



CENTRALES TÉRMICAS

EL CIRCUITO AGUA-VAPOR

Ismael Prieto

Junio 2009

Grupo de investigación de Ingeniería Térmica

INDICE DE MATERIAS

1. Introducción	3
2. Generalidades sobre el diseño	6
3. Transmisión de calor en ebullición, flujo bifásico, circulación	8
3.1. Punto de ebullición y propiedades termofísicas	8
3.2. Curva de ebullición	9
3.3. La ebullición en corrientes o ebullición forzada convectiva	11
4. La circulación	12
4.1. La circulación natural	13
4.2. La circulación de paso único	14
5. Criterios de diseño	14
6. Vaporizadores y separación del vapor	15
6.1. Diseño de las paredes	15
6.2. Tamaño del hogar	16
6.3. Criterios de diseño del hogar	17
6.4. Influencia de la ceniza	18
6.5. Paredes refrigeradas por agua	19
6.6. Superficie de convección de caldera	20
6.7. Análisis numérico	21
6.8. Separación del agua y el vapor. El calderín	21
7. Sobrecalentadores y recalentadores	24
7.1. Ventajas del sobrecalentamiento y del recalentamiento	24
7.2. Tipos de sobrecalentador	25
7.3. Tamaños de los tubos	27
7.4. Principios para diseño de sobrecalentadores	27
7.5. Principios para diseño de recalentadores	29
7.6. Metales de los tubos	29
7.7. Soportes de sobrecalentadores y recalentadores	30
7.8. Limpieza externa y espaciado de superficies	33
8. Regulación de la temperatura del vapor	34
8.1. Introducción	34
8.2. Variación del caudal de recirculación de humos	34
8.3. Variación de la inclinación de quemadores	37
8.4. Reparto del caudal de humos cuando el conducto de salida se divide en dos	38
8.5. Atemperación	40
8.6. Variación del exceso de aire	42
8.7. variación de la temperatura del agua de alimentación	42
8.8. Efecto del soplado sobre la temperatura del vapor	43
9. Sistemas bipaso y de puesta en servicio	44
9.1. Sistema bipaso de caldera con calderín	44
10. Definiciones y condiciones de servicio	48
11. Sistema de puesta en servicio o arranque de calderas de presión universal	49
11.1. Sistema de arranque con presión constante	50
11.2. Sistema de arranque con presión variable	53
12. Economizadores	56
12.1. Introducción	56
12.2. Tipos de economizadores	57
12.3. Otros tipos de economizadores	63
12.4. Características funcionales	64
12.5. Sistemas de soporte del economizador	66
12.6. Tamaño del banco tubular	68
12.7. Necesidades de acceso	69
12.8. Colectores	69
12.9. Ligaduras contra vibraciones	70
12.10. Requisitos de geométricas. Materiales y códigos	71

1 .Introducción

En un generador de vapor moderno, sus componentes se disponen para absorber de forma eficiente el calor de los productos de combustión y para suministrar el caudal de vapor necesario a la presión y temperaturas requeridas.

Tales componentes son el hogar, sobrecalentador, recalentador, economizador y calentador de aire. Se complementan con sistemas para la separación agua-vapor y para el control de la temperatura del vapor.

De forma general, el generador de vapor (caldera), se puede dividir en dos secciones, el hogar y el paso de convección.

El hogar es un gran volumen abierto, delimitado por paredes refrigeradas por agua-vapor, en el que tiene lugar la combustión y se enfrían los productos de esta, hasta lograr unas temperaturas de humos adecuadas a la salida.

El paso de convección contiene bancos o paquetes de tubos que configuran el sobrecalentador, el recalentador y el economizador.

Normalmente, después del paso de convección está el calentador de aire.

El sistema de vaporización-circulación suele incluir las paredes del hogar, el calderín y el equipo separador vapor-agua.

Este capítulo se centra en los componentes de hogar, sobrecalentador recalentador, economizador y además en los sistemas para el control de la temperatura del vapor, para el bipaso de vapor y para la puesta en servicio.

En general, las calderas se pueden clasificar en tres grandes tipos:

- Las de vasija
- Las de tubos de humos o pirotubulares
- Las de tubos de agua o acuotubulares.

Las modernas calderas de gran potencia son siempre acuotubulares.

En las calderas acuotubulares, los flujos de agua y vapor circulan por el interior de los tubos, mientras que los gases (humos) calientes fluyen por el lado exterior de las superficies tubulares.

El sistema de circulación de caldera esta constituido por tubos, colectores y calderines, debidamente conexiados para obtener una conducción tal que el flujo de agua circulante, para generar el vapor, refrigere a la vez todos los componentes.

La construcción acuotubular es la que permite calderas de mayor capacidad (potencia) y de presión más elevada, con relación a los diseños del tipo vasija o pirotubular.

Además, la caldera acuotubular ofrece mayor versatilidad en cuanto a disposición de componentes; y esto facilita una utilización más eficiente del hogar, del sobrecalentador, del recalentador y de los demás componentes de recuperación de calor.

Las modernas calderas de alta capacidad (potencia) de generación de vapor, se extienden en una gran variedad de diseños, tamaños y configuraciones, para acomodarse a un extenso rango de aplicaciones.

Los tamaños se sitúan entre los que corresponden a producciones que van desde las 0,13 a 1.200 kg/s (0,5 a 4500 t/h) y las presiones van desde 1 bar hasta valores superiores a la presión crítica.

La configuración de la caldera esta determinada principalmente por el sistema de combustión, el combustible, las características de la ceniza, la presión de operación y la potencia máxima de generación de vapor.

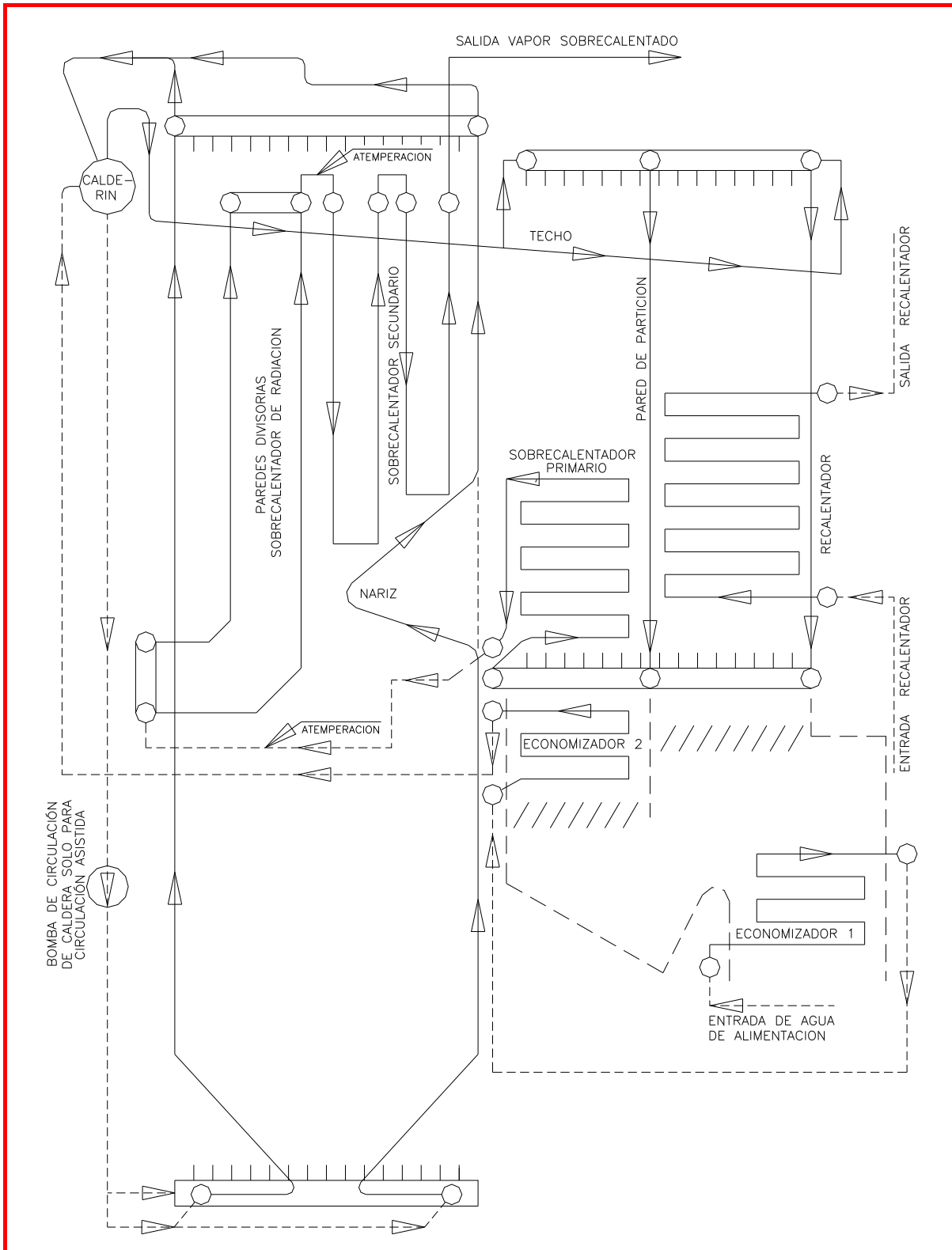


Figura 1. Caldera tipo Carolina

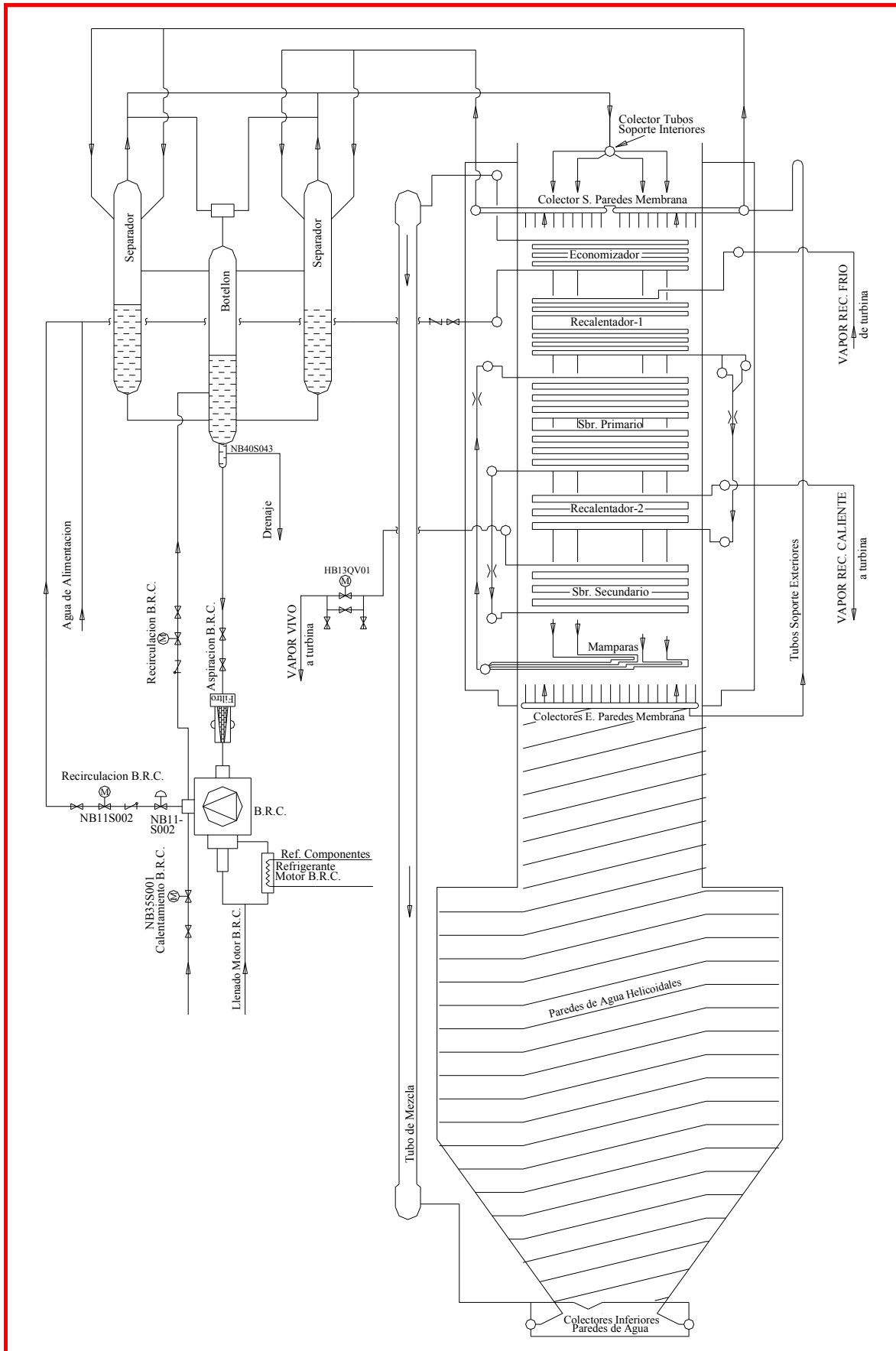


Figura 2. Caldera de torre de paso único

Las configuraciones y tipos de calderas son muy diversos ya que además de lo indicado en el párrafo anterior, cada fabricante tiene sus propios diseños.

Todas las calderas se construyen con estanqueidad del lado de gases (aire y humos), con paredes, suelos y techos de cerramiento totalmente refrigerados por agua o vapor, configurados mediante paneles membrana completamente soldados.

Normalmente, cada diseño incluye una sección de recalentamiento único; no obstante, la caldera supercrítica de proceso directo (de un paso) se ha suministrado también con un doble recalentamiento.

Entre los diseños de calderas de gran potencia, se puede mencionar el tipo de caldera denominado Carolina (RBC), con un flujo de gases descendente en el paso posterior de convección, que minimiza la altura global del generador de vapor (figura 1). Incluye medios para la limpieza de superficies de transmisión de calor, por sopladores, y también para la captación de ceniza.

Otro diseño es el de disposición del tipo de torre (RBT), con una ejecución del paso de convección totalmente purgable y con una mínima área en planta (figura 2).

Se puede mencionar también la configuración de caldera radiante tipo El Paso (RBE), para quemar aceite y gas. Esta unidad es muy compacta, como consecuencia de los combustibles relativamente limpios que utiliza. El diseño “compacta” minimiza la extensión (superficie requerida) de la planta y el acero estructural.

Existen unidades de más de 1.300 MW que queman carbón pulverizado, con presión supercrítica (necesariamente de paso único). El diseño de la circulación en una unidad de proceso directo (de un paso) elimina la necesidad de incorporar un calderín. Hay que resaltar, además, que en una unidad de paso único, los múltiples circuitos del flujo circulante, minimizan los desequilibrios de temperatura entre los diversos puntos de la periferia del hogar, que se pueden originar como consecuencia de un aporte calorífico no uniforme, como es normal.

Hay otros diseños de presión universal (UP) de proceso directo (paso único) para presiones subcríticas, con hogares que disponen de una circulación en espiral (figura 2) del fluido agua-vapor. La envolvente con tubos inclinados, alrededor del hogar, facilita circuitos múltiples a lo largo del cerramiento del hogar.

2. Generalidades sobre el diseño

Independientemente del tamaño o de la configuración, el diseño de una caldera moderna esta marcado por cuatro factores o parámetros claves:

1. Eficiencia o rendimiento (de la caldera y del ciclo térmico)
2. Fiabilidad
3. Costes de capital (inversión) y de operación
4. Protección medioambiental.

Estos parámetros, combinados con los propios de la aplicación concreta de que se trate, dan lugar a la diversidad de diseños mucho más amplia que los presentados previamente. No obstante, todas las unidades comparten un determinado número de elementos o componentes fundamentales, sobre los que se basa el diseño específico para cada ubicación y aplicación concretas.

La evaluación de una caldera comienza por la identificación de las necesidades globales de la aplicación. En general, estas necesidades se seleccionan mediante un proceso iterativo, equilibrando coste de capital inicial (inversión), coste de operación (especialmente de combustible), necesidades de vapor y experiencia de operación. La selección de estos parámetros puede influir mucho en el coste y en la eficiencia (rendimiento) térmica.

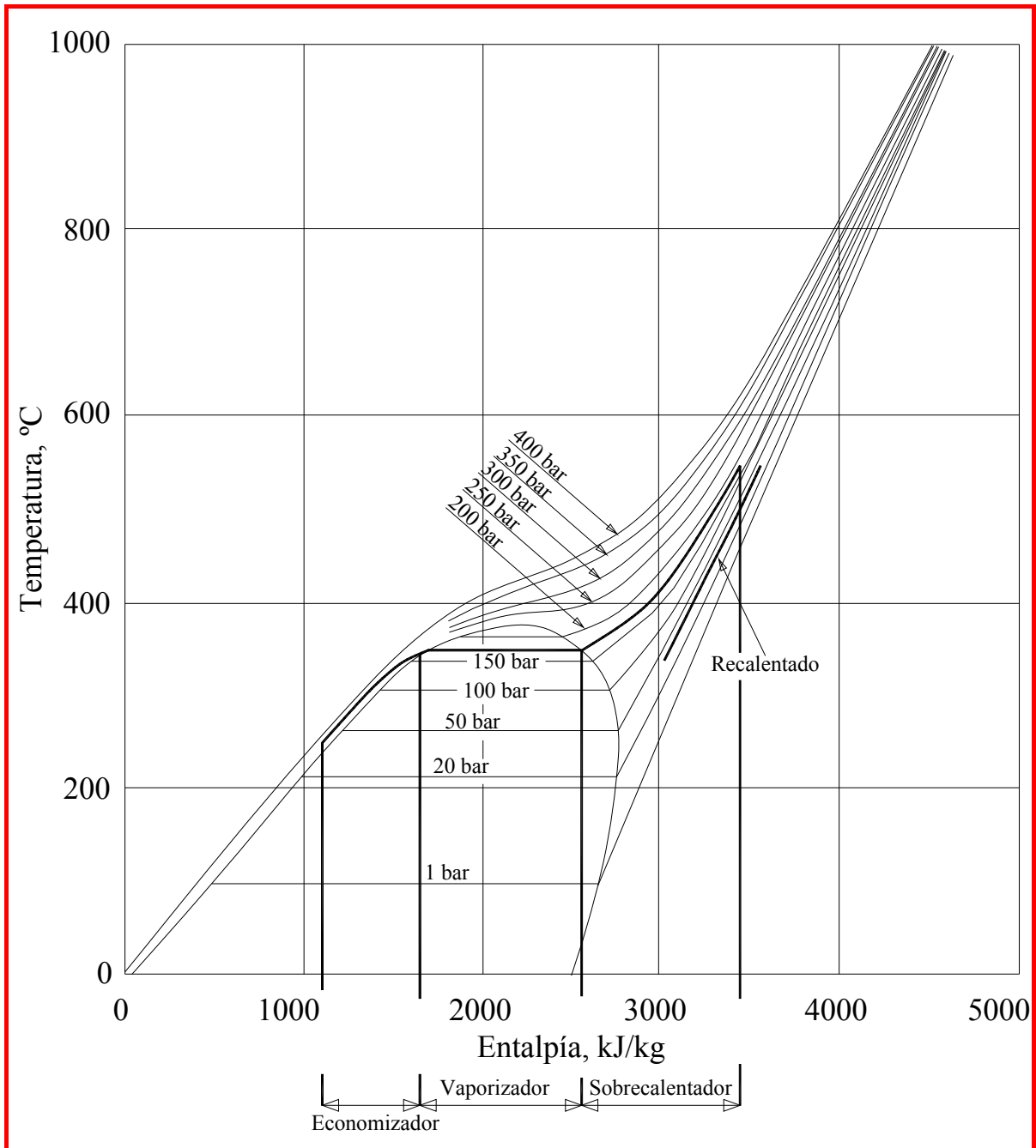


Figura 3. Diagrama temperatura-entalpía

Desde la perspectiva de una evaluación de caldera, el diagrama temperatura-entalpía que se muestra en la figura 3, para una unidad de alta presión y simple recalentamiento, facilita una importante información de diseño sobre la configuración de la unidad. En este ejemplo, la absorción relativa de calor para calentamiento de agua del ciclo, para vaporización y para sobrecalentamiento es de 25, 37 y 38 % respectivamente.

Por su parte, el recalentamiento del vapor incrementa la absorción total de calor en un 23 % aproximadamente. En el caso de ciclos con presiones de operación supercríticas, se puede añadir un segundo recalentamiento, mientras que para aplicaciones industriales, pueden bastar las etapas correspondientes al calentamiento de agua del ciclo y a la vaporización.

Las calderas se pueden diseñar para presiones de operación subcríticas o supercríticas. En el caso de presiones subcríticas, el cerramiento del hogar está refrigerado por agua a temperatura constante, y los circuitos de flujo tienen que diseñarse para asumir el flujo en dos fases (agua-vapor) y el fenómeno de la vaporización, tratados en el epígrafe 3. A presiones supercríticas, el agua actúa como fluido de fase única, con un incremento continuo de temperatura, a medida que avanza en la caldera. Estos diseños requieren especial consideración, para evitar los desequilibrios excesivos en temperaturas de metal, causados por las variaciones en la absorción de calor, en los distintos circuitos.

Se utilizan dos sistemas básicos de circulación del fluido en la caldera:

La circulación natural

El paso único.

Antes de tratar estas formas de circulación, se va a hacer una reseña de cómo se produce la vaporización en los tubos vaporizadores y los riesgos que esto conlleva.

3. Transmisión de calor en ebullición, flujo bifásico, circulación

Un caso de transmisión de calor con flujo másico, que tiene un interés especial en la generación de vapor, es el proceso de ebullición combinado con flujo de la mezcla agua-vapor. La ebullición o vaporización del agua es un fenómeno familiar. En términos generales, la ebullición es el proceso de transmisión de calor cuando el aporte del mismo al líquido no produce un aumento de temperatura mientras se mantenga constante la presión; el calor absorbido se emplea en la transformación del líquido en vapor. La cantidad de calor transmitida es grande, haciendo de este proceso un método ideal para refrigerar superficies expuestas a la recepción de flujos caloríficos muy altos, como ocurre en los hogares de combustibles fósiles, concentradores de energía solar y reactores nucleares. Por otro lado el proceso de ebullición comporta riesgos como el colapso total de la ebullición cuando el flujo calorífico es muy elevado y las fluctuaciones de caudal cuando se tienen flujos de mezcla de agua y vapor. Este proceso también necesita resolver problemas como conseguir una separación eficiente de agua y vapor. Otro objetivo que hay que conseguir en la ebullición en flujo bifásico es que haya una diferencia de densidades significativa entre el fluido contenido en los tubos que reciben calor y el contenido en los que no lo reciben. Esta diferencia de densidades es la fuerza motriz que produce el flujo de agua hacia los tubos vaporizadores en una caldera de recirculación natural bien diseñada.

La mayoría de los generadores de vapor que queman combustibles fósiles y los nucleares, funcionan en un rango de presiones en el cual la ebullición es el elemento clave del proceso de transmisión de calor. La comprensión de la ebullición y sus fenómenos asociados es esencial para el diseño de estas unidades, incluso cuando se trabaja a presiones superiores al punto crítico, a las cuales en lugar de ebullición, hay una transformación continua del agua en vapor, se produce un comportamiento similar a la ebullición y la transmisión de calor tiene características propias con una cierta similitud a las que se producen en ebullición.

3.1. Punto de ebullición y propiedades termofísicas

El *punto de ebullición* o temperatura de saturación, de un líquido se puede definir como la temperatura a la cual su presión de vapor es igual a la presión local. La temperatura de saturación del agua a la presión atmosférica es de 100 °C. Esta es la temperatura a la cual se produce generación neta de vapor y se liberan burbujas de vapor de un líquido sometido a calentamiento continuo. Esta temperatura de saturación, $TSAT$ es una función únicamente de la presión. Cuando la presión aumenta hasta aproximarse a la presión crítica (221,2 bar) el calor latente de vaporización tiende a cero y dejan de producirse las burbujas de vapor asociadas a la ebullición. En su lugar se produce una suave transición de líquido a vapor, con un incremento continuo en la

temperatura a medida que se le aporta calor. Otras dos definiciones útiles para la discusión de la transmisión de calor durante la ebullición son:

Subenfriamiento: Para el agua que se encuentra a una temperatura local inferior a la de saturación, es la diferencia entre la temperatura de saturación y la temperatura local ($T_{SAT} - T$).

Calidad del vapor (x): Es la fracción másica de la cantidad de agua en forma de vapor (normalmente se expresa en % en peso): $x = 100 \times m_{\text{agua}} / (m_{\text{agua}} + m_{\text{vapor}})$. Que también se puede expresar:

$$x = \frac{h - h_{AS}}{h_{clv}} = \frac{h - h_{AS}}{h_{VS} - h_{AS}}$$

donde:

- h = Entalpía local media del fluido, (J/kg)
- h_{AS} = Entalpía del agua a saturación, (J/kg)
- h_{VS} = Entalpía del vapor a saturación, (J/kg)
- h_{CLV} = Calor latente de vaporización, (J/kg)

Cuando la ebullición se produce en condiciones de saturación, las condiciones térmicas de equilibrio (ecuación anterior) dan la fracción másica del caudal correspondiente al vapor. Para condiciones de subenfriamiento donde $h < h_{AS}$, la calidad (x) resulta negativa, lo que puede ser una indicación de que se está en condiciones de subenfriamiento. En las condiciones donde $h > h_{VS}$, la calidad del vapor resulta superior al 100 % e indica que el vapor está sobrecalentado.

3.2. Curva de ebullición

En la figura 4 se muestra una curva de ebullición que resume los resultados obtenidos por muchos investigadores. La curva muestra los resultados correspondientes a un alambre al que se le suministra calor y que está sumergido en un líquido, pero las características son aplicables a muchas situaciones. El flujo calorífico (J/m^2s) se representa en función de la diferencia de temperaturas entre la superficie del metal y la media del total del fluido.

Entre los puntos A y B, se transmite calor al fluido por convección y se refrigera el metal sin que haya ebullición sobre la superficie del mismo.

Si se sobrepasa el punto B, llamado punto de ebullición incipiente, la temperatura del fluido en contacto con la superficie metálica calentada, tiene una temperatura ligeramente superior a la temperatura local de saturación del líquido, mientras el conjunto del líquido permanece subenfriado. Comienzan a formarse burbujas, inicialmente muy pequeñas, adyacentes a la superficie del alambre. Las burbujas colapsan (por condensación) cuando avanzan en el seno del resto del fluido subenfriado. Este fenómeno se llama ebullición en subenfriamiento y se produce entre los puntos B y S. La cantidad de calor transmitida (flujo calorífico) es muy grande pero no hay formación neta de vapor (las burbujas no llegan a la superficie).

Entre el punto S y el C, la temperatura del total de la masa fluida ha alcanzado la temperatura local de saturación, las burbujas no se condensan al avanzar en la masa de fluido y se desplazan hasta la superficie del mismo. Esta zona se llama de ebullición nucleada, vapor neto e igualmente que en la zona de subenfriamiento, el flujo calorífico es muy alto y la superficie metálica se encuentra a una temperatura ligeramente superior a la temperatura de saturación.

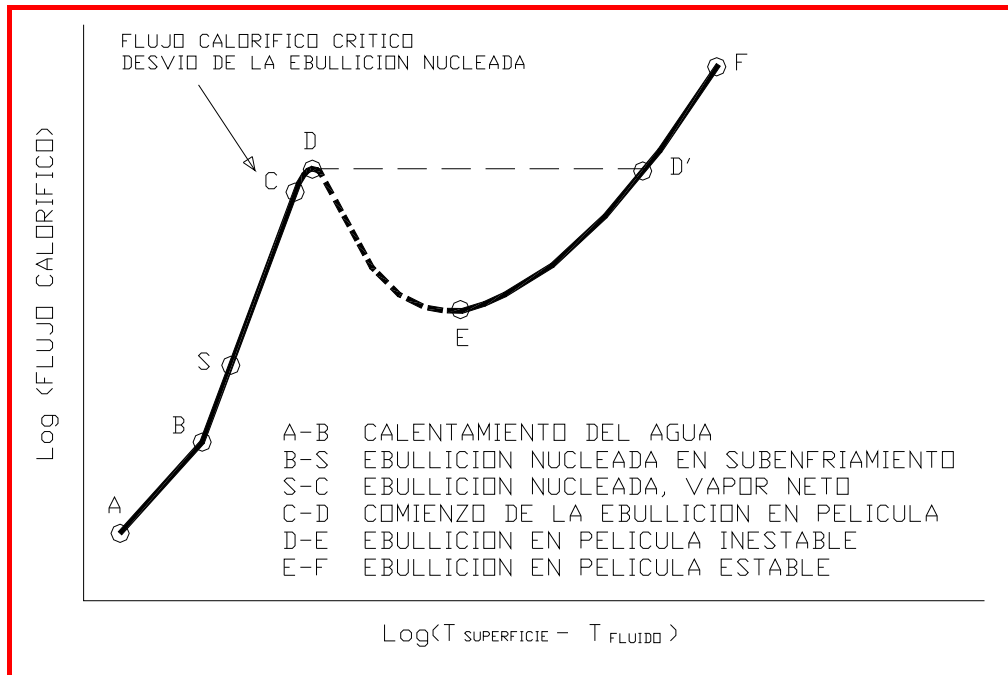


Figura 4. Flujo calorífico en función de la diferencia de temperaturas entre la superficie y el total del fluido

Cuando se alcanza el punto C la superficie en contacto con vapor se hace muy grande (formación de gran cantidad de burbujas). La cantidad de vapor generada es tan grande que dificulta el retorno del líquido hacia la superficie, y ésta comienza a quedarse recubierta por una capa de vapor, de baja conductividad térmica, lo que provoca una disminución del coeficiente, k , de transmisión de calor desde la superficie al fluido. A esta transición se suele hacer referencia como flujo calorífico crítico, desviación de la ebullición nucleada, quemado, secado, pico de flujo de calor o crisis de la ebullición. La respuesta de la temperatura de la superficie en estas condiciones, depende de como se esté calentando dicha superficie.

En los hogares de las calderas de combustibles fósiles o en los núcleos de los reactores nucleares, el ritmo de aporte de calor (la generación de calor) no depende de la temperatura de la superficie, por lo tanto el flujo calorífico no varía y una reducción en el coeficiente de transmisión de calor produce un aumento de la temperatura de la superficie desde el punto D al D'. En algunos casos la elevación de la temperatura de la superficie es tan grande que se puede producir la fusión del metal.

Si por otro lado ocurre que el flujo calorífico, puede ser dependiente de la temperatura de la superficie, como ocurre en los generadores de vapor nucleares, cuando la temperatura media local de la superficie aumenta, el flujo calorífico disminuye. Esta región que en la figura 4 está representada por la curva entre los puntos D y E se suele llamar zona de ebullición en película inestable o transición de la ebullición. Visto localmente, el fenómeno en esta región es muy complejo e inestable ya que partes discretas de superficie fluctúan entre la ebullición con la superficie mojada y la superficie sin agua o superficie seca.

Desde el punto E pasando por D' hasta el punto F, la superficie está en contacto con una capa poco conductora de vapor. La energía se transmite a través de esta capa por radiación conducción y microconvección a la interfase líquido vapor. En esta interfase se produce vaporización y formación de burbujas. Esta región es conocida como de ebullición estable en película.

En el diseño de los sistemas de los generadores de vapor, debe de tenerse mucho cuidado para controlar cual de estos fenómenos se puede producir. En los lugares donde el flujo calorífico es muy alto como ocurre en los hogares de las calderas de combustibles fósiles o en los núcleos de los reactores nucleares, es importante que se mantenga la ebullición nucleada o en subenfriamiento para que la refrigeración de la superficie sea adecuada y no haya riesgos de fallo de materiales. Por otro lado en las zonas donde el flujo calorífico sea pequeño o esté controlada por el coeficiente de transmisión de calor, puede ser aceptable la vaporización en película estable o inestable. En estas zonas debe de ser evaluado el flujo calorífico y deben de respetarse las limitaciones de temperatura, de la que solamente se pueden tolerar las variaciones de magnitud aceptable.

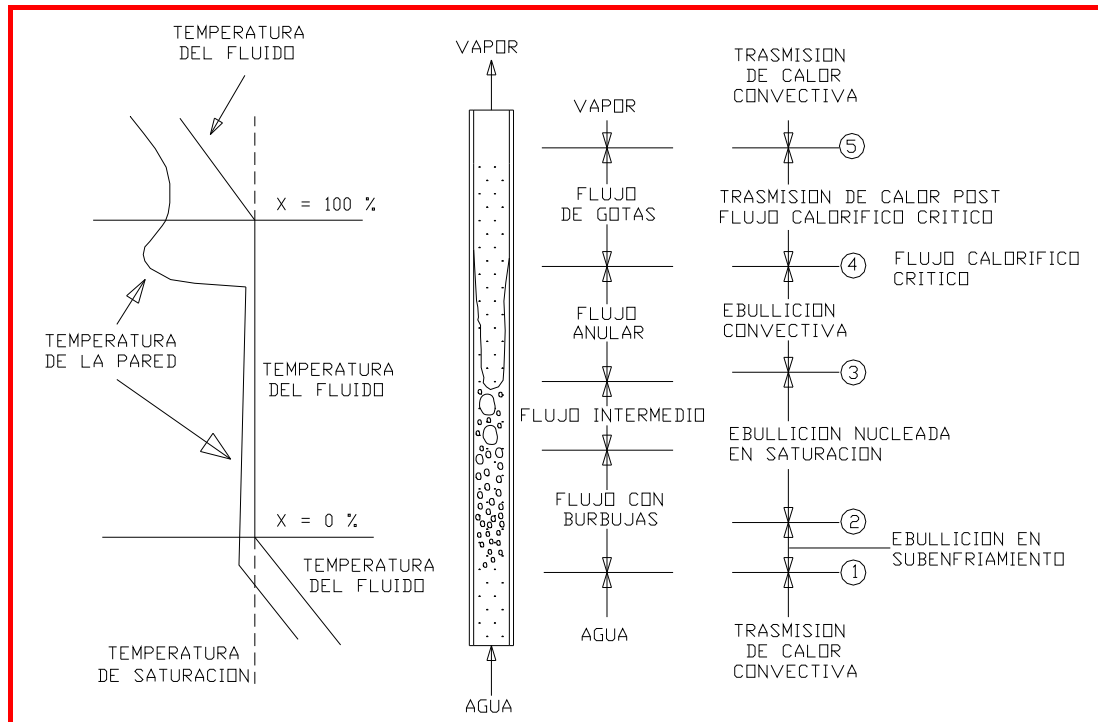


Figura 5. Ebullición en una corriente ascendente en un tubo vertical

3.3. La ebullición en corrientes o ebullición forzada convectiva

La ebullición en corrientes o ebullición forzada convectiva que virtualmente se produce en todos los sistemas generadores de vapor, es un fenómeno muy complejo en el que hay una interacción íntima entra dos fases fluidas en movimiento, la gravedad y el mecanismo de transmisión de calor en ebullición. La figura 5 es un ejemplo de la ebullición del agua en un tubo de sección circular, de gran longitud, calentado uniformemente y situado en posición vertical. El agua entra por la parte inferior del tubo como líquido subenfriado y el tubo se refrigera mediante transmisión de calor por convección. Se alcanza la ebullición incipiente en el punto 1, lo que representa una ebullición en subenfriamiento y un flujo de burbujas. La temperatura del fluido sigue aumentando hasta que la totalidad del fluido de la corriente alcanza la temperatura de saturación, punto 2, y comienza la ebullición nucleada. Desde este punto la ebullición se separa de lo que ocurre en un simple recipiente. El flujo de la mezcla agua-vapor progresa y va pasando por distintas estructuras: burbujas, intermedio y anular. Esto es el resultado de una interacción compleja de las fuerzas de tensión superficial, fenómenos de interfase, caídas de presión, densidad del agua-vapor y efecto del momento, acopladas con el comportamiento de la ebullición en la superficie. A medida que el agua- vapor sigue avanzando, se alcanza un punto donde el régimen de flujo es anular (agua sobre la superficie y vapor en el centro) y luego la película de

líquido sobre la superficie se hace tan fina que la ebullición nucleada desaparece (no hay formación de burbujas en el seno de la película), este es el punto 3. La transmisión de calor desde este momento se produce por conducción y convección a través de la fina película anular con vaporización en la interfase agua-vapor. Este mecanismo de transmisión de calor llamado ebullición convectiva también presenta unas velocidades de transmisión de calor altas. Hay que tener en cuenta que no todo el líquido está adherido a la pared ya que parte se encuentra en el núcleo de vapor en forma de gotas dispersas. Eventualmente se puede alcanzar un punto tal como el 4 donde la superficie deja de estar mojada y se produce lo que llamábamos flujo calorífico crítico, desviación de la ebullición nucleada, quemado, secado, pico de flujo de calor o crisis de la ebullición.

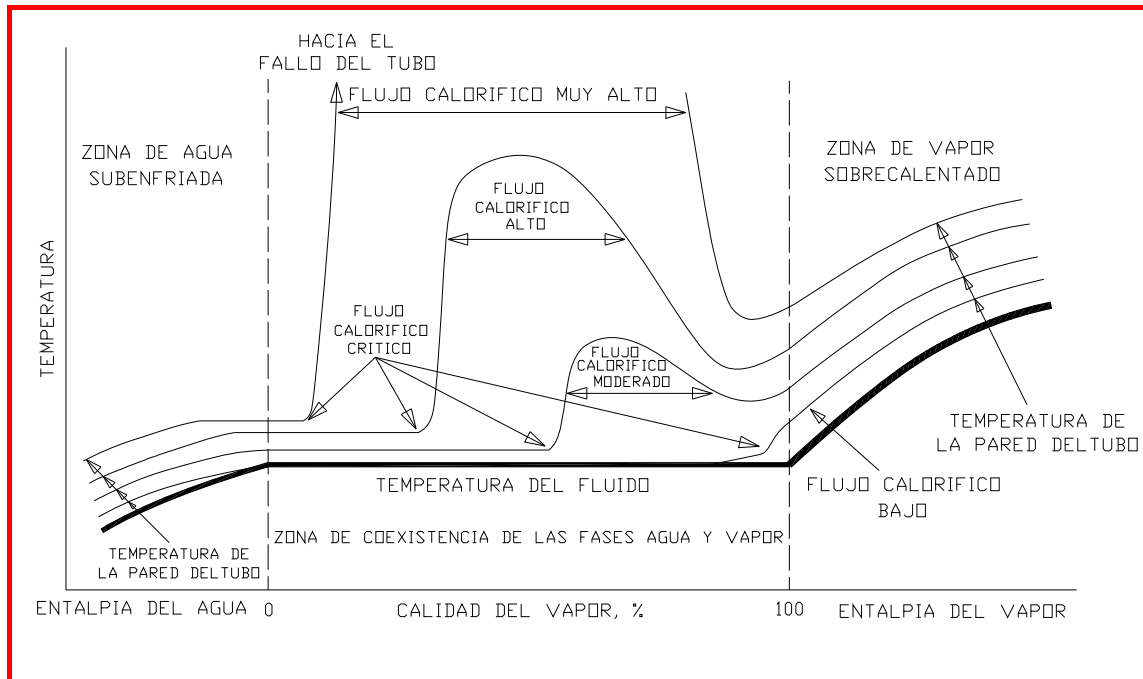


Figura 6. Efecto del flujo calorífico en la localización de la desviación de la ebullición nucleada

Este fenómeno siempre está asociado con una elevación de la temperatura. La localización exacta en el tubo de este punto y la magnitud de la temperatura alcanzada, depende fundamentalmente de una serie de parámetros, tales como el flujo calorífico, el flujo másico, la geometría y la calidad del vapor. En la figura 6, se puede ver el efecto de la velocidad de aporte de calor o flujo calorífico en la localización de la desviación de la ebullición nucleada y el aumento de temperatura asociado al fenómeno. Entre los puntos 4 y 5 de la figura 5, se produce el fenómeno de la transmisión de calor posterior a la desviación de la ebullición nucleada, el cual es altamente complejo. Después del punto 5 todo el líquido se habrá convertido en vapor y la transmisión de calor se produce por simple convección.

4. La circulación

Como ya se ha visto en el epígrafe 2, se utilizan dos sistemas básicos de circulación del fluido en la caldera: la circulación natural y la circulación de paso único.

4.1. La circulación natural

En el caso de sistemas de circulación natural, que operan a presiones subcríticas, el agua se vaporiza parcialmente en los circuitos del hogar, produciendo una mezcla agua-vapor a la salida de los tubos. Es necesario el equipo de separación de la mezcla agua-vapor, con el fin de suministrar vapor saturado y seco al sobrecalentador y recircular el agua a los circuitos vaporizadores de caldera. La circulación natural es consecuencia de la diferencia de densidades entre las ramas caliente (ascendente que recibe calor en el hogar) y fría (tubos descendentes exteriores a la caldera que alimentan por el fondo a los tubos ascendentes), ver figura 7a. Los límites aceptados industrialmente en la química del agua son generalmente menos rigurosos en este tipo de circulación.

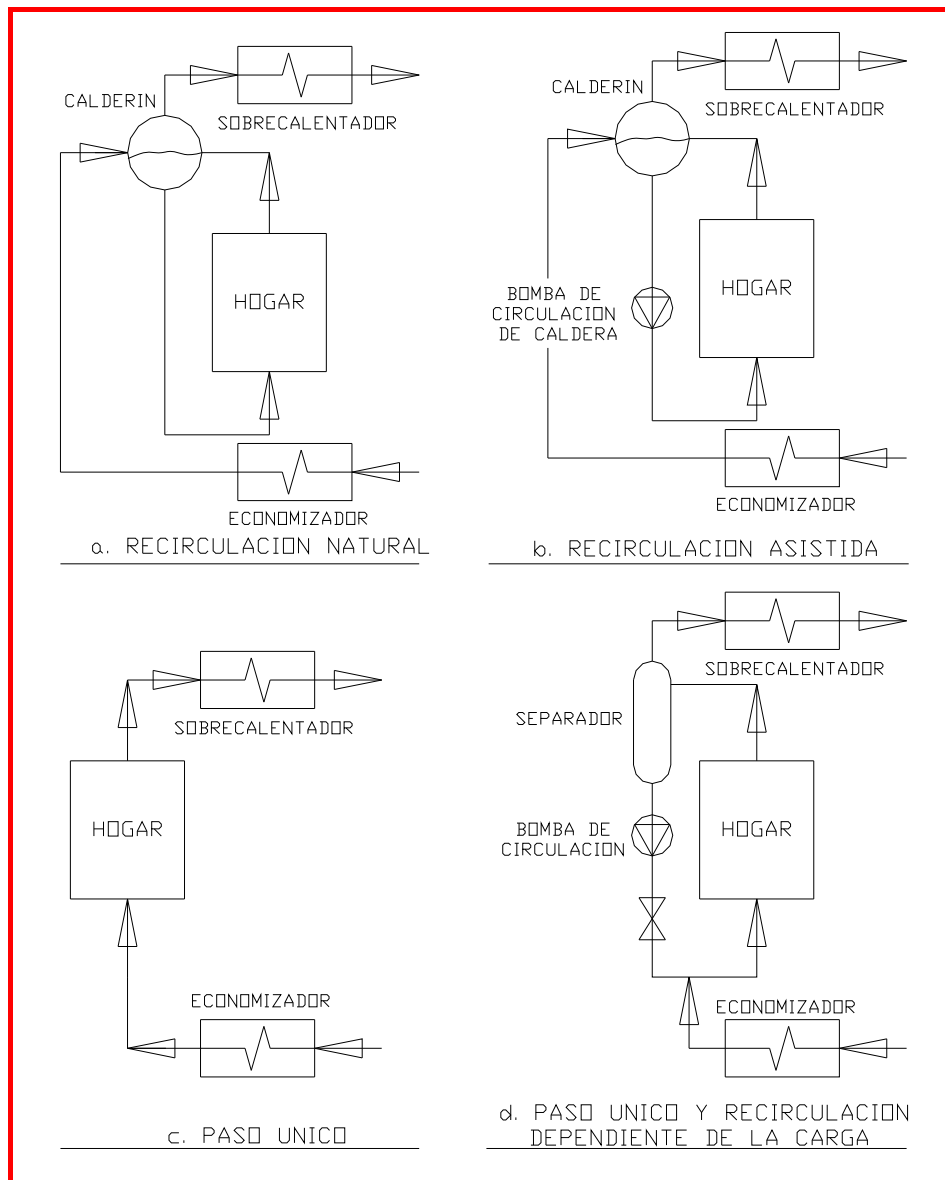


Figura 7. Tipos de circuitos según la circulación

Cuando se aumenta la presión de la caldera, las densidades del agua y el vapor, así como las del fluido en los tubos de bajada y en los tubos vaporizadores, varían como se muestra en la figura 8, donde se ve que la altura de bombeo también disminuye. Como consecuencia de ello, a partir de una determinada presión, la circulación se vuelve poco efectiva. Se puede, entonces, adoptar la solución de la figura 7b, en la que la circulación se realiza impulsando el fluido

mediante unas bombas llamadas de circulación de caldera (calderas de circulación asistida). De todos modos cuando se soluciona el problema de la circulación, persiste el de la separación de agua y vapor que también se realiza aprovechando la diferencia de densidades. Por todo ello no suele haber calderas de circulación natural ni de circulación asistida que trabajen a presiones superiores a 170 bar.

4.2. La circulación de paso único

En los diseños de paso único, se eliminan el calderín (figura 7c) y el equipo interno de separación del vapor, y se añade un sistema diferente de puesta en servicio (figura 7d). Las calderas de paso único, (presión universal (UP)), se han diseñado tanto para operación subcrítica como para operación supercrítica. A presiones supercríticas, el sistema puede incrementar la eficiencia (rendimiento) global del ciclo, pero a base de un mayor coste de capital inicial (inversión). Para estas unidades se necesitan unas condiciones de operación más estrictas en lo que se refiere a la calidad del agua.

Existen sistemas híbridos de circulación natural y de paso único (figura 7d).

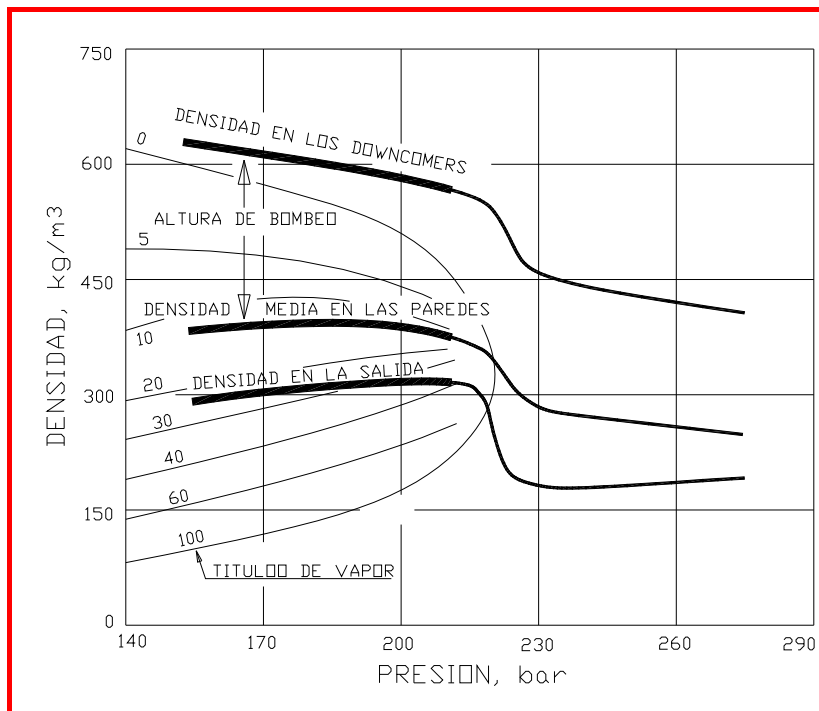


Figura 8: Efecto de la presión en las densidades y en las posibilidades de circulación natural

5. Criterios de diseño

Dentro del marco estructural precedente, en el diseño de caldera, los puntos que deben cumplimentarse son los siguientes:

1. Definir el aporte (entrada) de energía, basado en los requisitos de flujos de vapor, de temperatura de agua del ciclo (agua de alimentación) y de un rendimiento, supuesto o especificado, para la caldera.
2. Evaluar la absorción de calor que se necesita en la caldera y en otros componentes de transferencia de calor.
3. Ejecutar los cálculos de combustión, para establecer las necesidades de flujos de combustible, de aire y de gases (humos).
4. Determinar el tamaño y el perfil del hogar, considerando la ubicación y las necesidades de espacio de quemadores u otros sistemas de combustión, y además, incorporando suficiente

- volumen de hogar para lograr la combustión completa y bajas emisiones. Hay que facilitar medios para manipular la ceniza contenida en el combustible y para enfriar los gases (humos), de modo que la temperatura de humos a la salida del hogar satisfaga los requisitos de diseño.
5. Determinar la posición y la configuración de las superficies de calentamiento por convección. El sobrecalentador y el recalentador, cuando existan, deben ubicarse donde la temperatura de gases (humos) sea lo bastante alta como para poder producir una efectiva transferencia de calor, pero no tanto como para que puedan producirse temperaturas excesivas en tubos o ensuciamientos por ceniza. Todas las superficies de convección deben diseñarse para minimizar el impacto derivado de la acumulación de ceniza (o escoria), y también para permitir la limpieza de superficies sin erosión de las partes a presión.
 7. Instalar la suficiente superficie de vaporización, para generar el resto de vapor que no se produzca en las paredes del hogar. Esto debe cumplimentarse con o sin economizador.
 8. Diseñar las partes a presión, de acuerdo con los Códigos aplicables, utilizando materiales autorizados.
 9. Instalar una envolvente o cerramiento de caldera, que sea estanca a gases, alrededor de hogar, sobrecalentador, recalentador y economizador.
 10. Diseñar los soportes de las partes a presión y el cerramiento, para hacer frente a la expansión y a las condiciones locales, incluyendo cargas debidas a viento y a terremotos.

La selección y especificación del combustible son especialmente importantes. Aunque los sistemas de calderas se diseñan para combustibles concretos, es necesario evaluar todos y cada uno de los posibles combustibles que puedan ser utilizados si cambian las circunstancias iniciales.

La eficiencia (rendimiento) de caldera o de combustión, se suele evaluar como la diferencia a 100 de la suma de pérdidas de calor, expresadas como porcentajes.

6. Vaporizadores y separación del vapor

6.1. Diseño de las paredes

El hogar de una caldera grande, que queme carbón pulverizado, aceite o gas, en esencia, es un gran volumen delimitado por un cerramiento, en el que tiene lugar la combustión del combustible y la refrigeración de los productos de tal combustión (humos), antes de que estos penetren en los bancos o paquetes (haces) tubulares que se encuentran en el paso de convección.

Una excesiva temperatura de humos, a la entrada a los bancos de tubos de convección, puede provocar elevadas temperaturas del metal tubular, o bien un ensuciamiento o una escorificación que sean inaceptables.

La transferencia de calor a las paredes del cerramiento del hogar, tiene lugar fundamentalmente por radiación. Tales paredes pueden estar refrigeradas por agua en proceso de vaporización (en presión subcrítica), o mediante agua de alta velocidad (en presión supercrítica).

El cerramiento de la zona de convección contiene los pasos de gases (humos), horizontales y verticales descendentes (ver figura 1) o ascendentes (ver figura 2), en los que se localiza la mayor parte de las superficies del sobrecalentador, recalentador y economizador. Las superficies de tal cerramiento pueden estar refrigeradas por agua o por vapor.

Los cerramientos del hogar están constituidos normalmente por tubos refrigerados por agua y los del paso de convección lo están con tubos refrigerados por agua o por vapor, con una construcción denominada tipo pared membrana totalmente soldada. Estos cerramientos también se han construido con tubos tangentes, o con tubos muy poco espaciados.

En el caso de una construcción del tipo, pared membrana, los tubos de pared y las superficies membrana están expuestas, del lado del hogar, al proceso de combustión; mientras

que por el lado contrario lo están al aislamiento y la envolvente externa, que protegen la caldera respecto del ambiente exterior y minimizan la pérdidas de calor, preservando al mismo tiempo de daños al personal de operación.

6.2. Tamaño del hogar

Además de facilitar el volumen necesario para la combustión completa debe de permitir el enfriamiento de los gases (humos) hasta una temperatura de gases a la salida del hogar, aceptable. Por tanto, el cerramiento del hogar provee mucha o toda, de la superficie generadora de vapor, que precisa la caldera.

En unidades que queman carbón, el volumen mínimo de hogar se fija normalmente para lograr una temperatura específica en la ceniza, a la salida del hogar. Frecuentemente, esto conduce a demasiada superficie de vaporización en las unidades de alta presión, y a muy escasa superficie de vaporización en unidades de baja presión, para cumplimentar los requisitos termodinámicos correspondientes a la deseada temperatura de salida del vapor (ver figura 3).

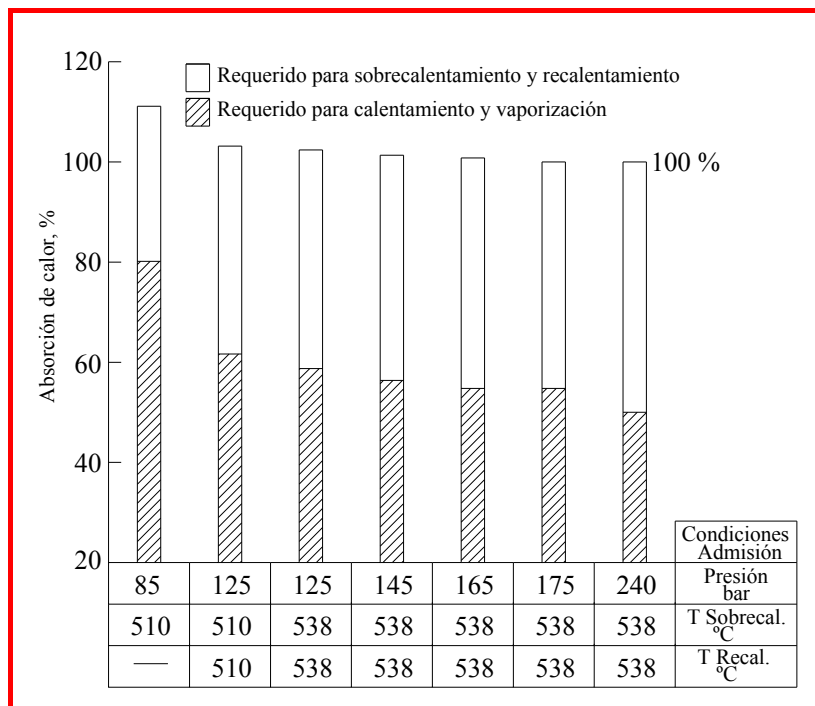


Figura 9. Absorción relativa de calor según la presión de operación

La figura 9 ilustra la influencia del ciclo de vapor, así como de la presión y temperatura del vapor, en la absorción relativa de energía entre economizador-hogar y sobrecalentador-recalentador. Cuando aumentan la presión y la temperatura del vapor, la absorción total de la unidad decrece progresivamente, como consecuencia de una mayor eficiencia del ciclo.

La absorción del hogar y del economizador representa la cantidad de calor añadido al agua de alimentación (agua del ciclo), para producir vapor saturado, o bien para alcanzar el punto crítico en una caldera supercrítica.

Al aumentar la presión de operación, disminuye la cantidad necesaria de calor para producir vapor saturado y por el contrario, aumentan las cantidades requeridas de calor por el sobrecalentador y por el recalentador.

En unidades de baja presión, la cantidad de calor absorbida por el hogar no es normalmente la adecuada para producir todo el vapor saturado requerido, y por ello se instala, aguas abajo del sobrecalentador, un banco o haz vaporizador.

En una unidad de alta presión, el calor absorbido por el hogar y por el economizador es el adecuado para producir todo el vapor saturado que se requiere.

Cuando el tamaño del hogar aumenta, el economizador puede hacerse más pequeño, para generar la misma cantidad de vapor. Como puede suponerse, al aumentar el hogar cada vez más, se llega a un punto en el que ya no se precisa economizador. Sin embargo, cuando se agranda el hogar, se reduce la temperatura de humos a la salida del mismo, se podría producir demasiado vapor y quedaría una energía insuficiente en los gases (humos) para alcanzar las temperaturas de diseño en sobrecalentador y en recalentador.

6.3. Criterios de diseño del hogar

Básicamente el hogares un gran volumen, con una abertura o sección de salida, que esta confinado por paredes refrigeradas por agua y dentro del cual se realiza la combustión. Tanto su perfil como su volumen quedan fijados por la selección del combustible y del sistema de combustión.

Con fuegos de quemadores en paredes, la mínima separación entre quemadores o recintos individuales de combustión, lo mismo que entre éstos y las paredes laterales, así como las soleras del hogar, se establece sobre la base de holguras físicas y de criterios funcionales para llegar a la combustión completa. Con estas limitaciones se impiden las interacciones (interferencias) entre llamas, se asegura la combustión completa, se evitan inaceptables colisiones de las llamas sobre las paredes (que provocarían el recalentamiento de tubos o excesivos depósitos) y se minimiza la formación de óxidos de nitrógeno (NO_x).

El máximo régimen de aporte de combustible, el número de quemadores y las correspondientes holguras asociadas establecen:

1. El área de la sección recta del hogar.
2. La altura de la zona de combustión.
3. La altura de la zona de inyección de aire terciario (si se usa).
4. La distancia entre quemadores y soleras del hogar.

Cuando el combustible se quema en hogares mecánicos, el área de la sección recta del hogar se determina mediante el régimen específico de liberación de calor por unidad de superficie de lecho.

El diseño del sistema de combustión y su influencia en el perfil y en el volumen del hogar se hace muy crítico y muy complejo, cuando tienen que reducirse los límites de emisiones. Para la reducción de las emisiones de NO_x se pueden considerar no solo los quemadores de bajo NO_x , sino también otras técnicas, tales como el escalonamiento en el hogar del aire terciario (portillas de NO_x), el requemado del combustible y la inyección de reactivos.

También se han desarrollado algunas técnicas para la inyección de absorbentes destinados a reducir las emisiones de dióxido de azufre (SO_2). Cada una de estas técnicas puede tener su particular impacto sobre el tamaño y la configuración del hogar.

La altura global del hogar se establece mediante diversos criterios:

- Para combustibles limpios, tal como el gas natural, el volumen y la altura del hogar se calculan general mente para enfriar los productos de la combustión, hasta una temperatura de gases a la salida del hogar que impida el posible recalentamiento de los tubos del sobrecalentador.
- Para combustibles tales como el carbón y algunos aceites, que contienen niveles significativos de ceniza, el volumen y la altura del hogar se determinan para enfriar los productos de la combustión, hasta una temperatura que evite el excesivo ensuciamiento de las superficies de conveccion.

La altura del hogar debe fijarse también para facilitar, al menos, el mínimo tiempo de residencia que precise la combustión completa, y para cumplimentar los requisitos mínimos de separación desde quemadores o recintos de fuego y portillas de NO_x hasta la bóveda y las superficies de convección.

6.4. Influencia de la ceniza

En el caso del carbón, y en menor grado también en el del aceite, una de las consideraciones extremadamente importantes es la ceniza presente en el combustible. Si esta ceniza no se tiene en cuenta adecuadamente, tanto en el diseño como en la operación de la unidad, dicha ceniza se puede depositar en las paredes del hogar, en las superficies inclinadas y sobre todos los bancos (paquetes) de tubos del paso de convección.

La ceniza no solo reduce la cantidad de calor absorbido por la unidad generadora de vapor, sino también aumenta la pérdida de tiro, erosiona las partes a presión y, eventual mente, puede provocar paradas forzosas para efectuar inaplazables limpiezas y reparaciones.

En los hogares que queman carbón, los problemas de la ceniza son mucho más severos, que los de otros combustibles. Hay dos métodos generales de manipular la ceniza en el caso del carbón:

- El hogar de ceniza sólida o ceniza seca.
- El hogar de ceniza fundida o de solera húmeda.

En el hogar de ceniza sólida o ceniza seca, que es particularmente aplicable a carbones con alta temperatura de fusión de la ceniza, se dispone una solera en forma de tolva (figuras 1 y 2) y una superficie suficiente de refrigeración, de tal modo que la ceniza que impacte sobre las paredes del hogar, o sobre la solera en forma de tolva (que a veces se identifica como cenicero), sea sólida y seca.

Cuando se quema carbón pulverizado, en un hogar con ceniza seca, aproximadamente el 80 % de la ceniza se arrastra por los gases (humos) a través de los bancos tubulares de convección.

Las características químicas de la ceniza pueden tener una dramática influencia sobre el volumen del hogar, que es necesario para lograr una satisfactoria operación de la unidad con cenicero seco. Esto se ilustra en la figura 10, que compara el volumen de un hogar, necesario para una caldera de 500 MW nominales quemando carbón bituminoso o sub-bituminoso de baja escorificación, con el que se requiere por otra unidad de igual potencia pero quemando lignito con un gran poder aglutinante escorificante.

Con muchos carbones que tienen bajas temperaturas de fusión de sus cenizas, es muy difícil emplear un hogar con cenicero seco, porque la ceniza (y en particular la escoria) se funde o al menos pasa al estado pastoso. Así las cosas, la ceniza se pega (se cuelga), es decir se amontona en las paredes del hogar o en la tolva del cenicero (tolva de escoria). Para manipular estos carbones, se ha desarrollado el hogar con ceniza fundida o con cenicero húmedo.

La configuración más afortunada de hogar con ceniza fundida es la que se emplea incorporando, uno o varios recintos ciclón o combustor ciclón, que suele llamarse a veces quemador ciclón, y designarse también el conjunto del hogar como hogar ciclón.

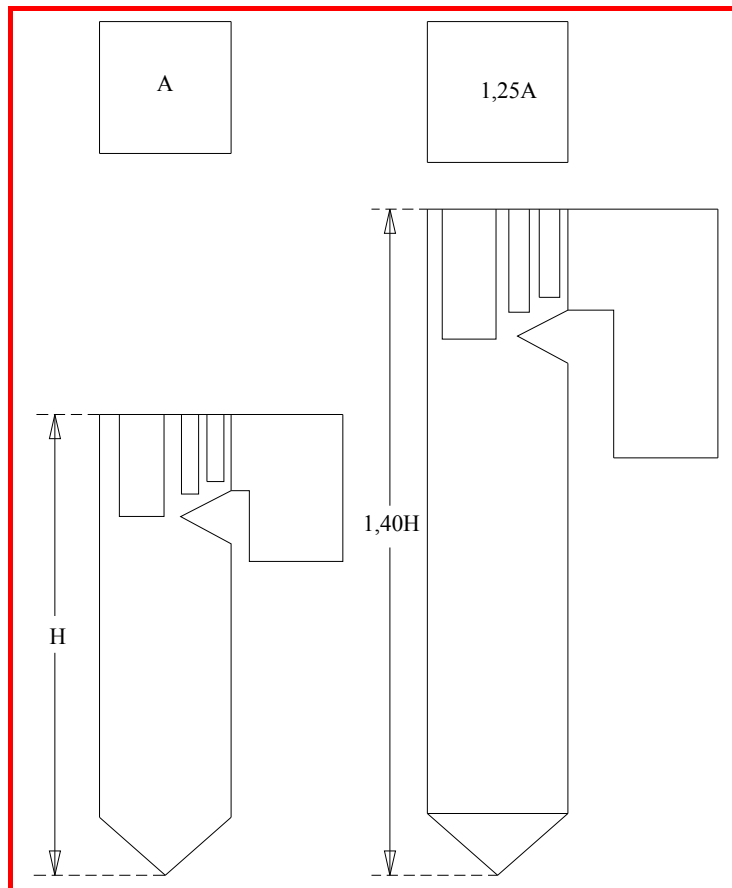


Figura 10. Comparación de tamaños de calderas para distintos tipos de carbón

6.5. Paredes refrigeradas por agua

La mayoría de los hogares de calderas tienen paredes del tipo membrana refrigeradas por agua. Esta construcción reduce el mantenimiento de las paredes del hogar; y también reduce la temperatura de los gases (humos) que se dirigen hacia los bancos de convección, hasta un nivel en el que la deposición de escoria y la corrosión en el sobrecalentador se pueda controlar mediante el equipo de soplado del hollín.

Los tubos de las paredes del hogar están espaciados lo menos posible, para que se obtenga la máxima absorción de calor, a la vez que se mantienen dentro de límites aceptables tanto las temperaturas de los tubos y de la membrana como las respectivas solicitaciones térmicas.

Las paredes membrana están compuestas por tubos, cuyos ejes están dispuestos en un plano y de modo que los de dos consecutivos están espaciados algo más que un diámetro de tubo, y además los tubos están unidos entre sí mediante una varilla que se suelda por completo a los tubos adyacentes. Este conjunto configura un panel de pared de superficie continua, de construcción robusta y estanca, capaz de transferir el calor requerido desde los gases (humos) del hogar hacia la mezcla agua-vapor interior a los tubos.

El ancho y la longitud de los paneles individuales son los adecuados para fabricación y montaje económicos, con colectores superiores e inferiores montados en taller (premontados) antes de su embalaje para su posterior montaje en campo. Las limitaciones de tamaño las imponen frecuentemente los espacios libres de transporte y las restricciones propias del montaje o construcción en campo.

La construcción de membranas con revestimiento refractario se utiliza en las paredes inferiores del hogar de unidades dotadas con combustores ciclones, destinadas a quemar basuras, y de unidades de lecho fluido.

6.6. Superficie de convección de caldera

En algunos casos se incluyen, como tubos vaporizadores, las primeras filas (pocas) de tubos que forman parte del banco o haz de convección. Tales tubos están bastante espaciados, para facilitar pasos de gases (humos) suficientemente amplios, con el fin de evitar las acumulaciones de ceniza y su aglutinación, y también con el objeto de facilitar la limpieza de las superficies en el caso de utilizar combustibles sucios.

Esos tubos de caldera, tan ampliamente espaciados, configuran lo que se conoce como pantalla de escoria o pantalla de caldera, y reciben el calor por radiación directa desde el hogar y por radiación y convección desde los gases (humos) de combustión que pasan a través de ellos.

Otra opción es la utilización de pantallas de tubos, refrigerados por agua o por vapor, ubicados en la parte superior del hogar. Estas pantallas, que a veces se identifican como paredes divisorias, facilitan una superficie adicional de caldera, en el hogar, a la vez que permiten optimizar el tamaño de este. En las mayores unidades de alta presión, estas pantallas de tubos, situadas en el plano de salida del hogar, generalmente están configuradas por superficie de sobrecalentador.

La temperatura de humos a la entrada en el sobrecalentador debe ser lo suficientemente alta para que se pueda alcanzar la temperatura deseada en el vapor sobrecalentado, con una razonable cantidad de superficie de caldeo y con la utilización de materiales económicos.

Las disposiciones mostradas en las figuras 1 y 2 ilustran configuraciones varias de superficie de sobrecalentador, a la salida del hogar.

El diseño de la superficie de transmisión de calor aguas abajo del sobrecalentador, depende del tipo de unidad (industrial o energética), de la deseada caída de temperatura en los gases (humos) y de una aceptable resistencia (perdida de tiro) al paso de humos a través de la referida superficie.

En el diseño de calderas con caldeo por convección, el objetivo está en establecer la adecuada combinación de ciertos parámetros, con el fin de lograr la caída deseada de temperatura en los gases (humos), con una resistencia tolerable en el flujo de los mismos. Estos parámetros son el diámetro y la longitud de los tubos, el espaciado entre tubos, el número y orientación de los tubos y los deflectores que se provean del lado de gases (humos).

En el diseño de superficies de convección, del lado de humos, la cantidad de superficie de transmisión de calor (m^2) necesaria para una carga o régimen dado (W), en general, resulta ser inversamente proporcional a la resistencia de flujo o caída de presión del lado de humos.

Las modificaciones de diseño que aumentan la resistencia, tal como una reducción del espaciado entre tubos, perpendicularmente al flujo, dan lugar a mayores regímenes de transferencia de calor (W/m^2).

A su vez, con el aumento de la referida resistencia se reduce también la cantidad de superficie de transmisión de calor necesaria para soportar la carga térmica total que se desea.

La optimización del flujo máximo de humos y del diseño se obtiene de la ponderación entre el coste de capital (inversión) correspondiente a la superficie de transmisión de calor y el coste operativo (en energía) de ventilador que se precisa para vencer la resistencia.

Para un régimen dado de humos, hay mayor coeficiente de termotransferencia (conductancia) pelicular, mayor absorción de calor y mayor pérdida de tiro, cuando los humos circulan perpendicularmente a los tubos (flujo cruzado), que cuando los humos circulan paralelamente a los tubos (flujo longitudinal o paralelo).

En general, el flujo gaseoso serpentea entre los bancos de tubos, lo que da lugar a una pérdida adicional de tiro y a una mala distribución de flujo, con poca mejora en la absorción de calor. Los cambios de dirección en el flujo, que sale de un banco tubular situado aguas arriba para

entrar en otros aguas abajo, hay que diseñarlos para que tengan resistencia mínima y óptima disposición.

6.7. Análisis numérico

Cuando el análisis unidimensional y los datos experimentales son insuficientes por sí solos, para el diseño, se puede emplear la modelación numérica en computador, para la determinación de transmisiones de calor locales y de condiciones de humos en caldera, sobrecalentador y recalentador. Estas herramientas numéricas son complejos programas de computador, multidimensionales, que resuelven las correspondientes ecuaciones de conservación de masa, de cantidad de movimiento, de energía y de compuestos.

6.8. Separación del agua y el vapor. El calderín

Las calderas de presión subcrítica de recirculación y los generadores de vapor de las centrales nucleares, están equipados con grandes recipientes cilíndricos llamados calderines. Su objetivo principal es separar el vapor saturado de la mezcla agua-vapor que se produce en los tubos vaporizadores. El agua separada del vapor es recirculada, junto con la de alimentación, hacia la parte inferior de los tubos vaporizadores. El vapor saturado sale desde el calderín por un determinado número de tubos para ser dirigido hacia las zonas de sobrecalentamiento. El calderín también sirve para:

1. Mezclar el agua de alimentación con el agua saturada separada del vapor.
2. Dosificar los productos químicos para control de corrosión y tratamiento de agua.
3. Purificar el vapor eliminando contaminantes y humedad residual.
4. Eliminar parte del agua (purga) para controlar su composición química (contenido de sólidos).
5. Mantener un almacenamiento de agua, para responder a los cambios bruscos en la potencia de la caldera.

De cualquier manera, la función primordial del calderín es la separación efectiva del agua y el vapor. Para ello debe de disponer de una gran superficie para favorecer la separación por gravedad o un gran espacio para la disposición de equipos de separación mecánica. La separación eficiente del agua y el vapor es crítica con relación a los siguientes aspectos:

1. Evitar el arrastre de gotas de agua hacia el sobrecalentador, donde provocarían daños de origen térmico.
2. Minimizar el arrastre de vapor en el agua que abandona el calderín, la cual provocaría disminución en la diferencia de densidades origen de la circulación.
3. Evitar el arrastre de sólidos disueltos en las gotas de agua arrastradas por el vapor hacia el sobrecalentador y la turbina, donde formarían incrustaciones.

El último punto es de particular importancia. El agua de la caldera puede contener impurezas principalmente en disolución. Estas proceden de las que pueda tener el agua de aportación debidas a deficiencias en el tratamiento químico o a fugas en el condensador. Debido a que la solubilidad de estos contaminantes es varios ordenes de magnitud inferior en el vapor que en el agua, una pequeña cantidad de gotas de agua que puedan ser arrastradas por el vapor (< 0,25 % en peso) puede significar un incremento muy importante en el arrastre de sólidos, que producirán depósitos inaceptables en el sobrecalentador y en la turbina. Los depósitos pueden producir daños en la turbina, así como aumentos de la temperatura del metal del sobrecalentador, con deformaciones y quemado de los tubos.

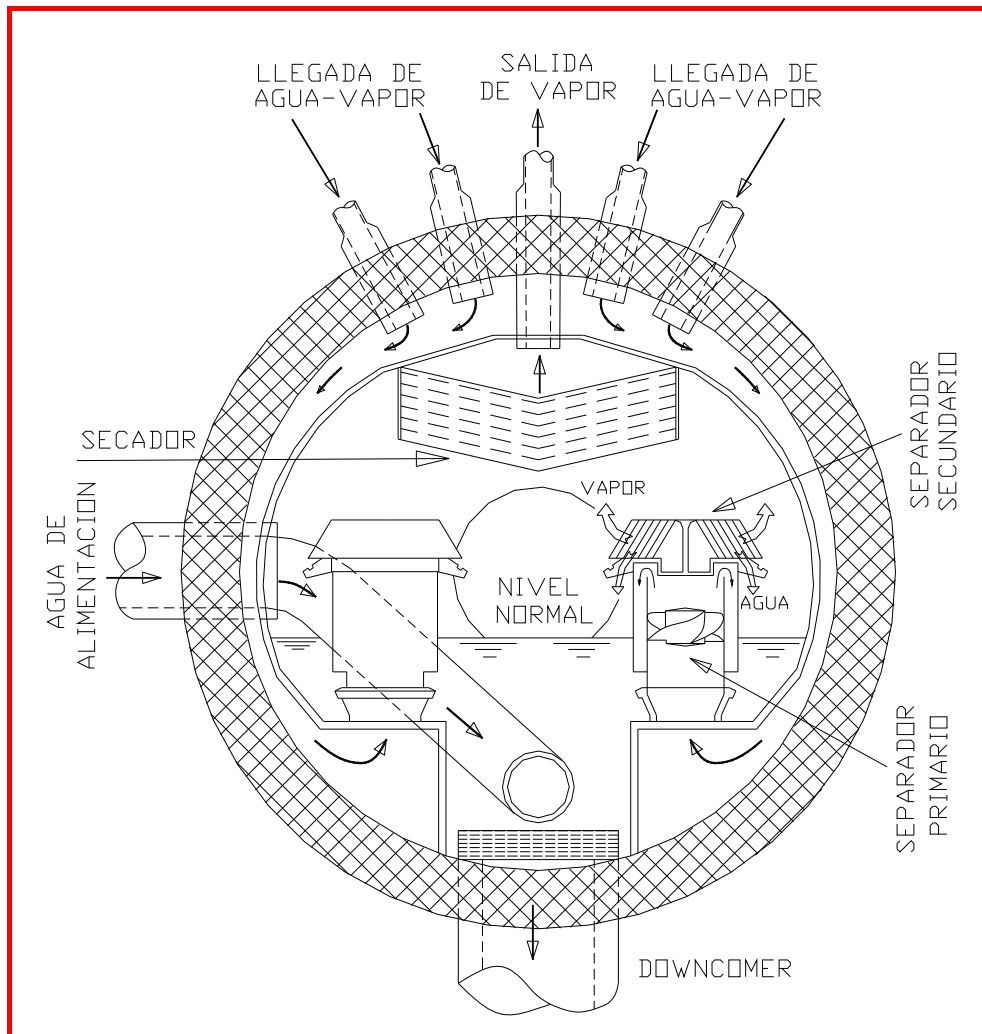


Figura 11. Sección transversal de un calderín

En la figura 11 se muestra la sección transversal de un calderín horizontal de una caldera de combustibles fósiles de alta potencia. Aquí se ilustra la disposición general de las placas deflectoras, de los separadores ciclónicos primarios, de los elementos separadores secundarios (limpiadores), de las salidas de agua (downcomer) y de las entradas de agua de alimentación. No se muestra la purga o conexión para la eliminación de agua. La separación del agua y el vapor típicamente tiene lugar en dos etapas. La separación primaria elimina casi todo el vapor del agua, y por tanto se recircula muy poca cantidad de vapor (debe de ser nula) desde el fondo del calderín a través de las conexiones de salida de agua (downcomer) hacia los tubos vaporizadores. Al abandonar los separadores primarios, en las calderas de alta presión, el vapor todavía contiene demasiado líquido en forma de gotas, las cuales contendrán una cantidad de impurezas inaceptable para el sobrecalentador y la turbina. Después de los separadores primarios, el vapor se hace pasar por los separadores secundarios, limpiadores o secadores (generalmente formados por paquetes de chapas arrugadas) para la eliminación final de gotas. El vapor abandona entonces el calderín por varios conductos.

Por tanto, una separación eficiente del agua y el vapor combina la operación integrada de los separadores primarios, los separadores secundarios o limpiadores y la disposición general de los elementos del calderín.

Los siguientes factores afectan a la separación del vapor.

Factores de diseño:

1. Longitud y diámetro del calderín.
2. Vapor generado en la unidad de tiempo.
3. Calidad media de vapor de entrada.
4. Tipo y disposición de los separadores mecánicos.
5. Disposición de los equipos de entrada de agua de alimentación y salida de vapor.
6. Disposición las conexiones al calderín de los downcomers y risers (tubos que conducen la mezcla agua-vapor al calderín).

Factores de operación:

1. Presión.
2. Potencia (carga) de la caldera o flujo de vapor.
3. Tipo de carga de vapor
4. Composición química del agua de la caldera.
5. Nivel de agua.

La separación primaria puede ser de uno de los siguientes tipos:

1. Separación natural por gravedad.
2. Separación asistida mediante bafles.
3. Separadores mecánicos de alta capacidad.

Aunque simple en concepto, *la separación natural del agua y el vapor* es muy compleja. Está fuertemente influenciada por las velocidades y las localizaciones de las entradas, la calidad media del vapor de entrada, la disposición y localización de las salidas del vapor y del agua y la dispersión del agua y el vapor por encima de la superficie del agua. Para una tasa baja de generación de vapor, velocidad de abandono de la superficie del agua no superior a 0,9 m/s, hay tiempo suficiente para que las burbujas se separen de la mezcla por gravedad, antes de que alcancen las conexiones de salida de agua y las gotas de agua tampoco alcancen la salida del vapor. Sin embargo, para la misma disposición con alta tasa de generación de vapor no hay tiempo suficiente para que se pueda alcanzar ninguno de estos objetivos. Además, la gran cantidad de burbujas ascendiendo en la masa de agua pueden ser la causa de una falsa indicación del nivel del calderín.

Se pueden utilizar simples *rejillas o bafles* para mejorar el proceso de separación de agua y vapor. En todos los casos dichos bafles producen:

1. Cambio en la dirección.
2. Mejor distribución de la mezcla agua-vapor.
3. Mayor resistencia al flujo.
4. Máxima longitud del camino a recorrer por la mezcla agua-vapor, lo cual favorece el proceso de separación por gravedad.

La separación mecánica utiliza separadores. De los separadores modernos de agua y vapor, se puede decir con toda generalidad, que siempre utilizan la fuerza centrífuga. En la figura 12 se muestran tres tipos de separadores, el ciclón cónico, el de brazo curvado y el ciclón horizontal. En la figura 13 se muestra con más detalle el separador de ciclón vertical. Los ciclones verticales van dispuestos en filas a lo largo de la longitud del calderín. La mezcla de agua y vapor llega a los mismos por la parte inferior y mediante una hélice se le imprime un movimiento de rotación. Debido a la fuerza centrífuga, el agua forma una capa contra la superficie del cilindro mientras que el vapor ocupa la parte central, al mismo tiempo que el conjunto circula hacia arriba. En la parte superior del ciclón el agua rebosa y comienza a fluir

hacia abajo por una sección anular que descarga en la parte inferior del separador, por debajo del nivel de agua del calderín. El vapor que asciende por el centro del separador pasa a través de un primer limpiador de chapa arrugada situado en la parte superior del separador. En muchas condiciones de operación no es necesaria más limpieza del vapor.

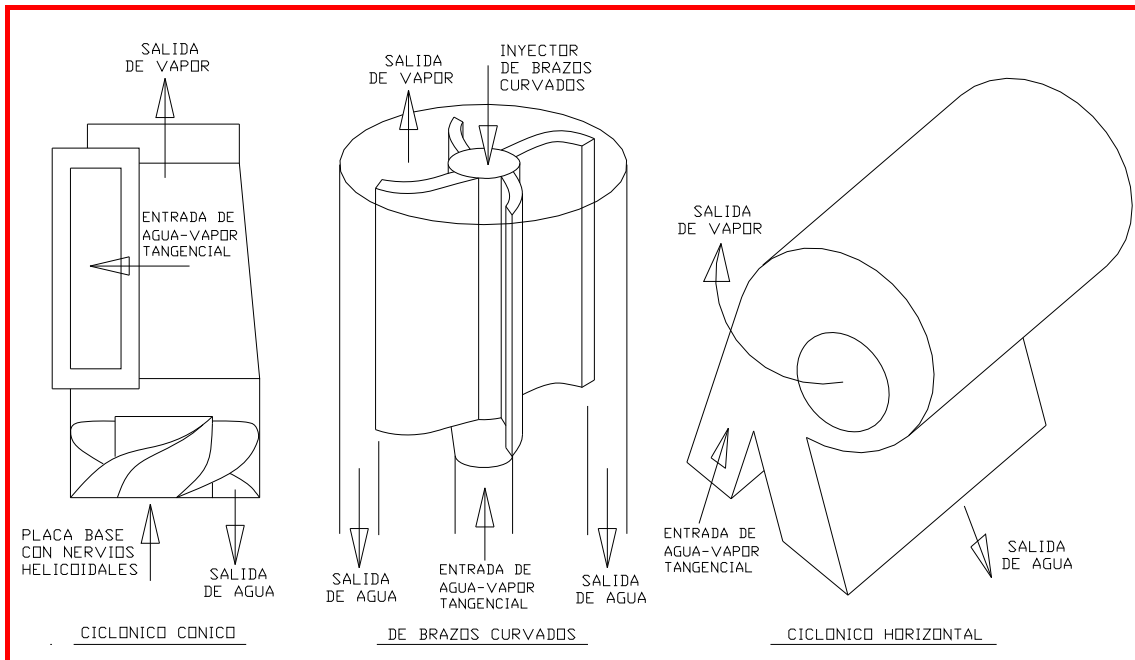


Figura 12: Tipos simples de separadores primarios de vapor de un calderín.

Cuando es posible que se produzcan variaciones grandes en la carga y variaciones también en la calidad del agua, deben de instalarse grandes limpiadores de chapa arrugada en la parte superior del calderín (ver figura 11), para que la separación del vapor sea correcta. Estos limpiadores se llaman limpiadores secundarios.

Esta combinación de ciclones y de limpiadores proporcionan una calidad del vapor tal que su contenido en sólidos resulta inferior a 1,0 ppm en un amplio rango de condiciones de operación. Esta pureza es perfectamente adecuada para el funcionamiento desde el punto de vista comercial. Sin embargo, se necesitan mayores mejoras en la calidad del vapor cuando es necesario eliminar impurezas, tales como sílice, que pasan al vapor por un mecanismo de vaporización o disolución. Para este propósito se puede utilizar el lavado del vapor con agua de condensado o de alimentación de pureza aceptable.

7. Sobrecalentadores y recalentadores

7.1. Ventajas del sobrecalentamiento y del recalentamiento

Cuando se utiliza vapor saturado en una turbina, el trabajo realizado da lugar a una pérdida de su energía, y a una consiguiente condensación parcial del vapor, incluso aunque haya caída de presión.

La cuantía de trabajo realizado por la turbina esta limitada por la cantidad de humedad que puede manipular la turbina sin un excesivo desgaste de sus alabes. Normalmente, tal grado de humedad se sitúa entre el 10 y el 15 %.

Es posible aumentar el trabajo realizado, mediante la separación de la humedad entre escalones de turbina, pero esto solo resulta económico en casos especiales. Incluso con separación de humedad, la energía total que se puede transformar en trabajo, por la turbina, es

pequeña comparada con la cuantía de calor requerida para elevar la temperatura del agua del ciclo hasta la correspondiente a la de saturación y para vaporizarla seguidamente. Por tanto, el contenido de humedad constituye una limitación fundamental en el diseño de turbina.

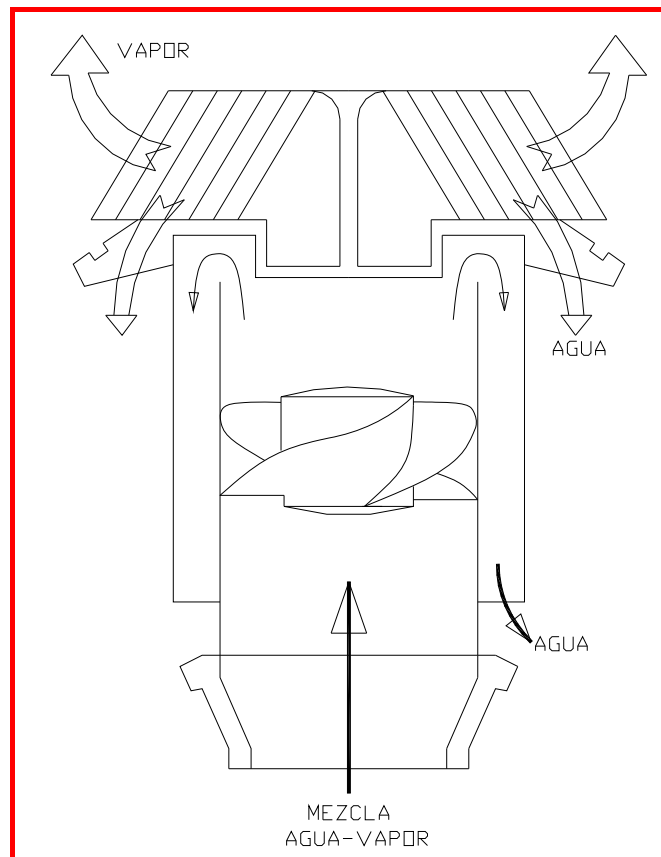


Figura 13: Ciclón separador vertical

En general, una turbina transforma la energía del vapor sobrecalentado en trabajo con formación de humedad solamente en el final de la expansión.

La ventaja del sobrecalentamiento se pone de manifiesto por la reducción del régimen o tasa (consumo específico) de calor del ciclo, cuando se eleva la temperatura del vapor que entra en la turbina.

Por ejemplo, en un cálculo simple sobre un ciclo ideal con sobrecalentamiento y con presión de 175,7 bar, equipado con un recalentamiento intermedio, se puede ver que su consumo específico bruto se reduce aproximadamente desde 7.973 a 7.594 kJ/kWh, cuando la temperatura del sobrecalentado sube de 482 a 593 °C. Esto representa una mejora de la eficiencia (rendimiento) que supera el 4,5 % y que es atribuible exclusivamente a la temperatura del sobrecalentamiento.

7.2. Tipos de sobrecalentador

Hay dos tipos básicos de sobrecalentadores (convección y radiación), que se caracterizan por la forma en que reciben la transferencia de calor desde los gases (humos).

El sobrecalentador de convección, se sitúa en zonas de temperaturas de gases (humos) relativamente más bajas. En una unidad generadora de vapor, la temperatura del vapor que sale del sobrecalentador aumenta con la producción (carga) de caldera. Como el régimen de transferencia de calor por convección es casi proporcional al régimen (caudal) de gases (humos), y por tanto proporcional también a la producción (carga) de caldera, la absorción total en el

sobrecalentador de convección por kg de vapor, y en consecuencia la temperatura del vapor, aumenta con la producción (carga) de caldera (ver figura 14). Este efecto se acentúa tanto más, cuanto más alejado del hogar se ubique el referido sobrecalentador de convección y cuanto menor sea la temperatura de gases (humos) que entran en dicho sobrecalentador de convección.

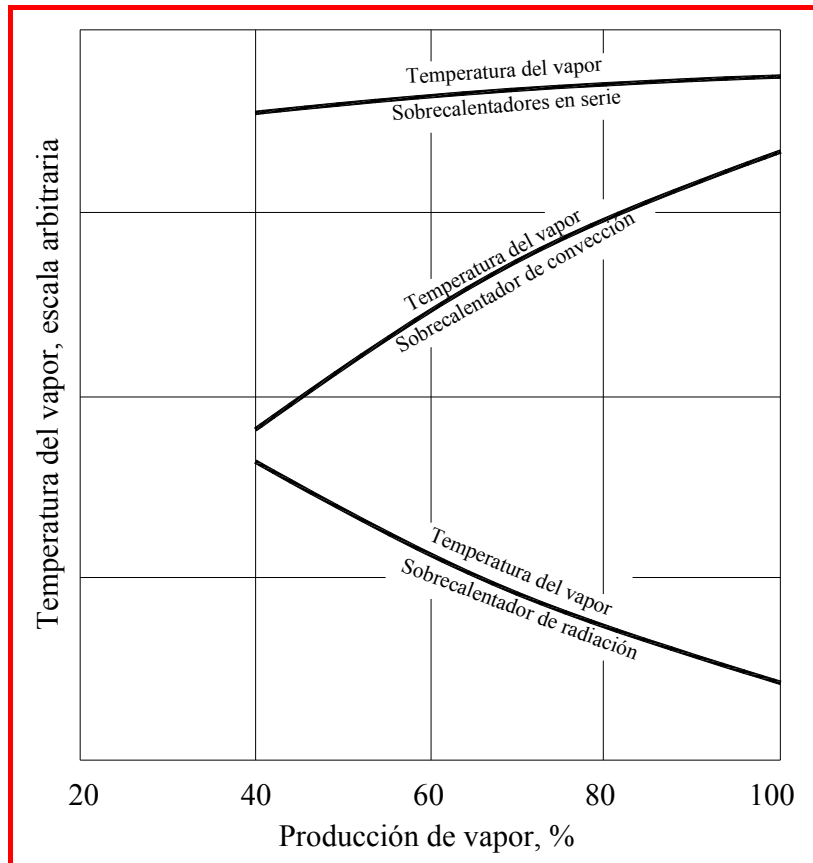


Figura 14. Temperatura final del vapor sobrecalentado según el tipo de sobrecalentador

El otro tipo es el sobrecalentador, el de radiación o sobrecalentador radiante, que recibe la energía fundamentalmente por radiación térmica, desde el hogar, con muy poca transferencia convectiva. Normalmente tiene una configuración de pantallas (paredes divisorias) o de placas colgadas (guitarras, raquetas, etc) formadas por tubos refrigerados por vapor, ampliamente espaciadas en la dirección perpendicular al flujo de gases (humos), del orden 700 mm ó más de espaciado lateral, y ubicadas a la vista del hogar. A veces, se incorporan estos elementos al sistema de vaporización.

Como el calor absorbido por las paredes del hogar no aumenta tan rápidamente como la producción (carga) de caldera, la temperatura de salida del sobrecalentador radiante disminuye al aumentar la producción (carga) de la caldera, conforme se muestra en la figura 14.

En ciertos casos, las dos curvas de variación de temperatura que tienen pendientes opuestas, correspondientes a los sobrecalentadores de convección y de radiación respectivamente, se pueden compensar mediante una combinación en serie de ambos tipos de sobrecalentadores, para obtener una curva plana para la temperatura del sobrecalentado, en amplios rangos de carga, tal como se ilustra en la figura 14. También se puede obtener una curva plana para la temperatura de vapor sobrecalentado, por medio de un sobrecalentador que tenga fuego independiente del que existe en el hogar (sobrecalentador autónomo).

El diseño de sobrecalentadores radiantes y conectivos requiere mucho cuidado, para evitar diferencias en la distribución de los flujos de vapor y de gases (humos), que podrían conducir al recalentamiento del metal de los tubos.

En general, los sobrecalentadores tienen unos flujos máscicos específicos de vapor entre 130 y 1.350 kg/m²s, o incluso más. Estas cifras se fijan para facilitar una adecuada refrigeración de los tubos, con caídas de presión admisibles.

El flujo máscico seleccionado depende de la presión y temperatura del vapor, así como de la inercia térmica del sobrecalentador. Por otra parte, una mayor caída de presión, asociada a mayores velocidades, mejora la distribución del flujo de vapor entre ambos lados del sobrecalentador.

Las mismas condiciones fundamentales que gobiernan el diseño del sobrecalentador se aplican también al diseño del recalentador. Sin embargo, la caída de presión en un recalentador es crítica, porque la ganancia en el consumo específico de calor, que tiene un ciclo dotado de recalentamiento, se puede anular por una pérdida (caída) de presión demasiado grande a través del sistema del recalentador. Por tanto, los flujos máscicos de vapor en el recalentador suelen ser generalmente algo menores que en los sobrecalentadores.

7.3. Tamaños de los tubos

En los sobrecalentadores y recalentadores más comunes, son típicos los tubos cilíndricos lisos de 44,5 a 79,9 mm de diámetro exterior.

Con tubos de diámetros menores que los reseñados, es más alta la caída de presión en el lado del vapor, y es más difícil la alineación o peinado de los mismos por el lado de gases (humos). Con tubos de diámetros mayores que los anotados, se presentan mayores solicitaciones debidas a la presión, del lado del vapor.

Para evitar la acumulación de ceniza (escoria y polvo), en recientes diseños, se ha aumentado el vano entre soportes de tubos de sobrecalentadores horizontales, y también se han espaciado los tubos reducido el número de éstos por fila.

El tubo de 73,5 mm de diámetro exterior ha cumplido los objetivos precedentes, con un mínimo sacrificio de las ventajas que ofrecen los tubos de menores diámetros. No obstante, en algunos casos se han utilizado con ventaja los tubos de 79,9 ó 77,2 mm de diámetro exterior.

Cuando se aumentan las temperaturas del vapor, las solicitaciones admisibles pueden obligar a la utilización de tubos de menores diámetros exteriores y también de menores espesores de pared.

En sobrecalentadores se emplean casi exclusivamente tubos lisos. Las superficies extendidas en tubos de sobrecalentadores, con aletas, anillos o clavos, hacen difícil la limpieza de la superficie de transmisión de calor y además puede incrementar la temperatura del metal de los tubos y la solicitación térmica, más allá de los límites admitidos en el diseño.

7.4. Principios para diseño de sobrecalentadores

El diseño correcto de un sobrecalentador debe considerar diversos parámetros, entre los que se incluyen los siguientes:

1. La temperatura especificada del vapor.
2. El rango de cargas de la caldera, para el que debe estar controlada la temperatura del vapor generado.
3. La cuantía de superficie del sobrecalentador requerida para conseguir la temperatura especificada del vapor.
4. La zona de temperaturas de gases (humos) en la que se debe ubicar la superficie requerida de sobrecalentador.

5. El tipo de acero aleado u otro material más idóneo, para la construcción de la superficie requerida y sus soportes necesarios.
7. El régimen del flujo de vapor en el interior de los tubos (flujo o velocidad másica), que esta limitado por la caída permisible de presión, pero que a su vez debe garantizar un control adecuado de las temperaturas del metal tubular.
7. La disposición de la superficie para hacer frente a las características de los combustibles previstos, en particular en lo referente al espaciado de tubos para evitar las acumulaciones de ceniza (escoria y polvo), o para facilitar la eliminación de tales acumulaciones, en las primeras etapas de su formación.
8. El diseño físico y el tipo de sobrecalentador, como estructura o componente.

Una modificación, en cualquiera de estos puntos, puede requerir un nuevo reajuste en alguno o en todos los demás puntos listados.

En el diseño de una planta energética de vanguardia, la temperatura de vapor deseada es típicamente la máxima que puede obtener el diseñador con un componente económico. En tal caso, los principios económicos exigen la determinación de dos costes interdependientes: la inversión inicial y el subsiguiente coste de conservación para minimizar los problemas de operación, las paradas forzosas y las sustituciones de componentes.

Como consecuencia de ello, la temperatura deseada de vapor se basa en una evaluación iterativa de variaciones en los parámetros aludidos en los puntos 3 a 7 que anteceden, de experiencia previa de operación y de los requisitos particulares del proyecto de que se trate.

En los últimos años, de la década de los 1990, la experiencia de operación ha conducido a la utilización generalizada de temperaturas de vapor de 538 ó 565 °C, para el sobrecalentado y el recalentado, en casi todas las nuevas grandes calderas para plantas energéticas (termoeléctricas).

Después de determinar o especificar la temperatura de vapor, de be calcularse la cuantía de la superficie necesaria para lograr este sobrecalentamiento. Todo esto depende los parámetros que se citan en los puntos 5 a 8 de la relación precedente.

Como no hay ninguna relación simple entre los parámetros citados, la cuantía de la superficie tiene que calcularse por tanteo, ubicando el sobrecalentador en una zona de temperatura de gases (humos) que satisfaga los distintos criterios de diseño.

En las calderas estandarizadas, la zona queda bien delimitada por la disposición de la unidad y por el espacio designado para la superficie sobrecalentadora.

Una vez calculada la cuantía de la superficie, con la ubicación y el espaciado óptimos, se calculan el flujo o velocidad másica del vapor, la caída de presión del vapor y las temperaturas del metal de los tubos del sobrecalentador, teniendo en cuenta las opciones de materiales y los requisitos de espesor.

Y luego se elige el tipo adecuado de material, sobre la base de una optimización económica de los tubos, colectores y demás componentes del sobrecalentador.

Puede que se precise alguna comparación de diversas disposiciones, para alcanzar la óptima combinación, con la que se podrá:

1. Usar aleaciones de bajo precio.
2. Tener una caída de presión más razonable en el lado del vapor, sin comprometer las temperaturas del metal de los tubos.
3. Disponer de un mayor flujo ó velocidad másica de vapor, para reducir las temperaturas de los tubos.
4. Contar con espaciados de tubos que permitan minimizar la acumulación de ceniza (escoria y polvo), con diversos tipos de combustible.
5. Obtener menores espaciados de tubos, haciendo posible una disposición más económica, para un suministro conocido de combustible.

7. Facilitar una disposición de tubos que reduzca la pérdida de tiro, cuando la evaluación de este parámetro resulte crítica para la instalación.
7. Ubicar la superficie del sobrecalentador en una zona de mayor temperatura de gases (humos), con el consiguiente ahorro en superficie.

Es posible completar un diseño práctico con óptimas características, tanto económicas como operacionales, y que satisfaga razonablemente todos los criterios expuestos. Sin embargo, para obtener los mejores resultados, se requiere una buena dosis de experiencia y la correcta aplicación de principios físicos.

7.5. Principios para diseño de recalentadores

Hay una gran similitud entre los diseños de un sobrecalentador y de un recalentador, aunque para el recalentador esta limitada la caída permisible de presión del lado del vapor.

Los flujos ó velocidades máxicas del vapor, en los tubos del recalentador, deberán ser suficientes para que el gradiente de temperatura a través de la película de vapor, es decir la diferencia entre las temperaturas del metal (superficie) tubular y del núcleo del flujo interior de vapor que circula por el interior del tubo, sea siempre inferior a 83 °C.

Normalmente, tal gradiente de temperatura se consigue con una caída de presión, a lo largo de los tubos del recalentador, que es del orden de 4 a 5 % de la presión de entrada al mismo. Esto permite asumir otro 4 a 5 % de caída de presión para tuberías y válvulas del sistema de vapor recalentado, sin que se exceda la caída total admisible de presión en el sistema global, que generalmente es de 8 a 10 %.

La caída de presión asignada a las tuberías del sistema de vapor recalentado se distribuye normalmente en dos sumandos, que computan:

- Un tercio (1/3) para la tubería de entrada (recalentado frío).
- Dos tercios (2/3) para la tubería de salida (recalentado caliente).

7.6. Metales de los tubos

La resistencia a la corrosión, la sollicitación admisible y el coste son los tres parámetros que determinan los materiales que se deben utilizar para los tubos del sobrecalentador y del recalentador.

La utilización del acero al carbono se maximiza. Sin embargo, hay que emplear aceros aleados cuidadosamente preseleccionados, en las partes en que sean necesarios.

Las diversas variantes en disposición de superficie básica de transmisión de calor para los sobrecalentadores se muestran en la figura 15. Estas variantes de disposición de la superficie permiten la evaluación del intercambio económico entre coste unitario de material y diferencia en cuantía de superficie requerida, justificada por consideraciones de índole termohidráulica.

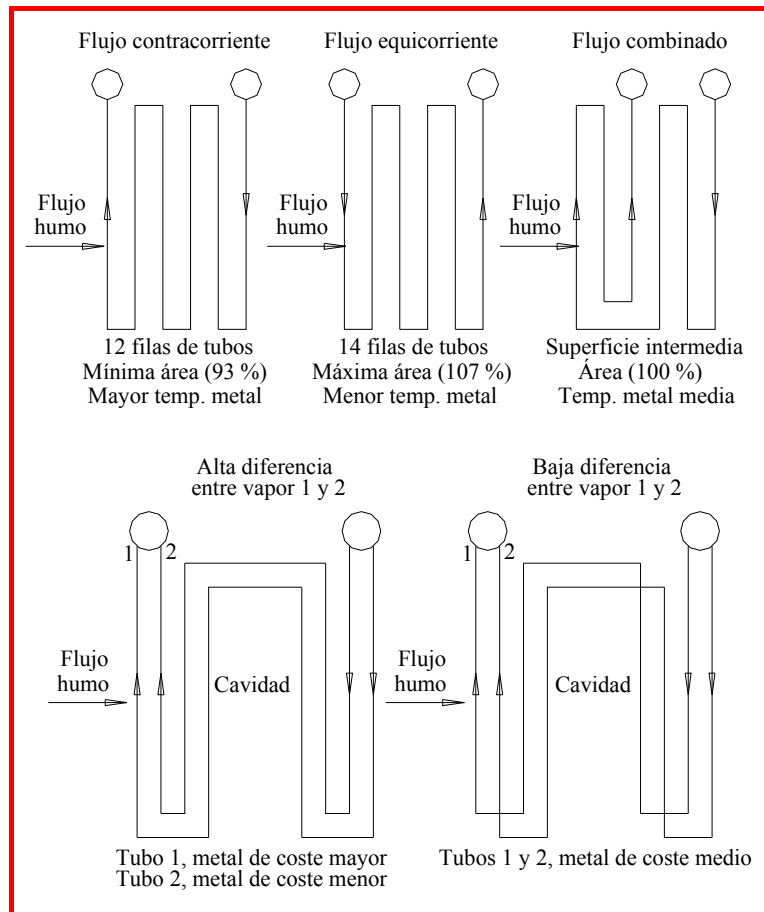


Figura 15. Disposiciones típicas de superficies de sobrecalentador

El objetivo principal de las comparaciones entre el flujo contracorriente y el flujo equicorriente es poner de manifiesto las correlaciones básicas entre requisitos de superficie de transmisión de calor y los correspondientes requisitos y temperaturas del metal de los tubos.

7.7. Soportes de sobrecalentadores y recalentadores

Como los sobrecalentadores y los recalentadores se encuentran ubicados en zonas de gases (humos) con temperaturas relativamente altas, es preferible que las cargas principales sean soportadas por los propios tubos.

En el caso de sobrecalentadores colgados (verticales), los puntos principales de soporte se encuentran fuera del flujo de gases (humos), soportándose las diversas guitarras (o pantallas) por sí mismas, a simple tracción. Las figuras 16a y 16b ilustran las disposiciones con soportes estándares, para la sección de salida de un sobrecalentador colgado (vertical), con soportes de la sección principal situados encima del techo de la caldera.

Cuando se dispone de un adecuado espaciamiento lateral (perpendicular al flujo de gases) y la limpieza de la ceniza no implica abrasión, se utilizan unas guías-abrazaderas refrigeradas por vapor. Si se prevé que la limpieza de ceniza puede implicar abrasión (por ejemplo, quemando carbón), se emplean guías de tipo anillo de aleaciones altas en cromo-níquel. Y adicionalmente, en zonas con temperaturas de humos más elevadas, se utilizan elementos de ligadura, de lado a lado, para mantener los espaciados transversales.

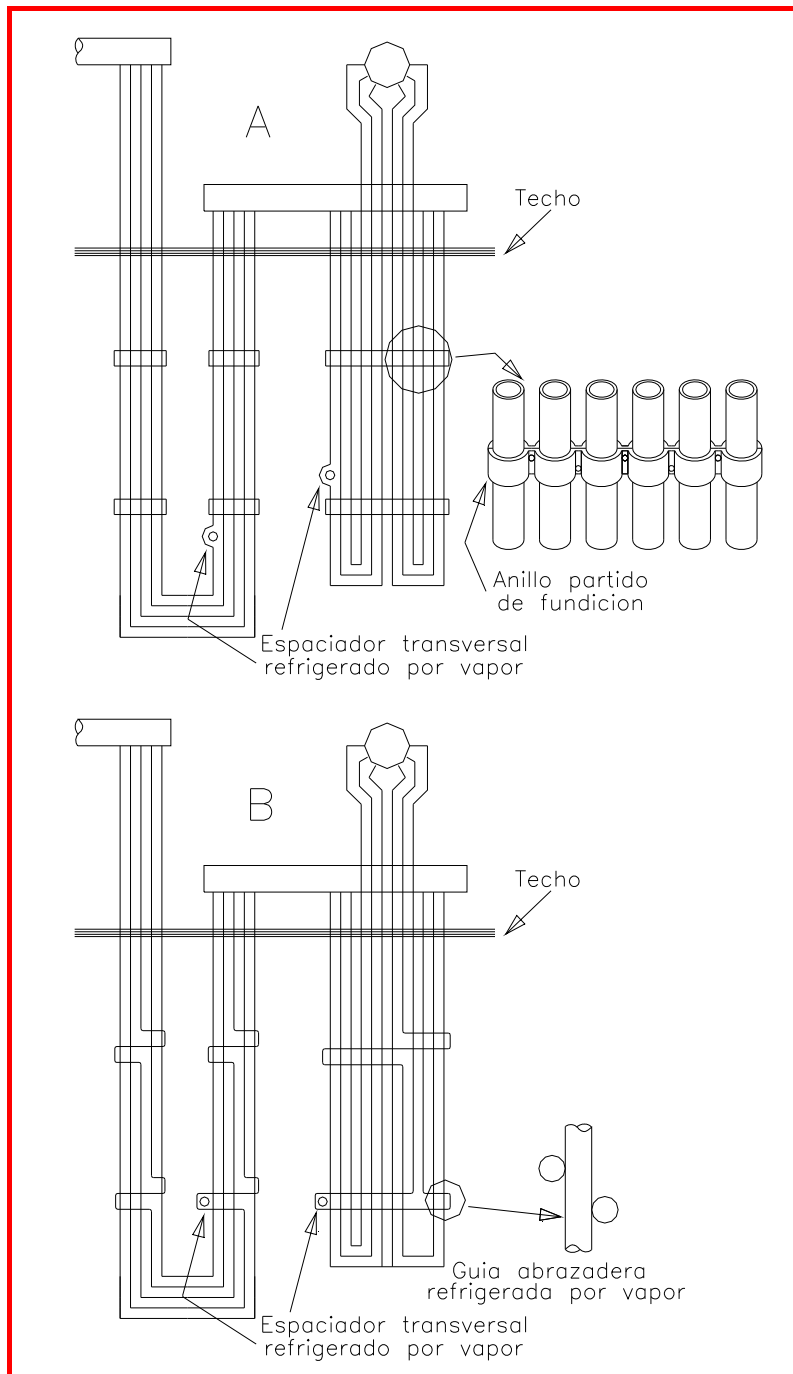


Figura 16. Disposiciones con soportes estándares, para la sección de salida de un sobrecalentador vertical, con soportes de la sección principal situados encima del techo de la caldera

Para elementos con menores espaciados laterales, las guías-abrazaderas refrigeradas por vapor, no son espaciadores prácticos, para mantener la alineación de los tubos de cada pantalla o guitarra; en tal supuesto, se emplean ligaduras mecánicas, como las uniones en “D” conforme muestra la figura 17. En este caso la holgura entre espaldas de tubos y el tamaño de las ligaduras tienen que reducirse al mínimo posible. De esa forma se reducen las sollicitaciones térmicas transmitidas a la pared de los tubos.

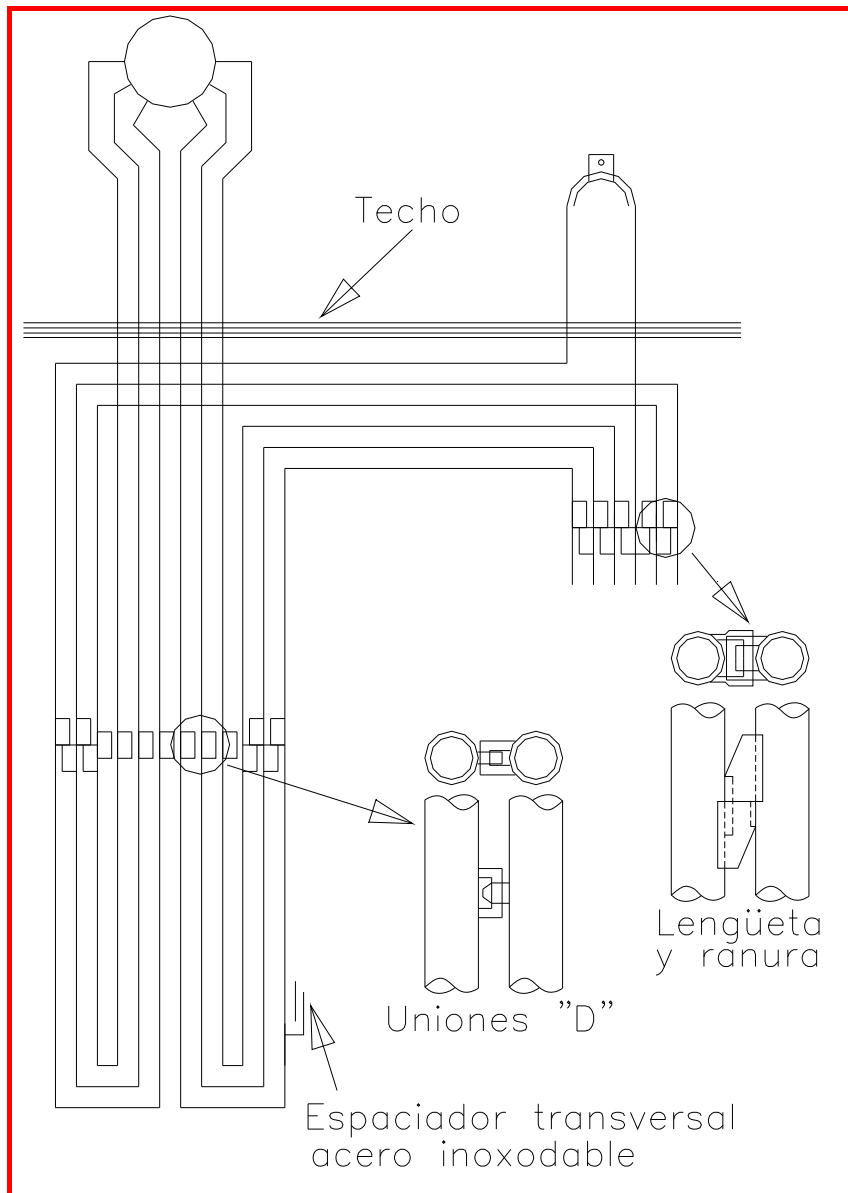


Figura 17. Disposición típica de una sección de recalentador vertical y detalle de soportado

La figura 17 muestra también una disposición típica de una sección de recalentador colgado (vertical) y detalla el soportado de un banco individual por una "guitarra especial" del recalentador, que facilita la colocación de todos los soportes principales encima del techo y resguardados del flujo de gases (humos).

En el caso de los sobrecalentadores horizontales, normalmente la carga a soportar se transmite siempre a otros tubos, como son:

- Tubos del cerramiento refrigerados por vapor o de la caldera.
- Tubos tipo "tirante" del economizador.

El engarce entre tubo-soporte y tubo de sobrecalentador se hace mediante unas patas (vías) adecuadas, una soldada al tubo soporte y la otra al tubo del sobrecalentador, tal como indica la figura 18. Estas "patas" se construyen en aceros, desde el acero al carbono hasta el aleado alto en cromo-níquel. En función de las consideraciones de diseño, esas "patas" deben deslizarse una en otra, para facilitar el movimiento relativo entre el tubo soporte (por ejemplo,

vaporizador) y el tubo de sobrecalentador. Los soportes del tipo "cuna" (silleta), también representados en la figura 18, facilitan el movimiento relativo entre tubos adyacentes del sobrecalentador.

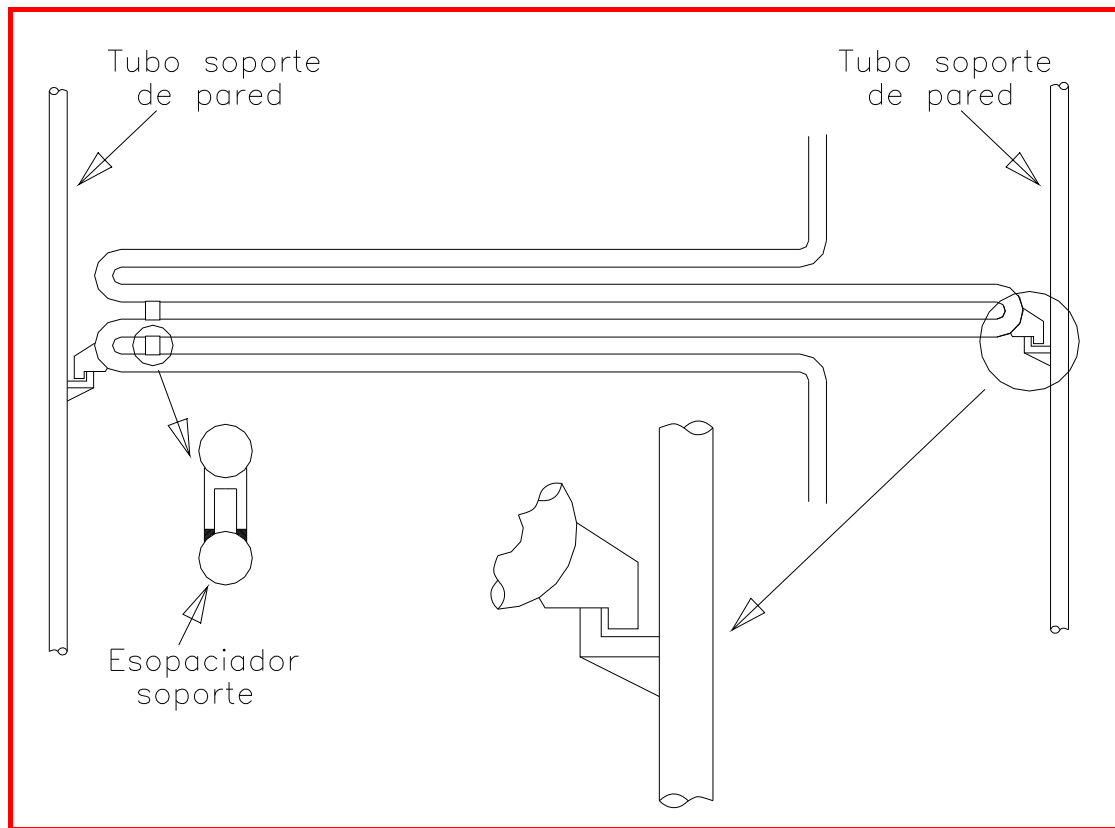


Figura 18. Disposición y soportado de sobrecalentadores horizontales

Con el aumento de tamaño de las unidades, crece también el vano en los tubos del sobrecalentador horizontal, de tal modo que es imposible soportar tales tubos solo en sus extremos. La mayoría de las unidades de gran tamaño emplean el denominado "tubo rigidizado" (o tubo tirante), generalmente colgado desde la salida del economizador. Y el espaciado de tubos, en una sección, se mantiene mediante la utilización de soportes del tipo cuna (silleta).

7.8. Limpieza externa y espaciado de superficies

Las unidades, en la actualidad se diseñan para operación continua, en algunos casos, durante 18 a 24 meses seguidos, entre dos paradas consecutivas, de modo que la limpieza del lado de gases (humos) se hace crítica.

Normalmente, un periodo de un año, entre dos paradas consecutivas programadas, se considera un aceptable intervalo de tiempo.

Para mejorar la limpieza, en las modernas calderas de plantas energéticas, las secciones colgadas del sobrecalentador (las diferentes "guitarras") están espaciadas en congruencia con la temperatura de gases (humos) y con el combustible que se queme.

- Generalmente se fija en el rango de 0,50 a 0,75 in (12,7 a 19,1 mm), como espacio libre entre tubos para las zonas de alta temperatura.
- Se permite incluso un mayor espaciado para zonas de superficies horizontales, que reciban gases (humos) a temperaturas inferiores a los 616 °C.

Estos espaciados son empíricos; se basan en la experiencia sobre ensuciamiento y erosión de tubos y sobre requisitos de fabricación.

8. Regulación de la temperatura del vapor

8.1. Introducción

La temperatura del vapor recalentado y sobrecalentado, están sujetas a variaciones debidas a causas diversas, las más normales están relacionadas con el funcionamiento, como pueden ser las oscilaciones en la marcha del hogar debido a un fallo parcial en la alimentación de combustible o a un cambio brusco en su calidad, etc. Otra causa de las variaciones suele ser los cambios de carga que es necesario introducir en función de la demanda. Cualquiera que sea la causa, el sistema de control debe de responder intentando llevar la temperatura al valor de consigna.

En este texto trataremos sobre qué variables puede actuar el sistema de control para variar la temperatura del vapor y razonaremos la respuesta a la actuación. También razonaremos si la posible actuación es adecuada o aconsejable, fundamentalmente desde el punto de vista del rendimiento, aunque puede haber otros de funcionamiento o de diseño de la unidad.

Las posibles formas de variar la temperatura del vapor son la siguientes actuaciones:

- Variación del caudal de recirculación de humos.
- Variación de la inclinación de quemadores.
- Reparto del caudal de humos cuando el conducto se parte en dos.
- Atemperación.
- Variación del exceso de aire.
- Variación de la temperatura del agua de alimentación.

Cuando en los apartados siguientes se hable de la regulación de la temperatura del vapor, significará que mediante la actuación que estudiamos, se producirá una variación tanto de la temperatura del vapor sobrecalentado como del recalentado. Para ajustar las temperaturas finales, se tiene en cuenta que las calderas suelen estar diseñadas para que, cuando la temperatura del vapor recalentado esté en su punto de consigna, la temperatura del vapor sobrecalentado sea algo superior a su punto de consigna. En tal caso el sistema de control, mediante cualquiera de los métodos utilizables que vamos a estudiar, ajustará la temperatura del vapor recalentado y luego, mediante el sistema de atemperación, disminuirá la temperatura del vapor sobrecalentado hasta su punto de consigna. El sistema de regulación utilizará como señal primaria la temperatura del vapor recalentado y el sistema de atemperación del vapor sobrecalentado utilizará como variable primaria la temperatura del vapor sobrecalentado. Cuando veamos el método de atemperación volveremos a insistir sobre las misiones, posibilidades e inconvenientes del método.

8.2. Variación del caudal de recirculación de humos

Para utilizar este sistema es necesario que la caldera tenga implementado un sistema de recirculación de humos. Consta de una toma de humos situada entre el economizador y los calentadores de aire, de donde son aspirados por un ventilador que los inyecta en el hogar. Hay que distinguir dos posibilidades: que la inyección se haga en la parte inferior del hogar o que se haga en la parte superior.

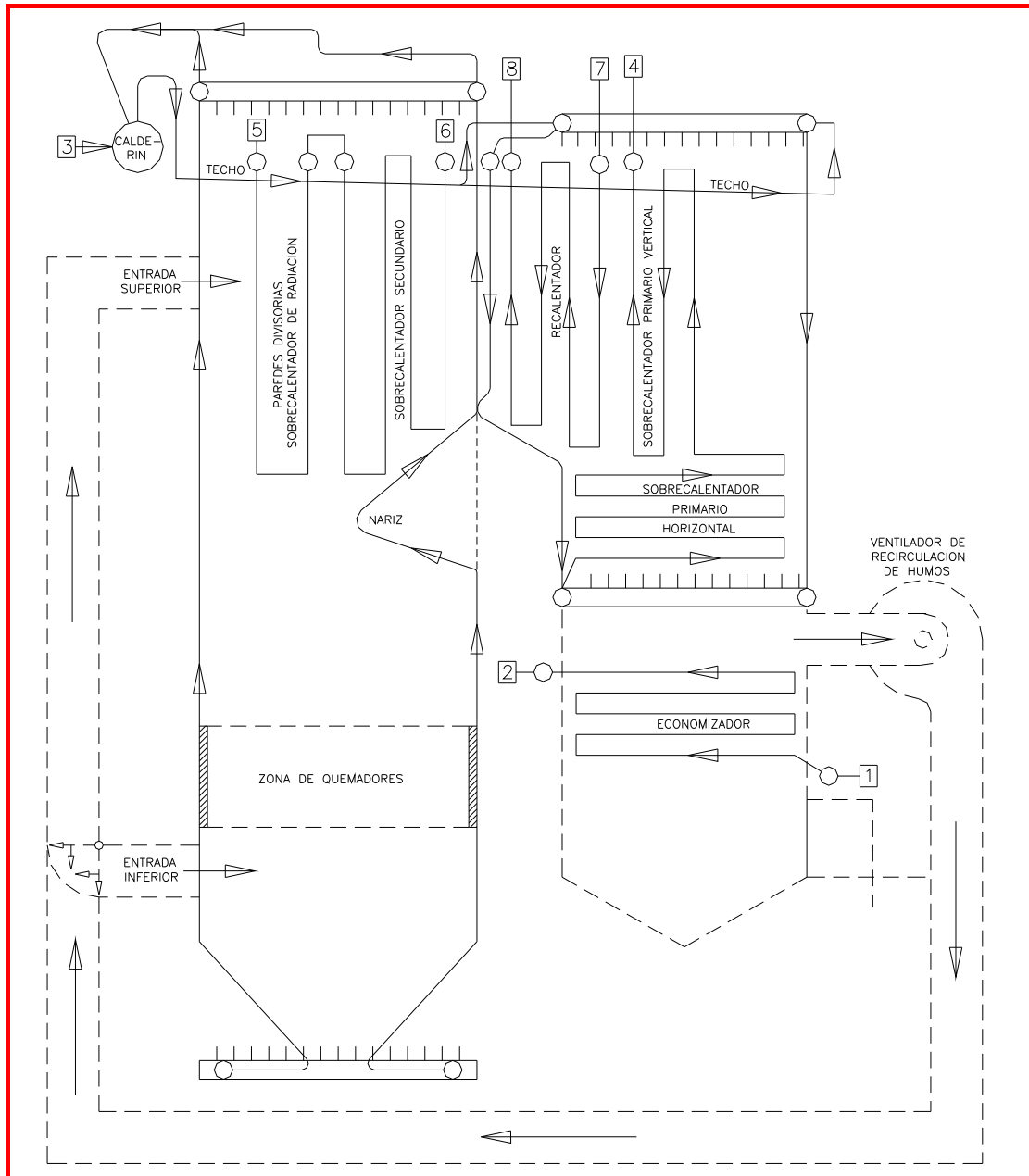


Figura 19: Representación esquemática de la recirculación de humos

Inyección en la parte inferior del hogar: En la figura 19 se puede ver un esquema de la recirculación de humos. Partamos de una situación en la que se mantenga un determinado caudal de recirculación y se aumenta dicho caudal. El aumento del caudal de estos humos, que tienen una temperatura relativamente baja, refrigera la parte inferior del hogar, por lo que en esta zona disminuirá la transmisión de calor hacia los tubos vaporizadores. Posteriormente alcanza la zona de quemadores donde se mezcla con los productos de la combustión que resultan también refrigerados. Este segundo efecto refrigerante hace que la cantidad de calor transmitida a los tubos vaporizadores en la parte superior del hogar también disminuya, ya que se produce casi exclusivamente por radiación y esta es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta.

El resultado es que la cantidad total de humos que abandonan el hogar es mayor, pero la temperatura a la que lo hacen es aproximadamente la misma que antes de aumentar el caudal de recirculación. Por lo tanto la cantidad de calor que sale del hogar es más alta. La velocidad de los

humos en la zona de sobrecalentadores y recalentador es mayor, por lo que también lo será el coeficiente de transmisión de calor, lo que implica que la cantidad de calor transmitida en esta zona es más alta y la temperatura del vapor subirá. El aumento del caudal de recirculación de humos hace un efecto de disminución de la cantidad de calor transmitida en el hogar que pasa a ser transmitida en la zona de sobrecalentadores y recalentador.

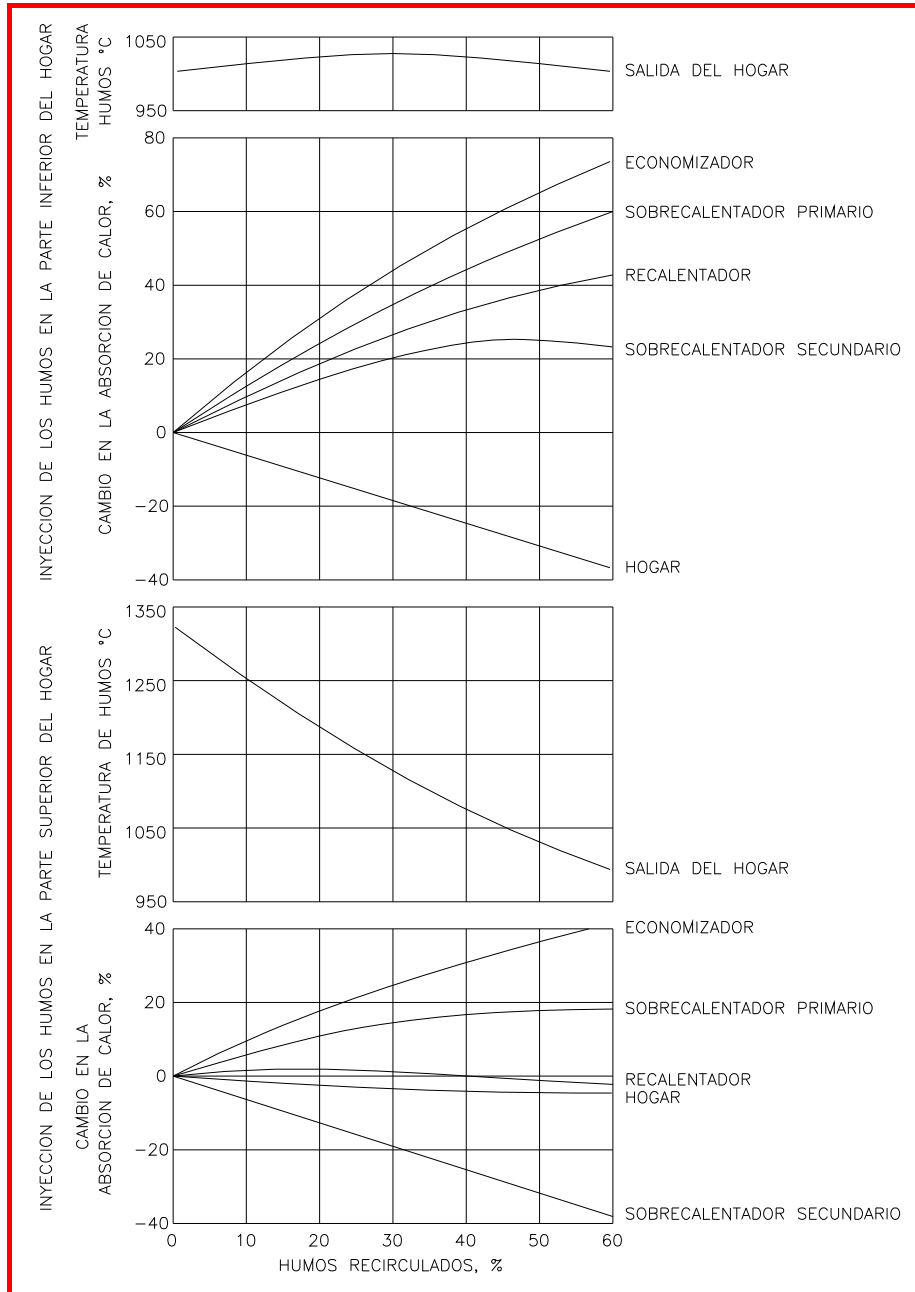


Figura 20: Efecto de la recirculación de humos sobre la distribución de la absorción de calor en las distintas superficies de intercambio a carga constante

Si se disminuyera la cantidad de humos recirculados el efecto sobre la temperatura del vapor sería el contrario, disminuiría su temperatura.

Dado que el sistema de recirculación de humos se suele utilizar en calderas de quemadores horizontales y que en éstos se produce la mezcla total del combustible y del aire primario y secundario no muy lejos del quemador, no se producirá efecto apreciable sobre la combustión, ya que no interferirá en la mezcla de aire y combustible y no se diluirá el aire de

combustión con gases inertes. Se puede considerar que la recirculación diluye solamente los productos de combustión.

Inyección en la parte superior del hogar: En la figura 19 se puede ver un esquema de la recirculación de humos. Si se inyecta en la parte superior, prácticamente ya no se puede producir efecto alguno sobre lo que ocurra en el hogar. El primer efecto será la dilución y refrigeración de los humos a la salida del hogar o lo que es lo mismo a la entrada en la zona de sobrecalentadores y recalentador. La cantidad de calor que alcanza esta zona no varía, pero lo hace repartido en una mayor cantidad de humos y por tanto a una temperatura más baja. Aunque la temperatura sea más baja, la velocidad de los humos es más alta y por tanto el coeficiente de transmisión de calor también será más alto. Hay por tanto una compensación entre la disminución de temperatura por un lado y el aumento del coeficiente de transmisión de calor por otro lado, que hacen que el único resultado sea una redistribución del calor transferido desde los humos entre los distintos elementos del circuito de agua-vapor.

En la figura 20 se puede ver un ejemplo de las variaciones de temperaturas en función del caudal de humos recirculado y según se realice su inyección en la parte superior o inferior de la caldera.

Hay que destacar una vez más que la recirculación no produce ningún efecto importante sobre la combustión ni sobre la cantidad de humos que salen por la chimenea, por lo tanto no tendrá repercusiones significativas sobre el rendimiento de la combustión ni sobre el rendimiento de la caldera. Esto hace que sea un sistema utilizable como método de regulación de la temperatura del vapor, siempre y cuando con él se alcancen los objetivos propuestos.

8.3. Variación de la inclinación de quemadores

Este método es aplicable en el caso de calderas de quemadores tangenciales inclinables, en los que la boquilla de inyección se puede inclinar 30° hacia arriba o 30° hacia abajo. Debido a las características de estos quemadores, donde la inyección de la mezcla aire-combustible y también del aire secundario tiene lugar en la dirección de la boquilla sin imprimir ningún tipo de turbulencia, se retrasa la mezcla y por tanto la combustión. Los quemadores están situados en las cuatro esquinas del hogar en varios niveles, cinco o seis, las boquillas de los del mismo nivel inyectan tangencialmente a un pequeño círculo imaginario situado en el centro del hogar. Debido a esta forma de inyección la mezcla aire combustible no será completa hasta el torbellino que ocupa el centro del hogar en forma de columna. La parte principal de la combustión tendrá lugar en esta “columna” de torbellino del centro del hogar. La inclinación de los quemadores determinará la posición de este torbellino a lo largo de la altura del hogar, tal como se puede ver en la figura 21

Cuando los quemadores están hacia abajo el núcleo de la llama está situado en una parte muy baja del hogar, la transmisión de calor por radiación hacia las paredes será importante en la parte baja del hogar y también en la parte alta, porque los productos de combustión a alta temperatura se forman en la parte baja y se mueven hacia arriba.

Cuando los quemadores están hacia arriba, la parte inferior del hogar no está recorrida por gases calientes, por lo que esta zona estará relativamente fría y la transmisión de calor será muy baja, mientras sigue siendo alta en la parte superior del hogar. El resultado de inclinar los quemadores hacia arriba es equivalente a disminuir la superficie útil de transmisión de calor dentro del hogar (en la parte baja se transmite menos calor hacia las paredes), a lo que corresponde una menor cantidad de calor transmitida y como consecuencia los humos al salir del hogar tendrán una cantidad de calor mayor y una mayor temperatura. La mayor cantidad de calor de los humos, debido a su mayor temperatura se trasmite al vapor en la zona de sobrecalentadores y recalentadores y como consecuencia se elevará la temperatura del vapor.

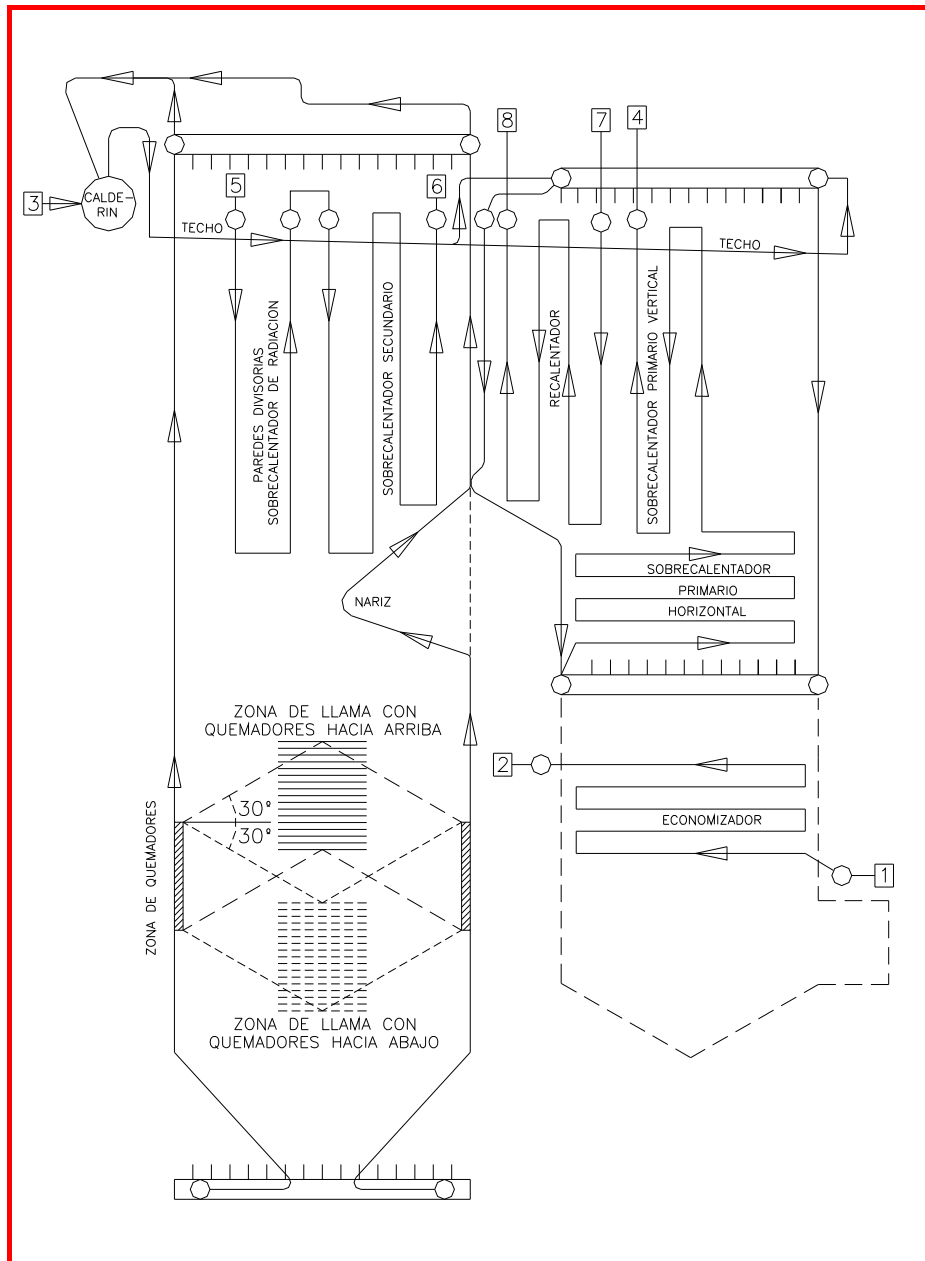


Figura 21: Posición del núcleo más importante de la llama en función de la inclinación de los quemadores

De acuerdo con lo anterior, cuando se inclinan los quemadores hacia arriba se aumenta la temperatura del vapor y cuando se inclinan hacia abajo se reduce la temperatura del vapor.

Este método de regulación de la temperatura del vapor no tiene ninguna influencia sobre la combustión ni sobre otros parámetros que puedan perjudicar el rendimiento de la caldera, por lo que puede ser utilizado, teniendo en cuenta que el sistema de control actuará sobre los elementos finales encargados de variar la inclinación de los quemadores.

8.4. Reparto del caudal de humos cuando el conducto de salida se divide en dos

Este sistema consiste en dividir el conducto de salida de humos, longitudinalmente, en dos partes, mediante una pared de tubos de vapor, repartir los distintos elementos de absorción de calor, del circuito agua-vapor, entre las dos partes del conducto y luego variar el reparto del caudal de humos entre ellos según nos interese.

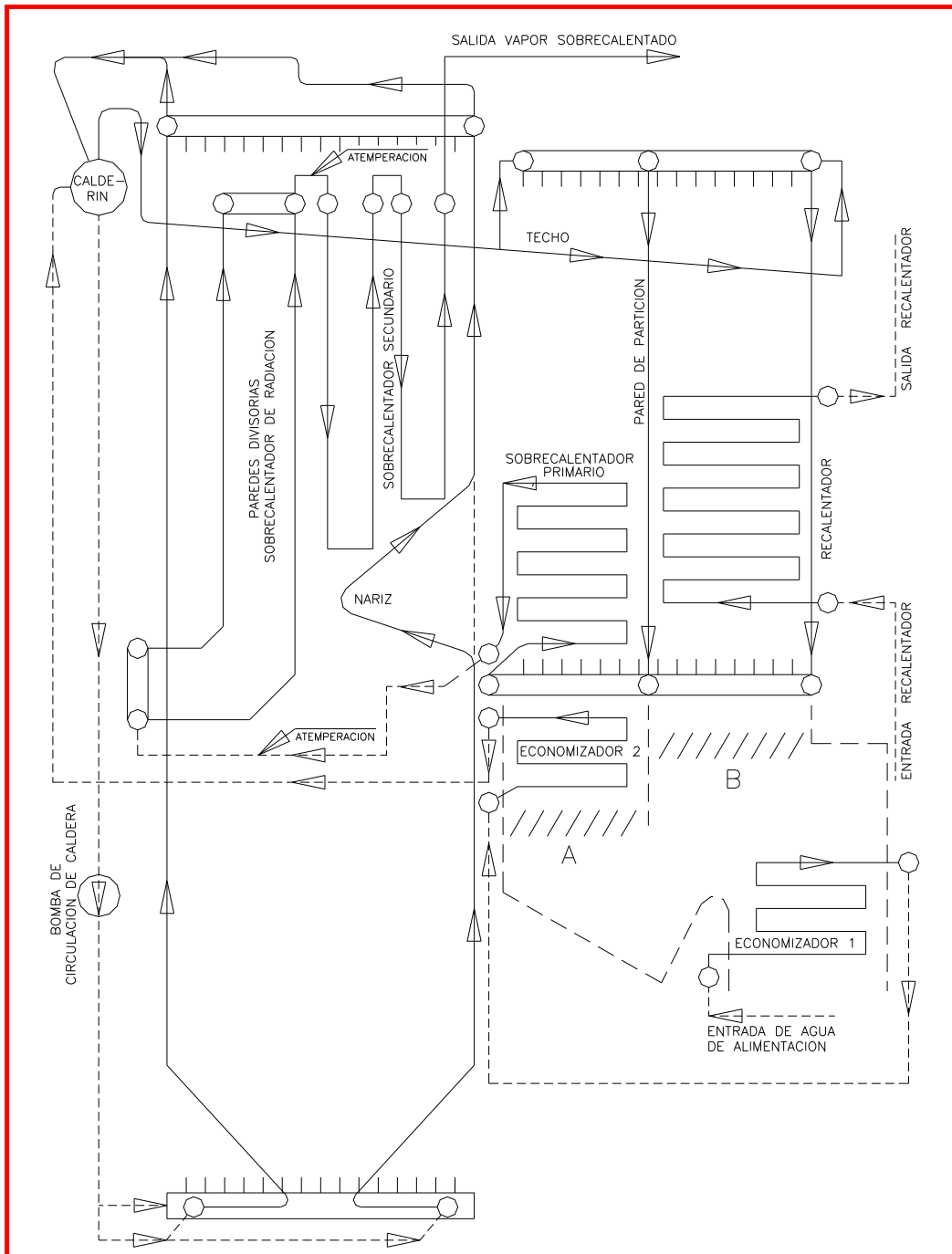


Figura 22. Generador de vapor con conducto de humos partido

En la figura 22 se puede ver el reparto de elementos entre los dos conductos; en el ejemplo representado, en el conducto del lado izquierdo están situados el sobrecalentador primario y la segunda etapa del economizador, en el conducto del lado derecho está situado el recalentador. En la salida del conducto del lado izquierdo se sitúa un cortatiros (A) y en la salida del conducto del lado derecho se sitúa otro cortatiros (B). El sistema de control de la temperatura del vapor actúa sobre la posición de los cortatiros variando la distribución del caudal de humos entre los dos conductos. En aquel conducto por el que se aumente el caudal de humos, aumentará la cantidad de calor que se le aporta y también aumentará la velocidad y como consecuencia, el coeficiente de transmisión de calor. Por lo tanto también aumentará la temperatura del vapor a la salida de los elementos que contiene. Se puede concluir que éste es un sistema que permite variar

la temperatura del vapor recalentado y sobrecalentado.

Se elige como situación de los cortatiros la de salida de los conductos porque es el lugar en el que la temperatura de los humos es más baja, lo que permite utilizar en su construcción materiales que no necesariamente han de ser resistentes a alta temperatura.

8.5. Atemperación

Ya se ha mencionado anteriormente, apartado 8.1., la misión del sistema de atemperación dentro del sistema de regulación de la temperatura del vapor: *Para ajustar las temperaturas finales, se tiene en cuenta que las calderas suelen estar diseñadas para que, cuando la temperatura del vapor recalentado está en su punto de consigna, la temperatura del vapor sobrecalentado sea algo superior a su punto de consigna. En tal caso el sistema de control, mediante cualquiera de los métodos utilizables de los que estamos a estudiando, ajustará la temperatura del vapor recalentado y luego, mediante el sistema de atemperación, disminuirá la temperatura del vapor sobrecalentado hasta su punto de consigna.*

La atemperación consiste en la inyección de agua en determinados puntos del sobrecalentador o recalentador para disminuir la temperatura del vapor. En la figura 22 se indican dos posibles puntos de la inyección del agua de atemperación para el vapor sobrecalentado.

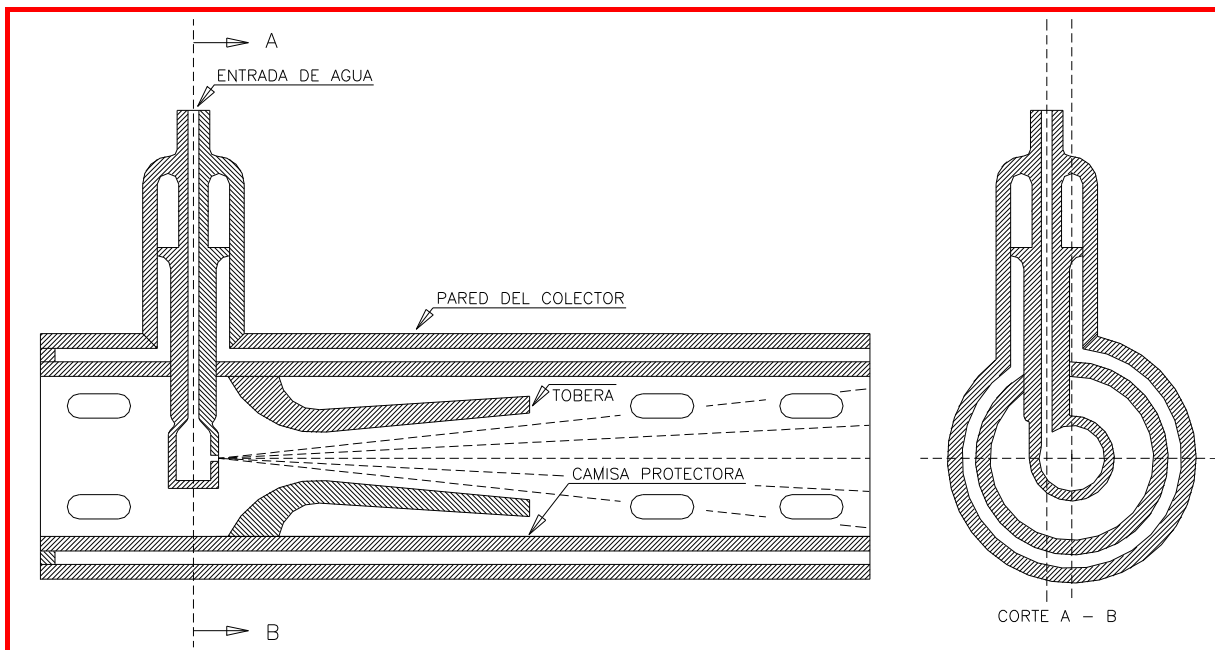


Figura 23: Atemperador de vapor de pulverización mecánica

En la figura 23 se muestra como se realiza la inyección de agua de manera que no se dañe el colector donde se hace dicha inyección. El agua procede directamente de la descarga de las bombas de alimentación y entra por un conducto, perpendicular al colector, alcanza tangencialmente una cámara cilíndrica coaxial con el colector, donde adquiere un movimiento de rotación que hace que al salir por el orificio del extremo de la cámara a la atmósfera de vapor, tenga lugar una buena pulverización, dividiéndose en gotas lo suficientemente finas para que su paso a vapor sea lo más rápido posible. La vaporización de las gotas de agua absorbe calor y reduce la temperatura del vapor. El chorro de agua pulverizada incide sobre la garganta de una tobera, donde se consigue una buena mezcla de las gotas de agua y el vapor y después en la zona de difusión la energía cinética adquirida por la mezcla de agua y vapor se transforma en presión. La inyección de agua es necesario hacerla en tramos rectos de colectores de enlace de distintas

partes del sobrecalentador. En la figura 22 se pueden ver dos posibles zonas, una entre el sobrecalentador primario y el de radiación, que consta de dos conductos que hacen este enlace, uno por la parte derecha de la caldera y otro por la parte izquierda. De esta forma colocando dos atemperadores uno en cada conducto se atempera el total del vapor. De forma similar también se puede hacer entre el sobrecalentador de radiación y el sobrecalentador final, en donde suele haber dos conductos uno que sale por la derecha del colector de salida del sobrecalentador de radiación y entra por la izquierda del colector de entrada al sobrecalentador final y otro que sale por la izquierda del colector de salida del sobrecalentador de radiación y entra por la derecha del colector de entrada al sobrecalentador final. En cualquiera de estos dos conductos que cruzan transversalmente la caldera hay longitud suficiente para situar un atemperador y todo el vapor pasa por estos dos conductos, aproximadamente la mitad por cada uno de ellos. La atemperación debe de hacerse en una zona del circuito de vapor que no esté cerca de la línea (temperatura) de saturación, ya que en algún transitorio o incidente de funcionamiento se podría entrar en la zona de vapor húmedo lo que mantendría gotas de agua durante un trayecto largo que dañaría interiormente los colectores y tubos del sobrecalentador. La atemperación tampoco se puede hacer después del sobrecalentador final porque cualquier incidente de características similares al anterior nos haría llegar agua a la turbina, lo cual podría producir en ella daños muy importantes.

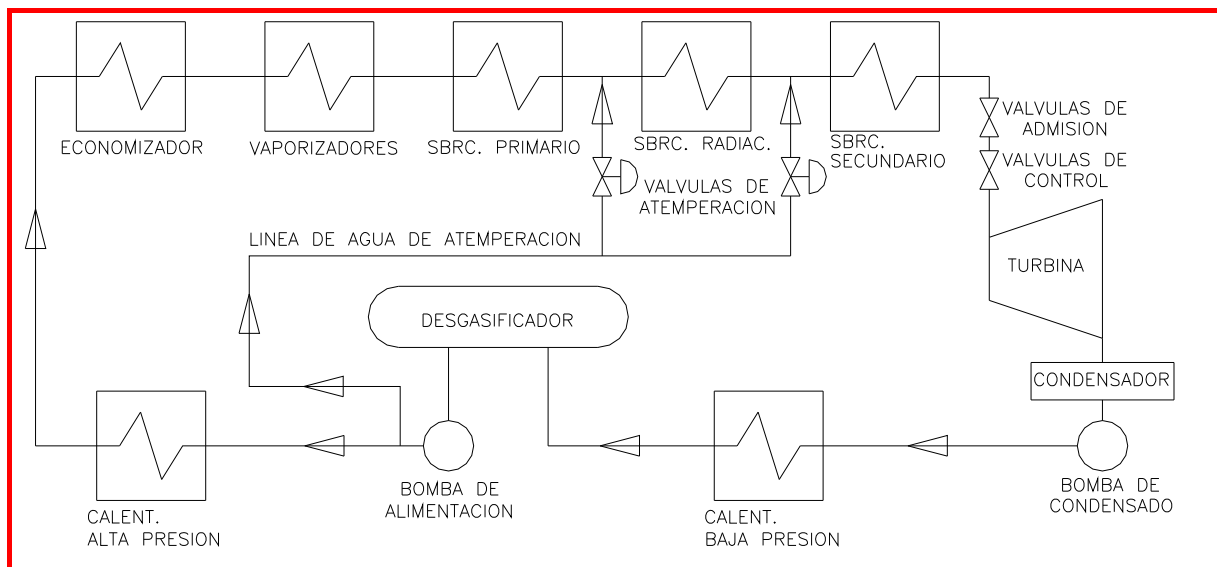


Figura 24: Diferencias entre el ciclo del agua de atemperación y el normal

La atemperación en el caso del recalentador, desde el punto de vista constructivo, solo es posible en la entrada o entradas al colector de entrada o en la salida o salidas del colector de salida. La primera de estas zonas está cerca de la curva de saturación y la segunda está cerca de la turbina, por lo que ninguna de ellas es satisfactoria. Como los daños de la turbina son siempre más importantes y costosos que los de la caldera, la atemperación se suele colocar a la entrada del recalentador. De todos modos aquí está la justificación de que se regule la temperatura del vapor recalentado mediante alguno de los métodos que estamos contemplando en este texto y posteriormente se ajuste la temperatura del sobrecalentado mediante atemperación. Para evitar el riesgo de cualquier tipo de daños, *la atemperación del recalentador no se suele usar más que en caso de emergencia.*

Por otro lado si se tiene en cuenta como se realiza la atemperación, ver **figura 24**, el agua de atemperación va directamente desde la descarga de la bomba de alimentación al sobrecalentador o recalentador, sin pasar por todas las zonas de calentamiento previas al generador de vapor (calentadores de alta presión y economizador) que son parte de los elementos

del ciclo regenerativo que hacen que se consiga una mejora de rendimiento. Se pueden considerar dos ciclos distintos, uno el que sigue el agua de atemperación y otro el que sigue el resto del agua de alimentación. Este segundo tendrá un rendimiento superior al primero, por lo que cuanto mayor sea el caudal de agua de atemperación, menor será el rendimiento total del ciclo. Desde el punto de vista de operación, *el caudal de agua de atemperación debe de ser lo más pequeño posible.*

8.6. Variación del exceso de aire

Si se varía el exceso de aire de la combustión, varía la cantidad total de humos, mientras que su temperatura a la salida del hogar permanece prácticamente invariable. Por lo tanto si el exceso de aire aumenta, lo hace también la cantidad de humos y por lo tanto la cantidad de calor que abandona el hogar. El aumento de la cantidad de humos hace que aumente el coeficiente de transmisión de calor, lo que se traduce en la transmisión de una mayor cantidad en la zona de sobrecalentadores y recalentador que trae como consecuencia un aumento de la temperatura del vapor. Si aumenta el exceso de aire lo hace también la temperatura del vapor y si disminuye ocurriría lo contrario, es decir, disminuiría la temperatura del vapor. La variación del exceso de aire produce una variación de la temperatura del vapor muy similar a la que produce la recirculación de humos. En principio se podría pensar en que esto sería un método para controlar la temperatura del vapor, pero, desde el punto de vista de la combustión, para cada tipo de combustible hay un exceso de aire para el que el rendimiento es máximo y este exceso de aire es el que debe de mantenerse en todo momento. Si con objeto de variar la temperatura del vapor actuamos sobre el exceso de aire, lo que estamos haciendo es perjudicar el rendimiento de la combustión y como consecuencia el rendimiento de la unidad. Esta circunstancia es inadmisibles para cualquier proceso comercial, por lo que este método de control de la temperatura del vapor, aunque es un método posible jamás debe de ser utilizado de forma sistemática.

8.7. Variación de la temperatura del agua de alimentación

Si se varía la temperatura del agua de alimentación, sea la caldera de recirculación o de paso único, se produce en una variación de la temperatura de entrada del agua en los tubos vaporizadores. En un determinado momento, si disminuye la temperatura del agua de alimentación, ésta entrará más fría en los tubos vaporizadores y necesitará más aportación de calor para alcanzar la temperatura de ebullición, por lo que ésta se alcanzará en una cota del tubo más elevada dentro del hogar. Si se tiene en cuenta la variación del coeficiente de transmisión de calor, al pasar del calentamiento por convección al calentamiento en ebullición nucleada, tal como se muestra en la figura 25, la elevación dentro del hogar del punto de comienzo de la transmisión de calor en ebullición nucleada, reduce la superficie del hogar con coeficiente de transmisión de calor alto. Por tanto se reduce la transmisión de calor en el hogar y los humos salen más calientes, con un contenido calorífico mayor que se transmitirá a los sobrecalentadores y recalentador, lo que hace que aumente la temperatura del vapor. Como conclusión, la disminución de la temperatura del agua de alimentación hace que aumente la temperatura del vapor.

Si se aumenta la temperatura del agua de alimentación, razonando de la misma forma que en el caso anterior se llega a la conclusión de que se produce una disminución de la temperatura del vapor.

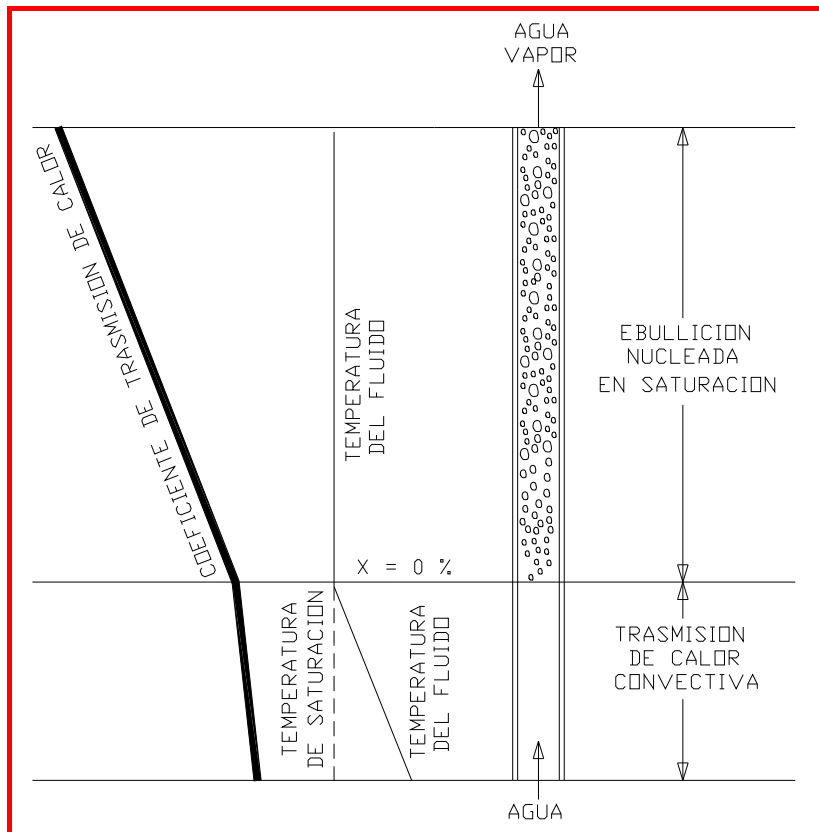


Figura 25: Variación del coeficiente de transmisión de calor a lo largo de un tubo vaporizador

En operación normal, la temperatura del agua de alimentación debe de mantenerse lo más alta posible para que el rendimiento del ciclo sea también lo más alto posible. Deben de mantenerse en servicio normal todos los calentadores. De acuerdo con este criterio no tendría sentido disponer de un margen de temperatura de agua de alimentación con objeto de regular la temperatura del vapor, ya que éste se traduce en una pérdida de rendimiento y en una máquina térmica comercial, el rendimiento es lo más importante.

Por lo dicho en el párrafo anterior, el método de variación de la temperatura del agua de alimentación para variar la temperatura del vapor, aunque técnicamente factible, es un método que no debe de ser utilizado.

8.8. Efecto del soplado sobre la temperatura del vapor

Todas las superficies de transmisión de calor del hogar; paredes vaporizadoras, sobrecalentadores, recalentador y economizador se van ensuciando progresivamente debido a la deposición de escorias parcialmente fundidas que solidifican sobre la superficie o a partículas sólidas que también se pegan a las superficies aunque no estén fundidas. Esto hace que los coeficientes de transmisión de calor disminuyan y los humos salgan más calientes hacia la chimenea, aumentando las pérdidas por calor sensible y disminuyendo el rendimiento.

Existen unos elementos llamados *sopladores de hollín* situados de tal manera que alcanzan a todos los puntos de las superficies de transmisión de calor y son capaces de limpiarlas soplandolas con chorros de vapor. Los soplados de las distintas superficies se realizan según las necesidades de la unidad y según programas establecidos. La secuencia de limpieza puede influir de forma importante sobre la temperatura del vapor.

Por ejemplo si toda la caldera está sucia, el coeficiente de transmisión de calor será bajo en todas las partes y los humos saldrán a la atmósfera más calientes. Si en tales condiciones se

soplan los sobrecalentadores y el recalentador y no se soplan las paredes vaporizadoras, los humos seguirán saliendo más calientes del hogar pero al haber mejorado los coeficientes de transmisión de calor en los sobrecalentadores y recalentadores debido a la limpieza por soplado, en esta zona se transmitirá más calor y aumentará la temperatura del vapor.

Otro ejemplo puede ser que partiendo de la caldera sucia se soplen las paredes vaporizadoras y no se soplen los sobrecalentadores y recalentadores, en cuyo caso aumentará la transmisión de calor en el hogar y los humos lo abandonarán a temperatura más baja, con lo que queda menos calor disponible para transmitir en la zona de sobrecalentadores y recalentadores, lo que unido a la falta de limpieza en los mismos, hace que disminuya la temperatura del vapor.

Se pueden hacer varias combinaciones y secuencias de soplado de la caldera, pero siempre se deben de adaptar aquellas que conduzcan a circunstancias de las que resulte un mejor rendimiento, como por ejemplo, funcionar con un caudal de agua de atemperación mínimo.

9. Sistemas bipaso y de puesta en servicio

Las calderas de alta presión de combustibles fósiles, ya sean de tipo de calderín o de presión universal de proceso directo, de las grandes plantas de generación de energía eléctrica, deben responder adecuadamente a las variaciones o cambios en los modos de operación, que sean requeridos de acuerdo con el servicio que deben prestar.

Lo anterior exige unas puestas en servicio y unos cambios de carga que puedan ser rápidos, frecuentes y fiables, para hacer frente a la demanda con una producción de electricidad económica.

Durante la puesta en servicio, o en condiciones de baja carga (inferior al 20 %), los sistemas normales de control de temperatura de vapor mediante atemperadores con atomizador de agua, resultan ineficaces, ya que la temperatura de vapor de salida tiende a seguir la temperatura de humos, porque el flujo de humos es notablemente superior al flujo de vapor.

Por tanto, hay que tomar medidas a fin de que se pueda asumir esa gran diferencia de flujos, y las necesidades de presión y temperatura del vapor, tanto en la turbina como en la caldera.

Para cumplimentar esos requisitos, se han desarrollado tres sistemas de bipaso y de puesta en servicio, para las calderas con calderín y para las calderas de paso único.

9.1. Sistema bipaso de caldera con calderín

El sistema bipaso de la caldera radiante B&W

- Minimiza el tiempo de puesta en servicio (PES).
- Controla las retiradas de servicio con vistas a la nueva puesta en servicio.
- Facilita el control de la temperatura de vapor para equiparlo a la temperatura del metal de la turbina.
- Permite la operación con presión dual.

Todas esas características reducen las solicitaciones (tensiones) en la turbina, con lo que se consigue mejorar la disponibilidad de la turbina y se reducen los costes correspondientes de mantenimiento.

El sistema bipaso de una caldera con calderín consiste en un "sistema de control" y en un "conjunto de tuberías y válvulas", cuidadosamente elaborado, tal como se representa en la figura 26.

Una sonda se encargan de monitorizar (vigilar) las temperaturas de gases (humos) en los tubos de salida del sobrecalentador y del recalentador, para facilitar el control de los regímenes de fuego y las temperaturas de gases (humos) durante la operación de puesta en servicio (PES).

Este sistema *reduce el tiempo de puesta en servicio* desde el estado frío, porque controla

las diferencias de temperaturas entre la de superficie de caldera de vapor saturado, la de superficie de sobrecalentado y la del metal de turbina.

Esto se cumplimenta mediante la provisión de un control directo de la temperatura de vapor, por medio de la mezcla de vapor saturado y del vapor que sale del sobrecalentador y del recalentador, tal como muestra la figura 26.

Esta disposición facilita la temperatura deseada de vapor, para la turbina, sin restricción alguna en el régimen de fuego, para la puesta en servicio de la caldera.

Este sistema también permite el *cambio rápido de carga*. El sistema tiene un juego de válvulas de cierre (parada) y de control del sobrecalentador, que permite la operación a presión dual, controlando independientemente la presión de admisión en la turbina y la presión en el calderín.

Este sistema de control facilita la operación a presión constante de los principales componentes de caldera, y paralelamente la operación a presión variable en la turbina, durante los cambios de carga.

La operación en presión dual minimiza las sollicitaciones (tensiones) térmicas en la caldera y en la turbina. Una retirada de servicio o parada en presión dual, mantiene la caldera muy próxima a su presión nominal.

Y paralelamente, al mismo tiempo la turbina muy próxima a su temperatura máxima, con vistas a una rápida reposición o nueva puesta en servicio.

Esa característica de la operación con presión dual es muy útil y se emplea especialmente en el caso de la retirada de servicio "vespertina" y de la sucesiva puesta en servicio "matinal", que implica el trabajo cíclico "a dos turnos", con el fin de mantener la turbina y la tubería de vapor próximas a su plena temperatura, para facilitar una rápida puesta en servicio o arranque con mínimas sollicitaciones (tensiones).

Operación

El sistema bipaso flexible puede adaptarse a la mayoría de las situaciones de operación. Por ejemplo, se puede amoldar a un mal funcionamiento de la turbina, mediante el oportuno ajuste de la temperatura y del caudal de vapor, a través de cualquier rango de carga, desde la sincronización hasta puntos concretos de carga.

Aunque el sistema bipaso mejora la operación de la unidad, la caldera puede operar en todo momento como una unidad convencional sin bipaso.

Las válvulas siguientes (ver figura 26), con sus funciones asociadas, facilitan la flexibilidad requerida del sistema, según se resume a continuación:

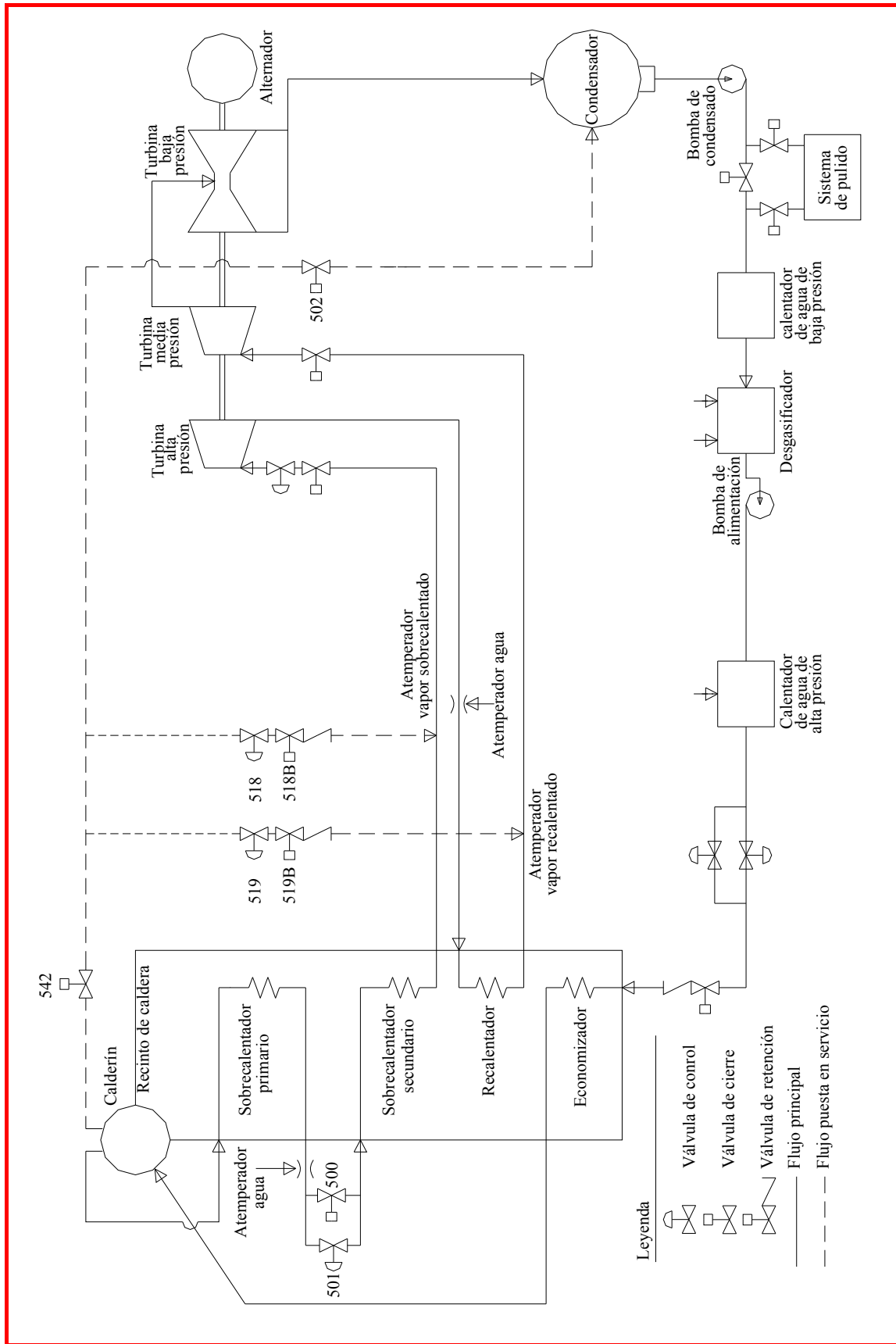


Figura 26. Sistema bypass de caldera con calderín

Válvula N°	Función
500	<i>Válvula de cierre (parada) de sobrecalentador secundario.</i> Separa el sobrecalentador secundario del resto del generador de vapor. Está cerrada cuando se emplea el sistema bipaso. Generalmente se diseña para abrir por encima del 70 % de carga.
501	<i>Válvula de bipaso de la válvula anterior (500).</i> Controla la presión de vapor que sale del sobrecalentador secundario, inferior a la del calderín, para puesta en servicio, para operación en presión variable y para atemperación de vapor. La capacidad de diseño es normalmente 70 % del flujo de diseño de caldera.
502	<i>Válvula de control de bipaso de sobrecalentador primario a condensador.</i> Facilita los fuegos para control de la temperatura de gases (humos) entrando en el sobrecalentador, para lograr alta temperatura de vapor durante el arranque. Se emplea principalmente en arranques en caliente y en paradas. Cierra a cargas mayores del 20 % de la nominal.
518	<i>Válvula de control del atemperador de salida del vapor principal</i> Reduce la temperatura del Vapor principal para que se equilibre con la del metal del primer escalón de turbina, durante el arranque en frío y arranque templado después de una parada de fin de semana. Cierra a cargas superiores al 20 %. La válvula de cierre <i>518-B</i> Facilita la incomunicación cuando la <i>518</i> este cerrada.
519	<i>Válvula de control del atemperador de salida de vapor recalentado</i> Reduce la temperatura del vapor recalentado para equilibrarse con las zonas no purgables, durante el arranque en frío y arranque templado tras parada de fin de semana. Cierra a cargas del 20 %. La válvula de cierre <i>519-B</i> facilita la incomunicación cuando la <i>519</i> este cerrada.
542	<i>Válvula de cierre de bipaso de sobrecalentador primario</i> Usada para incomunicar el sistema bipaso, durante la operación normal. Cierra cuando están cerradas <i>518</i> , <i>519</i> y <i>502</i> .

CONSIDERACIONES DE DISEÑO

Control de presiones de calderín y de salida de sobrecalentador.

En los arranques (en el caso de operación a dos turnos), que siguen a las paradas nocturnas, la temperatura de gases (humos) que salen del hogar tiene que mantenerse alta. De esa manera se mantienen altas las temperaturas del vapor principal y del vapor recalentado, para que se equiparen a las temperaturas del metal de turbina.

La turbina tiene que rodarse a baja presión, para evitar una gran caída adiabática de temperatura en la admisión, cuando se abra el vapor.

La superficie de saturación, de la caldera, se puede aislar de la superficie del sobrecalentador, por medio de las válvulas de cierre (500) y de bipaso (501), del sobrecalentador secundario.

Luego, la caldera se puede operar con los fuegos al régimen deseado, para elevar las temperaturas de vapor o la presión de calderín, mientras se mantienen bajas presiones en el sobrecalentador secundario y en la entrada o admisión de la turbina de alta presión.

Si la presión de calderín aumenta muy rápidamente, o alcanza su límite, la válvula bipaso (502) de sobrecalentador primario descarga la presión del calderín hacia el condensador, evitando que el condensado vaya a sumidero.

Se obtiene un mejor equilibrado de las temperaturas de metal de turbina con un máximo aporte (entrada) de calor hacia la caldera y una limitación de fuegos dictada por la protección del metal tubular de las superficies del paso de convección.

Control de temperatura del vapor recalentado

El control de temperatura del vapor recalentado se mantiene por medio de la válvula (519) del atemperador de vapor, durante los arranques y las paradas.

Antes de que el vapor circule por la turbina, el recalentador no tiene flujo alguno de vapor. El metal del recalentador absorbe calor de los gases (humos) y eventualmente alcanza la temperatura de los mismos, que puede llegar hasta los 538 °C.

Cuando el vapor pasa a través del recalentador y comienza a admitirse en la turbina de presión intermedia, la temperatura del vapor recalentado sube muy rápidamente hasta el nivel de la de los gases (humos), dando lugar a un importante desequilibrio, con las temperaturas de las zonas no purgables de recalentado, en la turbina de presión intermedia, para un arranque en frío y para un arranque templado tras la parada correspondiente a un fin de semana.

Los atemperadores de atomización con agua no son efectivos a bajas cargas, en las que las temperaturas del vapor recalentado se controlan mediante las temperaturas de gases (humos) en los bancos de convección.

La atemperación del vapor recalentado, con vapor saturado procedente del calderín, primero limita la subida de temperatura del vapor a la salida del recalentador, cuando el vapor se admite previamente en la turbina de alta presión y pasa a través de ella, y segundo ofrece un control positivo de la temperatura de vapor recalentado hasta un 20 % de la plena carga.

Control de temperatura del vapor principal

La válvula (518) del atemperador del vapor principal o sobrecalentado controla la temperatura del vapor que sale del sobrecalentador.

Los atemperadores de atomización de agua no son efectivos para las bajas cargas de caldera, en las cuales la temperatura del vapor sobrecalentado está determinada por la temperatura de los gases (humos) en los correspondientes bancos tubulares del sobrecalentador.

Por tanto, la temperatura del vapor principal o sobrecalentado se controla por medio de una válvula de atemperador de vapor, empleando vapor saturado procedente del calderín para rebajar temperaturas.

10. Definiciones y condiciones de servicio

Arranque frío

Un arranque frío, se define como la puesta en servicio de una unidad que no tiene presión alguna en el calderín o que tiene temperatura ambiente en los gases del hogar.

Por otro lado, las temperaturas correspondientes al metal de la turbina son inferiores a 150 °C y por ello es necesario un precalentamiento.

Arranque templado

Un arranque templado es la puesta en servicio de una unidad que ha estado parada del orden de dos días, como es el caso de una parada fin de semana.

En general, las temperaturas del metal de turbina son, al menos, del orden de los 150 °C y la presión residual en el calderín puede ser del orden de 30 bar.

Arranque caliente

Un arranque caliente, se define como la puesta en servicio de una unidad, que ha estado parada, del orden de 7 a 8 horas.

La caldera se mantiene "embotellada" para que se conserve la máxima energía interna. La presión del calderín es bastante alta. Por otro lado, el vacío en el condensador se habrá mantenido normal mente.

Las temperaturas del metal de turbina pueden ser del orden de 480 a 490 °C, tras una parada controlada.

Durante el periodo parada, puede producirse una caída de unos 70 °C en la temperatura del metal de turbina. Por tanto, la mínima temperatura de vapor que se precisa, para la nueva puesta en servicio es del orden de 430 a 440 °C. Normalmente, la temperatura del vapor es menor que la temperatura de gases (humos) entrando al sobrecalentador, cuando por su interior no

circula flujo alguno.

Si una unidad esta "disparada" (desacoplada), es decir retirada de servicio por alguna protección o manualmente, pero se encuentra preparada para rápida reposición en servicio, re-puesta en servicio (rearranque), la temperatura del metal de turbina debe ser de 538 °C, y la presión del calderín de ser aproximadamente la misma que habrá en el momento del disparo de la unidad.

Para alcanzar la alta temperatura de gases (humos) que se precisa, puede necesitarse el mantener los fuegos en el hogar y purgar el vapor excedente hacia el condensador.

Parada "controlada"

Cuando se esta reduciendo a cero la carga de una unidad, se puede emplear el sistema bipaso para facilitar las operaciones que siguen a la retirada de servicio.

Si en la unidad están programados trabajos de mantenimiento, la temperatura del metal de turbina y la presión en caldera deben conservarse lo más bajas que sea posible, cuando todavía tiene algo de carga la unidad.

La presión en la admisión se controla por medio de la válvula 501, y la atomización precisa para reducir las temperaturas de vapor y de metal, de acuerdo siempre con las "curvas de enfriamiento", se controla con las válvulas 518 y 519.

Una vez "desacoplada" (desconectada) o disparada la unidad, los ventiladores del generador de vapor deben mantenerse en servicio para refrigerarlo.

Operación con presión variable

Este modo de operación se suele identificar como "operación con presión variable".

La válvula de cierre (500) del sobrecalentador secundario y la válvula de bipaso (501) de aquella, que se utilizan en el sistema de bipaso, permiten la operación de la unidad con un nivel de presión constante en el calderín y en el sobrecalentador primario, mientras que la presión de salida del sobrecalentador secundario se varia con la carga. La operación de este modo mantiene la temperatura del vapor de turbina en el nivel deseado, en un rango de carga mucho mayor que el que se puede lograr con la operación a presión constante en la admisión.

Si se mantiene relativamente constante la presión en el calderín y en el sobrecalentador primario, cuando se opera a cargas reducidas, se facilita una toma o subida de carga muy rápida.

Arranque sin sistema bipaso

La unidad se puede arrancar y operar sin utilizar el sistema de bipaso. La completa apertura de la válvula 500 permite un arranque de la unidad como una caldera convencional y con calderín.

11. Sistema de puesta en servicio o arranque de calderas de presión universal

Un requisito clave, para los sistemas de arranque de unidades de presión universal, es la necesidad de diseñar flujos mínimos de circulación en los circuitos de alta absorción de calor, para su adecuada refrigeración, antes de que se "encienda" (tenga fuegos) la caldera.

Otras características son:

- La provisión de un bipaso de turbina, hasta que se equilibren la presión y la temperatura correspondientes del vapor.
- La reducción de la presión y temperatura en el flujo del bipaso, antes de que penetre el vapor en el condensador y en el equipo auxiliar.
- La provisión de suficiente agua desmineralizada para la completa puesta en servicio.

- La provisión de mayor flexibilidad de la unidad, por medio de la operación de la caldera en presión dual.

Las plantas con calderas de presión universal, que se diseñaron originalmente para operación con carga base, se han adaptado para operación con carga cíclica, incluyendo la operación diaria sobre el sistema bypass.

Hay disponibles dos sistemas diferentes de puesta en servicio o arranque para las calderas de presión universal:

- Uno, para operación a presión constante en caldera, para todo el rango de cargas.
- Y otro, para operación a presión variable en caldera, para todo el rango de cargas.

11.1. Sistema de arranque con presión constante

Para el sistema de arranque con presión constante en la caldera, se cuenta con un "separador de vapor" (tanque de expansión) ubicado en un bypass, que puede aislarse de la caldera durante la operación normal. La disposición general es la que se muestra en el esquema de la figura 27.

La bomba de agua de alimentación suministra el flujo mínimo requerido de agua de alimentación, durante la puesta en servicio y durante la operación a bajas cargas, para proteger los circuitos del hogar.

El fluido que sale del sobrecalentador primario, a plena presión, bypassa el sobrecalentador secundario, a través de la válvula reductora de presión (207), enviándolo hacia el tanque de expansión, en el que la mezcla agua-vapor se separa.

El nivel de agua del tanque de expansión se controla por las válvulas de purga (230) y (241), controlando la válvula (230) el flujo hacia el desgasificador, para lograr la máxima recuperación de calor.

El exceso de agua (que supere la capacidad del desaireador) se descarga al condensador, a través de la válvula (241).

Si las purgas no están dentro de los límites de calidad del agua, todo el flujo se conduce a través de la válvula (241) hacia el condensador y el sistema de pulido (polishing) del condensado.

La válvula de bloqueo (242) permanece cerrada mientras no exista un nivel determinado en el tanque de expansión, con el fin de asegurar que el agua no entre en las tuberías de vapor. Una vez establecido el nivel, la válvula (242) abre hacia la tubería que va desde el tanque de expansión hacia el desgasificador, para mantener la presión en éste, que controla la válvula (231). Esto permite retornar todas las purgas hacia el condensador, a través de la válvula (241), durante el periodo del acondicionamiento (depuración) en caliente, sin que sea necesario utilizar una fuente de vapor auxiliar para mantener la presión en el desgasificador, y también sirve para recuperar el calor en el tanque de expansión, durante dicho periodo de acondicionamiento.

Las válvulas (205) conectan el tanque de expansión con la entrada del sobrecalentador secundario, aguas abajo de la válvula de bloqueo" (200) del sobrecalentador secundario y de la válvula de control (401).

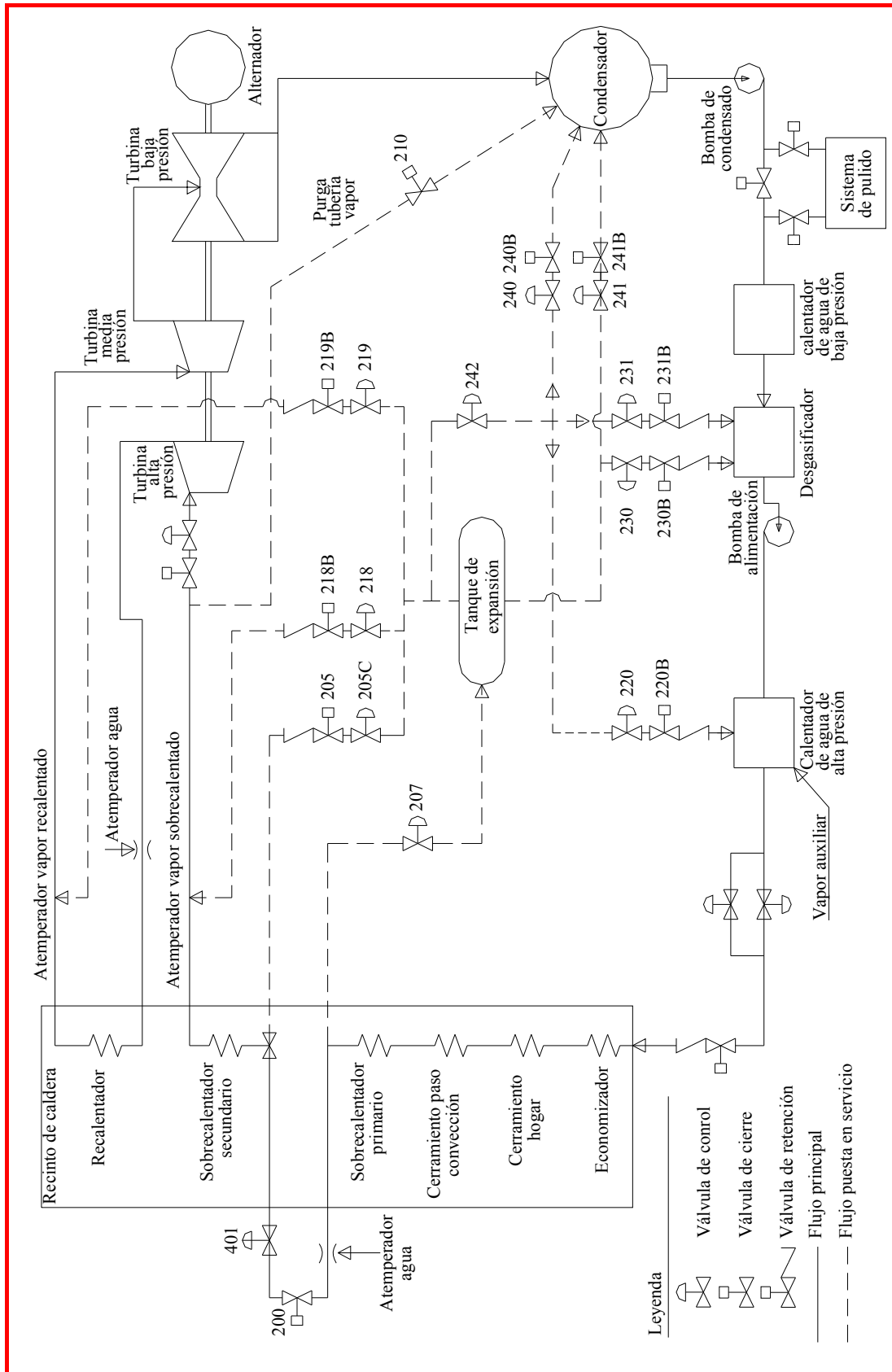


Figura 27. Sistema de arranque de caldera de presión universal operando con presión constante en el hogar

Siempre que haya un nivel adecuado en el tanque de expansión, la válvula (205) se abre normalmente a 20 bar, y el vapor seco fluye hacia el sobrecalentador secundario, para el

calentamiento de las tuberías de vapor.

La válvula bipaso de turbina (210) abre normalmente a 20 bar de presión en la tubería de vapor principal (sobrecalentado), para colaborar en el calentamiento y vaporización del sobrecalentador, durante el periodo inicial de la puesta en servicio.

Cuando haya suficiente vapor disponible, se empieza el "rodaje" de la turbina y se coloca "en línea", es decir se lleva a su velocidad nominal.

El exceso de vapor no requerido, que se separa en el tanque de expansión, se descarga hacia el condensador a través de la válvula (240). Esta válvula actúa también como una válvula aliviadora de sobrepresión, para evitar el disparo de las válvulas de seguridad, accionadas por resorte, que hay en el tanque de expansión. La válvula (240) tiene un punto de reglaje con ajuste, que puede tararse para mantener diferentes presiones en el tanque de expansión, para valores concretos de carga, durante el arranque.

El sistema completo de bipaso se dimensiona para manipular el flujo mínimo requerido durante la puesta en servicio, y para facilitar la operación en el tanque de expansión a mínima carga.

El periodo transitorio, o sea la transición desde la operación sobre el tanque de expansión hasta el flujo del proceso directo, se efectúa a mínima carga.

En ese transitorio, como el vapor que entra y sale del tanque de expansión es seco y sobrecalentado, el cambio de flujo desde el bipaso hasta el proceso directo se cumplimenta con una mínima fluctuación en la temperatura del vapor, mediante la apertura de la válvula de bloqueo (200) y de la válvula combinada de cierre-control (401), y además con el cierre de las válvulas bipaso (207) y (205).

Control de la temperatura de vapor

Los medios para controlar la temperatura del vapor principal (sobrecalentado) y del recalentado, en las diversas cargas de la operación normal, no son efectivos durante el arranque a cargas muy bajas.

El sistema de arranque mostrado en la figura 27, incluye el equipo de atemperación para el vapor, desde el tanque de expansión hacia los colectores de salida del vapor principal y del recalentado, para un control preciso de las condiciones del vapor durante el arranque, con el fin de cumplimentar los requisitos de temperatura del metal de turbina.

La válvula de atemperación (218) del vapor de salida del sobrecalentador se utiliza con cargas inferiores a la del 20 %, para introducir vapor saturado desde el tanque de expansión hacia el colector de salida del sobrecalentador.

Para una puesta en servicio desde el estado frío (arranque en frío), el rodaje inicial de la turbina debe hacerse con vapor saturado, que pasa desde el tanque de expansión a través de la válvula (218).

Ese vapor se puede mezclar, con una determinada cantidad de vapor que pasa a través de la válvula (205) y del sobrecalentador secundario, para controlar la temperatura de entrada a la turbina de alta presión por debajo de los 288 °C.

La válvula de control (205) facilita la necesaria caída de presión, entre el tanque de expansión y el colector de salida del sobrecalentador secundario, con vistas a la atemperación.

La válvula de atemperación (219) del vapor de salida del recalentador se utiliza con cargas inferiores al 20 % de la plena carga, para introducir vapor del tanque de expansión en el colector de salida del recalentado.

La relación entre flujos a través de la válvula de atemperación y el de la turbina de alta presión se limita, fundamentalmente por consideraciones relativas a la turbina y al control de turbina.

Alivio de sobrepresión.

El sistema bipaso se utiliza también para aliviar (descargar) la presión excesiva en la caldera, en un disparo con rechazo de carga.

Esto se realiza mediante el empleo de la válvula (207), que envía el exceso de vapor hacia el tanque de expansión.

11.2. Sistema de arranque con presión variable

Para unidades de presión universal que sean capaces de operar en régimen de presión variable en la caldera, para todo el rango de cargas, el sistema de arranque tiene un separador de vapor, ubicado en el circuito del flujo del vapor principal (sobrecalentado), aguas arriba del sobrecalentador primario. La disposición general se muestra en la figura 28.

La bomba de alimentación de caldera suministra el mínimo flujo requerido de agua de alimentación, durante la puesta en servicio y la operación a bajas cargas, para proteger los circuitos del hogar y resto de caldera. En el circuito de puesta en servicio se incluyen el economizador, el cerramiento del hogar, los pasos apantallados (en aquellas unidades que tengan pantallas aguas arriba del sobrecalentador primario) y el separador de vapor.

La mezcla agua-vapor se separa en el separador vertical, durante la puesta en servicio y la operación a bajas cargas.

La unidad se pone en servicio con baja presión en la caldera, para obtener la máxima cantidad de vapor al comienzo del arranque. Las válvulas (330) y (341) controlan las purgas desde el separador. La válvula (330) controla también el flujo hacia el desgasificador, para conseguir la máxima recuperación de calor.

La válvula de bloqueo (342) permanece cerrada hasta que llegue al separador una mezcla agua-vapor; posteriormente se cierra en cualquier momento en que se active el indicador de alto nivel en el separador, para evitar que el agua entre en sobrecalentador y en recalentador, a través de los atemperadores de vapor. Una vez abierta la válvula (342), la tubería de vapor del desgasificador mantiene la presión en este (controlada por la válvula (331).

Lo anterior permite el retorno de todas las purgas hacia el condensador, a través de la válvula (341), durante un acondicionamiento (depuración) en caliente, sin necesidad de usar una fuente de vapor auxiliar para mantener la presión en el desgasificador. También sirve para recuperar el calor del vapor separado durante el periodo del acondicionamiento (depuración).

Durante la etapa inicial de puesta en servicio, el flujo de vapor desde el sobrecalentador se establece a través de las purgas de la tubería de vapor principal y de la válvula (310), para el calentamiento de las tuberías de vapor.

Conforme se incrementa la entalpía del fluido que entra en el separador, las purgas van disminuyendo hasta que llega vapor seco al separador. A partir de ese momento, las válvulas de purga se cierran, el desgasificador se controla con el vapor procedente de la correspondiente extracción de turbina, y la unidad pasa a operación en proceso directo, con todo el flujo de vapor dirigiéndose hacia la turbina.

Válvulas divisoras (capacidad de "presión dual").

En la puesta en servicio desde estado caliente (arranque en caliente), e incluso en las puestas en servicio que siguen a paradas nocturnas, las temperaturas de los gases (humos) se mantienen elevadas, con el fin de conservar las altas temperaturas de vapor principal (sobrecalentado) y recalentado.

Generalmente, eso produce una subida excesivamente rápida de la presión de admisión, lo que no es conveniente porque provoca una enorme caída de la temperatura de admisión, cuando se admite vapor en la turbina.

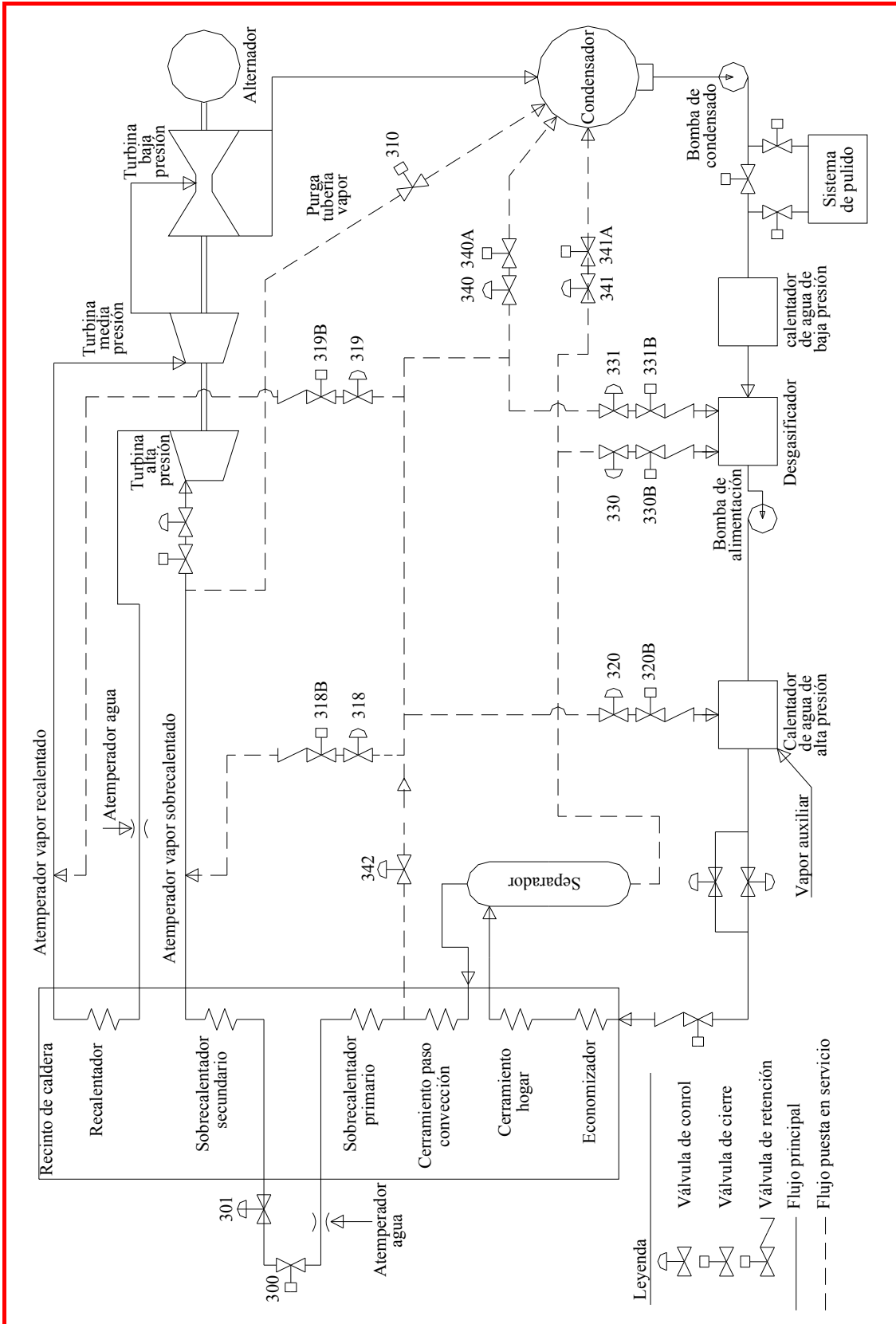


Figura 28. Sistema de arranque de calderas de presión universal operando a presión variable en el hogar

Mediante la válvula combinada de cierre y control (301) del sobrecalentador, la superficie de caldera se puede separar (independizar) de la superficie del sobrecalentador secundario. El fuego adicional requerido para subir y mantener las temperaturas de vapor se puede

aprovechar para subir la temperatura de saturación o la presión de caldera, mientras se mantienen las deseables bajas presiones' en el sobrecalentador secundario y en la entrada a la turbina de alta presión.

La operación en "presión dual" (con dos presiones) permite también regímenes mas rápidos en los cambios de carga. En efecto, como la presión y la temperatura de la caldera se pueden mantener mas elevadas, la unidad responde también mas rápidamente en cualquier cambio de carga.

Bipaso de sobrecalentador a condensador.

Cuando se alcanza la máxima presión deseada en caldera, o bien cuando se hace la puesta en servicio con la válvula de cierre de sobrecalentador en posición abierta, la válvula (340) de bipaso de sobrecalentador a condensador, facilita un medio de controlar la presión de caldera, durante las condiciones de puesta en servicio desde estado caliente.

Durante el periodo transitorio de la toma de carga, que sigue a la puesta en servicio caliente, la válvula bipaso de sobrecalentador (340) se debe abrir, para permitir mayores regímenes de fuegos y sostener, por tanto, la temperatura incrementada del vapor, hasta que la caldera alcance la carga de control (carga señalada).

El bipaso de sobrecalentador a condensador se emplea para aliviar (descargar) la presión excesiva en la caldera, en el caso de un disparo con rechazo de la carga. También se puede utilizar como una " válvula aliviadora" de sobrepresión, para suplementar o evitar el disparo de las válvulas de seguridad.

Control de temperatura de vapor.

El sistema de puesta en servicio mostrado en la figura 28 incluye el dispositivo para atemperación con vapor saturado. Este vapor se toma aguas abajo del separador y se inyecta en los colectores de salida del vapor principal (sobrecalentado) y del recalentado, para un preciso control de las condiciones del vapor durante la puesta en servicio, con el fin de cumplimentar los requisitos de temperatura del metal de turbina.

La válvula de atemperador (318) de vapor de salida del sobrecalentador se utiliza de forma análoga a la válvula (218) discutida mas arriba, en el epígrafe 11.1.

La válvula divisora (301) se emplea para obtener la necesaria caída de presión, entre el separador y el colector de salida del sobrecalentador secundario, con vistas a la atemperación.

La válvula de atemperador (319) de vapor de salida del recalentador se usa para cargas inferiores al 20 % de la plena carga, para introducir vapor del separador en el colector de salida del recalentado. La relación (ratio) de flujos, entre el que atraviesa la válvula de atemperador (319) y el que pasa por la turbina de alta presión, esta limitado por consideraciones de turbina y de control de turbina.

Regímenes permisibles de cambio de carga.

El mayor tiempo que se requiere para un cambio de carga, con operación en presión variable, se debe a una mayor variación en la temperatura del cerramiento del hogar y a la necesidad de restringir la velocidad de cambio de temperatura, para evitar roturas de las fijaciones de la envolvente de las paredes de cerramiento. Con operación en presión dual, el cerramiento del hogar permanece a presión constante y prácticamente a temperatura constante.

Sin embargo, el colector de entrada del sobrecalentador secundario sufre un amplio cambio de temperatura, con operación en presión variable, y el tiempo requerido para el cambio de carga se basa precisamente en la limitación de la velocidad de cambio de temperatura relativa al citado colector de salida.

Si toda la unidad se opera a presión constante, virtualmente no existe límite alguno

impuesto a la caldera, para la velocidad del cambio de carga, excepto para la velocidad del posible cambio del equipo de fuegos. Con un gran cambio de carga, la velocidad esperada sería aproximadamente de un 5 % de la plena carga, por minuto.

La velocidad del cambio de carga esta restringida también por el metal de turbina, que sufre una gran oscilación de temperatura debida a la admisión a bajas cargas, y que esta limitada por el numero de ciclos del diseño.

12. Economizadores

12.1. Introducción

Los economizadores y los calentadores de aire desempeñan una función clave, para la consecución de una alta eficiencia global de la caldera, mediante la recuperación de la energía de bajo nivel, es decir, la de los humos de baja temperatura, antes de que se evacuen a la atmósfera.

Por cada 22 °C de disminución en la temperatura de los humos, por medio de un economizador o de un calentador de aire, el rendimiento o eficiencia global de la caldera sube aproximadamente un punto porcentual, 1 %.

Los economizadores recuperan parte de esa energía residual calentando el agua de alimentación de la caldera, mientras que los calentadores de aire efectúan el calentamiento del aire de combustión.

El calentamiento del aire comburente mejora la combustión de muchos combustibles, y resulta imprescindible en la combustión del carbón pulverizado, para lograr el secado del carbón y para asegurar una ignición estable.

En comparación con las "paredes de agua del hogar", el "sobrecalentador" y el "recalentador", los economizadores y los calentadores de aire requieren mayores superficies de transmisión por unidad de calor recuperado. Esto se debe a la relativamente pequeña diferencia que existe entre la temperatura de humos (fluido calefactor) y la temperatura del fluido calentado (agua o aire, respectivamente).

La utilización y la disposición de un economizador y/o un calentador de aire dependen de diversos factores, de los que son principales:

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

Básicamente, los economizadores son superficies de transmisión de calor, constituidas generalmente por bancos tubulares, que se utilizan para calentar el agua de alimentación de caldera, antes de que entre en el calderín (para el caso de unidades con recirculación), o bien antes de que llegue a las superficies del hogar (si son unidades de de un paso).

El vocablo "economizador" precisamente proviene de la antigua utilización de tales recuperadores de calor, para reducir los costes de operación o "economizar" combustible, mediante una recuperación adicional de la energía residual que quedaba todavía en los humos.

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

Normalmente, el economizador suele ser la última superficie de transmisión de calor, refrigerada por agua, que se encuentra situada "aguas arriba" (en el lado de humos) del calentador de aire.

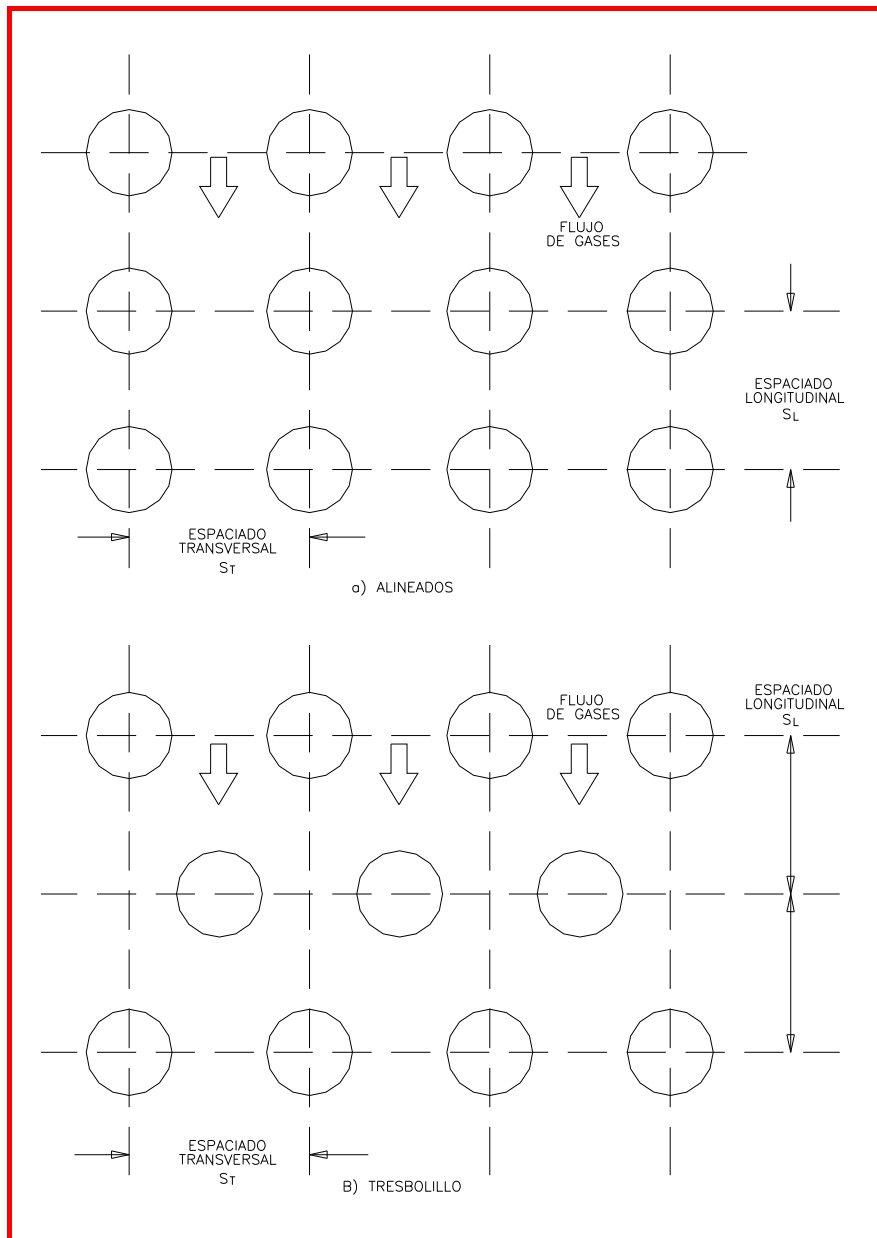


Figura 29. Disposiciones de los tubos de los economizadores

12.2. Tipos de economizadores

Tubos lisos (desnudos)

Aunque se ha generalizado la expresión "tubo liso", para los tubos que carecen de cualquier tipo de "aletas" o "superficies extendidas", conviene utilizar los términos "tubo desnudo" para estos, puesto que esta forma no deja duda alguna, aunque se aplique a tubos con estriado interior, por ejemplo.

Para un economizador, el diseño más común y fiable es el que incorpora el tipo de tubos desnudos, generalmente en disposición alineada y con flujos cruzados, conforme se muestra en la figura 29a.

Cuando se quema carbón, el polvo o "ceniza volante" crea siempre un ambiente sucio y erosivo.

Los tubos desnudos y alineados minimizan la posibilidad de la erosión y de la obturación (atasco) total o parcial, que son susceptibles de ser provocados por la ceniza, en comparación con

una disposición de los mismos tubos al tresbolillo, tal como se muestra en la figura 29b.

Adicionalmente, los tubos alineados presentan la geometría que ofrece la máxima facilidad para la limpieza con sopladores, del banco o paquete tubular que constituye el economizador.

No obstante, el conjunto de todas las ventajas citadas, derivadas de la disposición en línea de tubos desnudos, debe sopesarse frente a otras disposiciones alternativas, con un posible mayor peso, mas volumen y superior coste.

Superficies extendidas

Para reducir los costes de inversión, la mayoría de los fabricantes de calderas ha construido economizadores con una gran variedad de tipos de aletas o superficies extendidas, con el fin de mejorar el régimen de transmisión de calor desde el lado de los humos hacia el lado del agua.

En general, las aletas o "superficies extendidas" son piezas baratas, y en todo caso de precio muy inferior al de la superficie tubular propiamente dicha, que no se incluyen en el lote denominado "partes a presión", y de ahí que se identifiquen como componentes integrados en las partes a no presión.

Tales aletas o superficies extendidas permiten reducir el tamaño y por tanto el coste global del economizador. Sin embargo, el éxito de su aplicación a un caso concreto depende mucho del medio ambiente que se tenga en el lado de de humos.

Una de las preocupaciones primordiales, en el transcurso de la vida de la unidad, es la facilidad que se tenga para realizar la limpieza de la superficie de transmisión de calor del economizador, tanto interior como exterior. Desde luego la limpieza verdaderamente crítica es la del lado de los humos (exterior).

No siempre se pueden recomendar las utilizaciones de economizadores con superficies extendidas, ya que las correspondientes aletas empleadas pueden crear complicaciones operativas.

Por ejemplo, en determinadas calderas como son las que cuentan con combustores ciclónicos (hogar ciclón) no son recomendables los economizadores con superficies extendidas, como consecuencia de las peculiares características del polvo presente en los humos (muy alta concentración y muy erosivo).

- Aletas de clavos

Las aletas de clavos se comportan razonablemente bien en calderas que queman gases. No obstante, los economizadores con aletas de clavos tienen mayores caídas de presión en el lado de humos, en comparación a las que ofrecen, por ejemplo, los economizadores similares con aletas helicoidales.

Las aletas de clavos o púas forman superficies claveteadas, similares a las que se configuran en algunos tipos de hogares para la posterior instalación y soporte de materiales refractarios.

En general, los clavos (púas o espárragos) suelen tener una longitud que es aproximadamente igual al radio del tubo en el que se insertan como aletas, y siempre se sueldan perpendicularmente a la superficie tubular.

Las aletas de clavos se suelen comportar mal en todas las calderas que queman carbón, a causa de las cenizas, como consecuencia de:

- Altas erosiones debidas a la naturaleza del polvo arrastrado.
- Pérdidas en termotransferencia, debidas a la suciedad inherente al polvo depositado.
- Obturaciones, mayores o menores, debidas a las características físico-químicas de la ceniza.

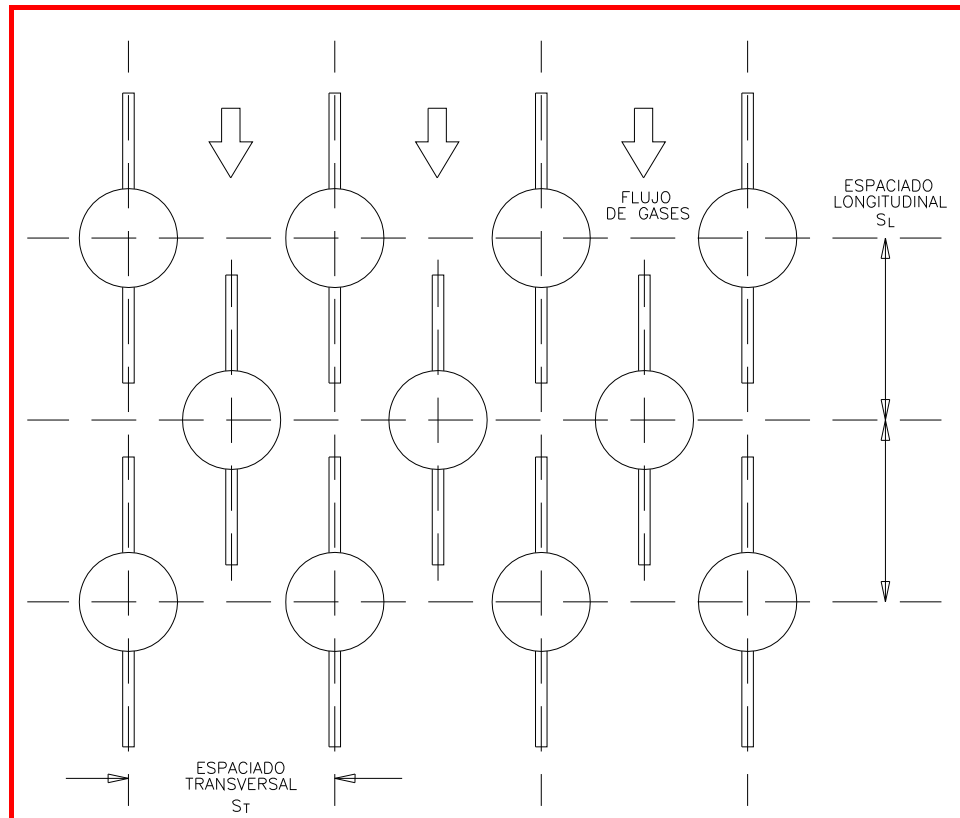


Figura 30. Economizador de tubos aleteados longitudinal mente, dispuestos al tresbolillo.

- Aletas longitudinales

Una aleta es longitudinal cuando se fija en el tubo, sobre su superficie, mediante una costura (soldadura) paralela a la dirección del eje tubular.

Los tubos aleteados longitudinal mente, dispuestos al tresbolillo y formando parte de una transmisión de calor con flujos cruzados, se puede observar en la figura 30.

Estos economizadores tampoco se comportan demasiado bien, a lo largo de prolongados períodos de operación de la unidad.

Muchos de tales economizadores se tuvieron que sustituir, especialmente en calderas que quemaban carbón, como consecuencia de las excesivas obstrucciones y erosiones, que se presentaron tras un tiempo de operación relativamente corto

En calderas que queman aceites y gases, con frecuencia se presentan grietas en los puntos terminales (extremos libres) de las aletas, que son los puntos mas calientes de la superficie extendida, provocando fallos.

Estos fallos se desarrollan mediante un mecanismo repetitivo, por el que las grietas, desde los puntos terminales o extremos, se propagan a través de las aletas, hacia la pared del tubo; y, en algunos casos, se llega al fallo de la pared tubular que aloja la aleta o superficie extendida.

- Aletas helicoidales

Los tubos con aletas helicoidales (figura 31) se aplicaron con bastante éxito en algunas unidades que quemaban carbones, aceites y gases.

La aleta helicoidal puede estar formada por "una hélice" de paso reducido, en el caso de unidades que quemen gases, debido a la ausencia de polvo (ceniza volante), que es propia de la combustión de carbón y de algunos aceites.

Un aleteado "helicoidal" típico lo constituye por ejemplo una hélice que tenga:

- 4 hilos por pulgada, es decir 4 pasos por pulgada (1 paso de 6,4 mm),
- Con un espesor de aleta de 0,060 a 0,075 in (1,5 a 1,9 mm).
- Con una altura de aleta de 0,75 in (19,1 mm).

Aplicado tal aleteado a tubos de 2 in (51 mm) de diámetro exterior, se obtiene una superficie efectiva de transmisión de calor igual a 10 veces la del tubo desnudo, por unidad de longitud tubular.

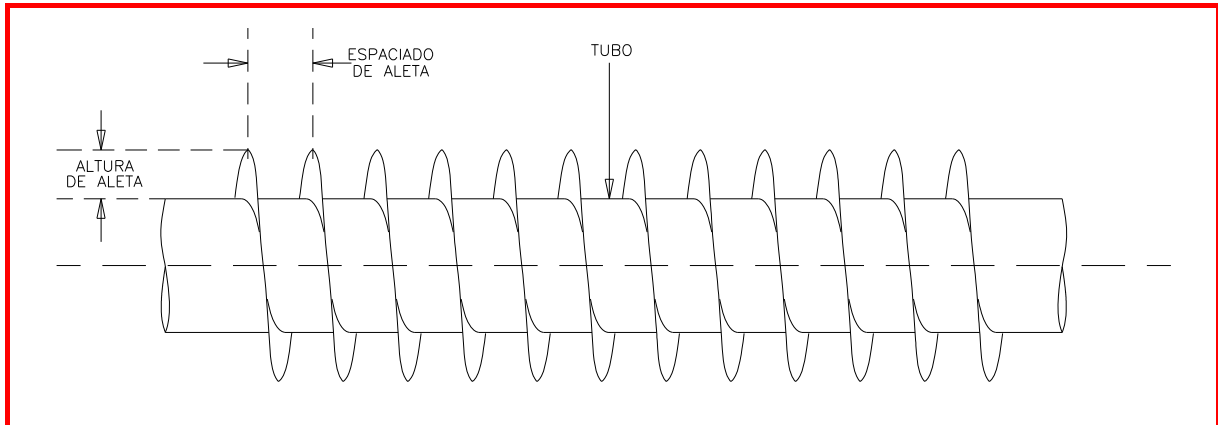


Figura 31. Tubo con aleteado helicoidal

Cuando se queman aceites pesados o carbones, las hélices deben tener pasos mucho mayores (menos hilos por pulgada), y hay que mantener las superficies de transmisión de calor tan limpias como sea posible.

Para unidades que queman aceites, el paso suele ser de 0,5 in (13 mm); con pasos menores (mayor número de hilos por pulgada) se suelen provocar obstrucciones, y con pasos superiores (menor número de hilos por pulgada) se reduce la superficie de transmisión de calor, referida a la unidad de longitud de tubo.

Para poder garantizar la limpieza de las superficies, se requieren sopladores y una limitación determinada en la altura del banco tubular, que suele situarse en unos 4,65 ft (1,2 ó 1,5 m) aproximadamente.

La disposición de tubos alineados es la que facilita más la limpieza y la que ofrece menos resistencia (caída de presión) del lado de humos.

- Aletas rectangulares

Las aletas rectangulares, que comprenden como caso particular las cuadradas, se disponen en planos individuales, paralelos entre sí y perpendiculares al eje tubular.

Cada aleta se compone realmente de dos mitades idénticas que se sueldan, respectivamente, a sendas semicircunferencias de una misma sección recta del tubo, adosándose por la parte exterior del mismo.

En consecuencia, cada aleta se configura con una ranura "meridiana", perpendicular al eje del tubo, que divide (separa) ambas mitades de la aleta completa según se representa en la figura 32.

Normalmente, este tipo de aleta se monta en bancos de tubos alineados y dispuestos horizontalmente, de modo que el flujo de humos (cruzado) es vertical y generalmente descendente, coincidiendo con la dirección de la ranura citada.

A título orientativo, el espaciado de aletas varía entre 0,5 y 1,0 in (13 y 25 mm) y el espesor de las aletas es de unos 0,125 in (3,18 mm).

La mayor aceptación de este tipo de aletas sobre economizadores se ha presentado en

unidades reconvertidas, es decir en unidades viejas que se han actualizado mediante el reequipamiento de algunos de sus componentes principales, como es por ejemplo el economizador.

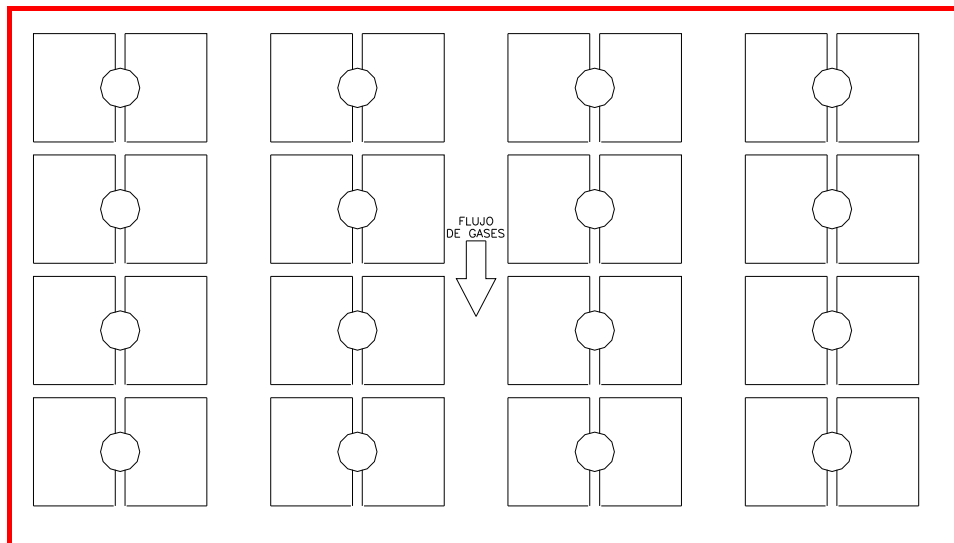


Figura 32. Aletas cuadradas

- Deflectores

Los bancos de tubos que configuran un economizador tienen sus tramos rectos unidos por curvas conformadas por la propia tubería en los extremos de aquellos. Y sólo en tales tramos rectos se instalan las superficies extendidas (aletas).

Por tanto, en los tramos curvos, en los que no cabe la instalación de aletas, se ofrece una sección de paso, para los humos, que resulta ser preferencial.

Para evitar que los humos bipasen (circunvalen) los tramos rectos aleteados, que ofrecen una sección de paso más restringida, se disponen unos tabiques deflectores que eviten la circulación de humos a través de las curvas (codos) citadas.

Estos tabiques deflectores se utilizan también para economizadores de tubos desnudos (de superficie exterior lisa), pero no resultan tan críticos como los que se requieren en el caso de tubos aleteados.

La circulación preferencial de los humos por el citado bipaso, a través de las curvas tubulares no aleteadas, provoca:

- Una reducción de la transmisión de calor en el banco o paquete de tubos que tiene la superficie extendida.
- Una elevación de la temperatura del cerramiento del espacio en el que se ubica la superficie de transmisión de calor del economizador.
- Una mayor erosión en las reiteradas curvas (o codos), especialmente en los casos en que se queman carbones altos en cenizas.

Límites de velocidad

El objetivo final del diseño de un economizador radica en lograr la necesaria transferencia de calor, con el mínimo coste posible.

Quizá, el criterio clave para el diseño corresponda a la máxima velocidad permisible en el banco o paquete tubular del economizador. Esta velocidad máxima permisible se define como la tolerable correspondiente a la sección mínima que ofrece el banco tubular al flujo nominal de los humos.

Es claro que las altas velocidades de humos mejoran las transferencias de calor, y en consecuencia permiten reducir los costes de inversión.

Cuando se queman combustibles limpios, como son los gases o los aceites con pocas cenizas, las velocidades se fijan con la máxima caída de presión que resulte justificable, desde el punto de vista económico.

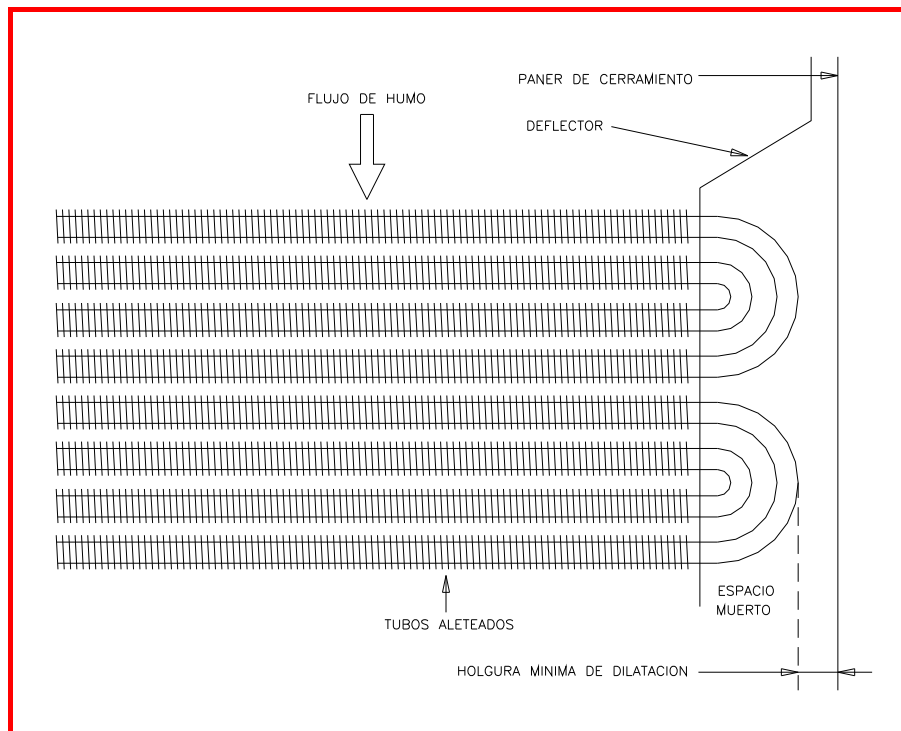


Figura 33. Protección de los codos mediante deflectores

En el caso de aceites pesados o de aceites con mucha ceniza, al igual que en el caso de carbones, las velocidades de humos hay que limitarlas, debido a los problemas potenciales de erosión derivados del polvo (ceniza volante) arrastrado y contenido por los humos.

Ante todo, la erosión depende mucho del contenido que tenga la ceniza en Al_2O_3 y SiO_2 , aunque también es evidente la dependencia entre dicha erosión y la cantidad total de ceniza, como también la velocidad máxima de humos.

En general, las velocidades máximas que resultan adecuadas y aceptables, para cada aplicación particular, se definen por la experiencia.

La limitación de velocidades esta presidida por diversos criterios adicionales. A título de ejemplo, se pueden citar:

- Cuando se quema carbón, con menos del 20 % de materias volátiles, se suele recomendar una velocidad límite básica, fijándola en el orden de 1,5 m/s.
- Para el caso de calderas que cuentan con los llamados "combustores ciclones" (hogar ciclón), por lo que se refiere a economizadores, se pueden utilizar mayores velocidades en humos, puesto que estos contienen menos polvo, porque la mayoría de la ceniza (siempre por encima del 50 %) se recoge como escoria, en la parte inferior de la caldera (en forma fundida).

Para una determinada disposición de tubos, y con una carga dada en la unidad, las velocidades de humos dependen solo de su volumen específico, que se reduce cuando se baja la temperatura de los mismos. Y, precisamente, los humos se enfrían conforme pasan a través del economizador.

El menor volumen específico, correspondiente a una menor temperatura, conduce a velocidad más baja, y por tanto a menores transferencias de calor.

Para mantener la velocidad de humos, a través de las distintas secciones del economizador, conviene diseñar concretamente el banco inferior con tubos de mayores diámetros, que reducirían la sección libre para el paso de los humos. De esta manera se puede mejorar la transferencia de calor, y por tanto requerir una menor superficie (menor inversión).

12.3. Otros tipos de economizadores

Economizadores de flujo largo

Existen algunos tipos de caldera industrial, que disponen de un economizador de flujo largo (de recorrido alargado y vertical). Este tipo de caldera se utiliza con cierta frecuencia en calderas de recuperación de plantas químicas.

Las superficies de calentamiento de estos economizadores de "flujo largo" se configuran con lotes de tubos verticales, aleteados longitudinalmente y formando los denominados "paneles membrana".

Por el interior de tales tubos circula, siempre en flujo ascendente, el caudal del agua de alimentación. Y, paralelamente, los humos circulan en sentido descendente, por el lado exterior de tubos y aletas.

De modo que, en el economizador de flujo largo se establece siempre una circulación en contracorriente pura.

En esos bancos tubulares, la transferencia de calor es algo menos eficiente que la que corresponde a los bancos de economizadores con flujos cruzados.

Sin embargo, los economizadores de flujo largo ofrecen siempre una mínima resistencia del lado de los humos.

Conviene resaltar que los productos de ensuciamiento (cenizas) se evacuan por medio de unas tolvas apropiadas, que se disponen en la parte inferior del cerramiento de la unidad.

Economizadores vaporizadores

Un economizador vaporizador se define como tal, cuando satisface la siguiente relación entálpica:

$$H_2 - H_1 \geq \frac{2}{3}(H_f - H_1)$$

H_2 = Entalpía fluido en salida economizador (hacia calderín).

H_1 = Entalpía fluido en entrada economizador (agua del ciclo).

H_f = Entalpía agua saturada (a presión salida de economizador).

En ciertas calderas, estos tipos de economizadores pueden resultar económicos. Pero en cualquier caso se requiere siempre: un diseño cuidadoso; un flujo que sea ascensional; y una salida (colector) a cota inferior a la del calderín de la unidad. De esta forma se impide el "golpe de ariete" y las excesivas "inestabilidades" que se pueden presentar en el flujo del fluido interior del economizador.

La relación entálpica precedente expresa la posible vaporización, dentro del banco tubular del economizador. Entre las posibles causas que pueden provocar la misma, hay que citar los desequilibrios entre flujos y las diferentes absorciones de calor, que son susceptibles de presentarse entre los distintos circuitos individuales.

Las unidades de alta presión, dotadas con calderín, son muy sensibles a aquellas causas, cuando la temperatura del agua del ciclo es muy próxima a la temperatura de saturación, correspondiente a la presión de operación.

De ahí que, para mejorar la circulación, la temperatura del agua de alimentación (la que va hacia el calderín) se limite a unos (28 °C) por debajo de la correspondiente temperatura de saturación.

12.4. Características funcionales

Transferencia calorífica

- Tubos desnudos

Para calcular la superficie de un economizador se pueden emplear las ecuaciones generales de transmisión de calor (Sección 1, Capítulo 4 “Heat Transfer” del libro “Steam its Generation and Use”).

En el caso del economizador que tiene circulación ascendente del agua y descendente de los humos, y que además carece de condiciones de vaporización, el banco tubular se puede considerar como ideal en cuanto a transferencia de calor, con las siguientes características:

1. El factor de corrección de la diferencia media logarítmica de temperaturas, para el referido banco tubular, será igual a 1,0.
2. El calor absorbido por un cerramiento constituido por paredes de tubos, así como el calor "radiativo intertubular" (el de radiación entre tubos), desde las diversas cavidades, se puede despreciar.
3. Toda la energía transportada por los humos se absorbe por el agua, es decir que no hay pérdidas de calor a través de los cerramientos.
4. El coeficiente de transferencia de calor, en el lado del agua, es normal mente del orden de 11.347 W/m²·K (2.000 Btu/ft²·h·F), y solo tiene una pequeña influencia global en las características funcionales del economizador a que nos referimos.
5. La influencia de la deposición de ceniza, del lado de los humos, se puede computar mediante un factor de limpieza basado en la experiencia.

En general, la velocidad de transferencia de calor, o flujo calorífico, se limita fundamentalmente del lado de humos, para el caso de bancos de tubos desnudos dispuestos en línea.

En este caso, el coeficiente global de transferencia de calor (desde humos hacia agua), que se utiliza para el cálculo, se puede estimar por medio de la relación siguiente:

$$U = 0,98(h_c + h_r) k_f$$

Donde:

U = Coeficiente global de transmisión de calor (W/m²K).

h_c = Coeficiente de transmisión de calor por convección lado humos, (W/m²K)

h_r = Coeficiente de transmisión de calor por radiación intertubular, (W/m²K), quemando carbón = 1,0

k_f = Factor efectividad superficie; para gas = 1,0; para aceites = 0,8; para carbón = 0,7.

- Tubos aleteados

Para economizadores con tubos aleteados, se pueden calcular las características funcionales de un modo similar al precedente, con solo utilizar las relaciones inherentes a superficies extendidas.

Por otro lado, como consecuencia de haber incrementado la transferencia de calor por el lado de humos (gracias al aleteado introducido), el coeficiente de transferencia y la resistencia

térmica de la pared tubular resultan mas importantes, y en consecuencia, hay que incluirlas en el calculo.

Como guía de carácter general, el coeficiente global de la transferencia de calor, para la mayoría de los tipos de aletas en economizadores, se puede estimar mediante:

$$U = 0,95 \cdot h_g \cdot k_f$$

Donde:

h_g = Coeficiente de transmisión de calor lado humos con tubos aleteados.

k_f = factor efectividad superficie; para gas = 1,0; para aceites = 0,8; para carbón = 0,7.

(En la Sección 2, Capítulo 21 “Performance Calculations” del libro “Steam its Generation and Use” se puede ver un ejemplo de cálculo de un economizador)

Resistencia del lado de humos

La caída de presión a través del banco tubular del economizador, en el lado de humos, se puede calcular mediante las relaciones que establece la dinámica de fluidos para el caso de los bancos de transmisión de calor con flujos cruzados.

En cualquier caso, tras el oportuno calculo, hay que" ajustar" dicha caída de presión, según sea el numero de filas de tubos atravesadas por los humos que configuran el economizador.

Como se sabe, estos ajustes se procesan por medio de unos determinados factores, cuyos valores concretos se pueden ver en la Sección 4, Capítulo 3 “Fluid Dynamics” del libro “Steam its Generation and Use”.

Cuando -se trata de bancos de tubos dispuestos en línea, y dotados de aletas, se puede establecer con carácter general que la resistencia del lado de humos, presentada por el economizador aleteado es igual a 1,5 veces la resistencia que corresponde a ese mismo paquete tubular configurado con tubos desnudos (lisos).

La caída de presión correspondiente al lado del agua se puede calcular por los métodos expuestos en la Sección 4, Capítulo 3 “Fluid Dynamics” del libro “Steam its Generation and Use”, en el que se determina la caída total ΔP_T por medio de la expresión siguiente:

$$\Delta P_T = \Delta P_f + \Delta P_l + \Delta P_s$$

ΔP_f = Caída de presión por fricción o rozamiento.

ΔP_l = Suma de pérdidas locales

ΔP_s = Pérdida de altura estática.

La presión de diseño es entonces la suma de la presión de diseño del calderín y de la perdida total ΔP_T . Esta presión diferencial suele ser de unos 1,7 bar.

Si la caída de presión en el lado del agua fuese excesiva, hay que aumentar el número de ramas en paralelo, para reducirla a un nivel aceptable. Y si la velocidad de humos es susceptible de aumentar, también podrá reducirse la caída de presión en el lado del agua con tubos de mayor diámetro interior, que suele estar disponible en el mercado en escalones diferenciales de 3 mm.

Conforme se discute en la Sección 4, Capítulo 3 “Fluid Dynamics” del libro “Steam its Generation and Use”, la caída dinámica es inversamente proporcional a la quinta potencia del diámetro interior del tubo. Esto es significativo y de mucha importancia para los casos de modernización de unidades.

A veces, también la actualización o puesta al día de materiales (por ejemplo, pasar del SA-210A1 al SA-210C) permite ir a menores espesores (óptimos) en tubos, que facilitan la modernización (re-equipamiento) de economizadores.

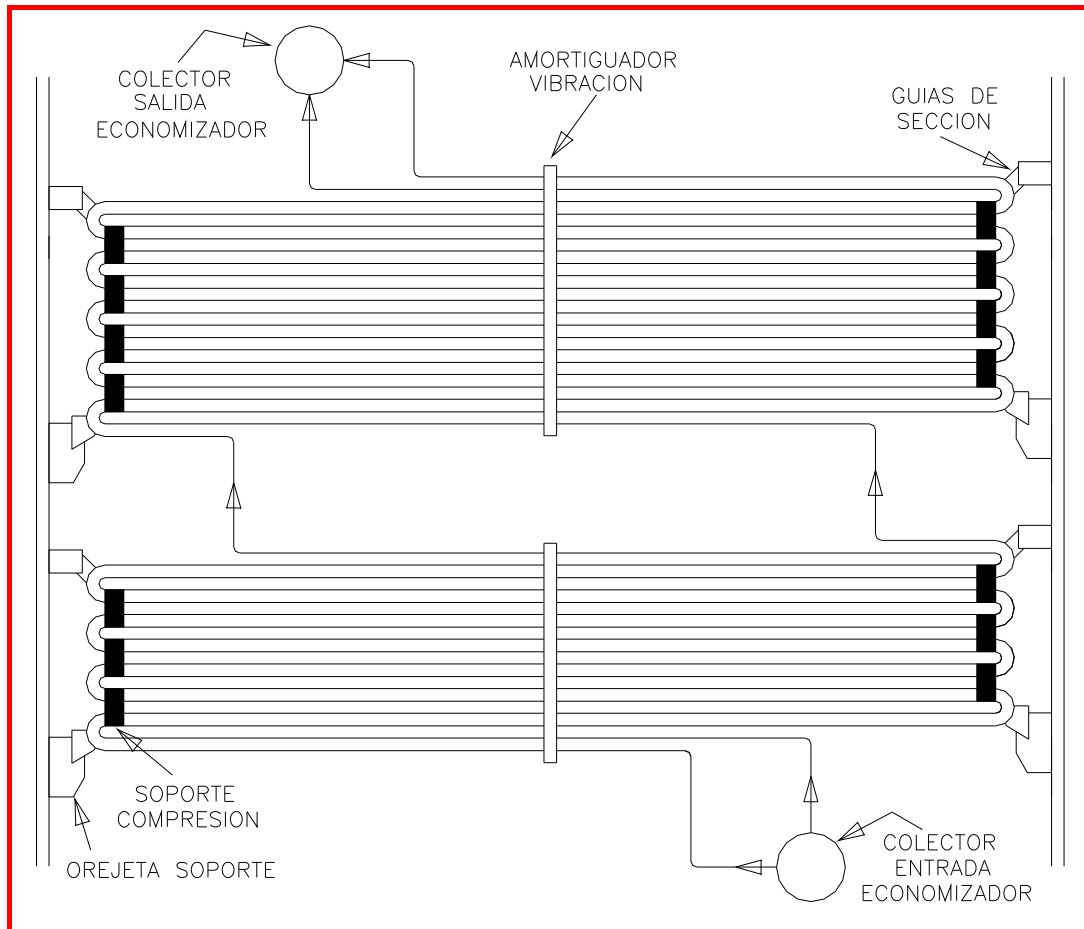


Figura 34.

12.5. Sistemas de soporte del economizador

Los economizadores se sitúan dentro de cerramientos (espacios) que tienen paredes tubulares o paredes de chapas, según sean las diversas temperaturas de humos. En general, las chapas se usan solo hasta temperaturas de 454 °C.

Cuando los aludidos cerramientos son de chapas, el economizador no puede soportarse en aquellos. Sin embargo, en el caso de cerramientos con paredes de tubos, si se deben utilizar estas para soportar el economizador.

Por lo general, todos los economizadores están colgados, es decir soportados desde puntos situados a cotas superiores a la del propio economizador.

Algunas veces, solo cuando la temperatura de humos que salen del economizador es suficientemente reducida, se pueden diseñar economizadores apoyados, o sea soportados en puntos de cota inferior a la del propio economizador.

De modo que, en lo que sigue, salvo indicación contraria, nos limitaremos a referirnos siempre a economizadores "colgados".

El número de soportes se determina con el análisis de la flecha (flexión) admitida, lo mismo para tubos individuales que para conjuntos tubulares.

La flecha tiene importancia desde el punto de vista de la durabilidad del material tubular. Y no debe olvidarse que, cuanto mayor sea la flecha admitida menos posibilidades hay de hacer frente a la ciclicidad, como consecuencia de la más alta fatiga inducida en cada uno de los ciclos.

Como los economizadores constan de un conjunto de tubos, con disposición alineada, es claro que el soportado de aquellos, en todo caso, implica siempre la utilización de estructuras del

tipo "rosario".

Las figuras 34 a 36 ilustran las disposiciones típicas de soportes para economizadores compuestos de tubos desnudos (lisos).

Los soportes en paredes exigen que los tubos queden soportados en sus extremos, de modo que, normalmente, se eligen para vanos relativamente cortos; y, además, en este caso, se necesitan fundaciones puente u orejetas individuales, soldadas o fijadas a los cerramientos de paredes tubulares (figura 34).

Hay otra posibilidad alternativa, para soportado del economizador en sus extremos, si los colectores de la pared del cerramiento (normal mente integrada en el circuito de vapor sobrecalentado) se encuentran situados a una cota superior a todo el economizador (por ejemplo, figura 35).

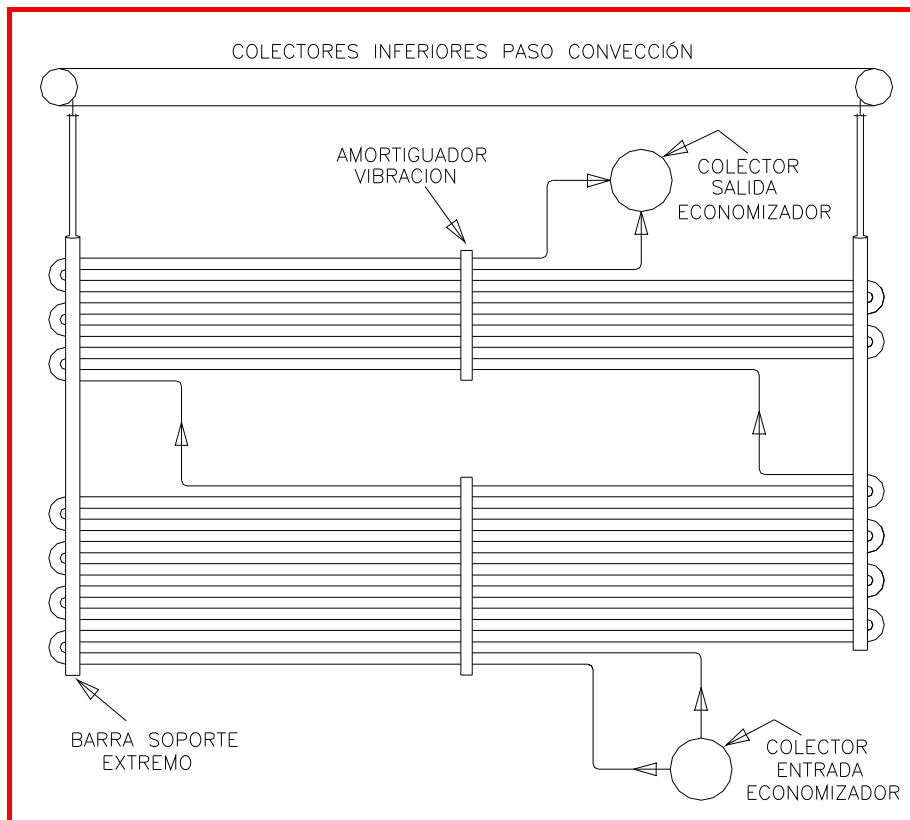


Figura 35.

Cuando los vanos rectos del banco tubular son grandes, los soportes -de tipo tirante- toman los tubos por los puntos situados a $1/4$ de la longitud tubular, computada desde los respectivos extremos (figura 36). Los soportes se conectan mecánicamente mediante una cadena o rosario de uniones, a los diversos tubos individuales o a las distintas secciones del economizador.

Los soportes quedan expuestos al flujo de humos que entra en el economizador, de modo que deben diseñarse con acero inoxidable, habida cuenta de la temperatura de tales gases en la sección de entrada al economizador. Sin embargo, es suficiente en el flujo de humos emplear materiales de calidad inferior, para los tirantes que soporten las secciones mas bajas del economizador, expuestos a temperaturas mucho mas moderadas.

En los diseños B & W, los tubos tirante soportan también otras superficies de transmisión de calores horizontales, que se encuentran en la zona de convección, aguas arriba del economizador, en el flujo de humos (figura 37).

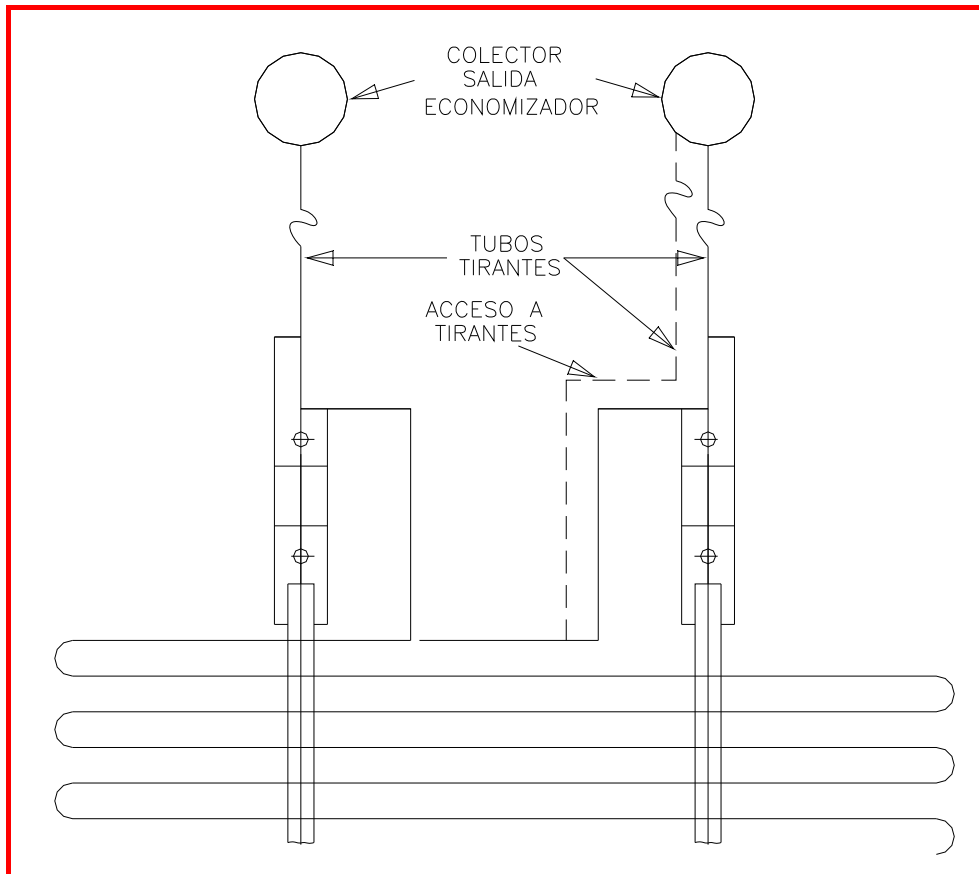


Figura 36.

12.6. Tamaño del banco tubular

El tamaño del banco tubular, que constituye el economizador de una unidad, se encuentra limitado por una serie de condicionantes, siendo los principales:

1. *Tipo de combustible*, como consecuencia de las diversas situaciones que se plantean al utilizar combustibles sólidos, líquidos y gaseosos, al menos desde el importante punto de vista de la limpieza.
2. *Limites de fabricación*, derivados de los máximos absolutos, en dimensión y en peso, que pueden manipularse en talleres y en la construcción de la planta.
3. *Alcance de los sopladores*, es decir la penetración que pueden lograr en el banco, desde el punto de vista de la limpieza.
4. *Máximas dimensiones para transporte*, condicionadas por la ruta a seguir durante el desplazamiento del equipo manufacturado, entre la fabrica y el lugar de emplazamiento de la planta.
5. *Consideraciones constructivas*, dimanadas de las peculiaridades del proyecto, por ejemplo cuando se trata de re-equipamientos de unidades en procesos de modernización.
6. *Mantenimiento, en cuanto a su facilidad y coste de ejecución*

En calderas nuevas, es raro encontrar profundidades de banco que superen la cifra de los 1,82 m.

Por el contrario, en el caso de actualizaciones (re-equipamientos) de unidades inmersas en procesos de modernización, se pueden admitir bancos con profundidades muchos mayores.

12.7. Necesidades de acceso

Alrededor de los bancos tubulares, y en particular de los que constituyen el economizador, se necesitan una serie de "cavidades" o "huecos" para:

- Poder realizar, ante todo, las soldaduras correspondientes de montaje, durante la construcción en el lugar del emplazamiento.
- Facilitar los trabajos posteriores de mantenimiento, en cada una de las diferentes ramas tubulares individuales.
- Disponer de espacio libre necesario, que se requiere por los sopladores para su operación durante el servicio de la unidad.

Para acceder a las distintas cavidades, hay que disponer de un número suficiente de puertas de acceso, en las paredes del correspondiente cerramiento.

El acceso a una determinada cavidad se puede dotar mediante diversos procedimientos, según sea el punto de partida para tal acceso:

- Desde el exterior del recinto, que limita el cerramiento, a través de una puerta individual específica; o bien
- Desde el interior, por medio de aberturas especiales, practicadas a través de los tirantes o de los bastidores de colectores.

La altura mínima de cualquier cavidad superará la cifra de 0,6 m, a modo de sótano bajo (sótano pequeño), en el que al menos se pueda reptar.

12.8. Colectores

Los diseños de colectores de economizadores, y en particular los de B&W, se ajustan al código de la American Society of Mechanical Engineers (ASME).

Los colectores de entrada se sitúan preferentemente en el interior del flujo de humos, y reciben el agua través de uno o ambos extremos.

Independientemente del diseño, es necesario sellar adecuadamente las penetraciones de la tubería de entrada y de salida del agua, por medio de las juntas estancas apropiadas, abrazaderas y flexibles. Este sellado es especialmente importante en el caso de unidades presurizadas (de tiro presurizado).

Otras consideraciones importantes son la flexibilidad de las diversas ramas tubulares, las expansiones diferenciales y los posibles desequilibrios y perturbaciones en las temperaturas de los humos.

Los colectores de salida, que no deben confundirse con los intermedios propios de las grandes unidades, reciben el agua de alimentación ya calentada y la dirigen hacia el calderín, o bien hacia los colectores que alimentan los diversos circuitos de las paredes del hogar en el caso de calderas de proceso directo o calderas de un paso (paso único).

Los colectores, tanto de entrada como de salida, han de ser lo suficientemente grandes, para asegurar una razonable distribución del flujo de agua, entre las diversas secciones ramales de los bancos tubulares.

Las velocidades del agua, en los economizadores, normalmente no suelen superar unos 6 m/s.

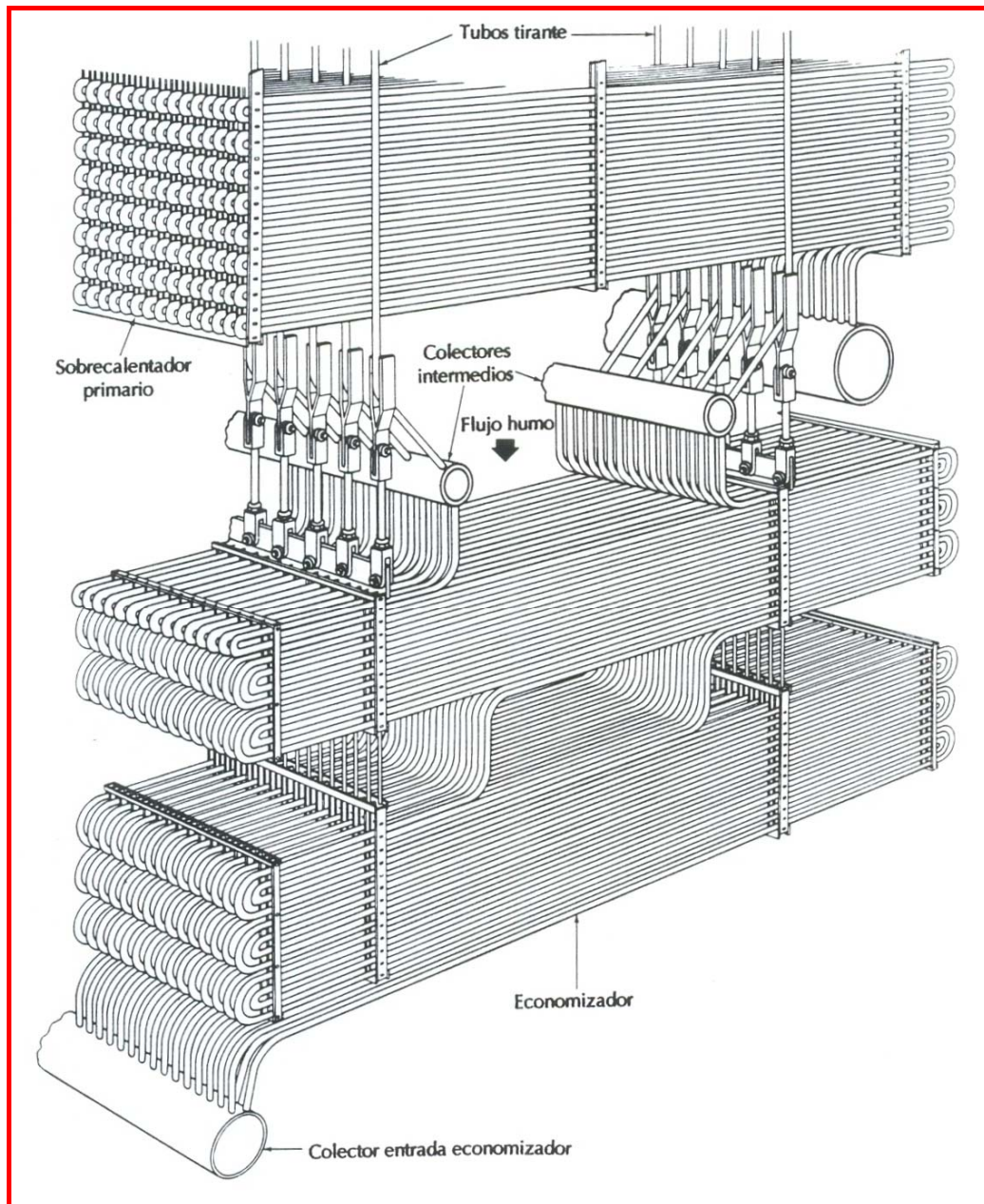


Figura 37. Disposición típica de un economizador.

12.9. Ligaduras contra vibraciones

Las sujeciones contra vibraciones, o guías de tubos, son enlaces mecánicos para restringir desplazamientos, que no son absolutamente rígidos, generalmente conseguidos por un "entrelazado de estructuras y de tubos.

Dichas ligaduras resultan imprescindibles, para algunas de las secciones del economizador, especialmente si están soportadas por sus extremos.

Estas ligaduras se pueden necesitar si las frecuencias naturales, dentro de la gama de cargas de caldera, están en resonancia (o bien son próximas) a la frecuencia propia vorticial de derrame.

Los tubos-tirante también pueden estar sometidos a vibraciones diversas, como consecuencia de la simple inmersión en el flujo de los humos, que se producen en la combustión, que es un fenómeno esencialmente vibratorio.

De todos modos, conviene destacar que los tubos-tirante ven ampliada la posibilidad de

vibración, como consecuencia de las grandes longitudes que tienen los citados tubos-tirante (no soportantes de cargas) que median entre las grandes cavidades existentes bajo el techo del paso de convección y los puntos de aplicación de las cargas soportadas.

12.10. Requisitos de geométricas. Materiales y códigos

Normalmente, los diámetros de tubos para economizadores están comprendidos entre 44,5 y 65,5 mm. Los diámetros que están fuera de este intervalo se usan, a veces, en casos de reequipamientos de unidades involucradas en procesos de modernización (actualización). En calderas supercríticas de un paso se emplean tubos menores, porque las calderas de presión tienen menos relevancia, con una circulación forzada; en estas unidades se minimiza el espesor correspondiente a la pared tubular.

El código ASME requiere que las temperaturas de diseño de las partes a presión, que se encuentran dentro de la unidad generadora de vapor, sean iguales o superiores a los 371 °C. La temperatura media calculada de la pared tubular, en el economizador, rara vez llega a esa cifra. Normalmente se encuentra entre 6 y 12 °C por debajo de la del fluido, que no suele pasar de los 343 °C, a lo largo del circuito del economizador.

El espesor mínimo de la pared tubular se calcula conforme a los métodos que se glosan en Sección 4, Capítulo 4 “Structural Analysis and Design” del libro “Steam its Generation and Use”.

En las calderas que queman carbón, el espaciado transversal entre tubos se elige de acuerdo con la velocidad y la resistencia máximas admitidas, en el lado de humos, que son parámetros que dependen del tamaño de tubos. Si se usan aletas (superficies extendidas), los espaciados laterales y verticales deben permitir, al menos, una separación entre aletas de 13 mm. Para tubos desnudos (lisos), conviene una holgura mínima, como espaciado, de 19 mm.

El mínimo espaciado vertical de los tubos debe ser 1,25 veces el diámetro exterior de los mismos. Con menores relaciones, la transferencia de calor puede reducirse hasta en un 30 %. Con relaciones superiores al citado 1,25 se afecta relativamente poco la transferencia de calor, pero aumenta la resistencia en el lado de humos y la profundidad del banco.