XX.- ECONOMIZADORES Y CALENTADORES DE AIRE

pfernandezdiez.es

Economizadores	*751*
Economizador de superficie	*753*
Tubos lisos	*753*
Superficies ampliadas	*753*
Protuberancias	*755*
Aletas longitudinales	*756*
Aletas helicoidales	*756*
Aletas anulares de perfil rectangular	*756*
Deflectores	*757*
Límite de velocidades	*758*
Economizadores de recorrido alargado	*758*
Economizadores vaporizadores	*759*
Transferencia térmica y caída de presión	*760*
Tubos desnudos	*760*
Tubos aleteados	*761*
Caída de presión del lado de humos	*761*
Caída de presión del lado de agua	*761*
Sistemas soporte del economizador	*762*
Tamaño del banco tubular	*763*
Colectores	*763*
Ligaduras contra vibraciones; consideraciones geométricas	*764*
Calentadores de aire	*765*
Calentadores de aire recuperativos	*765*
Calentadores tubulares de acero	*766*
Calentadores tubulares de fundición	*767*
Calentadores de chapas	*767*
Calentadores con serpentines de vapor-agua	*768*
Calentadores con tubos isotermos	*768*
Calentadores de aire regenerativos	*770*
Calentador Ljungström	*770*
Calentador Rothemühle	*771*
Superficies calefactoras	*772*
Características funcionales	*774*
Características térmicas	*774*
Fugas de holgura y arrastre	*775*
Caída de presión	*776*
Corrosión	*777*
Temperatura mínima del metal	*778*
Obstrucción y limpieza	*779*
Erosión e incendios	*779*
Aplicación a plantas energéticas	*780*
Reducción de los NOx	*781*
Reducción de los SOx	*782*
Referencias	*783*

Los economizadores y calentadores de aire recuperan la energía de los humos, antes de ser evacuados a la atmósfera, y son necesarios para obtener una alta eficiencia en la caldera. Los economizadores recuperan parte de esa energía precalentando el agua de alimentación de la caldera, y los calentadores de aire realizan el precalentamiento del $aire_{comburente}$, que mejora la combustión de muchos combustibles, y resulta imprescindible en la combustión del carbón pulverizado para:

- Lograr el secado del carbón
- Asegurar una ignición estable

En comparación con las paredes de agua del hogar, el sobrecalentador, el recalentador, los economizadores y los calentadores de aire, requieren mayores superficies termointercambiadoras, por unidad de calor recuperado, lo que es debido a la pequeña diferencia que existe entre la temperatura de los humos (fluido caliente) y la temperatura del fluido frío a calentar, agua o aire.

La utilización y disposición de un $\begin{cases} \text{- economizador} \\ \text{- calentador de aire} \end{cases}$ dependen de diversos factores, como:

- El combustible
- La aplicación de la unidad generadora de vapor
- La presión de operación de la caldera
- El esquema del ciclo energético en el que está la caldera
- La configuración global de la planta correspondiente a coste mínimo

Por cada 40ºF (22ºC) de disminución de la temperatura de los humos en un economizador o en un calentador de aire, el rendimiento de la caldera aumenta un 1%.

XX.1.- ECONOMIZADORES

Los economizadores son superficies termointercambiadoras constituidas por bancos tubulares, que se utilizan para calentar el agua de alimentación de la caldera en las siguientes situaciones:

a) Antes de que entre en el calderín (para el caso de unidades con recirculación)
b) Antes de que llegue a las superficies del hogar (si son unidades de proceso directo o de un paso)

Los economizadores reducen la posibilidad de que se presenten choques térmicos y grandes fluctuaciones en la temperatura del agua de alimentación de la caldera, que llega a las paredes de tubos de agua que configuran el hogar o que entra en el calderín.

El economizador suele ser la última superficie termointercambiadora refrigerada por agua, que se encuentra aguas arriba, en el lado de humos, del calentador de aire. La Fig XX.1 presenta la ubicación del economizador en una unidad que quema carbón y la Fig XX.3 su esquema.

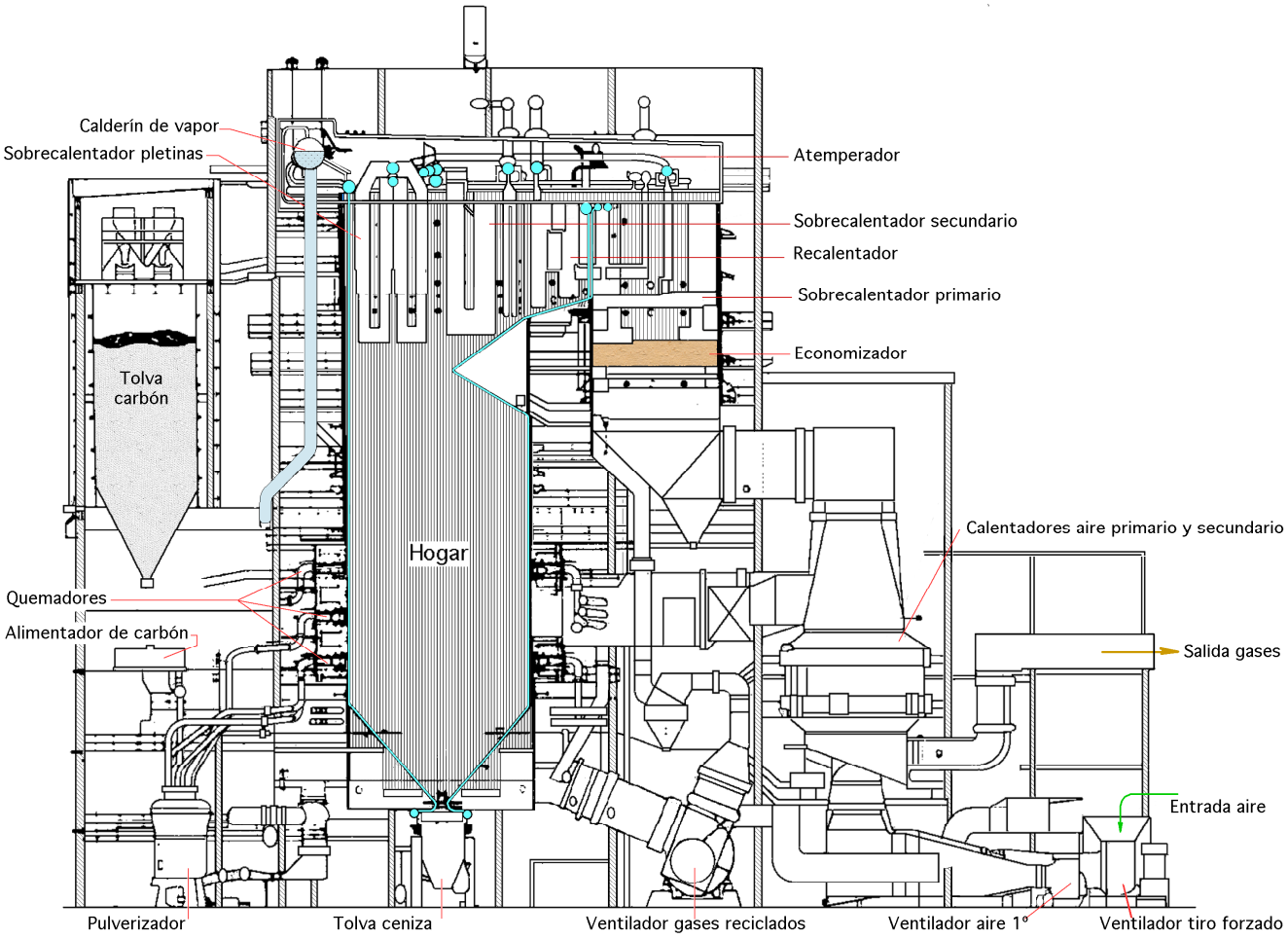


Fig XX.1.- Ubicación del economizador en una unidad que quema carbón

ECONOMIZADOR DE SUPERFICIE

Tubos lisos.- Para un economizador, el diseño más común y fiable es el que incorpora tubos desnudos (superficie exterior lisa), en alineación regular y al tresbolillo, con flujos cruzados, Fig XX.4a. Los tubos desnudos y alineación regular minimizan la posibilidad de erosión y obturación provocadas por la ceniza en polvo, en comparación con la disposición al tresbolillo, Fig XX.4b. Cuando se quema carbón, la ceniza en polvo de los humos crea siempre un ambiente sucio y erosivo, por lo que el banco de tubos que constituye el economizador debe ofrecer la máxima facilidad para su limpieza con sopladores.

Superficies ampliadas.- Para reducir los costes de inversión, los fabricantes de calderas construyen economizadores con una gran variedad de tipos de aletas, con el fin de mejorar el régimen de transferencia térmica desde el lado de humos hacia el lado del agua. Las aletas son de precio inferior al de la superficie tubular, lo que permite reducir el tamaño y coste del economizador; el éxito de su aplicación a un caso concreto depende del ambiente que se tenga en el lado de humos. Una preocupación importante, es la facilidad que para realizar la limpieza de la superficie termointercambiadora, tanto la interior como la exterior del lado de humos.

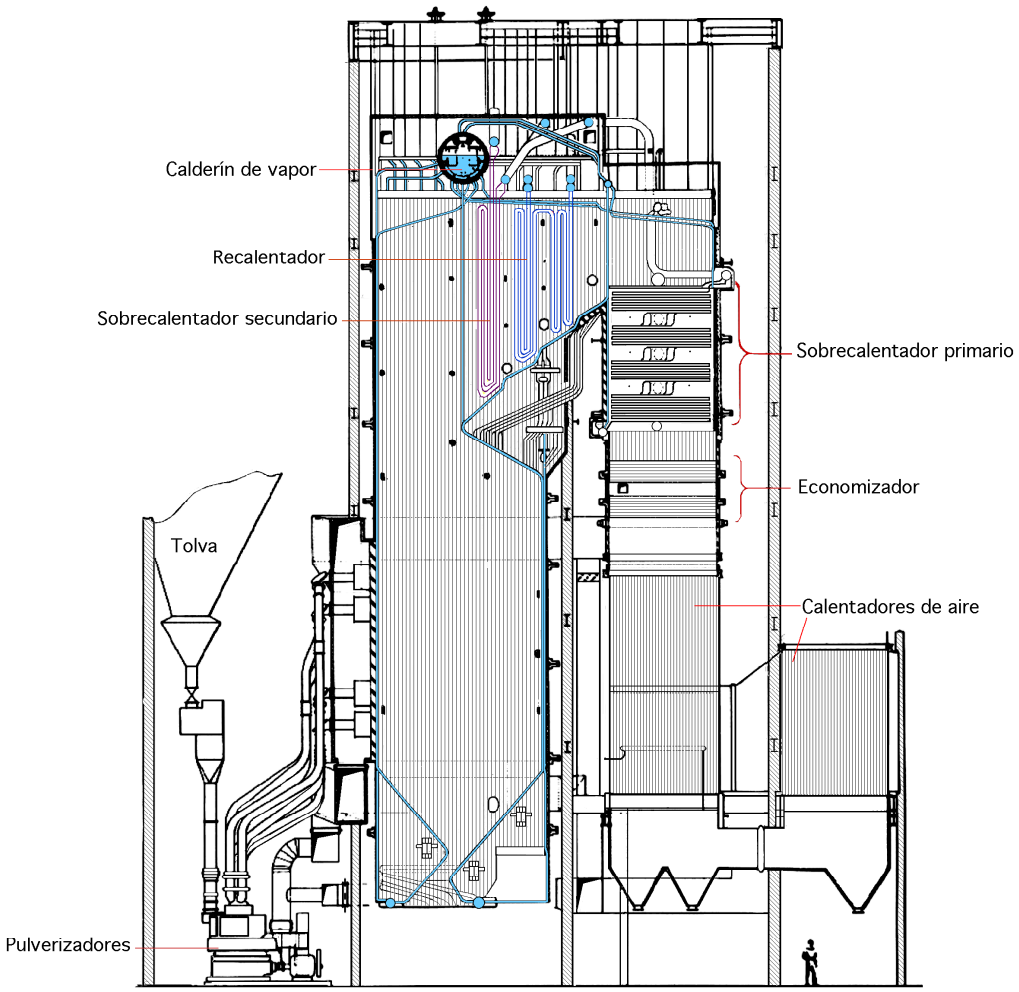


Fig XX.1a.- Posiciones del economizador y del calentador de aire en una unidad que quema carbón

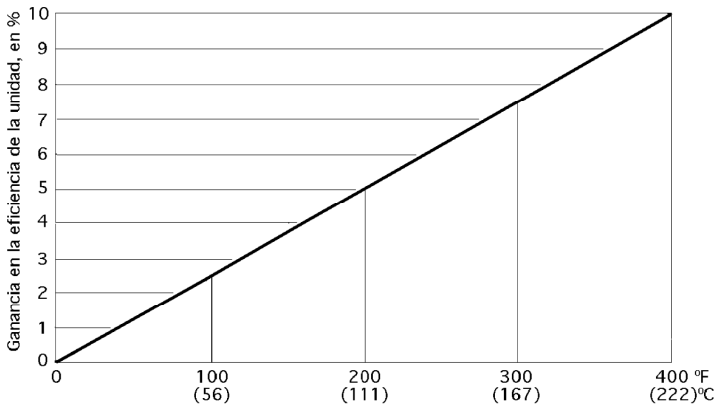


Fig XX.2.- Incremento aproximado del rendimiento debido al economizador y al calentador de aire

No siempre se pueden recomendar economizadores con aletas, ya que éstas pueden crear complicaciones operativas; en las calderas que cuentan con combustores ciclón, los economizadores con aletas no son recomendables, debido a las características de alta concentración y erosividad de la ceniza en polvo presente en los humos.

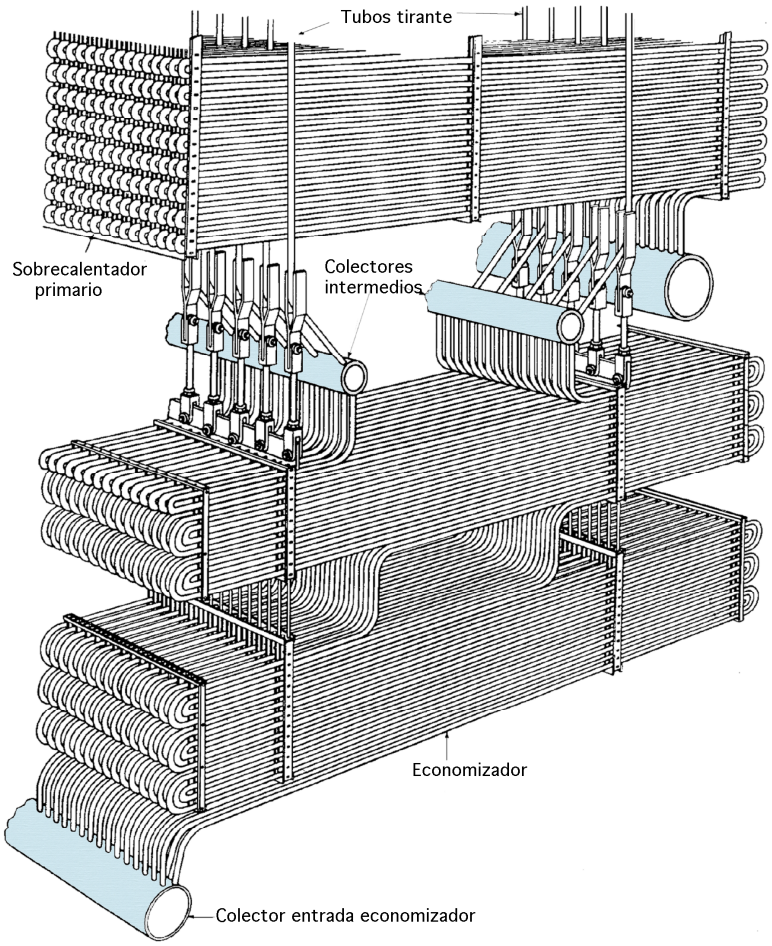


Fig XX.3.- Economizador de caldera para generador de vapor de una planta termoeléctrica

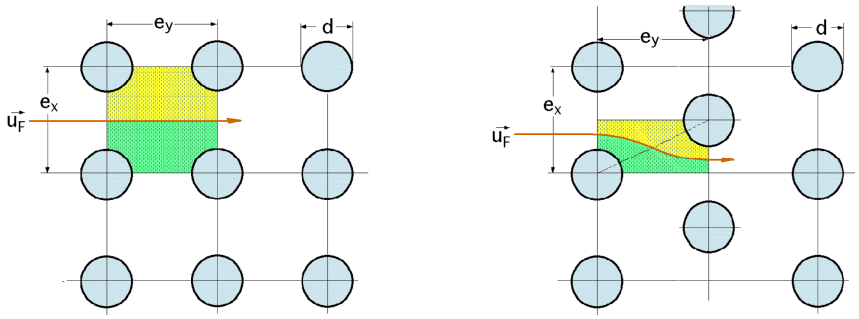


Fig XX.4- Flujos cruzados en baterías de tubos lisos en línea y al tresbolillo

Protuberancias.- Las protuberancias forman superficies similares a las que se configuran en algunos tipos de hogares para la posterior instalación y soporte de materiales refractarios; se comportan bastante bien en calderas que queman gases; los economizadores con protuberancias de clavos tienen mayores caídas de presión en el lado de humos, en comparación con los economizadores con aletas helicoidales. Los clavos suelen tener una longitud igual al radio del tubo en el que se insertan como protuberancias, y se sueldan perpendicularmente a la superficie tubular.

En las calderas que queman carbón, las protuberancias de clavos se comportan mal a causa de las cenizas, debido a:

- *la alta erosión por la naturaleza del polvo arrastrado*
- *las pérdidas en la termotransferencia, por la suciedad debida al polvo depositado*
- *obturaciones por las características fisicoquímicas de la ceniza*

Aletas longitudinales.- Una disposición de tubos aleteados longitudinalmente dispuestos al tresbolillo y formando parte de un intercambiador de calor de flujos cruzados, se presenta en la Fig XX.5. Estos economizadores no se comportan bien a lo largo de períodos de operación de la unidad prolongados; en calderas que queman carbón, se sustituyen a consecuencia de las excesivas obturaciones y erosiones que se presentan tras un corto tiempo de operación.

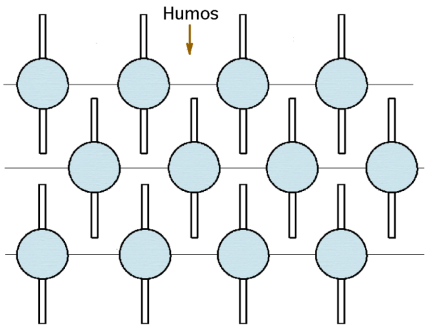


Fig XX.5- Tubos al tresbolillo con aletas longitudinales

En calderas que queman aceites y gases, con frecuencia se presentan fallos debidos a la aparición de grietas en el extremo libre de las aletas, que son los puntos más calientes de las mismas, que se propagan hacia la pared del tubo, llegándose al fallo de la pared tubular que aloja la aleta.

Aletas helicoidales.- Los tubos con aletas helicoidales, Fig XX.6, se aplicaron con éxito en algunas unidades que quemaban carbones, aceites y gases.La aleta helicoidal consiste en una hélice de paso reducido, y se utiliza en unidades que queman gases, debido a la ausencia de ceniza volante, (propia de la combustión del carbón y de algunos aceites). Las características de estas aletas son: 4 pasos por (“), espesor 0,060”÷0,075”, (1,5÷1,9 mm), y altura 0,75”, (19,1 mm); aplicándolas a tubos de 2” de diámetro exterior, se obtiene una superficie termointercambiadora 10 veces mayor que la del tubo desnudo.

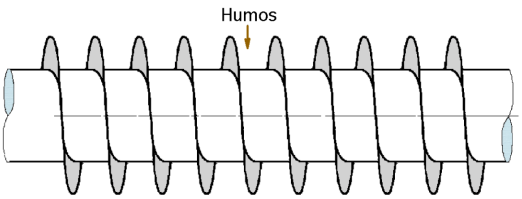


Fig XX.6- Tubo con aletas helicoidales

Cuando se queman aceites pesados o carbones, las hélices tienen un paso mucho mayor ya que hay que mantener las superficies termointercambiadoras tan limpias como sea posible. Para unidades que queman aceites, el paso suele ser de 0,5”; con pasos menores se pueden provocar obturaciones, y con pasos mayores la superficie termointercambiadora se reduce.

Para garantizar la limpieza de las superficies se emplean sopladores y una altura del banco tubular del orden de 4”÷5”= (1,2÷1,5 m). La disposición de los tubos en alineación regular facilita la limpieza y ofrece menos pérdidas de presión del lado de humos.

Aletas anulares de perfil rectangular.- Cada aleta se compone de dos mitades idénticas que se sueldan por la parte exterior del tubo, Fig XX.7.

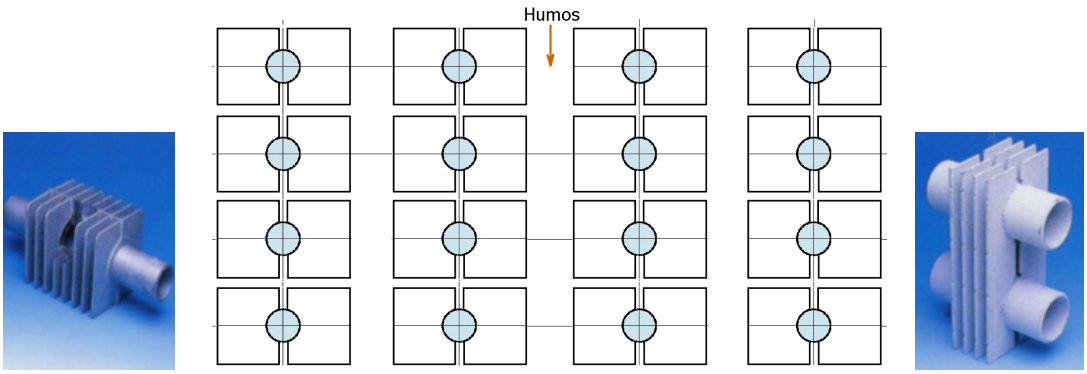


Fig XX.7- Tubos en alineación regular con aletas rectangulares

Este tipo de aleta se monta en alineación regular en bancos de tubos dispuestos horizontalmente, siendo el flujo cruzado de humos vertical descendente. Estas aletas se utilizan en economizadores viejos que se han actualizado mediante la modernización de algunos de sus componentes; el espaciado de aletas varía entre 0,5”÷1”, y su espesor es de 0,125”.

Deflectores.- Los bancos de tubos que configuran un economizador tienen sus tramos rectos aleteados y están unidos en sus extremos mediante codos de la misma tubería, en los que no se instalan aletas, conformando una sección de paso preferencial para los humos. Para evitar que los humos rodeen los tramos rectos aleteados, que ofrecen una sección de paso más restringida, se disponen tabiques deflectores que evitan la circulación de humos a través de los codos; también se utilizan en economizadores de tubos desnudos.

La circulación de los humos a través de los codos (no aleteados), provoca una:

- Reducción de la transferencia de calor en el banco que tiene la superficie ampliada

- Elevación de la temperatura del cerramiento que limita el volumen en el que está ubicada la superficie termointercambiadora del economizador

- Mayor erosión en los codos, cuando se queman carbones altos en cenizas

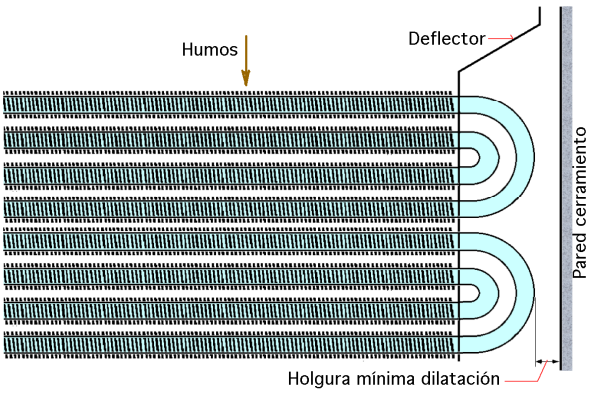


Fig XX.8- Protección de los codos en haces tubulares aleteados

Límite de velocidades.- El diseño de un economizador radica en lograr en el banco tubular la transferencia de calor necesaria, con el mínimo coste posible y máxima velocidad permisible, chorrespondiente a la sección mínima de paso de humos. Cuando se queman combustibles limpios, como gases o aceites con poca ceniza, la velocidad se fija con la máxima caída de presión permisible desde el punto de vista económico. En los aceites pesados y aceites con mucha ceniza, al igual que en los carbones, la velocidad de los humos se limita debido a problemas de erosión derivados de la ceniza volante en polvo en ellos contenida y arrastrada. La erosión depende del contenido en Al_2O_3 y SiO_2 que tenga la ceniza, de la cantidad total de ceniza, y de la velocidad máxima de los humos. La Fig XX.9 presenta varios ejemplos de límites de velocidad, en función de las características de las cenizas, en base a los siguientes criterios:

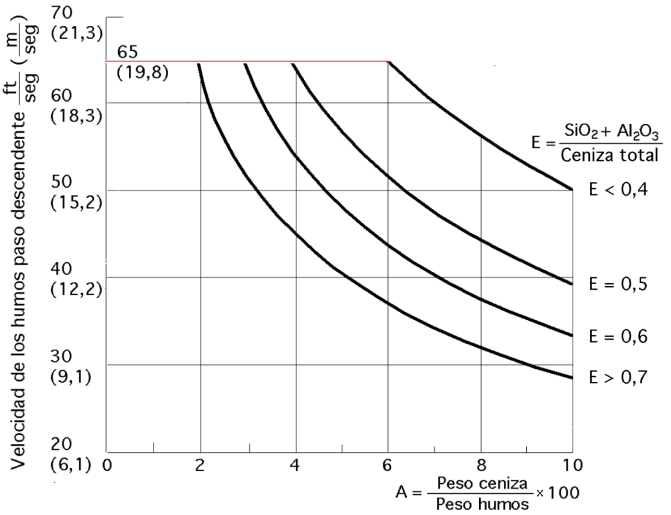


Fig XX.9- Velocidad máxima permisible de humos para economizadores en unidades que queman carbón pulverizado

- Cuando se quema carbón con menos del 20% de materias volátiles, se recomienda una reducción de la velocidad límite del orden de 5 ft/s (1,5 m/s)

- En los economizadores de calderas con combustores ciclón, en los humos se pueden utilizar velocidades mayores, ya que éstos contienen menos polvo porque más de un 50% de la ceniza se recoge como escoria fundida, en la parte inferior de la caldera; en lo que respecta a la erosión, las partículas arrastradas por los humos hacia el economizador resultan menos lesivas.

Para una determinada disposición de los tubos y una carga dada en la unidad, la velocidad de los humos depende únicamente de su volumen específico, que disminuye cuando baja su temperatura, lo que conduce a velocidades más bajas y menores transferencias de calor

Para mantener la velocidad de los humos a través de las distintas secciones del economizador, el banco inferior se diseña con tubos de mayor diámetro, lo que reduce la sección de paso de humos, mejora la transferencia de calor y requiere menor superficie e inversión.

Economizadores de recorrido alargado.- La Fig XX.10 representa un tipo de caldera industrial, que dispone de un economizador de recorrido alargado vertical (flujo largo), que se utiliza en calderas de recuperación de plantas químicas.

La superficie de calentamiento de los economizadores de flujo largo, Fig XX.10, consta de grupos de tubos verticales, aleteados longitudinalmente y formando los paneles membrana.

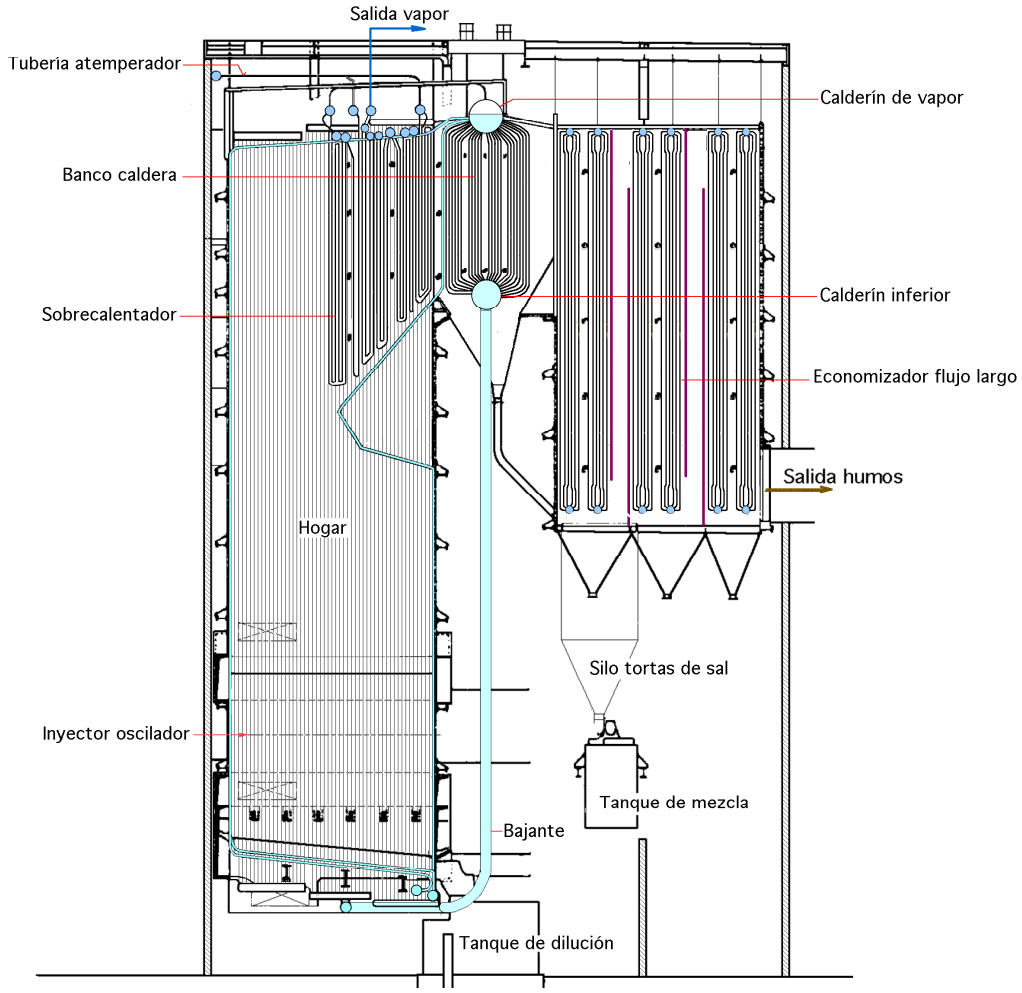


Fig XX.10.- Economizador de flujo largo en una caldera de recuperación propia de la industria química

Por el interior de los tubos circula el agua de alimentación, siempre en flujo ascendente, mientras que los humos lo hacen por el exterior en sentido descendente, en contracorriente; los economizadores de flujo largo ofrecen siempre una mínima resistencia del lado de los humos.

En estos bancos la transferencia de calor es menos eficiente que la que corresponde a los bancos de economizadores con flujos cruzados. Las cenizas se evacuan por medio de tolvas dispuestas en la parte inferior del cerramiento de la unidad.

***Economizadores vaporizadores*.-** La relación de entalpías que indica la posible vaporización dentro del banco tubular del economizador, debe satisfacer la relación:

$$i_2 - i_1 \geq \frac{2}{3}\,(i_{sal} - i_{ent}\,), \quad \begin{cases} i_1\,, i_2 & \textit{las entalpías del fluido a la entrada y salida del economizador hacia el calderín} \\ i_{sal} & \textit{la entalpía del agua saturada, a la presión de salida del economizador} \\ i_{ent} & \textit{la entalpía del agua del ciclo a la entrada del economizador} \end{cases}$$

Estos economizadores pueden resultar económicos en algunas calderas, pero siempre requieren de:

- Un diseño cuidadoso

- Un flujo ascensional

- Una salida a cota inferior a la del calderín de la unidad

impidiéndose así las inestabilidades que se presentan en el flujo del fluido interior del economizador, como: $\begin{cases} \text{- los desequilibrios entre flujos} \\ \text{- las diferentes absorciones de calor, en los distintos circuitos individuales} \end{cases}$

Las unidades de alta presión con calderín de vapor son muy sensibles a estas causas, cuando la temperatura del agua del ciclo está muy próxima a la de saturación, correspondiente a la presión de funcionamiento; para mejorar la circulación, la temperatura del agua de alimentación que va hacia el calderín, se limita a 50ºF (28ºC) por debajo de la temperatura de saturación correspondiente.

XX.2.- TRANSFERENCIA TÉRMICA Y CAÍDA DE PRESIÓN

TUBOS DESNUDOS.- En el economizador de la Fig XX.3, que tiene circulación ascendente del agua y descendente de los humos, y que carece de condiciones de vaporización, el banco tubular se puede considerar como un termointercambiador ideal, con las siguientes características:

- El factor de corrección de la LMTD para el banco tubular es la unidad

- Se desprecian el calor absorbido por un cerramiento constituido por paredes de tubos, y el calor de radiación entre tubos, desde las diversas cavidades

- Toda la energía transportada por los humos se absorbe por el agua, por lo que no hay pérdidas de calor a través de los cerramientos

- El coeficiente de transferencia de calor en el lado del agua es del orden de $\begin{cases} 2000\ Btu/ft^2\,h^\circ F \\ 11.347\ W/m^2 K \end{cases}$ *, y sólo tiene una pequeña influencia en las características funcionales del economizador*

- La influencia de la deposición de ceniza volante en polvo del lado de los humos, se considera mediante un factor de limpieza basado en la experiencia

La velocidad de transferencia de calor, para bancos de tubos desnudos dispuestos en línea, se limita del lado de humos; el coeficiente global U de transferencia de calor desde los humos hacia el agua, se estima mediante la expresión:

$$U = 0{,}98\ (h_{conv} + h_{rad})\ k_f$$

siendo:

k_f *el factor de efectividad de la superficie; para gases = 1 ; para aceites = 0,8 ; para carbones = 0,7*

Coeficiente de convección humos: $h_{conv} = h_{c(N)} = \left(\frac{0{,}287\ G^{0,61}}{D^{0,39}}\right)\left(\frac{c_p^{0,33}\,k^{0,67}}{\mu^{0,28}}\right) Y = h_c^* F_{pp} F_a Y$

h_{rad}, *el coeficiente de radiación entre tubos; si se quema carbón* $h_{rad} = 1$

$D_{equiv} = \dfrac{4\,(e_x\, e_y\, - 0{,}785\, D^2\,)}{\pi\, D}$, *con D diámetro exterior de los tubos y* e_x, e_y *el espaciado entre tubos*

Los valores de h_c^* , F_{pp} , F_a , Ψ , *se obtienen de las gráficas IV.13 a IV.17*

TUBOS ALETEADOS.- Para economizadores con tubos aleteados, las características funcionales se calculan de forma similar a los tubos desnudos, utilizando la formulación de las superficies ampliadas. Se produce un incremento de la transferencia de calor por el lado de humos debido a las aletas, por lo que en los cálculos hay que incluir éste coeficiente, junto con la resistencia térmica de la pared tubular. Para aletas en economizadores, el coeficiente global de transmisión de calor es:

$$U = 0{,}95\, h_{humos}\; k_f \;,\quad \begin{cases} h_{humos} \text{ el coeficiente de transferencia de calor del lado de humos con tubos aleteados} \\ k_f \text{ el factor de efectividad de la superficie; para } \begin{cases} gases = 1 \\ aceites = 0{,}8 \\ carbones = 0{,}7 \end{cases} \end{cases}$$

Caída de presión del lado de humos.- En bancos de tubos aleteados dispuestos en línea, la resistencia del lado de humos presentada en el economizador, se considera igual a 1,5 veces la resistencia que corresponde a ese mismo paquete tubular configurado con tubos desnudos.

Caída de presión del lado de agua.- Se calcula por la expresión:

$$\Delta p_T = \Delta p_{roz} + \Delta p_{locales} + \Delta p_{alt.estática} \quad \begin{cases} \Delta p_{roz} \text{ es la caída de presión por rozamiento} = \lambda\; \dfrac{L}{D_{equiv}}\; v\,(\dfrac{G}{10^5})^2 \\ v \text{ es el volumen específico y } G \text{ la velocidad másica} \\ \Delta p_{locales} \text{ es la suma de pérdidas locales} = \xi\; \dfrac{30}{B}\; \dfrac{T(°F) + 460}{1{,}73.10^5}\,(\dfrac{G}{10^5})^2 \end{cases}$$

que permite evaluar la caída de presión de un flujo de aire o gas, sólo aplicable con unidades inglesas, basada en el aire que tiene un volumen específico de 25,2 ft^3/lb, a 1000ºR y 30”Hg, con:

$\Delta p_{locales}$ *caída de presión en (“) de agua*

B presión barométrica en (“) de agua

T temperatura del aire o gas, ºF

G velocidad específica másica, lb/ft^2h.

$\Delta p_{alt.estática}$ *la pérdida de altura estática* $= \rho_{hom}\; \dfrac{g}{g_c}\; L \operatorname{sen}\theta$

siendo: $\begin{cases} g \text{ la aceleración de la gravedad, } ft/s^2 \text{ , } (m/s^2) \text{ y } g_c = 32{,}17\ lbmft/s^2 lbf \text{ , } (1\ kgm/s^2 N) \\ L \text{ la longitud en ft, (m)} \\ \theta \text{ el ángulo formado con la horizontal} \\ \rho_{hom} \text{ la densidad del fluido homogéneo} \end{cases}$

La presión de diseño, suma de la $\begin{cases} \text{- de diseño del calderín} \\ \text{- pérdida total } \Delta_{pT} \end{cases}$, suele ser de unos 25 psig (1,7 bar).

Si la caída de presión en el lado del agua es excesiva, para reducirla a un nivel aceptable se aumenta el número de ramas en paralelo. Si la velocidad de los humos aumenta, la caída de presión se reduce en el lado del agua, con tubos de mayor diámetro interior; la puesta al día de materiales permite espesores de tubos menores.

XX.3.- SISTEMAS SOPORTE DEL ECONOMIZADOR

Los economizadores se sitúan dentro de cerramientos que tienen, según sea la temperatura de los humos, paredes $\begin{cases} \textit{tubulares} \\ \textit{de chapas, hasta } 850°F\ (454°C) \end{cases}$

- Cuando los cerramientos son de $\begin{cases} \text{- chapa, el economizador no se puede soportar en ellas} \\ \text{- paredes de tubos, el economizador sí se puede soportar en ellas} \end{cases}$

En general, los economizadores están colgados y soportados desde puntos situados por encima del propio economizador; cuando la temperatura de los humos que salen del economizador es relativamente baja, se pueden soportar en puntos de cota inferior a la del economizador. Las Fig XX.11 a 13 presentan disposiciones de soportes típicas para economizadores con tubos lisos, que exigen que los tubos queden soportados en sus extremos y se eligen para vanos relativamente cortos, necesitando fundiciones puente u orejetas individuales, soldadas o fijadas a los cerramientos de las paredes tubulares, Fig XX.11.

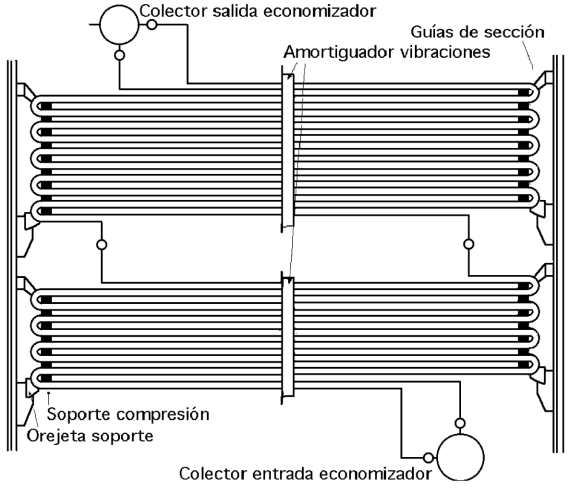


Fig XX.11.- Soportes de economizador; disposición soporte en paredes de agua

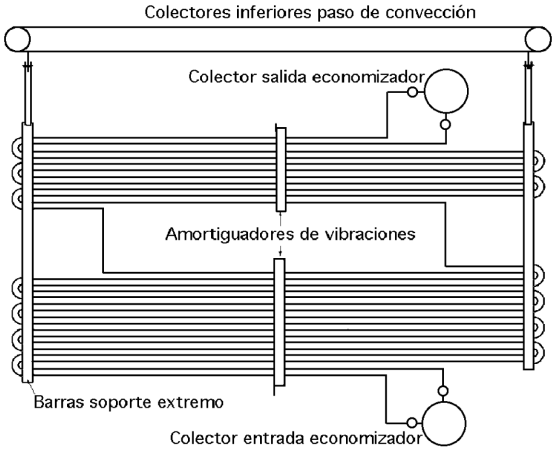


Fig XX.12.- Soportes de economizador; disposición soporte desde el colector

Otra posibilidad consiste en soportar el economizador en sus extremos, si los colectores de la pared del cerramiento integrada en el circuito de vapor sobrecalentado se encuentran situados por encima del economizador, Fig XX.12.

Cuando los vanos del banco tubular son grandes, los soportes tirante toman los tubos por los puntos situados a 1/4 de la longitud tubular, medida a partir de los extremos, Fig XX.13.

Los soportes se unen mecánicamente a los tubos individuales o a las secciones del economizador, quedando expuestos al flujo de humos que entra en el economizador, cuya temperatura obliga a diseñarlos con acero inoxidable. Para los tirantes que soportan las secciones más bajas del economizador, expuestos a temperaturas más moderadas en el flujo de humos, se emplean materiales de calidad inferior.

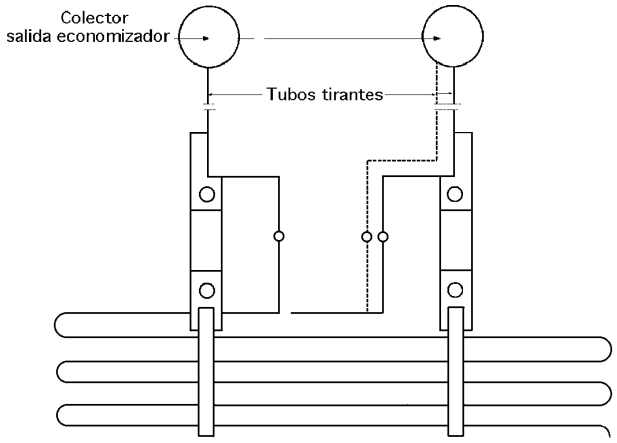


Fig XX.13.- Soportes de economizador; disposición soporte tirante

Tamaño del banco tubular.- Se encuentra limitado por una serie de condiciones, como:

- El tipo de combustible (sólido, líquido o gas) plantea, desde punto de vista de la limpieza, situaciones diversas

- Penetración que pueden lograr los sopladores en el banco, desde el punto de vista de la limpieza

- Límites de fabricación, en peso y dimensiones, a tener en cuenta en el taller y en la construcción de la planta

- Dimensiones máximas para el transporte, condicionadas por la ruta a seguir durante el desplazamiento del equipo, desde la fábrica al lugar de emplazamiento de la planta

- Consideraciones sobre el coste del mantenimiento

En calderas nuevas, es raro encontrar profundidades de banco que superen los 6 ft (1,82 m).
En la modernización de unidades se admiten bancos con profundidades mucho mayores.

Colectores.- Los colectores de entrada se sitúan en el interior del flujo de humos, y reciben el agua por uno o ambos extremos; es necesario sellar la penetración de las tuberías de entrada y salida del agua, por medio de juntas abrazadera flexibles, sobre todo en el caso de unidades de tiro presurizado.

Otras consideraciones son: $\begin{cases} \textit{- la flexibilidad de las ramas tubulares} \\ \textit{- las expansiones diferenciales} \\ \textit{- los desequilibrios y perturbaciones en la temperatura de los humos} \end{cases}$

Los colectores de salida reciben el agua de alimentación calentada y la dirigen hacia el calderín, o hacia los tubos bajantes que alimentan los diversos circuitos de las paredes del hogar en el caso de calderas de proceso directo o de paso único.

Los colectores de entrada y salida deben ser lo suficientemente grandes, para asegurar la distribución del flujo de agua entre las diversas secciones de los bancos tubulares. La velocidad del agua en los economizadores no supera los 20 ft/s (6 m/s).

Ligaduras contra vibraciones.- Son enlaces mecánicos no absolutamente rígidos; consisten en un entrelazado de tubos y estructuras que resultan imprescindibles para algunas secciones del economizador, especialmente si están soportadas por sus extremos.

Las ligaduras son necesarias cuando las frecuencias naturales (dentro de la gama de cargas de la caldera), están próximas a la frecuencia propia vorticial de derrame, o entran en resonancia.

Los tubos tirante están sometidos a vibraciones diversas, por estar inmersos en el flujo de humos, que es un fenómeno esencialmente vibratorio.

Hay que tener en cuenta que los tubos tirante ven amplificada la posibilidad de vibración, debido a su gran longitud, entre los grandes huecos existentes bajo el techo del paso de convección y los puntos de aplicación de las cargas a soportar.

Consideraciones geométricas.- Los diámetros de tubos para economizadores están comprendidos entre $\begin{cases} \textit{1,75" ÷ 2,50"} \\ \textit{44,5 ÷ 65,5 mm} \end{cases}$. Los diámetros que caen fuera de este intervalo se usan en casos de reequipamiento de unidades en proceso de modernización.

En calderas supercríticas de proceso directo se emplean tubos de menor diámetro, porque con circulación forzada la caída de presión tiene menos importancia; en estas unidades se minimiza el espesor correspondiente a la pared tubular.

El código ASME requiere que la temperatura de diseño de las partes a presión que se encuentran dentro de la unidad generadora de vapor, sea igual o superior a 700ºF (371ºC); la temperatura media de la pared tubular en el economizador, rara vez llega a esa valor, estando entre $10 \div 20$ºF = $(6 \div 12$ºC) por debajo de la del fluido, que no suele pasar de 650ºF (343ºC) a lo largo del circuito del economizador.

En las calderas que queman carbón, el espaciado transversal entre tubos se elige de acuerdo con la velocidad y resistencia máximas admitidas en el lado de humos, que son parámetros que de-

penden del tamaño de los tubos.

Si se usan superficies ampliadas, los espaciados laterales y verticales deben permitir una separación entre aletas de 0,5”(13 mm).

Para tubos lisos conviene un espaciado con holgura mínima de 0,75”, (19 mm).

El espaciado mínimo vertical de los tubos debe ser 1,25 veces el diámetro exterior de los tubos; si este espaciado es:

- Menor, la transferencia de calor se puede reducir hasta un 30%.

- Mayor la transferencia de calor queda poco afectada, aumentando la profundidad del banco y la resistencia en el lado de humos

XX.4.- CALENTADORES DE AIRE

Los calentadores de aire se utilizan para calentar el $aire_{comburente}$ y mejorar el proceso de la combustión en las plantas generadoras de vapor. Los humos constituyen la fuente energética, y el calentador recoge y utiliza el calor residual de los mismos, lo que incrementa la eficiencia global de la caldera un $5 \div 10\%$. Los calentadores de aire pueden utilizar otras fuentes térmicas, como el vapor procedente de la extracción de una turbina, dependiendo de la aplicación particular de que se trate.

Los calentadores de aire están ubicados detrás de la caldera, aguas debajo de la misma, (en el flujo de humos), en donde se reciben los humos calientes procedentes del economizador y el aire procedente del ventilador de tiro forzado.

El aire caliente que sale de los calentadores de aire mejora la combustión, con cualquier tipo de combustible; además, en las unidades que queman carbón pulverizado se emplea para el secado y transporte del combustible molido.

CLASIFICACIÓN.- Según su principio operativo en el proceso de transferencia de calor, se clasifican en dos grandes grupos:

- Recuperativos, en los que la transferencia de calor se verifica de forma directa y continua, a través de la pared que separa los fluidos, lo que garantiza la permanente separación de los flujos que intervienen en el proceso de intercambio térmico.

- Regenerativos, en los que la transferencia de calor es indirecta, haciendo uso de un medio que se expone, alternativamente, al fluido calefactor (para tomar su energía térmica) y al fluido a calentar (para cedérsela).

a) CALENTADORES DE AIRE RECUPERATIVOS.- El calor se transfiere a través de una superficie de intercambio térmico, que garantiza la separación de los flujos de humos y aire que llegan al calentador; esta superficie puede estar conformada por un conjunto de:

- Tubos, cuya superficie global es la del calentador de aire para el intercambio calorífico

- Placas paralelas, que canalizan los dos fluidos que intervienen en el proceso, por separado

Algunos intercambiadores de calor recuperativos operan con una pequeña contaminación por fuga entre los fluidos presentes; como la presión del aire es mayor que la de los humos ($p_{aire} > p_{humos}$), la fuga es del aire hacia éstos.

Calentadores tubulares de acero.- La energía térmica se transfiere desde los humos calientes que circulan por el interior de los tubos, al aire que circula por su exterior. La unidad consta de tubos rectos soldados a placas tubulares, en el interior de una carcasa de acero que sirve de cerramiento para el aire que circula por el exterior de los tubos, y que contiene las aberturas de entrada y salida del aire y de los humos.

En el calentador tubular vertical de la Fig XX.14, los tubos se soportan desde la placa tubular superior, y se apoyan en la placa tubular inferior. En cualquier caso, una de las placas tubulares debe ser flotante, para que se pueda mover libremente por la acción de las dilataciones de los tubos.

Para garantizar la estanqueidad (ausencia de fugas de cualquier clase) y en particular las de un fluido al otro (aire hacia humo), es indispensable colocar entre la placa flotante y la carcasa del calentador, una junta de expansión estanca que es la carcasa de cerramiento.

Frecuentemente se utilizan placas deflectoras dispuestas paralelamente a las placas tubulares, con el fin de: $\begin{cases} \textit{- separar los diversos recorridos parciales del aire exterior a los tubos} \\ \textit{- evitar daños a los tubos, originados por vibraciones inducidas por el flujo de aire exterior} \end{cases}$

Los tubos son de acero al C, o de baja aleación resistente a la corrosión.

El diámetro de los tubos varía entre $\begin{cases} 1{,}5" \div 4" \\ 38 \div 100\ mm \end{cases}$, con espesores entre $\begin{cases} 0{,}049" \div 0{,}120" \\ 1{,}24 \div 3{,}05\ mm \end{cases}$

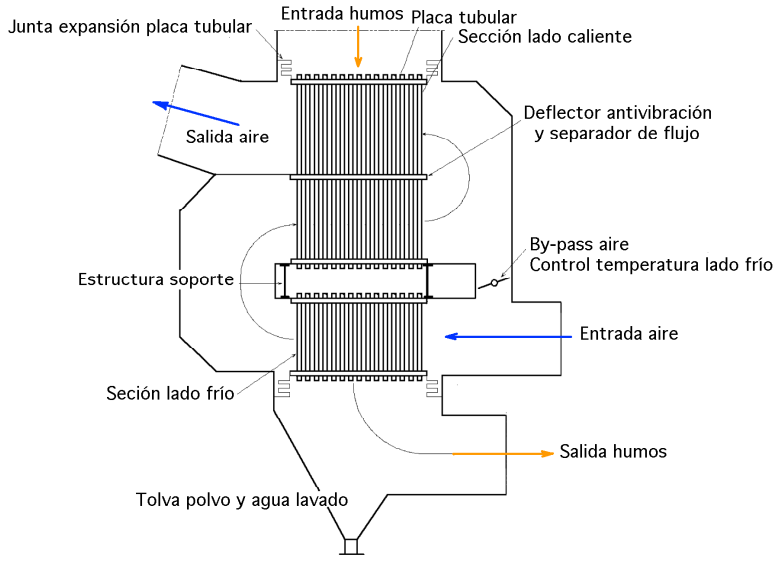
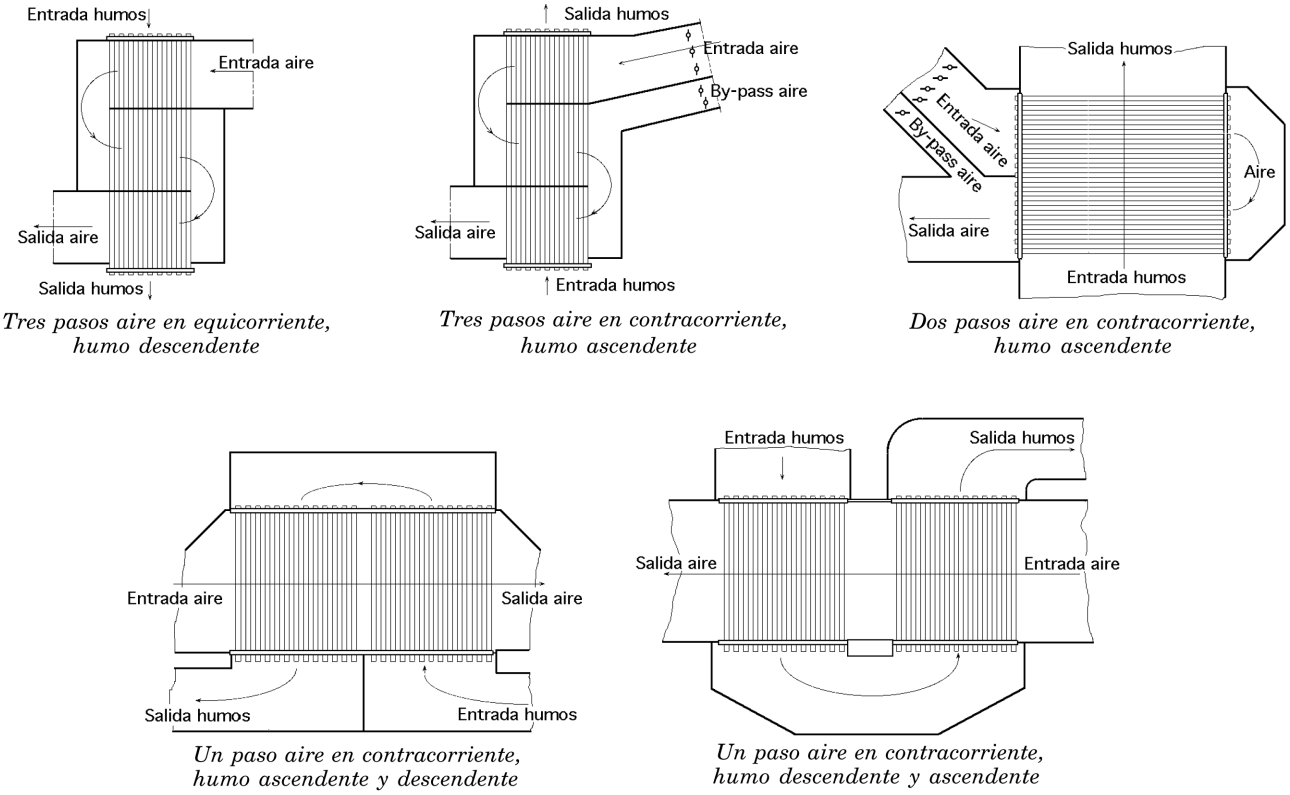


Fig XX.14.- Calentador de aire tubular, de tipo vertical



Tres pasos aire en equicorriente, humo descendente

Tres pasos aire en contracorriente, humo ascendente

Dos pasos aire en contracorriente, humo ascendente

Un paso aire en contracorriente, humo ascendente y descendente

Un paso aire en contracorriente, humo descendente y ascendente

Fig XX.15.- Algunas disposiciones de calentadores tubulares de aire

Cuando hay riesgo de corrosión y obstrucción de tubos, se utilizan diámetros y espesores superiores a los indicados.

La disposición tubular puede ser en línea o al tresbolillo, siendo esta última la más eficiente; la configuración de flujos normal es en contracorriente, con circulación vertical de humos por el interior de los tubos, y circulación horizontal de aire por uno o más pasos por el exterior de los tubos, existiendo una amplia variedad de disposiciones de pasos simples o múltiples, lo mismo del lado de humo que del lado del aire, para poderse adaptar a las diferentes configuraciones que requieren las plantas energéticas.

Para controlar la corrosión en el lado frío del calentador y el ensuciamiento por ceniza volante en polvo, los diseños incluyen un bipaso de aire frío o una recirculación de aire caliente, Fig XX.15.

Calentadores tubulares de fundición.- Se utilizan en la industria petroquímica, y muy poco en centrales termoeléctricas; su empleo está justificado por su alta resistencia a la corrosión.

Los tubos son de sección rectangular, tienen una costura soldada longitudinalmente, y se fabrican a partir de chapas de hierro fundido; se disponen con un solo paso del lado de humos, y con varios pasos en el lado del aire, circulando éste por el interior de los tubos del calentador.

La transferencia de calor se maximiza con aletas, en el lado de aire, y en el lado de humos.

Calentadores de chapas.- Constan de baterías de chapas en paralelo y transfieren el calor,

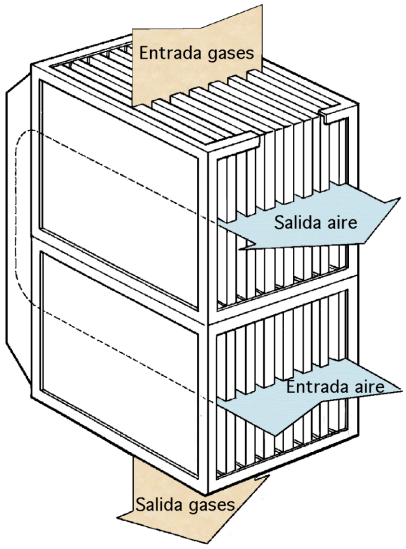


Fig XX.16.- Calentador de aire de chapas, con un paso de humos y dos de aire

en flujos cruzados, desde los humos calientes que fluyen por un lado de la chapa, al aire frío que fluye por el otro lado. El sellado entre los flujos de aire y humos se obtiene por soldadura de los bordes de las chapas, o mediante una junta, muelle y compresión externa de las baterías de chapas.

La Fig XX.16 representa un calentador de aire de chapas de acero, con un paso único del lado de humos y dos pasos del lado de aire. Para una determinada capacidad, los calentadores de aire modernos son de menor volumen que los tubulares y presentan mínimas fugas desde el aire hacia los humos.

Calentadores con serpentines de vapor-agua.- Los calentadores de aire recuperativos con *serpentines de vapor*, se utilizan en los generadores de vapor para precalentar el $aire_{comburente}$ en plantas termoeléctricas

Los calentadores con *serpentines de vapor-agua* constan de un banco de tubos de pequeño diámetro, exteriormente aleteados, dispuestos horizontal o verticalmente dentro del conducto de aire que va desde el ventilador de tiro forzado que impulsa el $aire_{comburente}$, hasta el calentador principal del aire.

El $aire_{comburente}$ circula, en flujo cruzado, por el exterior de los tubos, y se calienta mediante vapor de extracción del ciclo o con agua de alimentación, circulando siempre estos fluidos por el interior de los tubos. Algunas veces se utiliza como fluido calefactor un anticongelante (etilenoglicol), con el fin de evitar congelaciones en los períodos en los que la unidad se encuentra fuera de servicio.

El precalentamiento del aire reduce la corrosión y posibles obstrucciones en el lado frío del calentador del $aire_{comburente}$. Estos precalentadores, en muchas centrales térmicas, suelen ser los únicos componentes que existen para el calentamiento del $aire_{comburente}$ de la unidad.

b) CALENTADORES CON TUBOS ISOTERMOS.- El tubo isotermo de tipo termosifón, utilizado en los calentadores de aire para la generación de vapor, consiste en un tubo, en el que se ha hecho un vacío parcial, rellenado con un fluido de trabajo apropiado para la realización de la transferencia térmica, Fig XX.17.

El extremo vaporizador del tubo isotermo se expone a los humos calientes y el otro extremo, que hace de condensador, se coloca en el disipador térmico ($aire_{comburente}$ frío). El calor absorbido procedente de los humos calientes evapora el fluido que se desplaza hacia la zona de $aire_{comburente}$; cuando el fluido de trabajo libera su calor, condensa, y retorna por gravedad hacia el extremo vaporizador inferior.

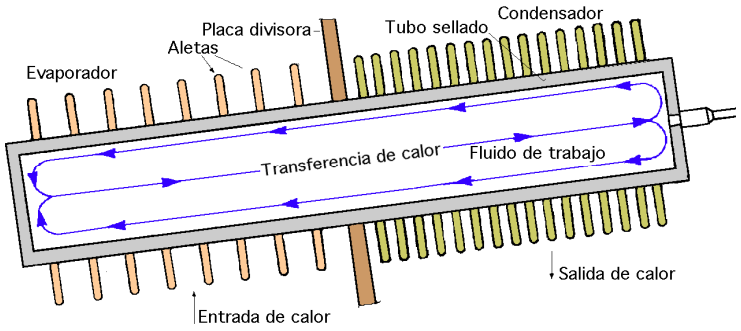


Fig XX.17.- Tubo isotermo

La circulación del fluido dentro del tubo es continua siempre que exista una diferencia de temperaturas entre los extremos vaporizador y condensador del tubo; el fluido es prácticamente isotermo, y su temperatura se aproxima a la media entre la del aire y la de los humos.

Los tubos isotermos operan con el extremo vaporizador a menor cota que el extremo condensador, por lo que tienen una ligera inclinación respecto a la horizontal, Fig XX.17. La superficie interior de estos tubos es rugosa lo que favorece la circulación del fluido interno y la exterior es aleteada, para incrementar el área de intercambio térmico.

Los calentadores de aire con tubos isotermos se disponen en bancos paralelos; la mitad de la longitud de los tubos se expone al flujo de humos, y la otra mitad al del aire; mediante una placa divisora se separan los flujos de aire y de humos y se soporta el banco tubular.

Los bancos de tubos isotermos se pueden combinar y encerrar dentro de carcasas, para lograr calentadores de aire que se puedan acoplar a una extensa variedad de configuraciones, para.

- Aplicaciones con humos sucios, como los de la combustión del carbón o del aceite pesado, la disposición de los bancos con tubos isotermos es regular

- El gas natural y aceites ligeros la disposición es al tresbolillo (más eficiente)

Los tubos son de acero al C, de diámetro 2” (51 mm) y longitud de hasta 40 ft (12,2 m).

Incorporan: $\begin{cases} \textit{3 aletas por 1", (1 aleta por cada 8,5 mm), en el lado de humos} \\ \textit{10 aletas por 1", (1 aleta por cada 2,5 mm), en el lado de aire} \end{cases}$

Los materiales aleados, resistentes a la corrosión, incrementan la vida del lado frío del calentador.

Los calentadores de aire con tubos isotermos tienen menor volumen que los tubulares de acero. Las fugas del aire hacia humos son mínimas en comparación con las que existen en otros tipos de calentadores de aire recuperativos.

Debido al comportamiento isotermo de cada tubo, para una temperatura mínima del metal, estas unidades de calentamiento de aire pueden operar a menor temperatura en el lado de salida de

humos en comparación con otros calentadores tubulares o regenerativos, lo que facilita el que la caldera funcione con eficiencias mayores y permite reducir la corrosión en el lado frío del calentador de aire.

La compatibilidad del fluido térmico y del material de la pared tubular, es importante; cualquier incompatibilidad conduciría a corrosiones internas, con aparición de gases no condensables que $\begin{cases} \textit{- Reducen la transferencia de calor} \\ \textit{- Atacan la integridad del tubo} \\ \textit{- Afectan a su presión de trabajo} \end{cases}$

Cuando los tubos son de acero al C, los fluidos utilizados se componen de hidrocarburos y agua, estando su temperatura entre $\begin{cases} 400°F \div 800°F \\ 204°C \div 427°C \end{cases}$; los fluidos basados en el agua no se aceptan por la posibilidad de congelación.

Los calentadores de aire con tubos isotermos se utilizan en la industria petroquímica, habiéndose instalado un cierto número de ellos en plantas termoeléctricas.

c) CALENTADORES DE AIRE REGENERATIVOS.- El calor se transfiere indirectamente, ya que disponen de un determinado medio de almacenamiento de calor que, periódica y alternativamente, por rotación o con dispositivos de válvulas de inversión, se expone a los flujos caliente y frío, utilizándose como medio de almacenamiento una gran variedad de materiales.

En estas unidades de generadores de vapor de plantas termoeléctricas, se emplean paquetes de elementos ensamblados, muy tupidos, de chapas de acero corrugado que utilizan la rotación, como procedimiento para sumergir el medio en los respectivos flujos.

El giro puede ser:

- De las chapas de acero que se exponen sucesivamente a los flujos de aire y humos

- De los conductos de aire y humos, que por medio de unos conductos giratorios dirigen los flujos de aire y humos, atravesando los elementos estacionarios de la superficie acumuladora del termointercambiador.

Los calentadores de aire de tipo regenerativo son pequeños, y se han utilizado con profusión para calentar el $aire_{comburente}$ de las plantas termoeléctricas.

Una característica de operación es la cantidad de $aire_{comburente}$ que fuga hacia el flujo de humos, debido a la rotación, que exige siempre una holgura entre las partes móviles y fijas.

Calentador Ljungström.- Tiene una carcasa cilíndrica y un rotor que lleva acoplados paquetes de elementos ensamblados de superficies de caldeo, que gira atravesando los flujos de aire y humos, dispuestos en contracorriente, Fig XX.18; el rotor está alojado en una carcasa que tiene conectados a ambos extremos de sus bases cilíndricas, los conductos de aire y de humos.

El flujo de aire atraviesa la mitad del rotor, y el de humos la otra mitad. Para minimizar las fugas de aire hacia los humos, y evitar el bipaso del rotor por los flujos de aire y humos, se dispone de cierres metálicos de láminas axiales, radiales y circunferenciales.

El eje de giro cuenta con dos cojinetes, uno de empuje superior y otro guía inferior, apoyados en las vigas soporte superiores e inferiores.

La velocidad del rotor es de 1 y 3 rev/min, y se consigue por medio de un piñón accionado por un motor eléctrico que engrana en una cremallera que rodea al rotor.

Para poderse acoplar a los diversos sistemas de flujos de aire y humos, se utilizan diseños de eje vertical y de eje horizontal, siendo los verticales los más comunes.

El eje de giro cuenta con dos cojinetes, uno de empuje superior y otro guía inferior, apoyados en las vigas soporte superiores e inferiores.

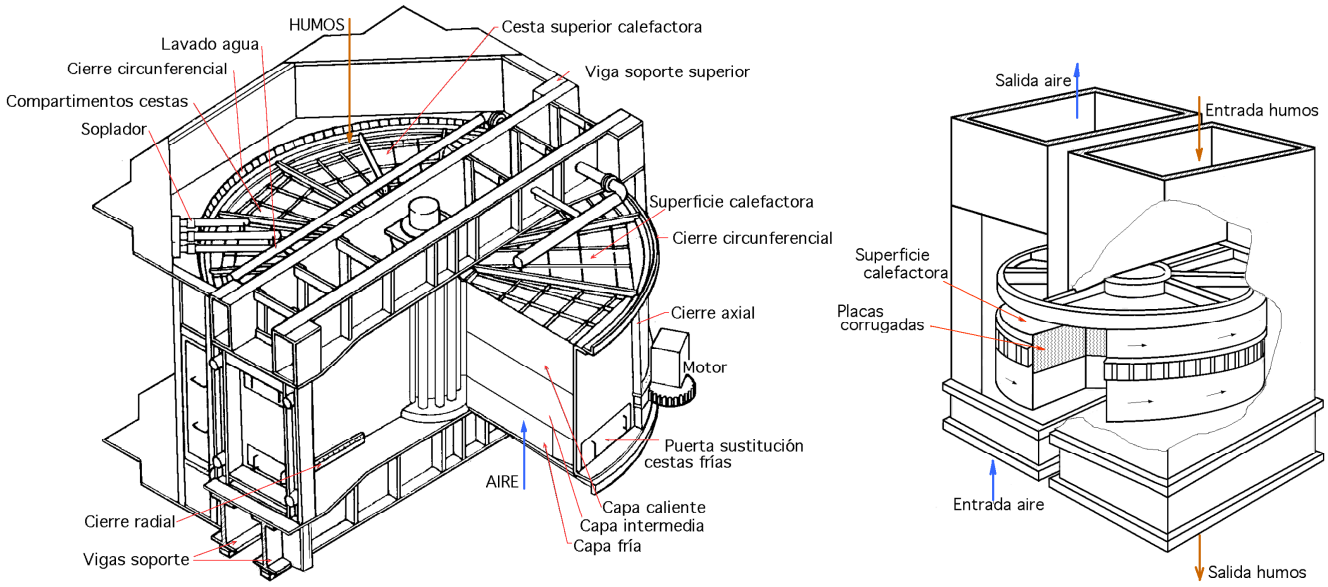


Fig XX.18.- Calentador regenerativo Ljungström

Calentador Rothemühle.- Utiliza unos elementos de superficies acumuladoras de calor estacionarias, y unos conductos giratorios divergentes, Fig XX.19. Los elementos de superficie se alojan y soportan en una carcasa cilíndrica fija (estator); en las bases de ésta gira sincrónicamente una estructura doble de sectores simétricos, que tienen un eje vertical común.

Unas carcasas fijas rodean el espacio barrido por los conductos divergentes, superior e inferior. El calor se transfiere cuando ambos flujos en contracorriente atraviesan los elementos de la superficie acumuladora.

El *aire* circula por el interior de los conductos divergentes, ya que requiere menor potencia en ventiladores, y los *humos* por el exterior de los mismos.

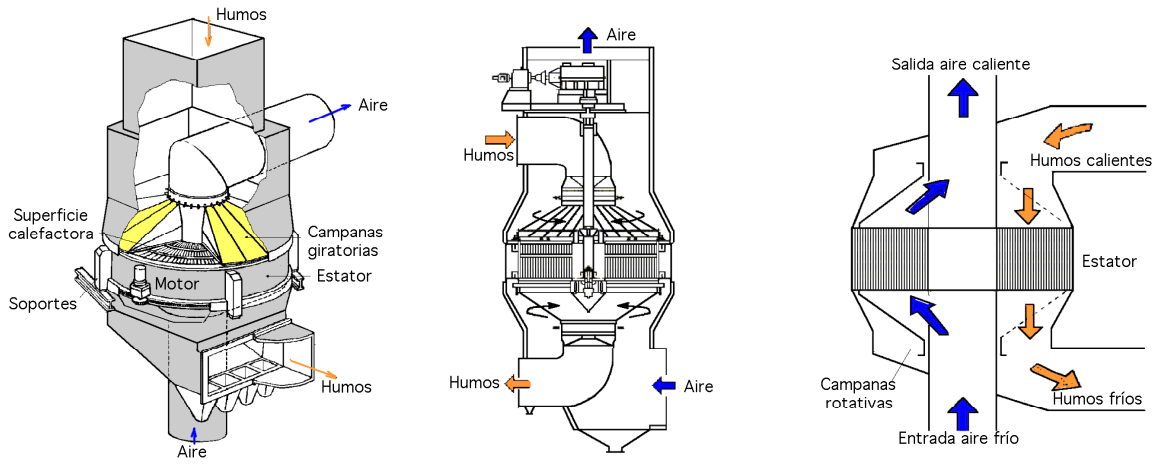
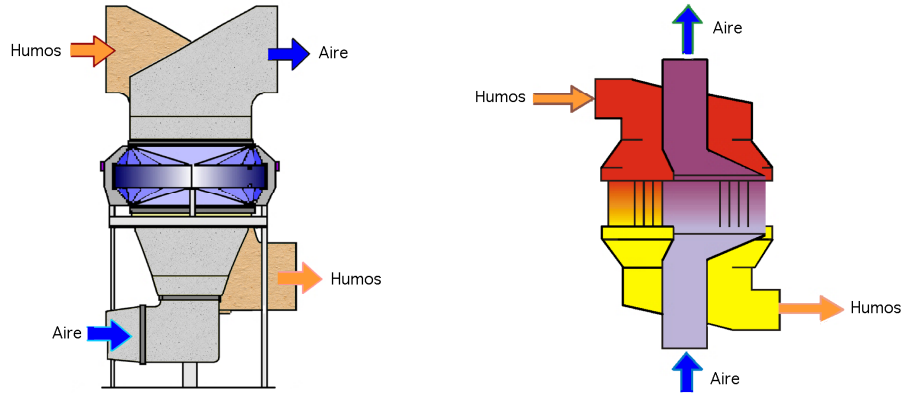


Fig XX.19.- Calentador regenerativo Rothemühle



a) Sistema del rotor de Rothemühle: Elementos de calefacción rotativos conductos inmóviles

b) Sistema del estator de Rothemühle: Elementos de calefacción inmóviles y conductos rotativos

Fig XX.20a.b.- Calentador regenerativo de aire Rothemühle

Para conseguir mínimas fugas de aire hacia los humos, se emplea un sistema de sellado; los elementos de estanqueidad son de hierro fundido y van montados en los conductos divergentes.

Las diferencias entre el calentador Rothemühle y el Ljungström, son:

- El Rothemühle tiene una masa giratoria pequeña, del orden del 20% de la total, lo que contribuye a una alta fiabilidad

- El estator permite una distribución uniforme de la carga del calentador sobre un determinado número de puntos de la periferia, facilitando la transferencia de las cargas de los conductos hacia el acero estructural que soporta la unidad.

- El sistema de sellado de los conductos divergentes se adapta a la curvatura del estator, sin sobrecargar el motor de accionamiento

XX.5.- SUPERFICIES CALEFACTORAS

Los elementos de superficie de acumulación de calor de tipo regenerativo, son disposiciones de dos tipos de chapas metálicas muy compactas, especialmente conformadas.

Cada par de elementos es combinación de una chapa plana y otra ondulada.

El objetivo de los perfiles ondulados es mantener las chapas despegadas, con el fin de ofrecer espacios para: { *- Facilitar unos canales de flujo a cada uno de los fluidos operativos* / *- Maximizar la transferencia de calor incrementando la superficie calefactora* / *- Lograr el mayor intercambio térmico creando turbulencias en los flujos*

El espesor de las placas de acero es el correspondiente a las galgas 26 y 18 = (0,48 y 1,27 mm), y se encuentran espaciadas entre 0,2" ÷ 0,4"= (5 ÷ 10 mm).

Con disposiciones compactas, se tienen: { *- altos regímenes de transferencia térmica* / *- elevada caída de presión* / *- gran ensuciamiento*

Con espaciados amplios, en los que uno de los elementos es una chapa plana, se obtiene:

- Una transferencia de calor más baja

- Una caída de presión más modesta

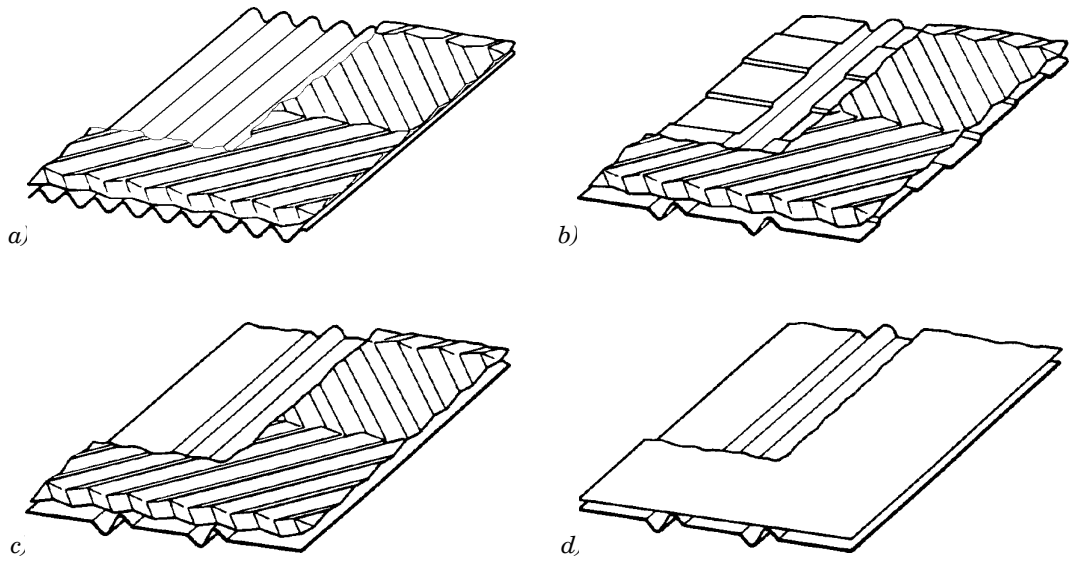
- Un reducido ensuciamiento potencial

Cuando se combinan el { *- perfil* / *- material con el que está construido* / *- espesor de la chapa* , se pretende:

- Maximizar la transferencia de calor y minimizar la caída de presión

- Alcanzar una buena limpieza

- Lograr una alta resistencia a la corrosión



a, b) Perfiles de placas caliente e intermedia para carbón, aceite y gas, galgas 26 a 22

c) Perfil de placa fría, aceite pesado y carbón bituminoso, ensuciamiento medio, galga 18

d) Perfil de placa fría, lignito y carbón subbituminoso, ensuciamiento severo, galga 18

Fig XX.21.- Perfiles de elementos de superficie de calentadores de aire regenerativos

Los elementos de la superficie calefactora se apilan y empaquetan en módulos individuales, que se instalan en el rotor/estator dispuestos en dos o más capas, Fig XX.21. La capa que se encuentra en el lado de entrada del aire es la fría, susceptible de corrosión y ensuciamiento, y tiene una profundidad de 12"(300 mm), con el objeto de que se pueda sustituir fácil y económicamente. Para aumentar la resistencia a la corrosión y mejorar la limpieza, se utilizan chapas con espesores grandes y perfiles abiertos.

Todos los elementos de la capa fría son de acero de baja aleación, resistente a la corrosión; si hay posibilidad de una elevada corrosión se utilizan aceros revestidos de esmaltes de porcelana. Las capas intermedia y caliente son más compactas que la fría, y utilizan chapas mucho más delgadas.

Tabla XX.1.- Ventajas e inconvenientes de los tipos de superficies calentadoras

Tipo	*Ventajas*	*Inconvenientes*
Recuperativo	*Fugas pequeñas* *Sin partes móviles*	*Grande y pesado* *Difícil recambio superficie*
Isotermo	*Fugas pequeñas* *Temperatura mínima del metal alta* *Sin partes móviles*	*Difícil limpieza* *Restricciones temperatura*
Regenerativo	*Compacto* *Fácil recambio superficies*	*Fugas* *Alto mantenimiento* *Riesgo incendio*

XX.6.- CARACTERÍSTICAS FUNCIONALES

Los calentadores de aire se diseñan para cumplimentar una serie de requisitos relacionados con sus características de funcionamiento, agrupándose respecto a: $\begin{cases} \textit{El punto de vista térmico} \\ \textit{Las fugas} \\ \textit{Las caídas de presión} \end{cases}$

Cualquier deficiencia en estas características de funcionamiento, implica:

- *Incrementar los costes de operación de la caldera*
- *Reducir la carga de la unidad*

La característica funcional es el rendimiento térmico del calentador, en el que influyen diversos parámetros y de ahí la importancia de tener en cuenta los requisitos citados; cuando se trata de verificar el funcionamiento del calentador de aire, basta con comprobar su rendimiento térmico.

Características térmicas.- La supercicie de intercambio térmico A de un calentador recuperativo se calcula en la forma:

$$A = \frac{Q}{U\,(LMTD)\,F}$$

El coeficiente global de transmisión de calor U incluye los coeficientes de convección y radiación, y los factores de ensuciamiento del lado de humos y del lado de aire, siendo su valor del orden

de $\begin{cases} 3 \div 10\ Btu/ft^2\,h^\circ F \\ 17 \div 57\ W/m^2\,^\circ K \end{cases}$

La eficiencia térmica se caracteriza comparando la temperatura de salida de los humos del calentador, con el valor que se adoptó en el diseño. La temperatura real de salida de los humos se obtiene a partir de la temperatura medida, teniendo en cuenta las correcciones debidas a las fugas y las desviaciones respecto al diseño.

El Código ASME de ensayos de rendimiento, proporciona una ecuación en la que se asume que todas las fugas se deben al aire entrante, de la forma:

$$T_2 = T_{2m} + \frac{\%\ Fugas}{100}\ \frac{c_{pa}}{c_{pg}}\ (T_{2m} - T_1)$$

siendo $\begin{cases} T_2 \text{ la temperatura corregida de salida de los humos del calentador de aire} \\ T_{2m} \text{ la temperatura media de salida del aire} \\ T_1 \text{ la temperatura de entrada del aire al calentador} \\ \%\ Fugas, \text{ el \% de aire que interviene en las fugas, respecto a los humos, a la entrada del calentador} \\ c_{pa} \text{ y } c_{pg} \text{ los calores específicos del aire y de los humos} \end{cases}$

La temperatura medida de salida de los humos se corrige debido a las desviaciones, respecto a sus valores adoptados en el diseño, de algunos parámetros como el flujo másico o las temperaturas de funcionamiento.

FUGAS.- Son el aire que pasa del lado de aire al de humos, y se mide en lb/h (kg/s), o como un porcentaje del flujo de humos; las fugas son indeseables porque:

- Representan la energía gastada en ventiladores para impulsar el aire que atraviesa la zona de combustión de la caldera

- Pueden reducir la eficiencia térmica del calentador de aire

Las unidades recuperativas comienzan a operar con fugas nulas, pero se presentan al cabo de un tiempo; con mantenimiento normal, las fugas en los calentadores de aire recuperativos se pueden mantener por debajo del 3%.

Las fugas en los calentadores de aire están asociadas al diseño de los calentadores regenerativos rotativos, siendo de dos tipos, de $\begin{cases} \text{- holgura} \\ \text{- arrastre} \end{cases}$

Fugas de holgura.- Son consecuencia de la mayor presión existente en el lado de aire, que se filtra al lado de humos (a menor presión), a través de las holguras existentes entre las partes móviles y fijas; se calculan por la expresión:

$$Fugas\ (\frac{lb}{hora})\ ó\ (\frac{kg}{seg}) = k\ A\ \sqrt{2\ g_c \Delta p\ \rho}$$

en la que:
$$\begin{cases} k, \text{ es el coeficiente de descarga, adimensional (entre 0,4 y 1)} \\ A, \text{ es el área cruzada por el flujo, } ft^2 \ (m^2) \\ g_c = 32{,}17 \ lbm.ft/lbf.s^2 \times 3600 \ (s/h)^2 = 4{,}17.10^8 \ lbm/\ lbf.h^2 \ (1 \ kgm/s^2 N) \\ \Delta p, \text{ es la presión diferencial a través de la holgura, } lb/ft^2 \ (kg/m^2) \\ \rho, \text{ es la densidad del aire de fuga, } lb/ft^3 \ (kg/m^3) \end{cases}$$

Fugas de arrastre.- Consisten en el aire desplazado hacia el flujo de humos por cada sector compartimental del rotor (o del estator), y es directamente proporcional a:

- El volumen de cada sector

- La velocidad de rotación de la superficie calefactora del calentador de aire

La *fuga de diseño* correspondiente a un calentador de aire regenerativo, a consecuencia del desgaste de los cierres, es del $5 \div 15\%$, aumentando con el tiempo de funcionamiento de la unidad. Se ha puesto a punto un sistema de cierres automático que evita el aumento de estas fugas por desgaste, ajustando durante el funcionamiento de la unidad la holgura entre las partes rotativas y fijas de los cierres.

Otra fuente de aire que pasa hacia los humos, es la infiltración en el flujo de humos de aire del exterior, debido a que los humos se encuentran a menor presión (depresión) que la atmósfera exterior. Las entradas de aire se pueden producir a través de grietas y agujeros en la carcasa, en las juntas de expansión del lado de humos, en las puertas de acceso y en empaquetaduras, siendo algunas veces difíciles de detectar, especialmente si la fuga es bajo la envolvente y el aislamiento.

La fuga de aire de un calentador es la diferencia entre los flujos de entrada y salida, del aire y humos, que se estima a partir de sus velocidades. Como es difícil medir con precisión velocidades en conductos de gran sección, la fuga del calentador resulta más exacta cuando se basa en el cálculo del peso de los gases presentes, teniendo en cuenta su análisis, la eficiencia de la caldera y los datos del análisis del combustible.

Una fuga aproximada del calentador de aire, basada en el análisis de humos a la entrada y salida del mismo, referidos a base seca, se determina mediante la expresión:

$$\%\ Fuga = \frac{\%O_{2\ salida} - \%O_{2\ entrada}}{21 - \%O_{2salida}} \times 90$$

La fuga medida en el ensayo, antes de compararla con la de diseño, se corrige debido a las desviaciones existentes entre las condiciones reales y las de diseño, en cuanto a la:

- Presión diferencial entre aire y humos, en el lado frío del calentador de aire

- Temperatura del aire frío a la entrada del calentador

Caída de presión.- En calentadores de aire recuperativos, del lado de humos y del lado de

aire, las caídas de presión se deben a:

- *El rozamiento del fluido*
- *Las pérdidas por* $\begin{cases} \text{- cambios de sección en las entradas y salidas del calentador de aire} \\ \text{- curvas y codos en los conductos de los flujos} \end{cases}$

En los calentadores de aire regenerativos, la principal causa de fricción radica en la superficie calefactora de intercambio térmico; a plena carga, los valores típicos están entre $\begin{cases} 2" \div 7"wg \\ 0{,}5 \div 1{,}7\ kPa \end{cases}$.

Las caídas de presión, en el lado de humos y en el de aire, son la diferencia entre las presiones estáticas manométricas de entrada y salida.

Los calentadores de aire requieren mucha atención durante su funcionamiento (mantenimiento), si las unidades consumen combustibles con altos contenidos de ceniza o de S, en comparación con unidades que quemen combustibles limpios, como el gas natural.

Corrosión.- Los calentadores de aire que se emplean en unidades que queman combustibles con S, están sujetos a corrosión en el lado frío de los elementos calefactores y de las estructuras más próximas. En una caldera, parte del SO_2 producido se convierte en SO_3 y éste se combina con la humedad para formar vapor de SO_4H_2; este vapor condensa en las superficies que tengan temperaturas inferiores a la del punto de rocío, entre $250 \div 300$ºF = $(120 \div 150$ºC); la temperatura del metal, en el lado frío del calentador, es de 200ºF, (93ºC), por lo que existe riesgo de corrosión.

Una solución sería operar siempre con temperaturas del metal superiores a la del punto de rocío, pero se inducen unas pérdidas considerables e inaceptables en el balance térmico de la caldera.

Cuando se queman combustibles que contienen S, la mayoría de los calentadores de aire se diseñan para operar con una temperatura mínima del metal inferior a la del punto de rocío, porque la eficiencia alcanzada compensa los costes que se plantean en el mantenimiento de la instalación, Fig XX.22 y 23.

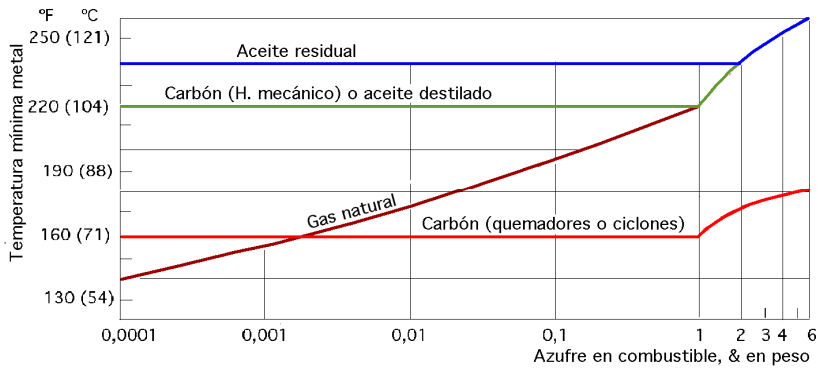


Fig XX.22.- Temperatura mínima de metal en el lado frío de un calentador de aire recuperativo,

cuando se queman combustibles con S

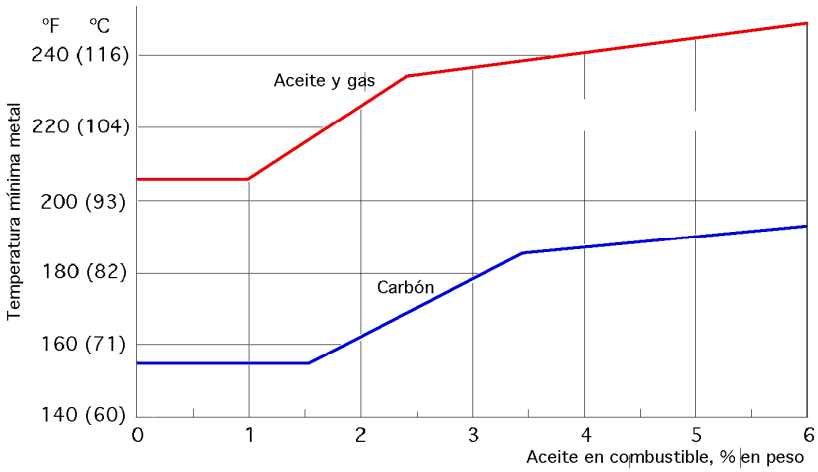


Fig XX.23.- Temperatura mínima de metal en el lado frío de un calentador de aire regenerativo cuando se queman combustibles con S

La ***temperatura mínima del metal*** recomendada puede ser inaceptable, cuando se presenta alguna de las siguientes circunstancias: $\begin{cases} \text{- } Combustible\ con\ excesivo\ contenido\ en\ S \\ \text{- } Temperatura\ ambiente\ demasiado\ baja \\ \text{- } Funcionamiento\ de\ la\ unidad\ a\ carga\ muy\ reducida \end{cases}$

Estas situaciones implican la utilización de métodos activos y pasivos, para controlar la posible corrosión en el lado frío del calentador de aire.

Los ***métodos activos para elevar la temperatura mínima del metal*** son:

- Precalentamiento del aire de entrada al calentador, mediante precalentadores con serpentines de vapor o de agua

- Bipaso de aire frío, por el que una porción del aire de entrada al calentador le circunvala

- Recirculación de aire caliente, mediante el cual una parte del aire caliente que sale del calentador se lleva a la entrada de los ventiladores de aire comburente

Los ***métodos pasivos de control de la corrosión***, comprenden:

- Espesores mayores en el lado frío $\begin{cases} 2 \div 3\ mm\ para\ tubos \\ 1\ mm\ para\ las\ chapas\ de\ la\ superficie\ regenerativa \end{cases}$

- Materiales de las chapas del lado frío de aleaciones altas o bajas, que tienen una vida doble de la del acero al C

- Revestimientos no metálicos en los elementos del lado frío, como esmaltes de porcelana o teflón, resinas epoxy, etc

- Materiales de las chapas no metálicas, como $\begin{cases} \text{- } extrusiones\ cerámicas\ en\ los\ regenerativos \\ \text{- } tubos\ de\ cristal\ de\ borosilicio\ en\ los\ tubulares \end{cases}$

- Disposición de tubos en el lado frío para calentadores tubulares, que aumenten la temperatura mínima del metal, imprimiendo mayores velocidades al flujo de humos

XX.7.- OBSTRUCCIÓN Y LIMPIEZA

La obstrucción es el ensuciamiento y taponamiento de los pasos por los que circulan los fluidos, provocados por la ceniza en polvo que arrastran los humos y por los productos de la corrosión. Esto se puede presentar en el lado caliente del calentador, pero lo más normal es que se desarrolle en el lado frío, en donde las partículas de ceniza en polvo se adhieren a la superficie calefactora con más facilidad, por estar humedecida con ácido.

La obstrucción incrementa la caída de presión en el calentador, y puede provocar una limitación de la carga en la unidad generadora de vapor, haciéndola funcionar a una carga menor que la nominal cuando los ventiladores alcanzan su máxima capacidad.

Hay que controlar y evaluar cualquier material que se deposite en el calentador de aire; para ello se cuenta con:

- *El sistema de soplado*
- *El control de temperatura del lado frío*
- *El diseño de la superficie calefactora*
- *La limpieza, cuando la unidad esté retirada de servicio o parada*
- *Los aditivos que se pueden emplear en el hogar*

Erosión.- Las superficies calefactoras y otras partes del calentador de aire pueden sufrir erosión, a causa del impacto de las partículas de ceniza en polvo que arrastran los humos a alta velocidad. La erosión se presenta en zonas próximas a la entrada de humos, que es donde las velocidades resultan máximas, y en los calentadores regenerativos en áreas junto a las holguras de los cierres, porque la ceniza en polvo se acelera al pasar por las mismas.

Las consecuencias de la erosión son:

- *debilitación estructural*
- *reducción de la superficie para la transferencia de calor*
- *perforación de componentes y fugas de aire hacia los humos*
- *entradas de aire desde el exterior*

La intensidad de la erosión es función de:

- *la velocidad másica del flujo de humos*
- *la carga de ceniza en los humos*
- *la naturaleza física de las partículas de ceniza en polvo*
- *el ángulo de impacto de las partículas*

La erosión se puede controlar:

- *reduciendo la velocidad de los humos*
- *eliminando los elementos abrasivos del flujo de humos*
- *utilizando materiales sacrificables*
- *empleando materiales resistentes a la erosión*

Los calentadores de aire que se vayan a utilizar en unidades con combustibles de ceniza altamente erosiva, se diseñan para limitar la velocidad a 50 ft/s (15 m/s).

Los conductos de entrada al calentador de aire se diseñan para suprimir altas velocidades; también hay que diseñar sistemas para eliminar algo de ceniza aguas arriba de los calentadores de

aire, como colectores de polvo, tamices o tolvas estratégicamente situadas.

En el caso de calentadores ya existentes se pueden:

- Instalar deflectores de flujo, que eviten puntualmente altas velocidades locales en el flujo de humos

- Sustituir materiales erosionados por otros más gruesos, que permiten una vida más larga

- Colocar materiales protegidos en las áreas críticas resistentes a la abrasión, como aceros y materiales cerámicos

La erosión en calentadores de aire tubulares se presenta en un tramo de longitud de 1 ft (0,3 m) a partir de la entrada de humos, como consecuencia de la turbulencia que se crea en éstos al penetrar en los tubos del calentador.

Para hacer frente a esta erosión, en los extremos de los tubos, se pueden instalar manguitos, o montar rejillas a la entrada del calentador para rectificar las líneas de flujo.

Incendios.- En los calentadores de aire son raros, pero de existir pueden llevarlos a su destrucción; el fuego suele empezar cerca del extremo frío, que es donde el $combustible_{inquemado}$ puede estar atorando los pasos de flujo. La mayoría de los fuegos ocurren durante la puesta en servicio de la unidad generadora de vapor, porque el aceite combustible no quemado que se encuentra depositado en las superficies calefactoras atoradas por la ceniza, igniciona; otras fuentes de riesgo de incendio pueden ser fugas en el sistema de lubricación de cojinetes o grandes acumulaciones de polvo.

Los incendios se evitan:

- Manteniendo limpio de $combustible_{inquemado}$ *la totalidad del calentador de aire*

- Disponiendo de un ajuste apropiado en el equipo de combustión del generador de vapor

- Soplando el calentador de aire durante la puesta en servicio de la unidad generadora de vapor

- Soplando antes de la retirada de servicio del generador de vapor

XX.8.- APLICACIÓN A PLANTAS ENERGÉTICAS

Los calentadores de aire recuperativos y regenerativos se utilizan en las centrales termoeléctricas de producción de electricidad para $\begin{cases} \text{- mejorar su eficiencia} \\ \text{- atender a diversos tipos de combustión} \\ \text{- conseguir la máxima disponibilidad de la unidad} \end{cases}$

Las unidades que queman carbón pulverizado requieren de dos flujos de aire caliente:

- El $aire_{primario}$ *suministrado a alta presión para pulverizadores*

- El $aire_{secundario}$ *a menor presión, que se envía a quemadores*

El sistema de $aire_{primario}$ puede ser caliente y frío, y se utiliza en pequeñas unidades de forma que:

- Un tercio del $aire_{comburente}$ calentado en un segundo calentador, se lleva a los ventiladores de $aire_{primario}$ caliente, en los que se presuriza para pasar luego a los molinos

- El resto del $aire_{comburente}$, tras pasar por el calentador de aire, va hacia los quemadores

El sistema de $aire_{primario}$ frío cuenta con dos calentadores de aire independientes, que reciben los flujos de dos ventiladores de $\begin{cases} aire_{primario} \\ aire_{secundario} \end{cases}$; en algunas unidades, el $\begin{cases} aire_{primario} \\ aire_{secundario} \end{cases}$ se calientan en la misma unidad de calentamiento regenerativo.

Si se utilizan calentadores regenerativos independientes, los calentadores de $aire_{primario}$ tienen el doble de fugas que los de $aire_{secundario}$, porque operan con una diferencia de presiones aire-humos alta; por esta razón, para el calentamiento del $aire_{primario}$ se emplean calentadores de aire recuperativos, mientras que para el calentamiento del $aire_{secundario}$ pueden ser regenerativos.

En unidades que queman aceites y gases se emplean calentadores de aire recuperativos y regenerativos. Independientemente del tipo de combustible, las plantas de gran potencia usan calentadores regenerativos, porque son de menor tamaño y requieren una inversión global más baja.

Para diferencias de presión superiores a 10 kPa, por ejemplo en lechos fluidificados, se prefieren los calentadores de tipo recuperativo.

Reducción de los NO_x.- Los sistemas que existen para la reducción de los NO_x son:

- Actúan sobre la metodología de la combustión
- Realizan el tratamiento o depuración de humos

Los sistemas de tratamiento de humos para la reducción de los NO_x introducen NH_3 en el flujo de humos reaccionando con los NO_x de dos formas $\begin{cases} térmicamente\ a\ alta\ temperatura \\ en\ presencia\ de\ un\ catalizador\ a\ baja\ temperatura \end{cases}$, produciendo siempre nitrógeno molecular y agua.

El NH_3 reacciona también con algo de SO_3 presente en los humos, para formar compuestos que condensan a temperaturas inferiores a los 530ºF (277ºC).

Como los calentadores de aire (refrigeradores de humos), normalmente se encuentran aguas abajo del equipo de reducción de los NO_x, sus superficies calefactoras están expuestas a una rápida obstrucción por ensuciamiento y creciente corrosión, a temperaturas de $\begin{cases} 510°F \div 340°F \\ 266°C \div 171°C \end{cases}$, por lo que los calentadores de aire regenerativos se deben diseñar para minimizar estos inconvenientes, en base a:

- Un mínimo de capas de elementos de superficie, para que el atorado entre capas sea el menor posible

- Una superficie colectora de gran espesor $\begin{cases} \text{- construida con aleaciones resistentes a la corrosión, o} \\ \text{- recubierta con esmalte para alargar la vida} \end{cases}$

- Una superficie con perfiles abiertos, para facilitar la limpieza

- Colocar sopladores en el lado caliente y en el frío

Con estas configuraciones, los calentadores de aire pueden estar en funcionamiento continuo y fiable durante un año o más, sin tener que acudir al lavado con agua con la unidad fuera de servicio.

Algunos calentadores de aire regenerativos se han modificado para actuar, al mismo tiempo, como reductores catalíticos selectivos de los NO_x.

Reducción de los SO_2.- Para reducir las emisiones de S se utilizan sistemas de desulfuración de humos (FGD), que eliminan el SO_2 del humo mediante su reacción con la inyección de algunos compuestos, como la caliza.

En la mayoría de los casos, los humos tratados mediante el sistema (FGD) salen a la temperatura de saturación, $\begin{cases} 120°F \div 130°F \\ 49°C \div 54°C \end{cases}$, antes de entrar en la chimenea, para su dispersión.

A veces, los humos del sistema (FGD) se recalientan hasta 180ºF (82ºC) o más, en las dos situaciones siguientes, cuando:

- Exista un conflicto entre la temperatura del punto de rocío y el revestimiento de la chimenea

- Se precise una mayor sustentación del humo (mayor altura térmica), con el fin de mejorar la dispersión del penacho de la chimenea

Para estas aplicaciones, se utilizan calentadores de aire regenerativos y recuperativos, similares a los empleados en el calentamiento de aire.

REFERENCIAS CAP XX.- ECONOMIZADORES Y CALENTADORES DE AIRE

Mc Adams W. H.- HEAT TRANSMISSION.- Third Ed., McGraw-Hill Company, New York, 1954

Mayer E. H., Mc Carver G. M.- ECONOMIZER TECHNOLOGY FOR UTILITY AND INDUSTRIAL BOILERS.- Course for the Center for Professional Advancement, E. Brunswick New Jersey (1991)

B&W.-STEAM: ITS GENERATION AND USE.- 40th Edition, Chapter 19.- The Babcock-Wilcox Company.- Barberton, Ohio, USA (1992)

Srivastava R. K., Hall R. E., Khan S., Culligan K.; Lani B. W.- NITROGEN OXIDES EMISSION CONTROL OPTIONS FOR COALFIRED ELECTRIC UTILITY BOILERS.- U.S. Environmental Protection Agency, National Risk Management Research, Laboratory Air Pollution Prevention and Control Division, Research Triangle Park, NC, USA

Conrads, H.G.- INCREASING BOILER EFfiCIENCY BY UBC MONITORING.- In Proceedings of the DOE/ NETL 2002 Conference on Unburned Carbon on Utility Fly Ash; National Energy Technology Laboratory, Pittsburgh PA, May 14-2002; available at: http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/02/ubc/conrads summa ry.pdf (accessed July 1, 2005).

Dubbel, H.- TASCHENBUCH FÜR DEN MASCHINENBAU.- 11th Ed., Springer Verlag GmbH & Company, Berlin, Germany, 1958.

Davey, T.A.- ACHIEVING UNIFORM COMBUSTION USING BURNER LINE ORIfiCES TO BALANCE COAL FLOW DISTRIBUTION.- InProceedings of the EPA-DOEEPRI Combined Power Plant Air Pollutant Control Symposium, The MEGA Symposium; EPRI/DOE/EPA, Chicago, IL, August 20 –23, 2001

Huttenhofer, K., Beer, J.K., Smeets, H., van der Kooij, J.- AIR PREHEATER DOWNSTREAM OF A COAL-FIRED BOILER.- In Proceedings of the EPRI/EPA 1993 Joint Symposium on Stationary Combustion NO_x Control; EPRI/EPA: Miami Beach, FL, May 24-27, 1993.

Frya A., Adamsb B., Shurtzb T., Davisb, K.- AIR PRE-HEATER CORROSION BEHAVIOR RELATED TO HALOGENS FOR OXYCOAL RETROFIT OF UTILITY BOILERS.- 3rd Oxyfuel Combustion Conference