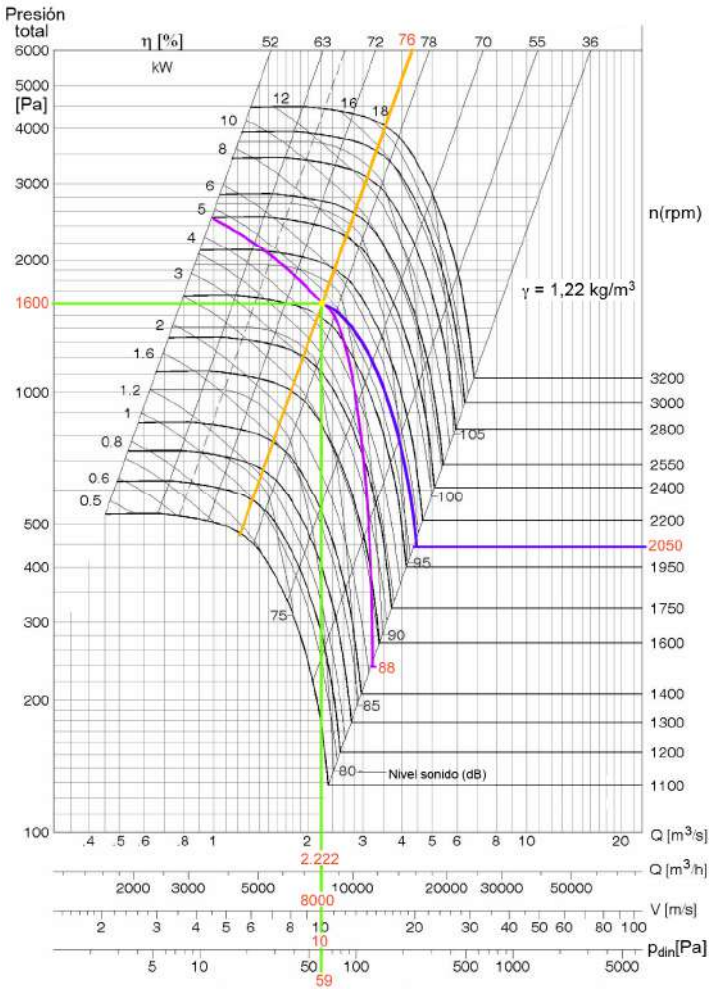
- Como consecuencia de la relación entre la característica de inestabilidad que mantiene el ventilador, curva D, y la nueva resistencia del sistema, curva B_1, el nuevo punto de funcionamiento está en su intersección X_1

- Cuando la resistencia del sistema disminuye y vuelve a ser la primitiva, curva B, el ventilador se recupera de su inestabilidad y retorna a su curva característica de funcionamiento normal A.



Para el punto de funcionamiento señalado: Volumen aire 485 m^3/min, Presión estática 132 mmca, n° de revoluciones 1050 rpm, Eficiencia total 73%, Potencia absorbida 15 kW, Nivel intensidad del sonido 93 dB

Fig XXIV.44.- Curvas características de rendimiento, eficiencia, sonido y potencia en un diagrama (p_{est} - Q)



Para el punto de funcionamiento señalado: Volumen aire 8000 m^3/h, Presión dinámica 59 Pa, Presión total 1600 Pa, 2050 rpm, Eficiencia total 76%, Potencia absorbida 4,7 kW, Nivel intensidad del sonido 88 dB, Velocidad del fluido 10 m/seg

Fig XXIV.45.- Curvas características de eficiencia, presión dinámica, sonido y potencia en un diagrama (p_{total} - Q)

En la hipótesis de que se presente una circunstancia como la descrita, el ángulo de paso variable de los álabes se reduce hasta que el ventilador recobre su estabilidad. El ventilador es estable cuando la nueva curva característica de funcionamiento, curva A_1, correspondiente al nuevo ángulo seleccionado del paso variable, facilite un nuevo punto de inestabilidad S_1 que se encuentre más elevado que la nueva resistencia del sistema, curva B_1.

Cuando los ventiladores axiales se dimensionan adecuadamente y la curva de resistencia del sistema es de perfil parabólico, la probabilidad de que se produzca una situación de inestabilidad es muy pequeña. La probabilidad de inestabilidad aumenta cuando el ventilador está sobredimensionado por lo que respecta a su capacidad, o cuando los ventiladores funcionan de forma inadecuada.

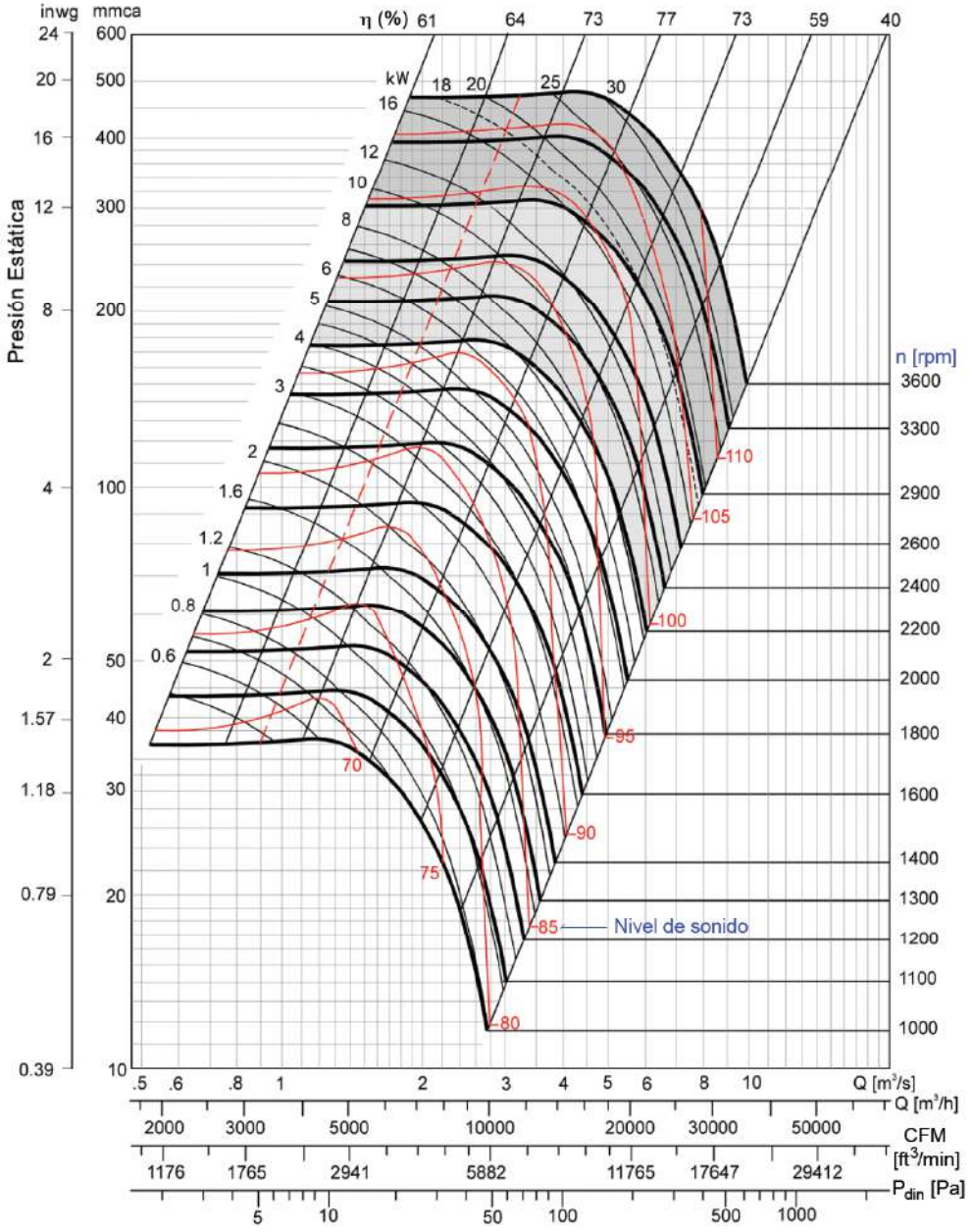


Fig XXIV.46.- Curvas características de rendimiento, eficiencia, nivel de sonido y potencia en un diagrama (p_{est}-Q)

RUIDO.- Los ventiladores producen dos tipos de ruido:

*- El de **tono simple** (monofrecuencia), que se genera cuando el flujo de fluido atraviesa un objeto estacionario (paletas o boquillas rectificadoras). La distancia entre los álabes del rotor y el objeto afecta a la intensidad del sonido, junto con la frecuencia del paso de los álabes, siendo dominante su primer armónico*

*- El de **banda ancha** (multifrecuencia) se produce por la elevada velocidad del fluido circulando por el interior de la carcasa del ventilador, y cubre un amplio campo de frecuencias*

El sonido se desplaza desde la boca de entrada de la caja al ventilador, a la carcasa, y al conducto de impulsión. Los niveles sonoros procedentes de la caja de entrada del ventilador de tiro forzado y de $aire_{primario}$ se controlan mediante un silenciador de absorción.

El ruido procedente de la carcasa del ventilador se controla mediante un aislamiento de lana mineral y de una envolvente acústica. El ruido en el conducto de impulsión requiere una evaluación más detallada para determinar el método de control más económico.

- Para ventiladores de tiro forzado y de $aire_{primario}$ resulta efectivo el aislamiento acústico de los conductos de salida, o la instalación de un silenciador de absorción.

- Para ventiladores de tipo inducido es suficiente la instalación de un aislamiento térmico y de una envolvente, en los conductos de salida de humos.

Para reducir el ruido de salida de la chimenea en unidades que quemen carbón, un silenciador de absorción colocado en la descarga no funcionará, porque los paneles absorbentes del sonido se llegan a cubrir con ceniza volante en polvo, por lo que se debe utilizar en esta zona un silenciador de resonancia, con autolimpieza.

XXIV.7.- SISTEMA ATEMPERADOR DE CONDENSACIÓN

En la mayoría de las calderas, el método de control de la temperatura del vapor en el sobrecalentador, es la atemperación por un atomizador de agua que se introduce en el vapor entre el sobrecalentador primario y secundario. Si para la atemperación se utiliza agua de alimentación, ésta debe tener un bajo contenido en sólidos, para evitar la introducción de depósitos en el sobrecalentador o en la turbina. Si la calidad del agua de alimentación no cumple los criterios establecidos para el agua del atomizador, se puede utilizar un sistema atemperador de condensación que disponga de agua de bajo contenido en sólidos.

Un diagrama esquemático de un sistema atemperador de condensación se indica en la Fig XXIV.47; consta de:

- Un condensador

- Una válvula de control del agua del atomizador

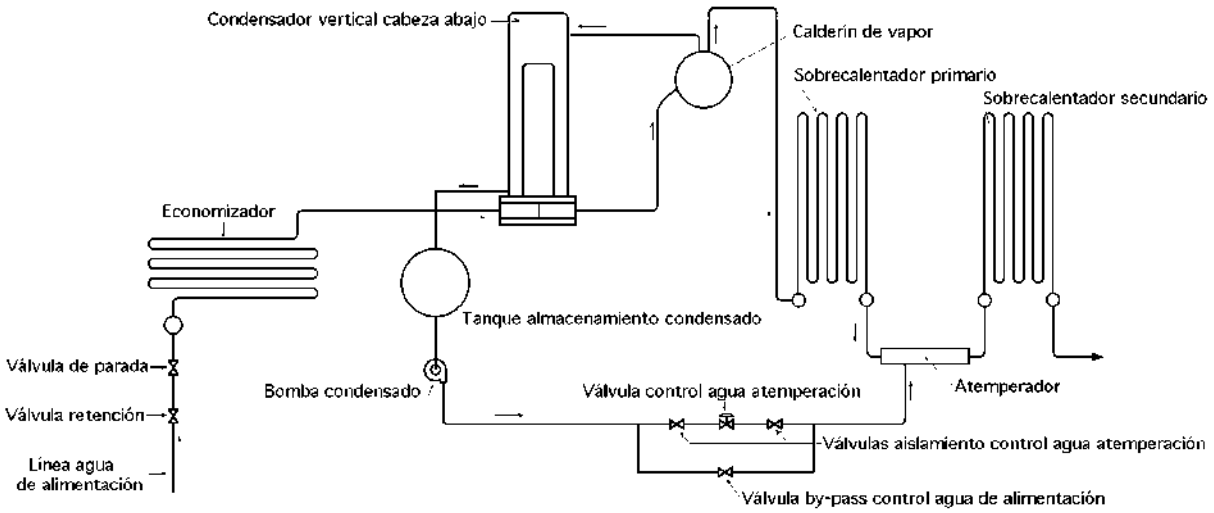


Fig XXIV.47.- Esquema del sistema de condensador vertical

- *Un atemperador atomizador de agua*
- *Un tanque de almacenamiento de condensado*
- *Una bomba de condensado*

En el diseño de este sistema, el vapor saturado procedente del calderín de la caldera se lleva al lado de la carcasa exterior a los tubos de un condensador vertical, en el que el agua condensa y subenfría; este condensado fluye a través de la tubería del agua al atomizador y válvula de control, hacia un atemperador situado entre las etapas del sobrecalentador. Los sistemas de atemperador de condensación se accionan por la diferencia de presiones entre la del calderín y la que corresponde al punto del recorrido del vapor sobrecalentado, en el que se introduce el agua al atomizador.

Los condensadores se posicionan por encima de la cota del calderín, con el fin de incrementar la altura hidrostática disponible para el atemperador.

Si la presión diferencial disponible no es suficiente para vencer la resistencia del sistema, debida al flujo de diseño del agua del atomizador, se tiene que utilizar una bomba de condensado.

Para evitar la bomba de condensado, las pérdidas del sistema por resistencia se minimizan mediante la utilización de un atemperador con baja caída de presión, si las características del sistema del atomizador permiten su uso en el campo operativo de la caldera.

El agua de alimentación es el medio refrigerante que fluye por el interior de los tubos del condensador vertical.

Existen otras ubicaciones alternativas del condensador vertical:

- *Aguas arriba de la entrada del economizador*
- *Aguas arriba de un colector intermedio en caso de un economizador multibanco*

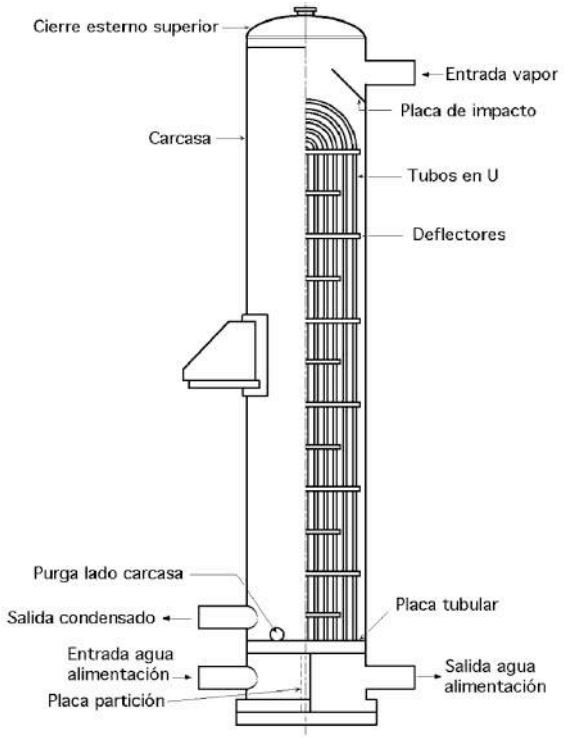


Fig XXIV.48
Disposición de un condensador vertical con cabezal inferior

El condensador del agua del atomizador, es un termointercambiador vertical de carcasa y tubos, con el cabezal (placa tubular) en la parte inferior, Fig XXIV.48. El haz tubular está formado por un paquete de tubos en forma de U invertida.

La carcasa es cilíndrica con la entrada de vapor del calderín próxima a la parte superior de la misma, y la salida de condensado en la parte inferior de la carcasa.

Durante el funcionamiento normal, el sistema del condensador está sometido a un funcionamiento cíclico. En algunos períodos no hay demanda de flujo atomizador y el nivel de condensado en el condensador sube hasta la parte superior del haz tubular, operación deseable en la disposición de tubos en forma de U invertida; esta construcción impide la formación de bolsas de vapor en la parte alta del termointercambiador, que podrían provocar golpes de ariete y las consiguientes grietas en la carcasa.

A veces, cuando el condensador está casi inundado de agua, el conjunto está a una temperatura cercana a la del agua de alimentación. Una súbita demanda de agua del atomizador atemperador hará caer rápidamente ese nivel de agua, exponiendo grandes longitudes de la carcasa y de partes internas a la temperatura del vapor saturado, lo que representa una rápida subida de temperatura en la carcasa, del orden de 300ºF (167ºC).

REFERENCIAS CAP XXIV.- ELEMENTOS AUXILIARES DE CALDERA

AMCA.- PUBLICATION 850- 84.- AIR MOVEMENT AND CONTROL ASSOCIATION.- Arlington Heights, Illinois, 1984. American Society of Mechanical Engineers.- ASME

AMCA.- PUBLICATION 850-84.- FLUE GAS DAMPERS- APPLICATION AND SPECIFICATION GUIDE FOR FLUE GAS ISOLATION AND CONTROL DAMPERS

AMCA.- PUBLICATION 850-02, "INDUSTRIAL PROCESS/POWER GENERATION HEAVY DUTY DAMPERS FOR ISOLATION AND CONTROL.- Air Movement and Control Association International, Inc., Arlington Heights, Illinois, 2004.

AMCA.- PUBLICATION 201-02, "FANS AND SYSTEMS.- Air Movement and Control Association International, Inc., Arlington Heights, Illinois, 2004.

American Society of Mechanical Engineers.- ASME BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE, SECTION I.- ASME.- New York.- 1988

American Society of Mechanical Engineers.- ASME BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE, SECTION I: POWER BOILERS, New York, 2004.

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

Diamond Power Specialty Company.- PRODUCT INFORMATION.- IK-4M-WL.- Waterlance Sootblower

BDB Series.- DOUBLE INLET CENTRIFUGAL FAN.- With Backward Wheels.- Kruger Ventilation Industries

SINGLE-WIDTH FANS WITH ACOUSTAFOIL®/BC/PLR WHEELS.- BULLETIN 131 june, 2004

Chaplin R.A.- THERMAL POWER PLANTS.- Vol II- FOSSIL FUEL FIRED BOILER AIR AND GAS PATH.- University of New Brunswick, Canada

Nagiar, H. M.- MODELING OF THE BUCKSTAY SYSTEM OF MEMBRANE WALLS IN WATER-TUBE BOILER CONSTRUCTION.- Thermal Science: Year 2014, Vol. 18, Suppl. 1, pp. 559-572