XIX.- CALDERAS, SOBRECALENTADORES Y RECALENTADORES

pfernandezdiez.es

Calderas de vapor	*695*
Calderas industriales de pequeña potencia	*697*
Caldera de hogar integrado y caldera Stirling	*697*
Grandes calderas energéticas, Carolina, El Paso,...	*701*
Diseño de calderas	*702*
Circulación natural, Proceso directo o paso único	*703*
Criterios de diseño generales	*705*
Superficie de cerramiento	*706*
Tamaño del hogar y requisitos del ciclo	*706*
Criterios de diseño del hogar	*708*
Influencia de la ceniza, hogar de ceniza sólida	*709*
Paredes refrigeradas por agua, superficie de convección de la caldera	*711*
Análisis del cálculo numérico aplicado a calderas	*713*
Modelización de las líneas de flujo de corriente de gases, y de la estequiometría local "combustible-aire"	*714*
Diseño de las partes a presión	*715*
Modelizaciones diversas cuando se modifica el sistema de aire	*716*
Soportes de caldera	*718*
Sobrecalentadores y recalentadores, ventajas	*719*
Tipos de sobrecalentadores	*719*
El sobrecalentador de convección y de radiación	*720*
Tamaño de los tubos	*721*
Diseño de sobrecalentadores y recalentadores	*722*
Metal de los tubos y soportes del sobrecalentador y del recalentador	*723*
Limpieza interior y exterior; espaciado entre superficies	*725*
Ajuste y control de la temperatura del vapor	*726*
Atemperación	*729*
Atemperadores de mezcla y de superficie, de simple etapa, doble, de dos etapas	*729*
Aplicación del atemperador en calderas de presión universal	*731*
Cortatiros de distribución de los gases	*731*
Recirculación de gases	*732*
Selección de quemadores	*735*
Hogares con diferentes caldeos	*736*
Sobrecalentadores autónomos	*736*
Sistema bipaso y puesta en servicio	*737*
Sistema bipaso de caldera con calderín	*737*
Cambio rápido de la carga y control de la presión del calderín y a la salida del sobrecalentador	*737*
Control de la temperatura del vapor recalentado y sobrecalentado	*740*
Puesta en servicio fría, templada y en caliente	*740*
Retirada de servicio	*741*
Funcionamiento a presión variable	*741*
Sistema de puesta en servicio de calderas de presión universal	*742*
Sistema de puesta en servicio a presión constante	*742*
Control de la temperatura del vapor y reducción de la sobrepresión	*744*
Sistema de puesta en servicio a presión variable	*745*
Válvulas de presión dual	*746*
Bipaso de sobrecalentador a condensador	*747*
Regímenes permisibles en los cambios de carga	*747*
Referencias	*749*

Los componentes de un generador de vapor moderno se disponen para absorber eficientemente el calor de los productos de la combustión y para suministrar vapor a la presión, temperatura y gasto másico especificados; comprenden la caldera, sobrecalentador, recalentador, economizador y calentador de aire; éstos equipos se complementan con sistemas separadores *agua-vapor* y para el control de la temperatura de salida del vapor.

El conjunto de la caldera se divide en dos partes: $\begin{cases} \text{- } hogar \\ \text{- } paso\ de\ convección \end{cases}$

- El hogar es un amplio volumen abierto en el que tiene lugar la combustión, con paredes de cerramiento refrigeradas por agua y vapor, y donde se refrigeran los productos obtenidos en el proceso, hasta lograr la temperatura adecuada de los gases a la salida del hogar

- El paso de convección está conformado por bancos de haces de tubos que configuran el sobrecalentador, el recalentador, el banco de caldera y el economizador

Normalmente, al paso de convección le sigue el equipo recuperador o calentador de aire.

La caldera incluye: $\begin{cases} \text{- } las\ paredes\ de\ cerramiento\ del\ hogar \\ \text{- } el\ calderín\ de\ vapor\ y\ el\ equipo\ separador\ de\ vapor\text{-}agua \\ \text{- } el\ banco\ de\ caldera\ tubular \\ \text{- } las\ tuberías\ de\ interconexión\ (bajantes,\ ascendentes\ y\ alimentadoras) \end{cases}$

XIX.1.- CALDERAS DE VAPOR

Aunque el término caldera comprende el sistema total de generación de vapor, el concepto superficie de caldera excluye la del economizador, la del sobrecalentador, la del recalentador y la de cualquier otro componente que no esté comprendido en el propio sistema de circulación *agua-vapor*; por lo tanto, la superficie de la caldera es el conjunto de tubos, calderines y recipientes que forman parte del sistema de circulación de la mezcla *agua-vapor*, y que están en contacto con los gases calientes.

Las calderas se pueden clasificar en tres grandes grupos de: $\begin{cases} \text{- } vasija \\ \text{- } tubos\ de\ humos\ o\ pirotubulares \\ \text{- } tubos\ de\ agua\ o\ acuotubulares \end{cases}$

Las calderas modernas de elevada capacidad, potencia y presión, son siempre acuotubulares; en ellas, los flujos de agua y vapor circulan por el interior de los tubos, mientras que los gases calientes lo hacen por el exterior.

El sistema de circulación de la caldera está constituido por tubos, colectores y calderines, conectados de forma que el flujo de agua que circula para generar el vapor, refrigere a la vez todos los componentes. La caldera acuotubular ofrece una mayor versatilidad en la disposición de sus componentes, lo que facilita un aprovechamiento más eficiente del hogar, del sobrecalentador, del recalen-

tador y de todas las superficies termointercambiadoras.

El tamaño de la caldera depende de la producción de vapor, desde $\begin{cases} 1000 \div 10.000.000\ lb/h \\ 0{,}13 \div 1260\ kg/s \end{cases}$, y presiones desde 1 atm hasta valores superiores a la crítica.

La configuración de la caldera viene determinada por: $\begin{cases} \text{- } el\ sistema\ de\ combustión \\ \text{- } el\ combustible \\ \text{- } las\ características\ de\ la\ ceniza \\ \text{- } la\ presión\ de\ operación \\ \text{- } la\ capacidad\ de\ generación\ de\ vapor \end{cases}$, viniendo indicadas algunas configuraciones en las Fig XIX.1 a 5.

CALDERAS INDUSTRIALES DE PEQUEÑA POTENCIA

Caldera de hogar integrado.- Es una caldera modular de baja presión, tiene dos calderines y quema aceite y gas, Fig XIX.1. Para bajas potencias se puede montar completamente en taller y enviarla luego hasta su lugar de destino; como quema combustibles limpios, no hay necesidad de prever medios para la captación de cenizas o para la limpieza de superficies termointercambiadoras.

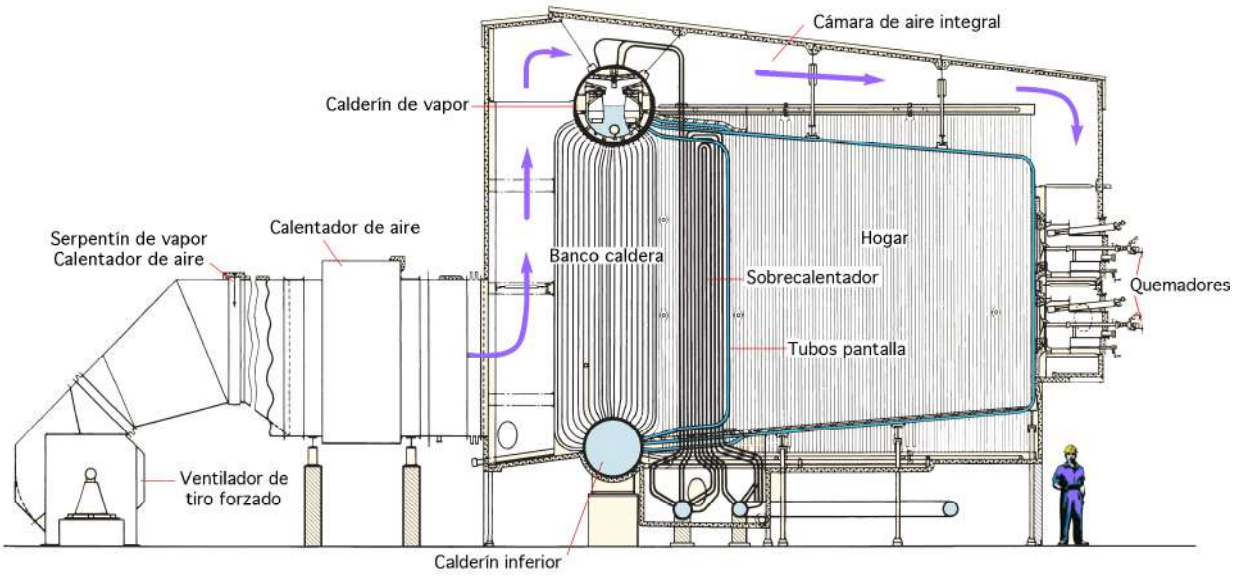
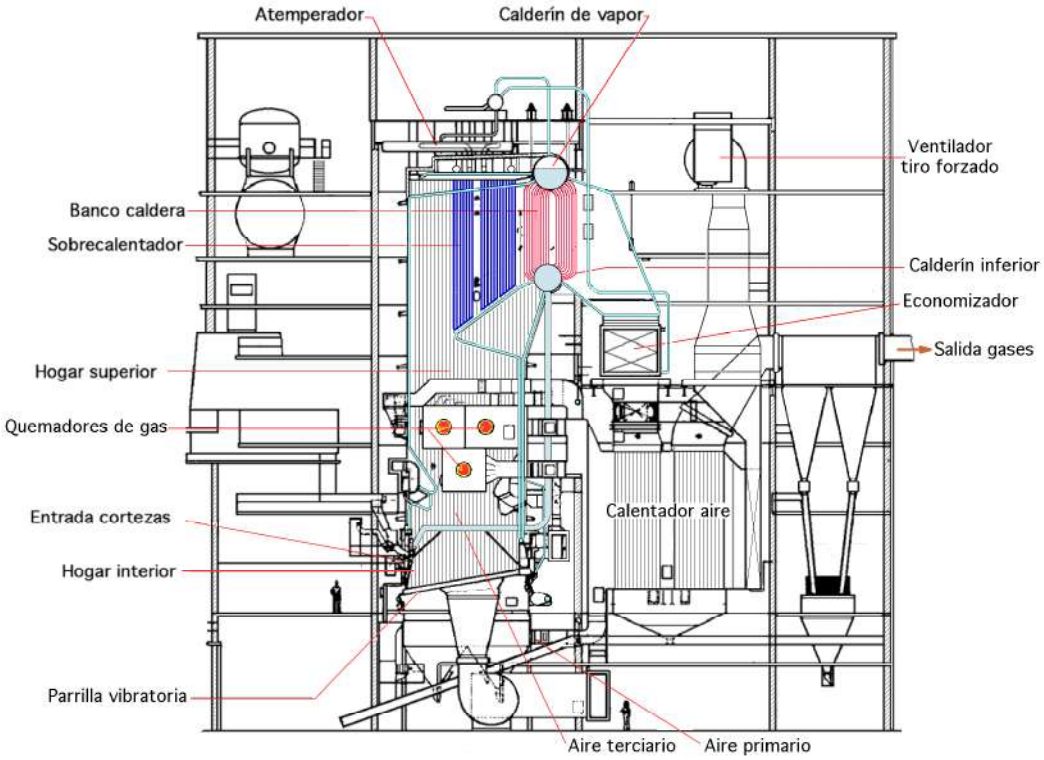


Fig XIX.1.- Caldera industrial de hogar integrado para quemar aceites y gases

Para lograr la potencia de vaporización, la superficie termointercambiadora está constituida por un banco tubular configurado por tubos poco espaciados entre sí, que se extienden entre un calderín de vapor superior y otro inferior.

Caldera Stirling.- Consta de dos calderines, y está dotada de un hogar con zona de combustión controlada, diseñada para la combustión de maderas con alta humedad, y de biomasa, Fig XIX.2; está dotada de un sistema de parrilla mecánica (hogar mecánico) y de un banco de caldera con gran superficie de generación de vapor.

Otros diseños singulares incluyen calderas { *- de lecho fluidificado*; *- de recuperación de calor de procesos*; *- para obtener energía de las basuras*



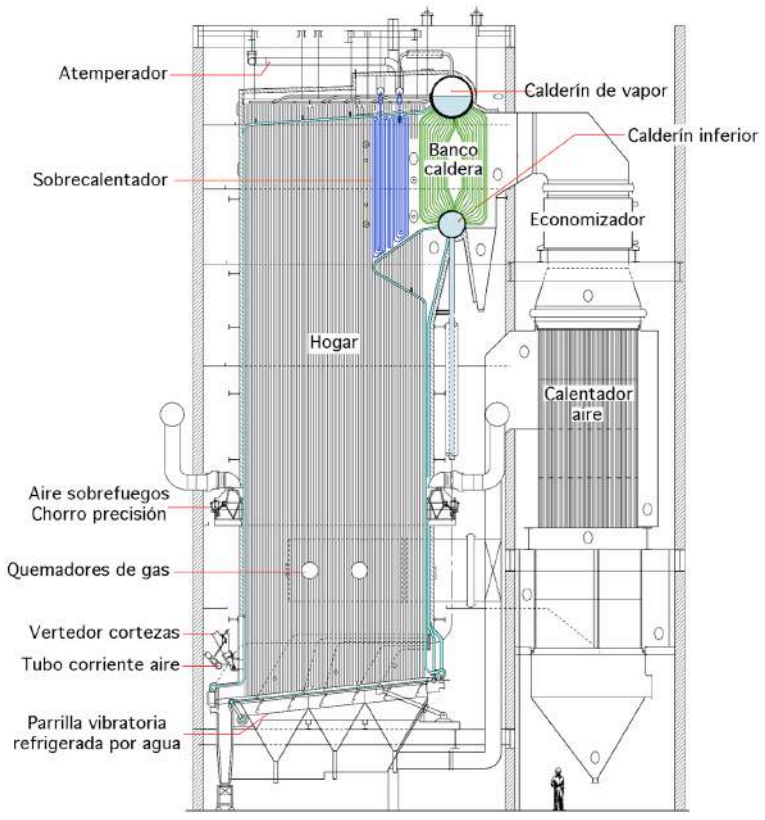


Fig XIX.2.- Calderas energéticas Stirling de dos calderines con hogar mecánico para quemar cortezas

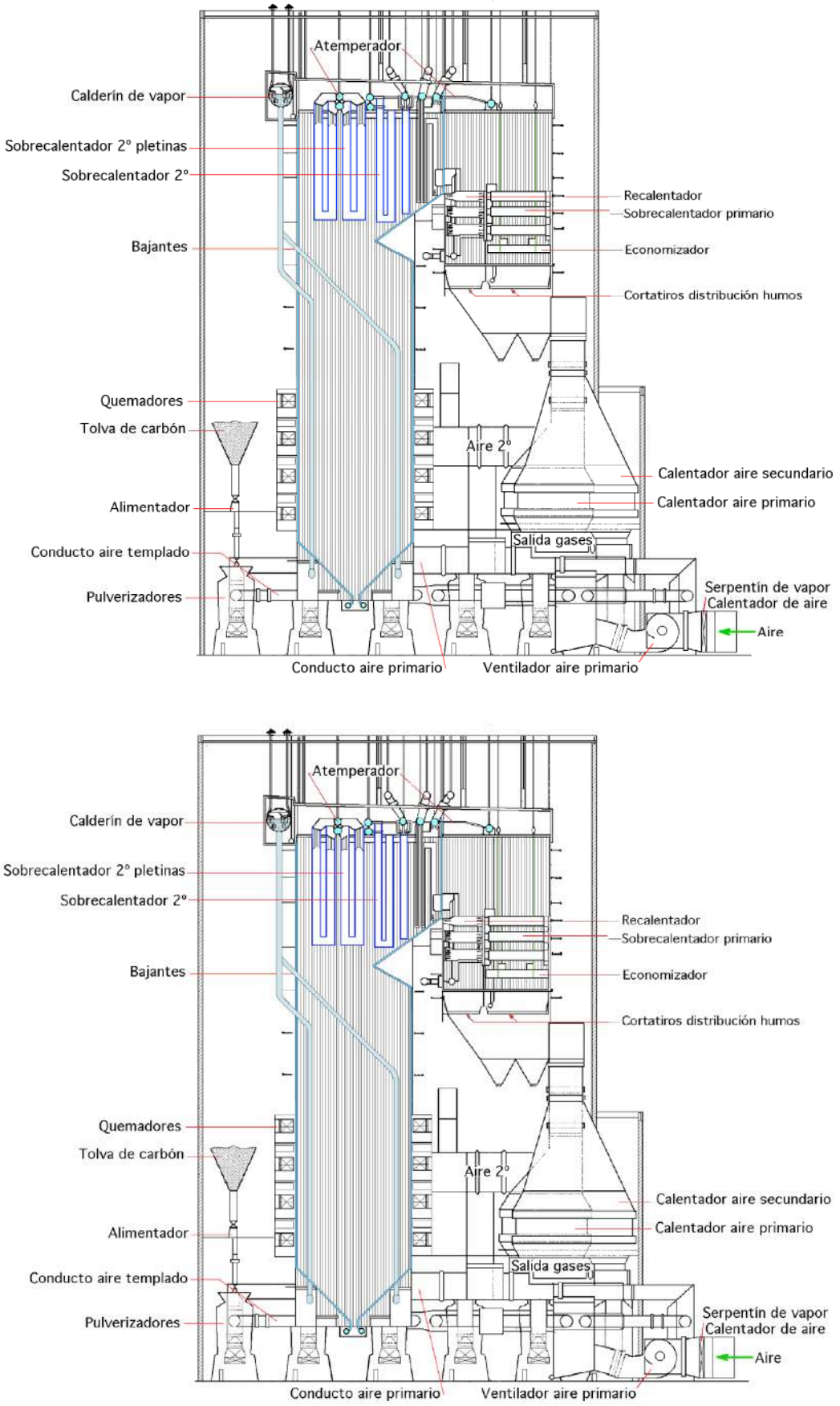
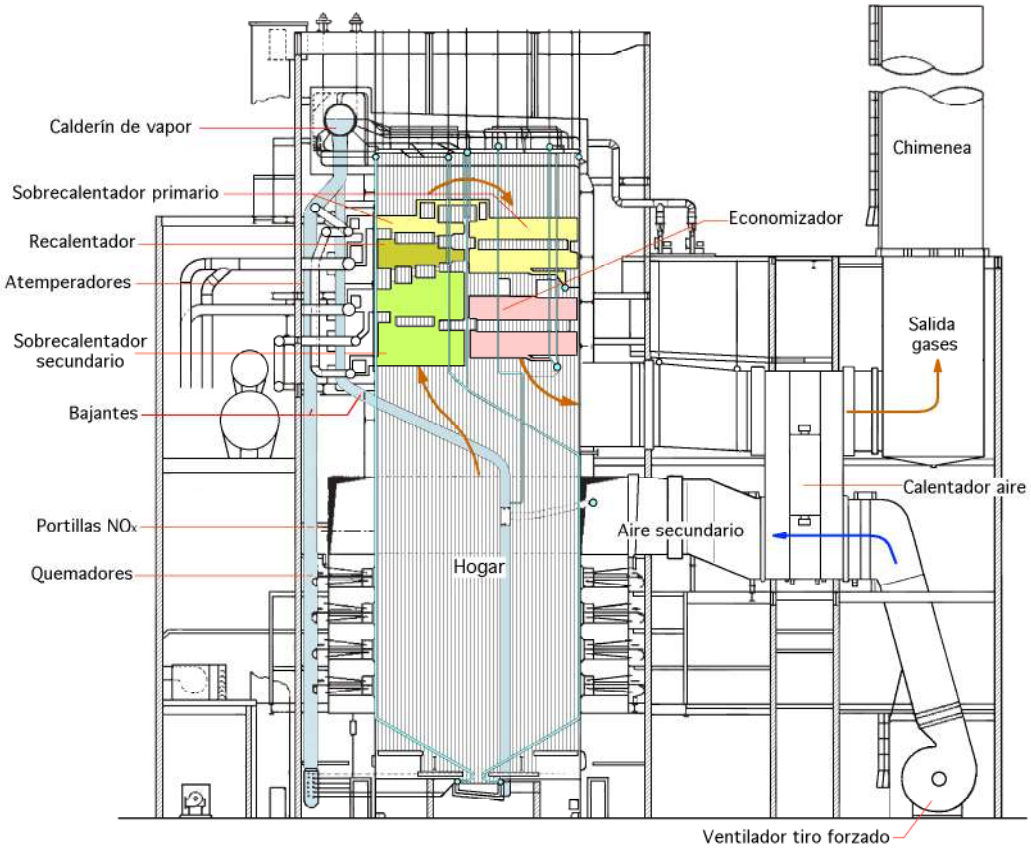


Fig XIX.3.- Calderas radiantes tipo Carolina que queman carbón pulverizado (RBC)
Presión de diseño 2975 psig (205,1 MPa); temperatura de sobrecalentamiento y recalentamiento del vapor 1005°F (541°C);
a) Capacidad de 6.600.000 lb vapor/h (832 kg vapor/seg). b) Capacidad de 4.800.000 lb vapor/h (617 kg/seg)



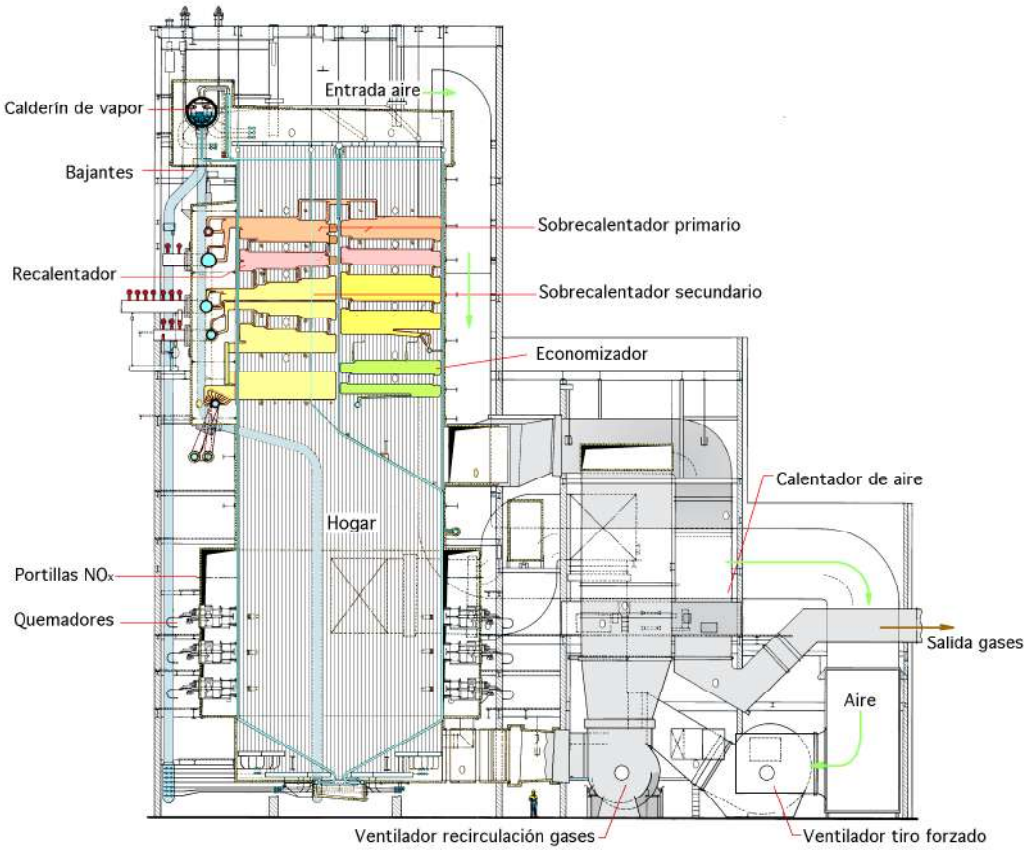


Fig XIX.4.- Calderas radiantes tipo El Paso que queman gas natural (RBE). Presión de diseño 1800 ÷ 2600 psig (12,4 ÷ 17,9 MPa); Temperatura de sobrecalentamiento y recalentamiento del vapor 1000 ÷ 1050°F (538 ÷ 566°C); Capacidad de vapor a la salida 70.10^5 ÷ 7.10^6 lb/h, (88 ÷ 880 kg/seg)

GRANDES CALDERAS ENERGÉTICAS.- Las Fig XIX.3 y 4 representan tipos de calderas radiantes, para sistemas de generación de vapor en caldera con calderín y circulación natural, tipos Carolina (RBC) y El Paso (RBE), respectivamente.

a) La *caldera radiante tipo Carolina*, Fig XIX.3, quema carbón pulverizado en lecho suspendido:

- *tiene un flujo de gases descendente en el paso posterior de convección*
- *minimiza la altura del generador de vapor*
- *incluye sopladores para la limpieza de las superficies termointercambiadoras*
- *incluye medios para la captación de la ceniza*

La *caldera radiante tipo El Paso*, Fig XIX.4, quema aceite y gas; es una unidad muy compacta, debido a los combustibles relativamente limpios que utiliza, lo que minimiza la superficie de la planta; se pueden prever medios selectivos para la limpieza del equipo.

b) Las calderas de presión universal diseñadas para proceso directo (flujo de paso único), pueden ser de presiones supercríticas o subcríticas.

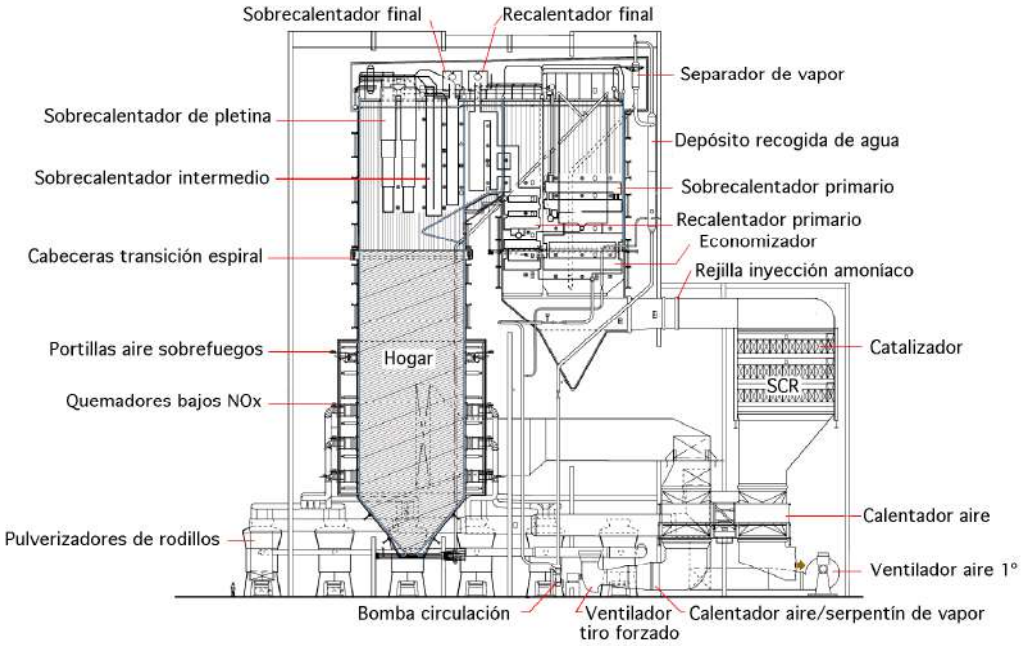


Fig XIX.5.- Caldera de presión variable de 750 MW , que quema carbón pulverizado. Presión de diseño 3825 psig (26,4 MPa) Temperaturas del vapor sobrecalentado 1054°F (568°C) y recalentado 1105°F (596°C) Capacidad de 5.000.000 libras de vapor/h (630 kg de vapor/s).

La Fig XIX..7 es una unidad de presión supercrítica de 1300 MW que quema carbón pulverizado y utiliza tubos verticales en las paredes del hogar; estas calderas se suministran con simple o doble recalentamiento y se construyen con estanqueidad del lado de los gases.

Las paredes, suelos y techos son de cerramiento total refrigerados por agua, y están configurados mediante paneles membrana completamente soldados.

El diseño de la circulación en una unidad de proceso directo elimina la necesidad de incorporar un calderín de vapor; los múltiples circuitos del flujo que circula minimizan los desequilibrios de temperatura que se pueden originar como consecuencia de un aporte calorífico no uniforme entre diversos puntos de la periferia del hogar. Existen diseños de calderas de presión universal de proceso directo para presiones subcríticas, con hogares que disponen de una circulación del fluido de trabajo *agua-vapor*, en espiral, Fig XIX.6.

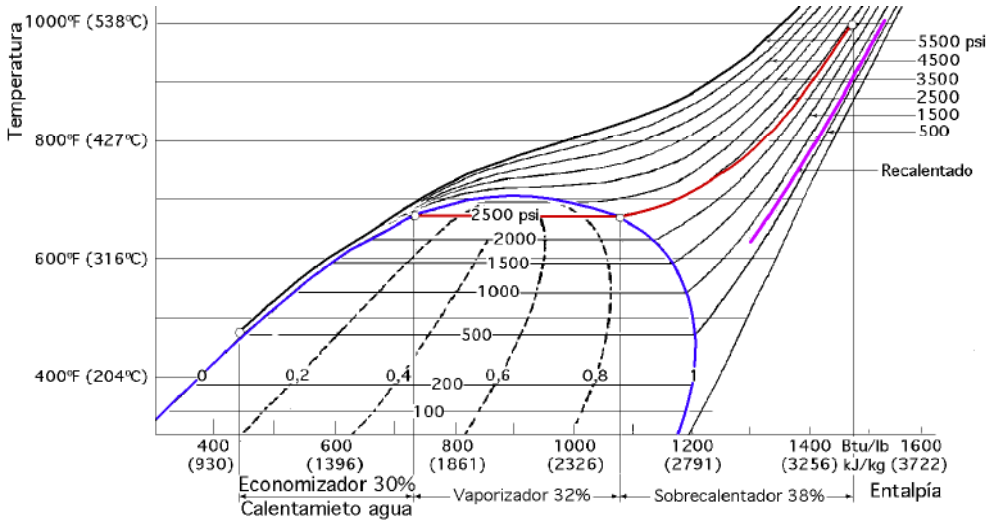


Fig XIX.6.- Diagrama (Temperatura-entalpía), para absorción en caldera subcrítica con una sección de calentamiento

Diseño de calderas.- El diseño de calderas modernas está influenciado por la:

- *Eficiencia de la caldera y del ciclo térmico*
- *Fiabilidad y los costes de inversión y de operación*
- *Protección medioambiental*

Todas las unidades comparten un determinado número de elementos fundamentales, sobre los que se basa el diseño para cada ubicación y aplicación.

La evaluación de una caldera comienza por la identificación de las necesidades globales de la aplicación, que se relacionan en la Tabla XIX.1, las cuales se seleccionan mediante un proceso iterativo, que tiene en cuenta
- *La inversión*
- *El coste de operación (especialmente de combustible)*
- *Las necesidades de vapor*
- *La experiencia de operación*

Para evaluar la caldera, el diagrama temperatura-entalpía, Fig XIX.7, para una unidad de AP y recalentamiento simple, facilita una importante información para el diseño de la unidad.

En este ejemplo, la absorción de calor para
- *el calentamiento del agua del ciclo es el 30%*
- *la vaporización es el 32%*
- *el sobrecalentamiento posterior es el 38%*

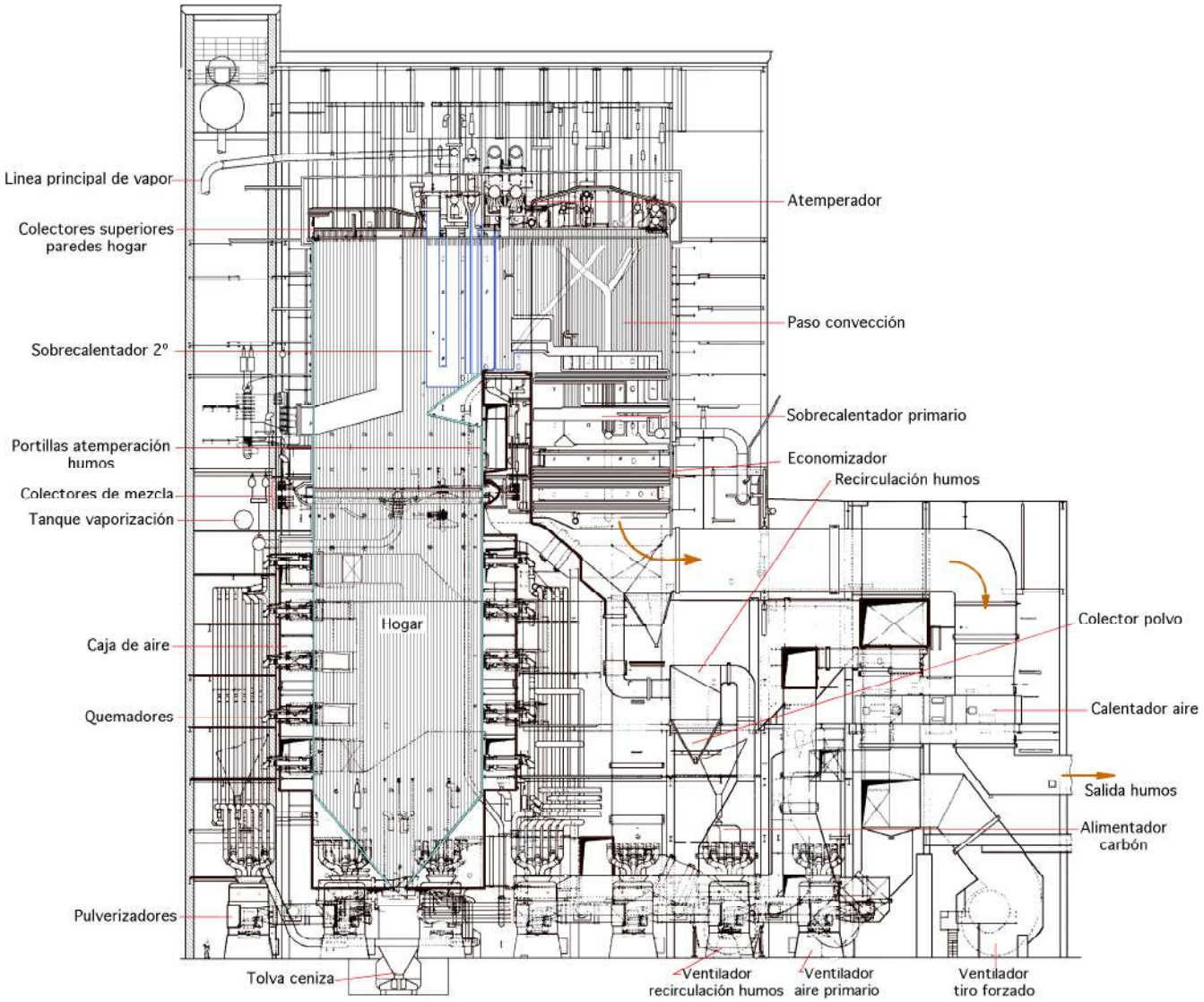


Fig XIX.7a.- Generador de vapor Zimmer de carbón pulverizado para planta energética de 1300 MWe.- Cincinnati G&E/Dayton P&L/AEP-Columbus Southern Power.- Presión de salida 26,5 MPa; temperatura vapor 543°C/538°C (año 1990)

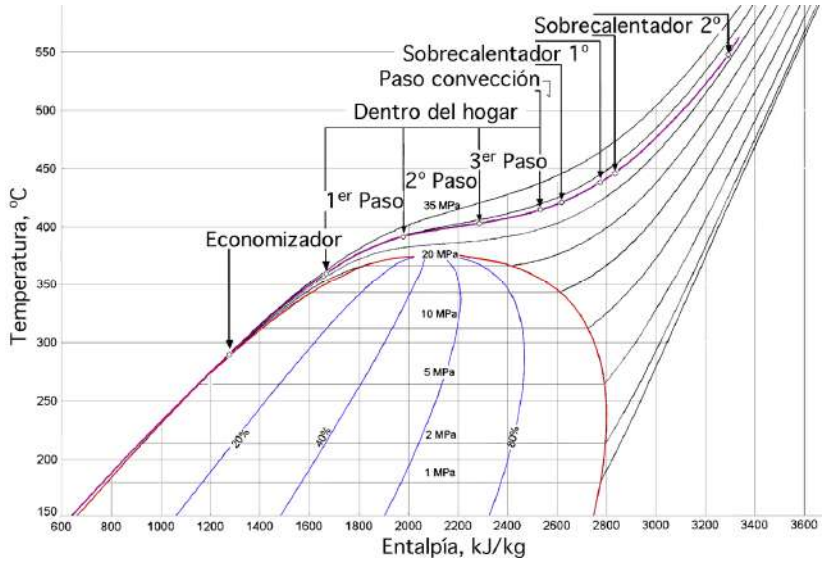


Fig XIX.7b.- Diagrama T-s para la caldera Zimmer de 1300 MWe

Tabla XIX.1.- Especificaciones empíricas para el diseño de calderas

ESPECIFICACIÓN	*COMENTARIOS*
Utilización del vapor	*Valores de caudal, presión y temperatura. Para calderas de servicio público, para determinado ciclo energético y para el balance térmico de la turbina*
Tipo y análisis de combustible	*Características de combustión, ensuciamiento y escorificación, análisis de ceniza, etc.*
Suministro de agua de alimentación	*Procedencia del agua, análisis y temperaturas de entrada al economizador*
Límites de caídas de presión	*Lado de gases y lado de vapor*
Reglamentación gubernamental	*Incluso requisitos de control de emisiones*
Factores específicos de la ubicación	*Características geográficas y estacionales*
Utilización del generador de vapor	*Carga base, ciclicidad, etc.*
Preferencias del comprador	*Directrices específicas del diseño: Condiciones de flujo, preferencias de equipo y eficiencia del generador de vapor*

Para ciclos con presiones de operación supercríticas, se puede añadir un segundo recalentamiento intermedio del vapor que incrementa la absorción total de calor en un 20%.

Para aplicaciones industriales pueden ser suficientes las etapas correspondientes al calentamiento del agua del ciclo y a la vaporización.

Las calderas se pueden diseñar para presiones de operación subcríticas o supercríticas:

- A presiones subcríticas, el cerramiento del hogar está refrigerado por el agua de la caldera a temperatura constante; los circuitos de flujo se diseñan para asumir el $\begin{cases} \text{- flujo en dos fases agua-vapor} \\ \text{- fenómeno de la vaporización} \end{cases}$

- A presiones supercríticas, el agua actúa como un fluido de fase única, con un continuo incremento de la temperatura, conforme pasa por la caldera

Estos diseños tienen que evitar desequilibrios en la temperatura del metal, causados por las variaciones en la absorción de calor en los distintos circuitos de flujos, utilizándose dos sistemas básicos de circulación del fluido en la caldera $\begin{cases} \text{- circulación natural} \\ \text{- proceso directo o paso único} \end{cases}$

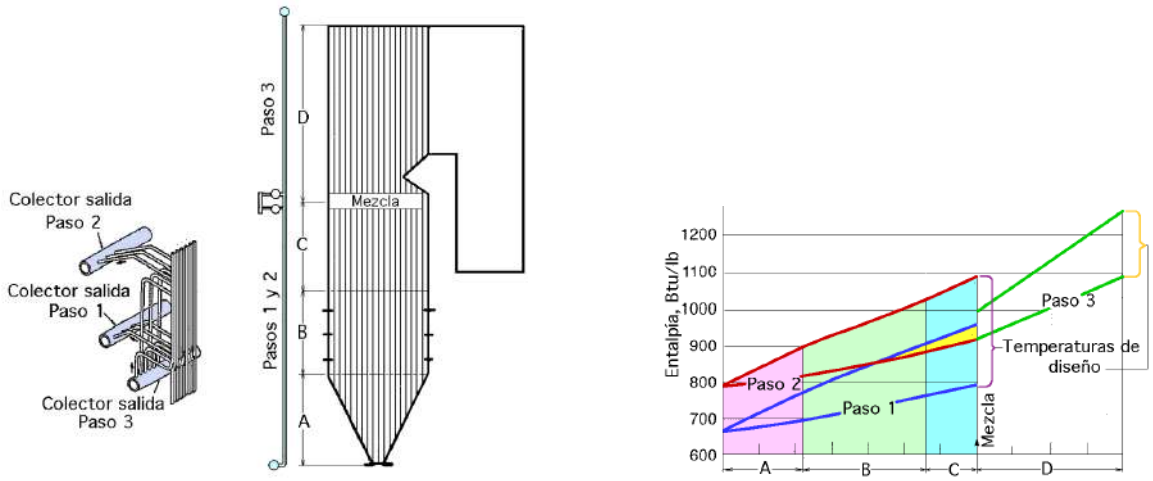


Fig XIX.8.- Disposición de un hogar caldera supercrítica UP

Circulación natural.- Es consecuencia de la diferencia de densidades entre las zonas calientes y frías del circuito. En los sistemas de circulación natural que operan a presiones subcríticas, el agua se vaporiza sólo parcialmente en los circuitos de la caldera, produciendo una mezcla *agua-vapor* a la salida de los tubos. El equipo de separación de la mezcla *agua-vapor* se incluye para separar el vapor del agua, con el fin de suministrar vapor saturado seco al sobrecalentador y reciclar el agua a los circuitos de la caldera. Los límites aceptados en la química del agua, a nivel industrial, son menos rigurosos a bajas presiones; la caída de presión del fluido *agua-vapor* en el interior de los tubos, suele ser menor que la de diseño.

Proceso directo o paso único.- En este diseño se eliminan el calderín de vapor y el equipo interno de separación del vapor, y se añade un sistema diferente de puesta en servicio. Las calderas de proceso directo o paso único de presión universal se diseñan para operaciones subcríticas y supercríticas. A presiones supercríticas, el sistema puede incrementar la eficiencia global del ciclo energético, a base de una mayor inversión, ya que se necesita una operación más precisa y un tratamiento de agua más riguroso.

CRITERIOS DE DISEÑO GENERALES.- Los puntos a tener en cuenta en el diseño de una caldera son:

a) Definir el aporte de energía teniendo presente:
- *los requisitos de los flujos de vapor*
- *la temperatura del agua de alimentación del ciclo*
- *la eficiencia térmica supuesta de la caldera*

b) Evaluar la absorción de energía que se necesita en la caldera y en los demás componentes de intercambio térmico

c) Realizar los cálculos de combustión para establecer los flujos de combustible, aire y gases

d) Determinar la forma y el tamaño del hogar, teniendo en cuenta la ubicación y necesidades de espacio de los quemadores y sistemas de combustión, incorporando el volumen de hogar suficiente para lograr la combustión completa y bajas emisiones. Hay que prever medios para manipular la ceniza contenida en el combustible y para enfriar los gases, de forma que la temperatura de gases a la salida del hogar satisfaga los requisitos de diseño

e) Determinar la situación y configuración de las superficies de calentamiento por convección. El sobrecalentador y el recalentador se ubican donde la temperatura de los gases sea lo suficientemente alta que permita producir una transferencia de calor efectiva, pero no tanto como para que se puedan producir temperaturas excesivas en los tubos o ensuciamientos por ceniza. Las superficies de convección se diseñan para minimizar el impacto debido a la acumulación de ceniza y para permitir la limpieza de superficies sin erosión de las partes a presión

f) Instalar la suficiente superficie de caldera que permita generar el resto de vapor que no se produzca en las paredes del hogar, lo que se debe cumplimentar con o sin economizador

g) Instalar un cerramiento de caldera estanco a gases, alrededor del hogar, caldera, sobrecalentador,

recalentador y economizador

h) Diseñar los soportes de las diferentes partes a presión y del cerramiento, para hacer frente a la expansión y a las condiciones locales, incluyendo cargas debidas al viento y a terremotos

Los sistemas de calderas se diseñan para determinados combustibles; cuando se queman otros de características distintas a las del combustible de diseño, se presentan con frecuencia problemas en la combustión, escorificación, ensuciamiento, manipulación de la ceniza, etc.

Superficie de cerramiento.- El hogar de una gran caldera que quema carbón pulverizado, gasóleo o gas, es un gran volumen delimitado por un cerramiento, en el que tiene lugar la:

- Combustión del combustible

- Refrigeración de los gases de combustión antes de que éstos penetren en los bancos tubulares del paso de convección

Una temperatura excesiva de los gases que entran en los bancos de tubos de convección, puede provocar en los tubos $\begin{cases} \text{- elevadas temperaturas} \\ \text{- un ensuciamiento} \\ \text{- una escorificacin inaceptables} \end{cases}$

La transferencia de calor a las paredes del cerramiento del hogar, tiene lugar por radiación; estas paredes pueden estar refrigeradas por agua $\begin{cases} \text{- en proceso de vaporización (a presión subcrítica)} \\ \text{- a alta velocidad (a presión supercrítica)} \end{cases}$.

El cerramiento de la zona de convección contiene los pasos de gases horizontales y verticales descendentes, en los que se localiza la mayor parte de la superficie del sobrecalentador, recalentador y economizador; las superficies del cerramiento pueden estar refrigeradas por agua o por vapor.

Los cerramientos del hogar y paso de convección están conformados con una construcción tipo pared membrana totalmente soldada, con tubos refrigerados por agua.

Estos cerramientos se construyen también con tubos en contacto (uno junto al otro), o con tubos muy poco espaciados dotados de una envolvente interna estanca a los gases. En el caso de una pared membrana:

- Los tubos de la pared y de las superficies membrana del lado del hogar (envolvente interna) están expuestos al proceso de combustión

- El aislamiento y la envolvente exterior $\begin{cases} \text{- protegen la caldera del medio ambiente} \\ \text{- minimizan las pérdidas de calor} \\ \text{- preservan de daños al personal} \end{cases}$

Tamaño del hogar y requisitos del ciclo.- El cerramiento del hogar constituye gran parte de la superficie generadora de vapor de la caldera, facilitando el:

- *Volumen necesario para la combustión completa*
- *Medio de enfriamiento de los gases de combustión hasta una temperatura aceptable a la salida del hogar*

En las unidades que queman carbón, el volumen mínimo del hogar se fija para lograr una determinada temperatura en la ceniza del combustible, a la salida del mismo.

La Fig XIX.9 indica la influencia del ciclo de vapor, su presión y temperatura, en la absorción de energía entre $\begin{cases} \text{- } caldera/economizador \\ \text{- } sobrecalentador/recalentador \end{cases}$

Al aumentar la presión y temperatura del vapor, para una producción energética dada, la absorción total de la unidad decrece progresivamente como consecuencia de la mayor eficiencia del ciclo. La absorción de la *caldera/economizador* representa el calor aplicado al agua de alimentación entrante en la caldera, para producir vapor saturado, o para alcanzar el punto crítico en una caldera de presión universal supercrítica de proceso directo o de un paso.

Al aumentar la presión de la operación, la cantidad de calor requerida para producir vapor saturado disminuye, mientras que para el *sobrecalentador/recalentador* aumenta. La variación de la absorción requerida al modificarse la presión de la *caldera/economizador* no es significativa; una variación en esta absorción de un 1% equivale a un desvío de unos 10ºF (6ºC) en la temperatura del vapor sobrecalentado o del vapor recalentado.

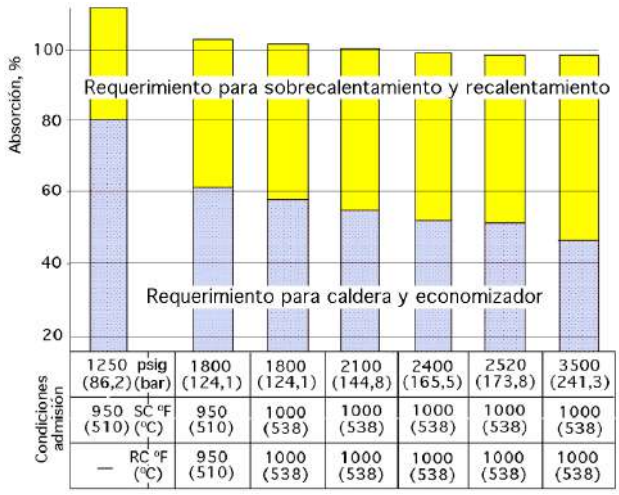


Fig XIX.9.- Absorción de calor en %, según la presión de operación y la temperatura del vapor

En unidades de baja presión, el calor absorbido por el hogar no es el adecuado para producir todo el vapor saturado requerido y, por éllo, aguas abajo del sobrecalentador se instala un banco de caldera o haz vaporizador.

En unidades de AP, 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 se puede hacer más pequeño para generar la misma cantidad de vapor; cuando el tamaño del hogar aumenta hasta un determinado tamaño, se llega a una situación en la que no se precisa economizador.

Cuando el hogar se agranda, la temperatura de salida de los gases se reduce, produciéndose demasiado vapor, por lo que los gases no tendrán la energía suficiente que permita alcanzar la temperatura de diseño en el *sobrecalentador / recalentador*.

Criterios de diseño del hogar.- El hogar se puede considerar como un gran volumen con una abertura de salida, confinado por paredes refrigeradas con agua y dentro del cual se realiza el proceso de la combustión; su perfil y volumen quedan fijados por el tipo de combustible y sistema de combustión.

Con paredes que utilizan quemadores o recintos de fuego circulares, la separación mínima entre los quemadores, las paredes laterales y la solera del hogar, se establece con el criterio de llegar a la combustión completa, por lo que se:

- Impide la interacción entre los flujos de combustible y llama

- Asegura la combustión completa

- Evita la colisión de las llamas sobre las paredes, que provocarían el recalentamiento de los tubos o depósitos excesivos

- Minimiza la formación de NO_x

El régimen de aporte máximo de combustible y el número de quemadores establecen:

- El área de la sección recta del hogar

- La altura de la zona de $\begin{cases} \text{- combustion} \\ \text{- inyección de aire}_{terciario} \end{cases}$

- La distancia entre los quemadores y la solera del hogar

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

Cuando se tiene que reducir el límite de emisiones, el diseño del sistema de combustión y su influencia en el perfil y volumen del hogar, se hace muy crítico y complejo.

Para reducir las emisiones de NO_x se pueden considerar no sólo los quemadores de bajo NO_x sino también otras técnicas, como: $\begin{cases} \text{- el escalonamiento del aire}_{terciario} \text{ en el hogar} \\ \text{- el requemado del combustible} \\ \text{- la inyección de reactivos} \end{cases}$

También se han desarrollado algunas técnicas para la inyección de absorbentes destinados a reducir las emisiones de SO_2.

Cada una de estas técnicas tiene su particular impacto sobre el tamaño y configuración del hogar:

a) Para combustibles limpios como el gas natural, el volumen y altura del hogar se calculan 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

b) Para combustibles tipo carbón y algunos aceites, que contienen significativos niveles de ceniza, el volumen y altura del hogar se determinan para enfriar los productos de la combustión hasta una temperatura de gases a la salida del hogar que evite el excesivo ensuciamiento de las superficies de convección

c) La altura del hogar se puede fijar también para:

- Facilitar el tiempo mínimo de residencia que precise la combustión completa

- Cumplimentar los requisitos mínimos de separación desde los quemadores y portillas de NO_x hasta la bóveda y superficies de convección

XIX.2.- INFLUENCIA DE LA CENIZA

Para el carbón y en menor grado en el aceite, una de las consideraciones extremadamente importantes es la ceniza presente en el combustible; si no se tiene en cuenta en el diseño o en el funcionamiento, se puede depositar en las superficies inclinadas de las paredes del hogar y en los bancos tubulares del paso de convección.

La ceniza:
- *reduce el calor absorbido por la unidad generadora de vapor*
- *aumenta la pérdida de tiro*
- *erosiona las partes a presión*
- *provoca paradas forzosas para efectuar limpiezas y reparaciones*

Para el carbón existen dos tipos generales de hogares según la ceniza
- *sólida (seca) o de solera seca*
- *fundida o de solera húmeda*

El ***hogar de ceniza sólida*** se aplica a carbones con ceniza de alta temperatura de fusión; consiste en una solera en forma de tolva (cenicero), y una superficie de refrigeración; la ceniza que impacta sobre las paredes del hogar o sobre la solera, es sólida y seca, evacuándose como partículas sólidas. Cuando se quema carbón pulverizado en un hogar con ceniza seca, el 80% de la ceniza se arrastra por los gases a través de los bancos tubulares de convección.

Las características químicas de la ceniza influyen en el volumen del hogar, necesario para lograr una satisfactoria operación de la unidad; en la Fig XIX.10 se compara el volumen de un hogar para una caldera de 500 MW quemando carbón bituminoso o subbituminoso de baja escorificación, con el que se requiere por otra unidad de igual potencia pero quemando lignito con un gran poder aglutinante (fácil escorificación).

Con carbones que tienen cenizas con baja temperatura de fusión, es muy difícil emplear un hogar con cenicero seco, porque la ceniza (y en particular la escoria) que está fundida o en estado

pastoso, se amontona formando grumos en las paredes del hogar o en la tolva del cenicero. Para manipular estos carbones, se ha desarrollado el hogar con ceniza fundida o con cenicero húmedo, cuya configuración incorpora uno o varios combustores ciclón.

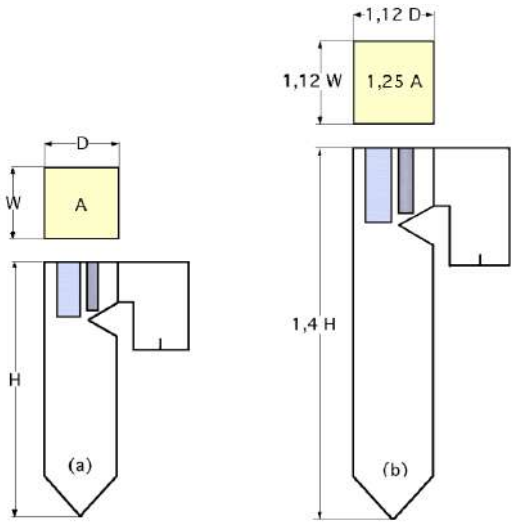


Fig XIX.10.- Comparación de tamaños de calderas para diversos tipos de carbones
a) 500 MW, carbón bituminoso y subbituminoso; ceniza poco escorificante ; b) 500 MW, lignito de Texas; ceniza muy escorificante

El hogar, formado por el recinto ciclón y el hogar convencional residual, comprende una disposición en dos escalones:

- En la parte inferior del hogar la temperatura debe ser suficiente para que la ceniza se vierta sobre la solera en forma líquida, conformándose una balsa de escoria líquida, que se drena hacia un tanque que contiene agua, en donde se trocea

- En la parte superior del hogar, los gases se enfrían hasta una temperatura inferior a la del punto de fusión de la ceniza, de modo que ésta (polvo), cuando se arrastra hacia los bancos tubulares de convección no provoca un excesivo ensuciamiento

Como consecuencia de las elevadas emisiones de NO_x propias de los hogares con ceniza fundida, su diseño es poco frecuente en el proyecto de nuevas calderas.

XIX.3.- PAREDES REFRIGERADAS POR AGUA

La mayoría de los hogares de calderas tienen paredes membrana refrigeradas por agua. Esta construcción, Fig. XIX.11, reduce el mantenimiento de las paredes del hogar, y reduce la temperatura de los gases 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. Para obtener la máxima absorción de calor, los tubos de las paredes del hogar están espaciados lo menos posible, a la vez que la temperatura de los tubos y de la membrana se mantienen dentro de límites aceptables.

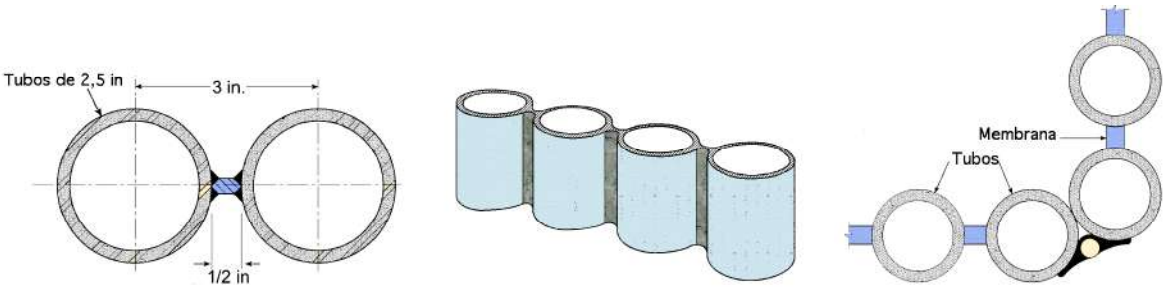


Fig XIX.11.- Tubos con pared membrana y con sellado en esquinera

Las paredes membrana están constituidas por una fila de tubos cuyos ejes están espaciados algo más de un diámetro de tubo, y unidos entre sí mediante una varilla membrana que se suelda por completo a los tubos adyacentes, configurando una superficie de pared continua, robusta y estanca, transmitiendo el calor de los gases del hogar a la mezcla *agua-vapor* que circula por el interior de los tubos. La construcción de paredes membrana con revestimiento refractario se utiliza en las paredes inferiores del hogar de unidades dotadas con combustores ciclón destinadas a quemar basuras, y en unidades de lecho fluidificado.

Superficie de convección de la caldera.- En algunos diseños, las primeras filas de tubos que forman parte del banco de convección, se incluyen como tubos de caldera, los cuales están bastante espaciados para así facilitar el paso de los gases y evitar la acumulación de ceniza, mejorando la limpieza de las superficies termointercambiadoras cuando se utilizan combustibles sucios; configuran la pantalla de escoria o pantalla de caldera, y reciben el calor por:

- *Radiación directa desde el hogar*
- *Radiación y convección desde los gases de combustión que pasan a su través*

Otra variante es utilizar pantallas de tubos refrigerados por agua o por vapor, ubicados en la parte superior del hogar; a veces se identifican como paredes divisorias, y facilitan una superficie adicional de caldera optimizando el tamaño del hogar.

En las grandes unidades de AP, estas pantallas de tubos situadas en el plano de salida del hogar, configuran la superficie del sobrecalentador; a la entrada del sobrecalentador la temperatura de los gases debe ser lo suficientemente alta para que se pueda alcanzar la temperatura deseada en el vapor sobrecalentado, con una suficiente superficie de caldeo y utilizando materiales económicos.

Las disposiciones indicadas en las Fig XIX.1 a 6, muestran configuraciones de superficie de sobrecalentador a la salida del hogar; para optimizar el diseño del sobrecalentador, en la parte alta del hogar se pueden incorporar pantallas de tubos o paredes divisorias ampliamente espaciadas y refrigeradas por vapor. La Fig XIX.12 muestra unas superficies de convección, en planta, con espaciados decrecientes, y la variación en la temperatura media de los gases, conforme éstos las atraviesan.

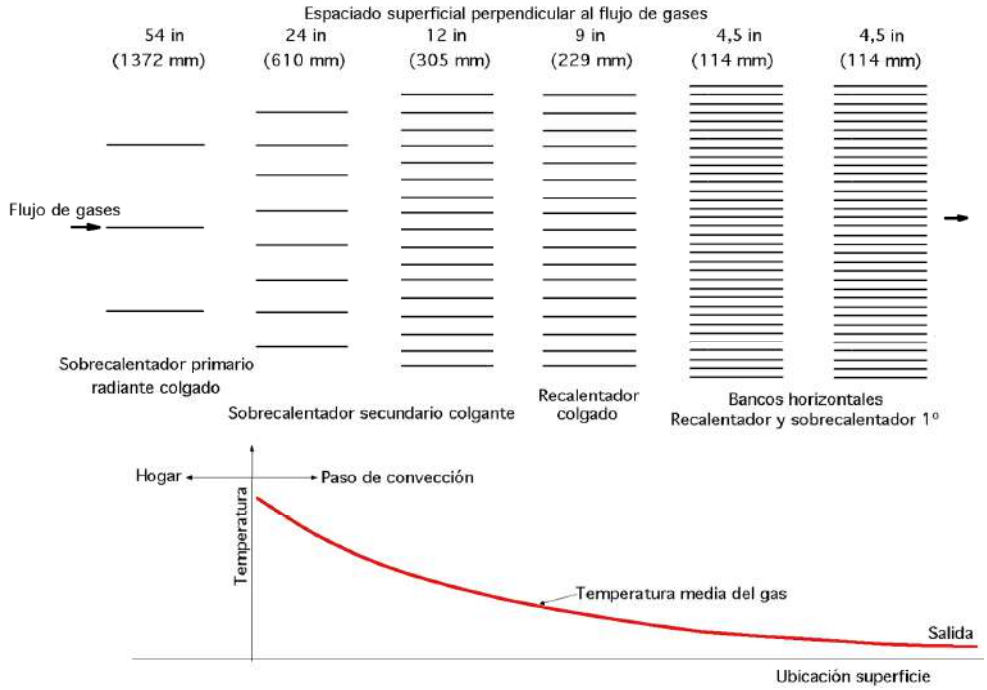


Fig XIX.12.- Disposición esquemática en plantas de superficies de convección y variación de la temperatura media de los gases

El diseño de la superficie termointercambiadora de la caldera, aguas abajo del sobrecalentador, depende de $\begin{cases} \text{- } la\ caída\ de\ temperatura\ en\ los\ gases \\ \text{- } el\ tipo\ de\ unidad \begin{cases} industrial \\ energética \end{cases} \\ \text{- } la\ pérdida\ de\ tiro\ al\ paso\ de\ los\ humos\ a\ través\ de\ la\ superficie\ termointercambiadora \end{cases}$

En el diseño de calderas con caldeo por convección, con el fin de lograr la caída prevista de temperatura en los gases, y una pérdida de tiro tolerable en el flujo de los mismos, se pueden combinar ciertos parámetros, como el $\begin{cases} \text{- } diámetro\ y\ longitud\ de\ los\ tubos \\ \text{- } espaciado\ entre\ tubos \\ \text{- } número\ y\ orientación\ de\ los\ tubos \\ \text{- } número\ de\ deflectores\ del\ lado\ de\ gases \end{cases}$

En el diseño de las superficies de convección del lado de gases, la superficie termointercambiadora necesaria para un régimen dado es inversamente proporcional a la caída de presión del lado de gases. Las modificaciones del diseño que aumentan la caída de presión (como la reducción del espaciado entre tubos perpendicular al flujo), dan lugar a mayores regímenes de transferencia de calor, reduciéndose la superficie termointercambiadora para soportar la carga térmica total deseada.

Para un determinado régimen de gases circulando en flujo cruzado, $\begin{cases} \text{- } el\ coeficiente\ de\ película \\ \text{- } la\ absorcion\ de\ calor \\ \text{- } la\ pérdida\ de\ tiro \end{cases}$ son mayores que cuando lo hacen paralelamente a los tubos; el flujo de gases serpentea entre los bancos de tubos, lo que da lugar a una pérdida de tiro mayor y a una mala distribución del flujo, con poca mejora en la absorción de calor. Los cambios de dirección en el flujo que sale de un banco tubular aguas arriba y que entra en otro aguas abajo, se diseñan para que tengan resistencia mínima.

XIX.4.- ANÁLISIS DEL CÁLCULO NUMÉRICO APLICADO A CALDERAS

Para la determinación de los intercambios térmicos locales y las condiciones de gases en la caldera, sobrecalentador y recalentador, si los datos experimentales son insuficientes para el diseño, se recurre al modelado mediante cálculo numérico, haciendo uso de programas informáticos que resuelven las ecuaciones de conservación de la masa, cantidad de movimiento y energía.

La modelización numérica de las zonas del sobrecalentador y recalentador incluye el cerramiento de caldera, los recintos de fuego o quemadores y otros aspectos geométricos que pueden afectar al flujo, incluyendo los componentes situados aguas arriba y aguas abajo, con el fin de facilitar las mejores condiciones de contorno para la zona interesada.

En la aplicación de los programas informáticos hay que tener en cuenta el tamaño del modelo y su complejidad, frente al tiempo de cálculo necesario que requiere el ordenador.

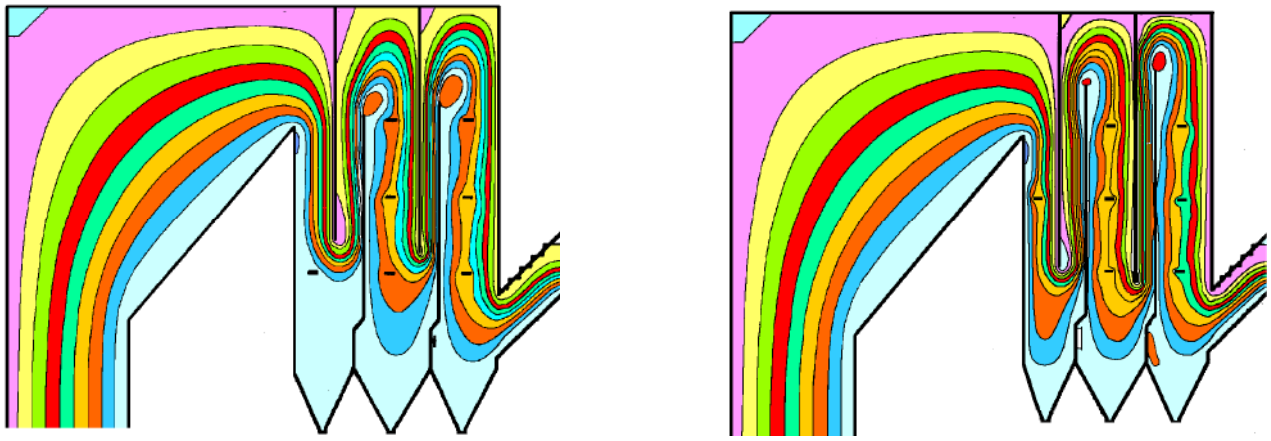
Las entradas numéricas incluyen datos:

- *geométricos y configuración de las superficies termointercambiadoras y de la caldera*
- *de características funcionales, caidas de presión y absorción de calor de las superficies termointercambiadoras*
- *de operación, estequiometria y temperatura de los gases a la salida del hogar*

- *Disposición de quemadores, ángulos de paletas e intensidad de la turbulencia*
- *Propiedades del combustible, cantidad de combustible y gases, composición y finura del carbón, etc*

Con el procesado final se puede obtener la magnitud de otras variables secundarias, tales como la resistencia a la escorificación o efectividad de la mezcla. El análisis numérico se puede clasificar en tres categorías:

- *verificación de los diseños propuestos*
- *evaluación de las modificaciones del diseño*
- *investigación de problemas localizados*



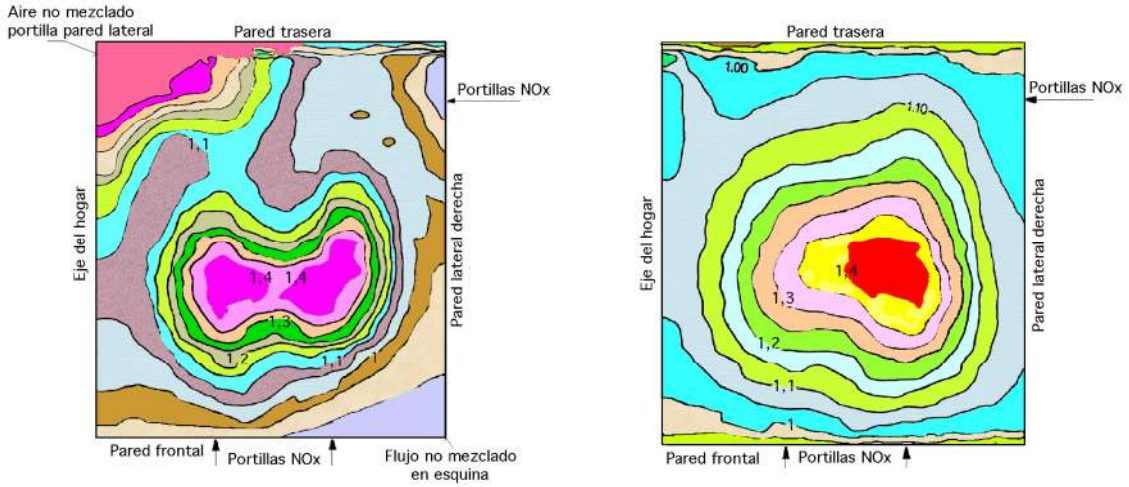
a) Disposición original de los deflectores del paso de convección. *b) Disposición mejorada de los deflectores del paso de convección*

Fig XIX.13.- Modelización de las líneas de flujo de corriente de los gases de combustión

Ejemplo 1.- Las Fig XIX.13a.b muestran las líneas de flujo en un diseño de caldera, antes y

después de modificar la disposición de los deflectores del paso de convección; como se observa, el diseño se modificó porque el tamaño de la superficie termointercambiadora hizo que disminuyera la prevista absorción de calor, realizándose la modificación antes de la fabricación, para reducir costes.

Ejemplo 2.- La aplicación del modelo numérico que se presenta en la Fig XIX.14 se refiere a un análisis que determina la posición óptima de las portillas de NO_x en un sistema de caldera; se representa el trazado de las estequiometrías combustible/aire, a una cota de 15 ft (4,6 m) sobre las portillas de NO_x antes y después del ajuste de las portillas de NO_x. La distribución más uniforme con mezcla mejorada, da lugar a una menor formación de NO_x.



a) Configuración inicial de mezcla. *b) Configuración mejorada de mezcla*

Fig XIX.14.- Modelización de la estequiometría local "combustible-aire"

Ejemplo 3.- La modelización numérica se puede utilizar para investigar problemas en la caldera. El modelo tiene en cuenta la geometría de la caldera y sus características funcionales como la absorción de calor, temperatura y caída de presión. El modelo facilita una imagen detallada y clara de las características funcionales, mejor que la que se puede lograr utilizando métodos analíticos.

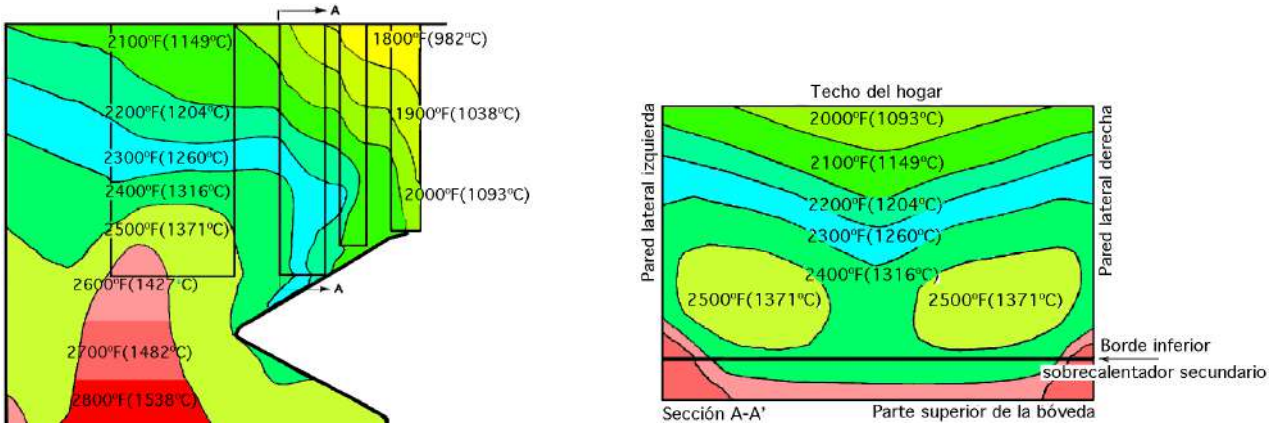


Fig XIX.15.- Modelización de la estequiometría local "combustible-aire"

Si se supone, por ejemplo, que en el borde de entrada más bajo del $sobrecalentador_{secundario}$ una unidad está experimentando una excesiva acumulación de ceniza, para determinar la causa de la escorificación y evaluar las modificaciones del diseño que permitan reducir dicha acumulación, se puede utilizar un modelo numérico, en el que:

- Las superficies más bajas del $sobrecalentador_{secundario}$*, en el lado de entrada de gases, y con una cierta desviación hacia las paredes laterales, tengan altas velocidades y elevadas cargas de ceniza*

- La gráfica de los niveles de temperatura en el diseño preliminar que se empleó en la construcción y en un diseño de bóveda más grande, Fig XIX.15, indicaban que el aumento de tamaño de la bóveda desplazaba los gases calientes, separándolos de la zona a estudiar en el $sobrecalentador_{secundario}$*, eliminando virtualmente el impacto de la ceniza caliente*

- La reducción de 100°F (56°C) en la temperatura máxima de los gases que entraban en el $sobrecalentador_{secundario}$*, mejoró la resistencia de la unidad frente a la escorificación.*

La modelización exacta de calderas y de sus componentes depende de la disponibilidad de información para determinar las condiciones adecuadas a la entrada y de contorno, las propiedades de los fluidos y el conocimiento de características globales como la caída de presión y la absorción de calor.

XIX.5.- DISEÑO DE LAS PARTES A PRESIÓN

Las calderas se diseñan según normas como el Código ASME para Calderas y Vasijas a Presión. Es importante conocer las temperaturas de diseño de las partes a presión, que no se deben superar durante la operación del generador de vapor ya que los esfuerzos permisibles dependen de la temperatura máxima a que están expuestos los materiales. Las temperaturas del material del cerramiento de una caldera con calderín, la puesta en servicio y el diámetro exterior de cada tubo dependen de

- *el flujo calorífico transitorio*
- *la presión de diseño*
- *la conductividad del metal*
- *la temperatura de saturación a la presión máxima de la caldera*

En los tubos de caldera, las temperaturas se mantienen en niveles conocidos mediante la provisión de un caudal de agua suficiente, para evitar que se llegue al flujo calorífico crítico, o punto de desvío de la vaporización puntual. En cada tubo, el agua saturada tiene una velocidad determinada, prestando especial atención a las zonas de alto flujo calorífico y a los tubos inclinados con calentamiento por su generatriz superior. Como los calderines de vapor tienen paredes gruesas, hay que limitar el flujo calorífico a través de ellos para así evitar excesivos gradientes térmicos durante:

- *la puesta en servicio*
- *la retirada de servicio*
- *el funcionamiento, con el calderín expuesto a los gases*

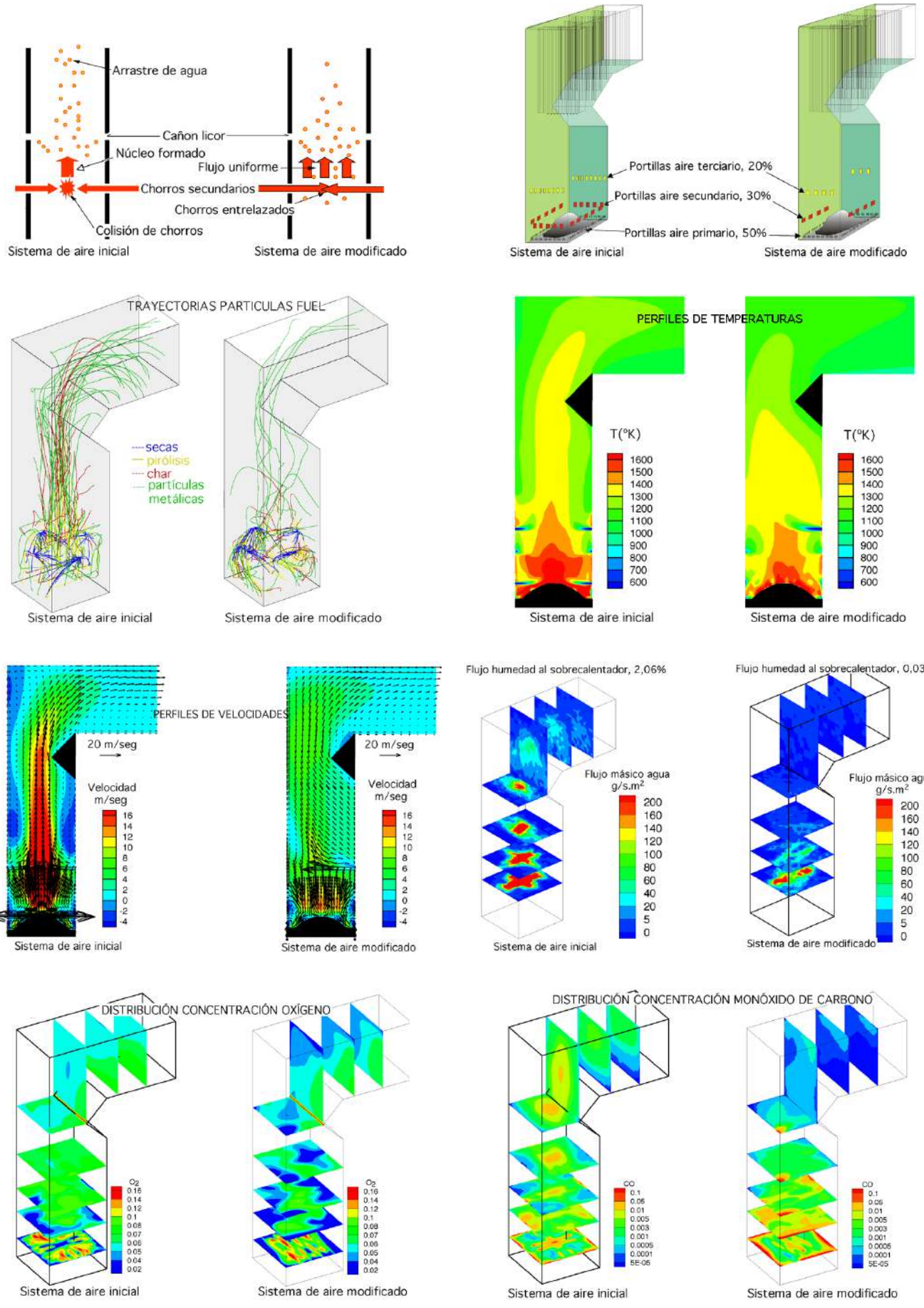


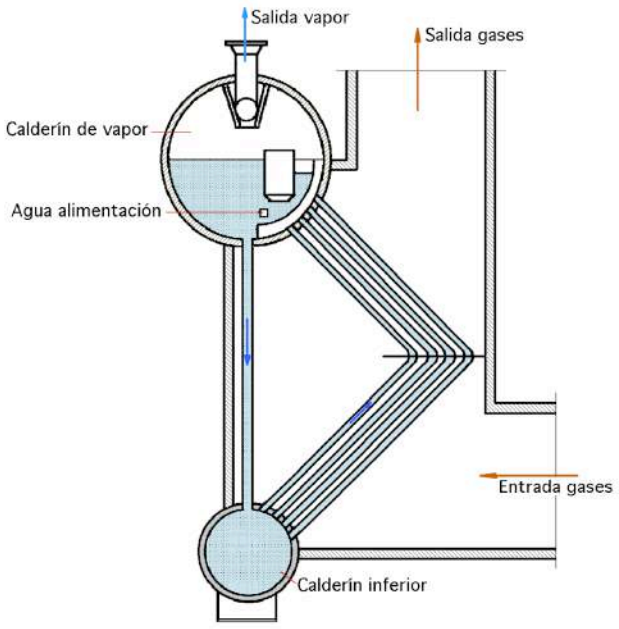
Fig XIX.16.- Modelizaciones diversas cuando se modifica el sistema de aire

Cuando el calderín cuenta con un determinado número de penetraciones tubulares, el flujo de agua a través de éstas sirve para refrigerar las paredes del calderín.

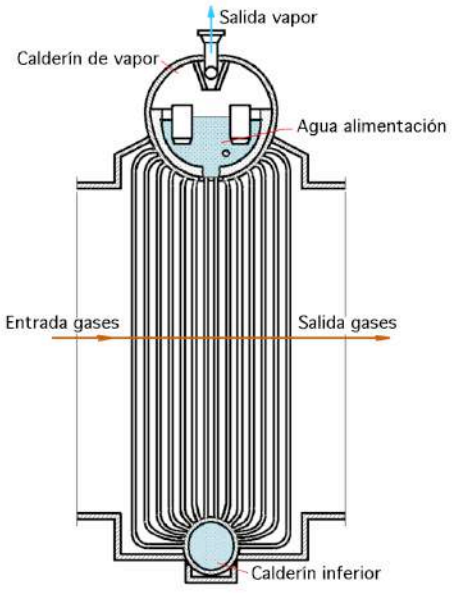
Cuando el aporte de calor a un calderín es demasiado elevado por la $\begin{cases} alta\ temperatura \\ velocidad\ de\ los\ gases \end{cases}$, se le dota de un aislamiento exterior o se le reubica fuera del flujo de calor. En el interior del calderín se instala un equipo de separación de vapor, que mantenga la humedad y los sólidos disueltos en el vapor, en niveles aceptables.

En calderas de un paso (proceso directo), toda la humedad vaporiza en los tubos, de modo que la vaporización y el sobrecalentamiento tienen lugar en forma secuencial, sin calderín; la pureza del vapor depende, exclusivamente, del mantenimiento de la pureza del agua de alimentación. Las válvulas de seguridad de la caldera son componentes muy importantes de protección del generador de vapor.

El Código ASME estipula que la presión de diseño de la caldera no debe ser inferior a la presión de descarga de la válvula de seguridad que tenga el tarado más elevado. Para evitar pérdidas innecesarias y trabajos de mantenimiento debidos al frecuente disparo de las válvulas de seguridad, la que abra primero (la de tarado más bajo) se debe regular para que dispare a una presión que no sea inferior a la de operación de la caldera incrementada en un 5%.



Configuración típica para unidades de HRSG que recuperan calor de pequeñas turbinas de gas y de motores Diesel.

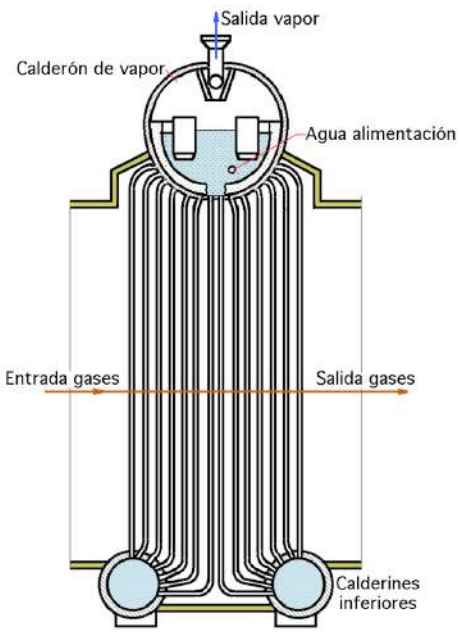


Esta configuración se ha utilizado más años que las demás. Tiene la ventaja de que el calderín superior es un separador de vapor, que está conectado con el inferior por tubos verticales. Esto hace que pueda manejar flujos muy grandes de gases.

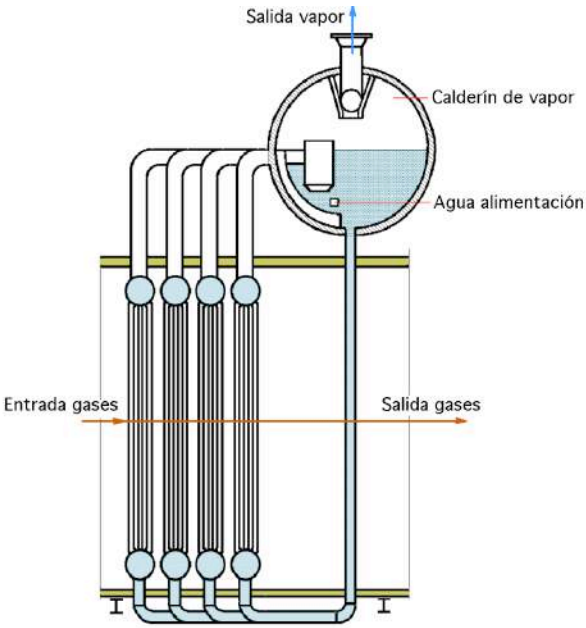
Fig XIX.16a.b.- Configuraciones con diversas modificaciones

La presión de operación en el calderín de vapor depende de la presión requerida en el punto de utilización del vapor y de la correspondiente caída de presión. Cuando el vapor se utiliza para ali-

mentar una turbina, la presión de operación de la caldera se calcula sumando a la presión de admisión en la turbina, la caída de presión en la tubería de vapor, válvulas, sobrecalentador y partes internas del calderín, correspondiente al máximo flujo de vapor de la unidad.



Configuración de 3 calderines, típica en instalaciones con una gran cantidad de ceniza; en la zona que separa los calderines inferiores se ubicaba la tolva para recoger y retirar las partículas sólidas



En los últimos veinte años, esta configuración, apoyada en el suelo, se ha convertido en el más popular de todos los diseños de evaporadores. Se puede construir en módulos axiales o en módulos laterales múltiples, diseño que acepta cualquier tipo de flujo de gases.

Fig XIX.16c.d.- Configuraciones con diversas modificaciones

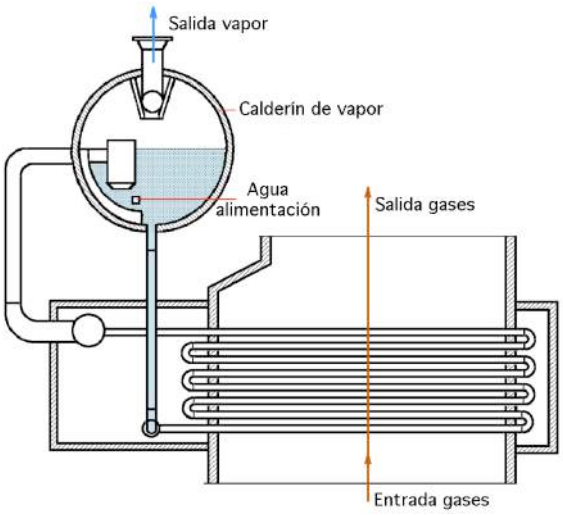


Fig XIX.17.- Evaporador de tubos horizontales

Soportes de caldera.- Los tubos de las paredes del hogar están soportados por los colectores a los que están conectados; los tubos de los bancos vaporizadores y pantallas se soportan por el calderín y por los colectores a los que están conectados.

Para conseguir el diseño adecuado de soportes se hacen las siguientes consideraciones:

- Los tubos se disponen y alinean de forma que no estén sometidos a momentos flectores excesivos

- No se debe sobrepasar, en ningún caso, la carga de trabajo en los asientos de los tubos

- Hay que facilitar la expansión de las partes a presión

La caldera apoyada se debe anclar sólo en un punto, guiarse en una sola dirección, y dejar que se expanda libremente en las demás direcciones. En este tipo de caldera, para reducir las fuerzas de rozamiento y las solicitaciones resultantes en las partes a presión, es conveniente utilizar asientos o armaduras de rodillos cuando soportan cargas importantes.

XIX.6.- SOBRECALENTADORES Y RECALENTADORES

Ventajas del sobrecalentamiento y recalentamiento.- Cuando en una turbina se utiliza vapor saturado, el trabajo realizado está limitado por el grado de humedad ($10 \div 15\%$) que puede manipular la turbina sin un excesivo desgaste de sus álabes.

Se puede aumentar el trabajo realizado extrayendo la humedad entre escalones de la turbina, situación que no es económica salvo en casos especiales; la energía total que la turbina puede transformar en trabajo es pequeña comparada con la cantidad de calor requerida para elevar la temperatura del agua del ciclo hasta la de saturación y posterior vaporización; el contenido de humedad constituye una limitación fundamental en el diseño de la turbina.

En general, una turbina transforma la energía del vapor sobrecalentado en trabajo sin formación de humedad, por lo que esa energía se recupera en la turbina.

Esto no es aplicable cuando la presión del vapor sea igual o superior a la crítica 3.208 psi (221 bar); para presiones superiores a ésta, el calor aplicado a temperaturas superiores a 705ºF (374ºC) se recupera en su totalidad por la turbina de vapor.

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

Por ejemplo, en un cálculo simple en un ciclo Rankine ideal con sobrecalentamiento (Hirn) a la presión de 2.400 psig (185,6 bar) y recalentamiento intermedio, cuando la temperatura del sobrecalentado sube de $\begin{cases} 900°F \div 1100°F \\ 482°C \div 593°C \end{cases}$, el consumo específico bruto se reduce de $\begin{cases} 7.550 \div 7.200\ Btu/kWh \\ 7.963 \div 7.594\ kJ/kWh \end{cases}$, lo que representa una mejora del rendimiento del 4,5% atribuible a la temperatura del sobresalentamiento.

TIPOS DE SOBRECALENTADORES.- Existen dos tipos básicos de sobrecalentadores, de

convección y de radiación, que se caracterizan por la forma en que realizan la transferencia de calor desde los gases.

a) El ***sobrecalentador de convección*** se emplea cuando la temperatura de los gases es pequeña. En una unidad generadora de vapor que utilice este diseño, la temperatura del vapor que sale del sobrecalentador aumenta con la producción de la caldera.

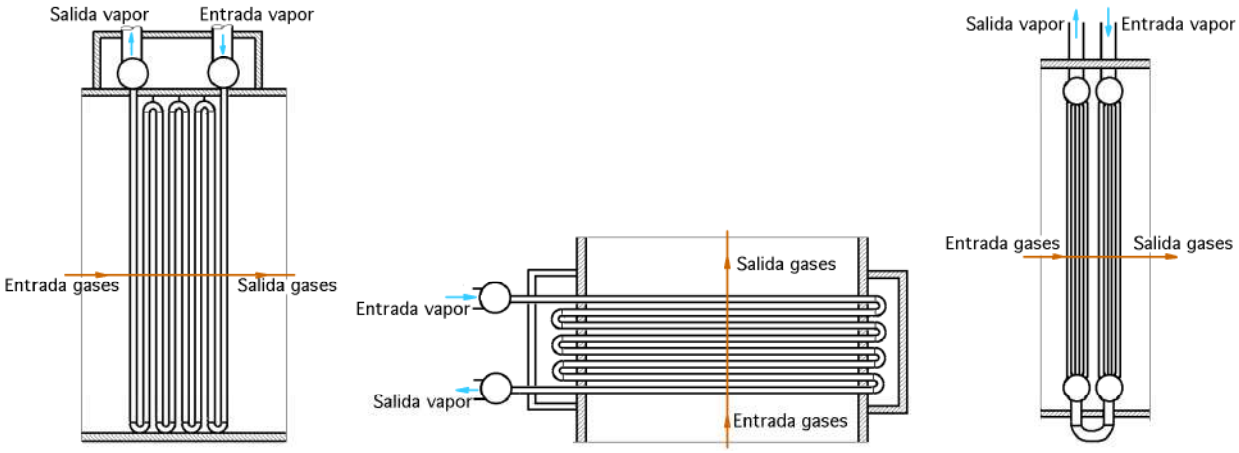


Fig XIX.18.- Configuraciones del sobrecalentador.

Como el régimen de transferencia de calor por convección es casi proporcional al régimen de gases y, por tanto, a la producción de la caldera, la absorción total en el sobrecalentador de convección y la temperatura del vapor, aumentan con la producción de la caldera, Fig XIX.19.

Este efecto se acentúa tanto más, cuanto más alejado del hogar se ubique el sobrecalentador de convección y cuanto menor sea la temperatura de los gases que entran en el mismo.

b) El ***sobrecalentador de radiación*** recibe la energía desde el hogar por radiación, y muy poca convección. Normalmente tiene una configuración de pantallas (paredes divisorias) o de placas colgadas formadas por tubos refrigerados por vapor, ampliamente espaciadas en la dirección perpendicular al flujo de gases. A veces, este sobrecalentador se incorpora a las paredes del cerramiento del hogar.

Como el calor absorbido por las paredes del hogar no aumenta tan rápidamente como la producción de la caldera, la temperatura de salida del sobrecalentador radiante disminuye al aumentar la producción de la caldera, Fig XIX.19. En ciertos casos, las dos curvas de variación de la temperatura, que tienen pendientes opuestas, correspondientes a los sobrecalentadores de convección y radiación, se pueden compensar combinando en serie ambos tipos de sobrecalentadores, obteniéndose para la temperatura del sobrecalentador una curva plana, en amplios márgenes de carga. También se puede obtener una curva de temperatura plana para el vapor sobrecalentado, mediante un sobrecalentador que tenga fuego independiente del que existe en el hogar.

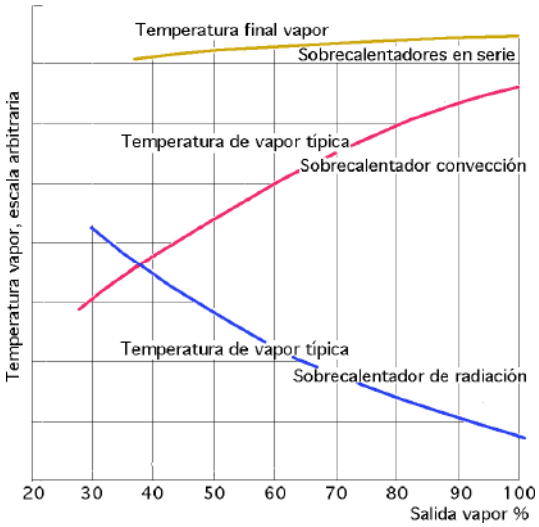


Fig XIX.19.- Temperatura final del vapor sobrecalentado, prácticamente uniforme para un amplio campo de cargas, obtenida en dos secciones en serie de radiación y convección

En el diseño de los sobrecalentadores radiantes y convectivos hay que tener mucho cuidado en evitar diferencias en la distribución de los flujos de vapor y de gases, que podrían conducir al recalentamiento de los tubos. L

Los sobrecalentadores tienen flujos de vapor entre $\begin{cases} 100.000 \div 1.000.000\ lb/ft^2 h \\ 136 \div 1356\ kg/m^2 s \end{cases}$, o más; estas cifras se fijan para facilitar $\begin{cases} \text{- una refrigeración adecuada} \\ \text{- caídas de presión admisibles} \end{cases}$ en los tubos.

La mayor caída de presión, asociada a velocidades mayores, mejora la distribución del flujo de vapor entre ambos lados del sobrecalentador.

Las condiciones para el diseño del sobrecalentador se aplican también al diseño del recalentador. Sin embargo, la caída de presión en un recalentador es crítica, porque la mejora en el consumo de calor del ciclo se puede anular por una pérdida de presión demasiado grande en el recalentador; por lo tanto, el flujo másico de vapor en el recalentador suele ser algo menor que en el sobrecalentador.

Tamaño de los tubos.- En los sobrecalentadores y recalentadores se usan tubos cilíndricos lisos de $\begin{cases} 1,75" \div 2,75" \\ 44,5 \div 69,9\ mm \end{cases}$ de diámetro exterior. Con tubos de menor diámetro, la caída de presión en el lado del vapor es más alta, siendo más difícil su alineación por el lado de los gases. Con tubos de mayor diámetro, las mayores solicitaciones debidas a la presión, se presentan del lado del vapor.

En las unidades modernas, para evitar la acumulación de ceniza se:

- *Aumenta la distancia entre los soportes de los tubos de sobrecalentadores horizontales*
- *Separan aún más los tubos*
- *Reduce el número de tubos por fila*

El tubo de 2,5”(63,5 mm) de diámetro exterior cumplimenta los objetivos precedentes, con una mínima diferencia de ventajas respecto a las que ofrecen tubos de menor diámetro. Cuando la temperatura del vapor aumenta, las solicitaciones admisibles pueden obligar a la utilización de tubos de menor diámetro exterior.

En sobrecalentadores se emplean tubos lisos; si tienen superficies ampliadas en forma de aletas longitudinales, transversales o protuberancias, la limpieza de la superficie termointercambiadora del lado de gases se complica; las superficies ampliadas pueden incrementar la temperatura de los tubos por encima de los límites de diseño.

Diseño de sobrecalentadores.- Se deben considerar algunos parámetros, como:

- *La temperatura del vapor*

- *El campo de cargas de la caldera, dentro del cual la temperatura del vapor debe estar controlada*

- *La superficie del sobrecalentador para conseguir la temperatura del vapor*

- *La zona de temperaturas de gases en la que se ubica la superficie del sobrecalentador*

- *El tipo de acero para la construcción del sobrecalentador y sus soportes necesarios*

- *El régimen del flujo de vapor en el interior de los tubos, que está limitado por la caída de presión, y que a su vez debe garantizar un control adecuado de la temperatura de los tubos*

- *La disposición de la superficie para hacer frente a las características de los combustibles, en lo referente al espaciado de tubos para evitar la acumulación de ceniza, o para facilitar su eliminación en las primeras etapas de su formación*

- *El diseño físico y tipo de sobrecalentador como estructura*

En casi todas las nuevas grandes calderas para plantas termoeléctricas, la experiencia conduce a la utilización de temperaturas de vapor sobrecalentado y recalentado de $\begin{cases} 1000°F \div 1050°F \\ 538°C \div 566°C \end{cases}$.

En las calderas estándar, la zona de ubicación del sobrecalentador queda bien delimitada por la disposición de la unidad y por el espacio asignado a la superficie sobrecalentadora. Una vez calculada la superficie, con su ubicación y espaciado óptimos, se calculan el flujo másico y la caída de presión del vapor, así como la temperatura de los tubos del sobrecalentador.

Para alcanzar la combinación óptima hay que:

- *Usar aleaciones de bajo precio*

- *Tener en el lado del vapor una caída de presión que no comprometa la temperatura de los tubos*

- *Disponer de un mayor flujo másico del vapor, para reducir la temperatura de los tubos*

- *Considerar el espaciado entre tubos que minimice la acumulación de ceniza con diversos combustibles*

- *Obtener un menor espaciado entre tubos, el más económico, para un suministro dado de combustible*

- Facilitar una disposición de tubos que mejore el tiro cuando este parámetro resulte crítico para la instalación

- Ubicar el sobrecalentador en una zona de temperatura de gases elevada, para ahorrar superficie intercambiadora

Diseño de recalentadores.- Existe una gran similitud entre el diseño de un sobrecalentador y de un recalentador; para el recalentador, la caída de presión permisible del lado del vapor está limitada. El flujo másico del vapor en los tubos del recalentador, debe ser el suficiente para que el gradiente de temperaturas a través de la película de vapor, sea inferior a 150ºF (83ºC); este gradiente se consigue con una caída de presión en los tubos del recalentador de $4 \div 5\%$ de la presión de entrada al mismo, junto con otra caída de presión en válvulas y tuberías del sistema de vapor recalentado de $4 \div 5\%$, por lo que la caída de presión total admisible en el sistema no excede del $8 \div 10\%$.

La caída de presión asignada a las tuberías de vapor recalentado es del orden de:

- Un tercio para la tubería de entrada (recalentamiento frío)

- Dos tercios para la tubería de salida (recalentamiento caliente)

Metal de los tubos.- Los parámetros que determinan los materiales que se deben utilizar para los tubos del sobrecalentador y del recalentador son: $\begin{cases} \text{- la resistencia a la oxidación} \\ \text{- la solicitación admisible} \\ \text{- el coste} \end{cases}$

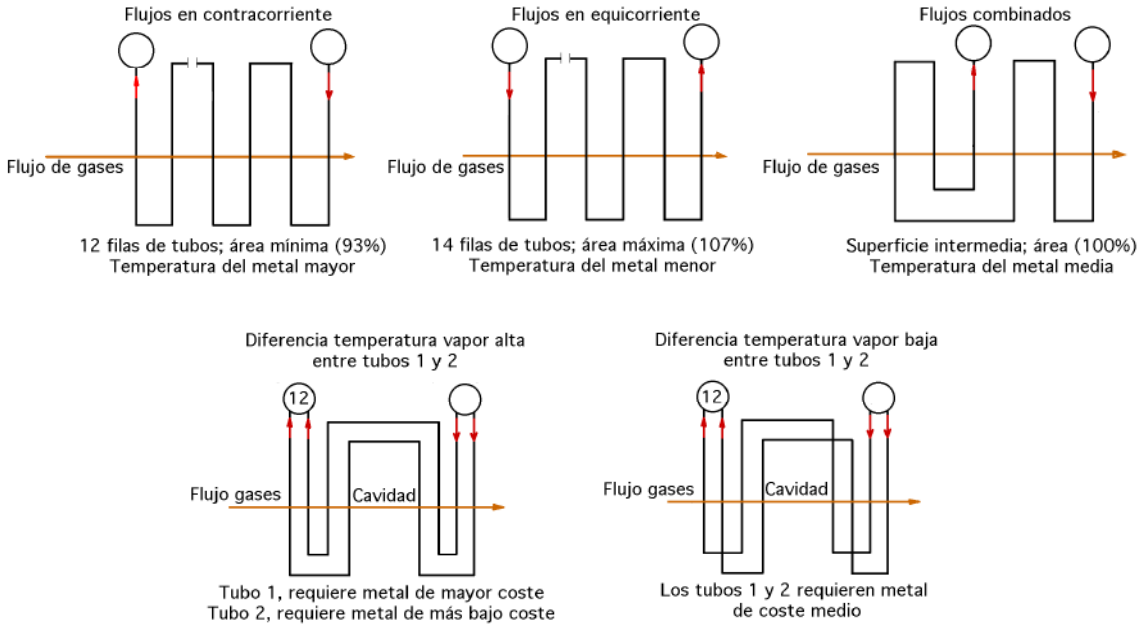


Fig XIX.20.- Disposiciones típicas de superficies de sobrecalentadores

Soportes de sobrecalentadores y recalentadores.- Los sobrecalentadores y recalentadores están ubicados en zonas de gases con temperaturas relativamente altas, por lo que es preferible que las cargas principales se soporten por los propios tubos. Diversas disposiciones típicas de la superficie bási-

ca de intercambio para los sobrecalentadores se indican en la Fig XIX.20; permiten evaluar un intercambio económico que relaciona el coste de material y la diferencia de superficie requerida, justificada por consideraciones de índole termohidráulica.

En los *sobrecalentadores verticales,* colgados, los puntos principales de soporte se encuentran fuera del flujo de gases, por lo que las pantallas con soportes de la sección principal situados encima del techo de la caldera, se soportan por sí mismas, a tracción, Fig XIX.21a.b.

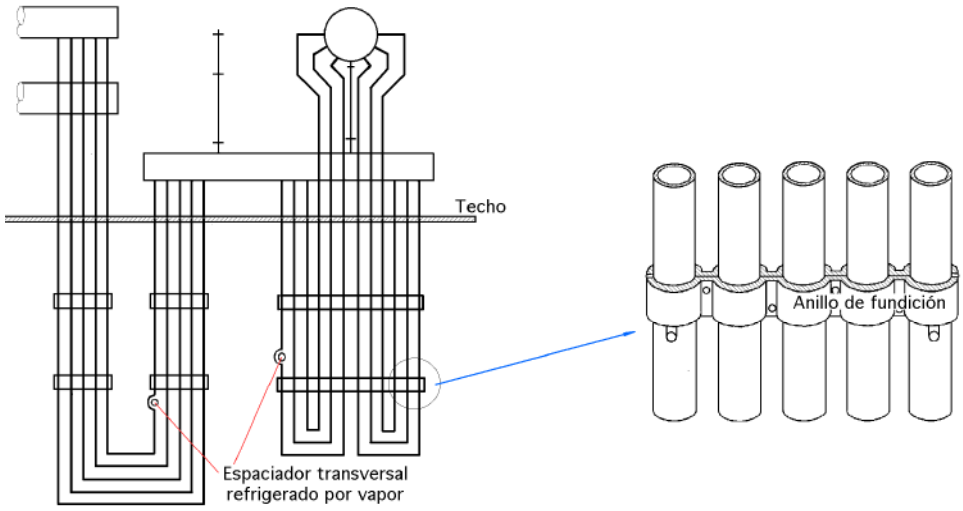


Fig XIX.21a.- Sección colgante de sobrecalentador, con soportes de fundición tipo anillo partido

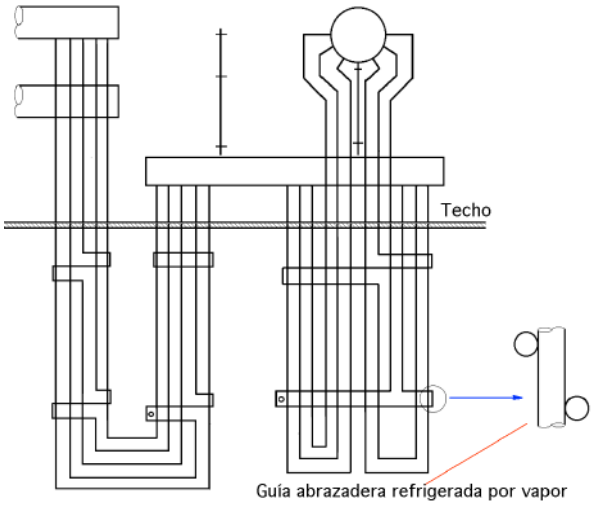


Fig XIX.21b.- Sección colgante de sobrecalentador, con guía envolvente refrigerada por vapor

- Cuando se dispone de un espaciado lateral perpendicular al flujo de gases y la limpieza de la ceniza no implica abrasión, se utilizan guías abrazaderas refrigeradas por vapor

- Si la limpieza de la ceniza implica abrasión, por ejemplo cuando se quema carbón, se emplean guías de anillo en las aleaciones altas de cromo-níquel

- En zonas con temperatura de gases elevada se utilizan elementos de ligadura, de lado a lado, para

mantener los espaciados transversales

- Para mantener la alineación de los tubos de cada pantalla en sistemas con espaciados laterales menores, las guías abrazadera refrigeradas por vapor no son prácticas, empleándose ligaduras mecánicas, Fig XIX.22, como las uniones en D.

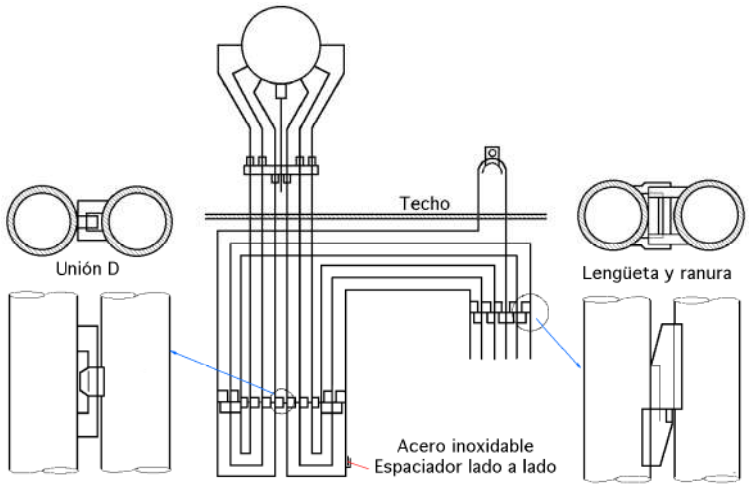


Fig XIX.22.- Sección colgante de recalentador con soportes

En *sobrecalentadores horizontales*, la carga a soportar se transmite a los tubos de cerramiento refrigerados por vapor, o de la caldera. La unión entre tubos soporte y tubos del sobrecalentador se hace mediante dos tipos de guías, una soldada al tubo soporte y otra al tubo del sobrecalentador, deslizando una en la otra, Fig XIX.23.

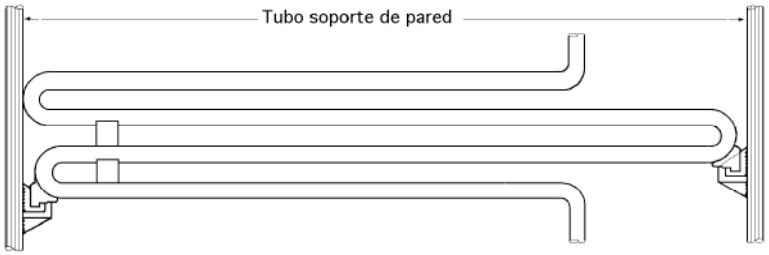


Fig XIX.23.- Soportes en los extremos del sobrecalentador horizontal

Los soportes tipo cuna facilitan el movimiento relativo entre tubos contiguos del sobrecalentador. Cuando aumenta el tamaño de las unidades, el espaciado entre los tubos del sobrecalentador horizontal también aumenta, hasta el extremo de que es imposible soportar estos tubos sólo por sus extremos, empleándose un tubo tirante colgado desde la salida del economizador.

Limpieza interior.- No se suele exigir la limpieza interna de las superficies termointercambiadoras del sobrecalentador y del recalentador, aunque en algunas circunstancias se han limpiado por vía química. Durante la puesta en servicio inicial, el soplado de las tuberías de vapor se utiliza para eliminar escamas, aceites y otros residuos.

Limpieza exterior y espaciado entre superficies.- Las unidades modernas se diseñan para funcionar entre dos retiradas de servicio consecutivas del orden de 18 a 24 meses seguidos, por lo que la limpieza del lado de gases se hace crítica. Para mejorar la limpieza, las secciones colgadas del sobrecalentador están espaciadas de acuerdo con la temperatura de los gases y el tipo de combustible que queme el generador de vapor. En la Fig XIX.21 se muestra la disposición correspondiente a unidades que queman carbón pulverizado en lecho suspendido

El espaciado longitudinal en la dirección del flujo de gases:

- Se fija desde $\begin{cases} 0{,}50 \div 0{,}75" \\ 12{,}7 \div 19{,}1\ mm \end{cases}$*, como espacio libre entre tubos para las zonas de alta temperatura*

- Se permite un mayor espaciado para zonas de superficies horizontales, que reciban gases a temperaturas inferiores a 1500°F (616°C)

XIX.7.- AJUSTE Y CONTROL DE LA TEMPERATURA DEL VAPOR

La mejora en el consumo específico de calor se debe, en gran parte, a la alta eficiencia del ciclo térmico, que se hace posible por las elevadas temperaturas del vapor que se suministra a la turbina.

La importancia de la regulación de la temperatura del vapor, dentro de estrechos márgenes, se pone de manifiesto por el hecho de que una variación de la temperatura del vapor de $\begin{cases} 35°F \div 40°F \\ 19°C \div 22°C \end{cases}$, implica una alteración del 1% en el consumo específico de calor, para presiones de funcionamiento superiores a 1800 psi, (124,1 bar).

Para $\begin{cases} \text{- un control preciso} \\ \text{- una regulación exacta} \end{cases}$ de la temperatura del vapor existen otros fundamentos como:

- Prevenir fallos en el sobrecalentador, recalentador o turbina, por excesivas temperaturas del metal

- Impedir dilataciones térmicas que puedan reducir peligrosamente las holguras en la turbina

- Evitar la erosión derivada de una excesiva humedad en los últimos escalonamientos de la turbina

En las calderas con calderín, la producción de vapor y la presión de salida se mantienen constantes con el régimen de fuegos; las temperaturas del vapor $\begin{cases} \text{- sobrecalentado} \\ \text{- recalentado} \end{cases}$ dependen de parámetros básicos de diseño, como $\begin{cases} \text{- las dimensiones de la superficie termointercambiadora} \\ \text{- la relación entre las superficies de convección y radiación} \end{cases}$.

Las temperaturas de vapor vienen afectadas también por otras variables operativas, como:

- El exceso de aire ($aire_{exceso}$)

- La temperatura del agua de alimentación del ciclo a la entrada al generador de vapor

- Las variaciones en el combustible que modifican las características de la combustión y las deposiciones de ceniza sobre las superficies termointercambiadoras

- La correcta combinación y disposición de los quemadores que estén en servicio

En las calderas de proceso directo de presión universal, que tienen una zona variable para el paso del agua a vapor, la producción de vapor y la presión y temperatura del vapor sobrecalentado se controlan coordinando el régimen de $\begin{cases} - \textit{ fuegos} \\ - \textit{ el flujo del agua de alimentación de la caldera} \end{cases}$, dejando que la temperatura del vapor recalentado sea la variable dependiente permitiendo una tolerancia de ±10ºF (6ºC) sobre la temperatura de salida del vapor.

Cuando la carga aumenta $\begin{cases} - \textit{ la temperatura} \\ - \textit{ el gasto másico de los gases de combustión} \end{cases}$ se incrementan.

En un sobrecalentador de convección, la temperatura del vapor crece al aumentar la carga, siendo el gradiente de temperaturas debido a este aumento, tanto menor cuanto más próxima al hogar esté la superficie del sobrecalentador de convección.

En un sobrecalentador de radiación, la temperatura del vapor decrece al aumentar la carga.

En una unidad generadora de vapor, las superficies de sobrecalentamiento de radiación y convección se instalan en serie, para mantener prácticamente constante la temperatura del vapor en todo el campo de control de la unidad, Fig XIX.19.

Exceso de aire.- Cualquier variación en el $aire_{exceso}$ que entra en la zona de quemadores, provoca una modificación de los gases que van hacia el sobrecalentador de convección; un aumento del $aire_{exceso}$ en quemadores eleva la temperatura del vapor.

Temperatura del agua de alimentación.- Un incremento en la temperatura del agua de alimentación del ciclo a la entrada del generador de vapor provoca una disminución de la temperatura del vapor sobrecalentado; para un flujo de vapor dado, cuando la temperatura del agua de alimentación sube:

- Se quema menos combustible
- Se producen menos gases a menor temperatura fluyendo hacia el sobrecalentador de convección
- La temperatura del vapor sobrecalentado es menor

Limpieza de las superficies termointercambiadoras.- La eliminación de los depósitos de ceniza acumulados en las superficies termointercambiadoras (en el lado de gases), aguas arriba del sobrecalentador:

- Aumenta la absorción de éste incrementando la temperatura del vapor
- Reduce la temperatura de los gases que entran en el mismo bajando la temperatura del vapor

Ajuste de la temperatura del vapor.- Cuando las condiciones de operación se apartan de las de diseño, el ajuste de la temperatura del vapor es imprescindible, y consiste en ampliar o reducir la superficie del sobrecalentador y/o del recalentador; un buen diseño debe prever ésto en la for-

ma más económica posible. En determinadas unidades, es posible el ajuste reduciendo o ampliando la superficie de vapor saturado, aguas arriba de la superficie de sobrecalentamiento (en el lado *agua-vapor*).

Estas modificaciones alteran la temperatura de gases a la entrada de estos sobrecalentadores.

Si para incrementar la temperatura del vapor se reduce la superficie de vapor saturado, este tipo de ajuste es relativamente simple y cuesta menos que añadir superficie al sobrecalentador y/o recalentador, ya que ésto puede ser difícil y costoso, e incluso imposible.

El uso de un revestimiento refractario en áreas selectivas del hogar refrigerado por agua:

- *Eleva la temperatura de los gases hacia el sobrecalentador*
- *Tiene un efecto favorable sobre la combustión y sobre la pérdida por* $C_{inquemado}$

El refractario no se debe aplicar nunca en superficies que no toleren la deposición de ceniza, lo que puede aumentar el coste de mantenimiento.

Para la regulación de la temperatura del vapor, una forma de ajuste simple, barata y efectiva, consiste en alterar la velocidad másica de los gases que fluyen hacia el sobrecalentador, modificando la posición de determinados deflectores o cortatiros, si la unidad lo permite.

Esta característica funcional permite variar el control de la temperatura del vapor hasta un 20%, cuyo límite está fijado por su repercusión sobre la pérdida de tiro y sobre el rendimiento de la caldera. Un incremento de 10ºF, (6ºC) en la temperatura de los gases a la salida de la caldera, reduce la eficiencia un 0,25% aproximadamente.

Control.- El control se necesita para regular la temperatura del vapor, dentro de los límites requeridos, con el fin de corregir las fluctuaciones que provocan los parámetros de operación, como la producción de la caldera y la deposición de ceniza en las superficies termointercambiadoras; esta circunstancia se puede corregir alterando la frecuencia de la operación de los equipos de sopladores.

La operación selectiva de los sopladores de pared del hogar, o la reducción de la producción de vapor en la unidad, para inducir el desprendimiento de acumulaciones de ceniza desde las paredes del hogar, puede disminuir la temperatura de los gases que llegan a la superficie del sobrecalentador.

El tiempo que tarda una turbina en llegar a tomar la plena carga se establece de acuerdo con una curva de seguridad (temperatura del vapor-tiempo).

La retirada de servicio de $\begin{cases} \text{- } calentadores\ de\ agua\ del\ ciclo \\ \text{- } pulverizadores\ de\ carbón \end{cases}$, puede afectar a la temperatura del vapor y, por tanto, requerir el control de esta temperatura.

Para regular la temperatura del vapor se pueden considerar los siguientes parámetros de con-

trol:
- *La atemperación*
- *Los cortatiros de dosificación y distribución de gases*
- *La recirculación de gases hacia el hogar*
- *El aire$_{exceso}$*
- *La selección, ubicación y posición de los quemadores en funcionamiento*
- *La orientación de los quemadores móviles*
- *El hogar dividido con fuegos diferenciados*
- *Los sobrecalentadores autónomos con fuegos independientes*

ATEMPERACIÓN.- Con ella se regula y limita la temperatura del vapor diluyendo el vapor a alta temperatura en agua a baja temperatura.

Los atemperadores pueden ser de
- *mezcla*
- *superficie*

Un atemperador de *mezcla o contacto directo* es el atomizador, en el cual se mezclan el vapor y el medio refrigerante, que puede ser agua o vapor saturado.

En un atemperador de *superficie*, que comprende el tipo de recipiente y de calderín, el vapor está separado del medio refrigerante por la superficie termointercambiadora. Los atemperadores de superficie se usan raras veces en los diseños ordinarios de calderas para unidades energéticas, mientras que los atomizadores se usan en todas las unidades que tienen exigencias de atemperación.

El atemperador del sobrecalentador se puede ubicar en una de las dos posiciones siguientes:

- En algún punto intermedio situado entre las dos secciones del sobrecalentador

- A la salida del sobrecalentador

La ubicación ideal de un atemperador de sobrecalentador, en lo que respecta al control del proceso, debería estar a la salida del sobrecalentador, ya que el control sería directo y no habría tiempo de retraso en la respuesta del control; ésto conlleva problemas, como el:

- Poder arrastrar agua hacia la turbina por el flujo de vapor

- Que el atomizador no protegería al metal del sobrecalentador del recalentamiento

El atemperador del sobrecalentador ubicado en su interior hace frente a los problemas citados y es el que se prefiere; en esta situación:

- La temperatura del vapor que sale del sobrecalentador no sobrepasa la temperatura máxima deseada

- El vapor procedente de los elementos del sobrecalentador de la primera etapa se mezcla a fondo, a la vez que entra en el sobrecalentador de la segunda etapa a una temperatura uniforme

Por lo que respecta al recalentador, el atemperador se coloca en el lado de entrada del mismo.

El atemperador atomizador del sobrecalentador para la regulación de la temperatura de vapor de la Fig XIX.24, es el que ha dado los resultados más satisfactorios.

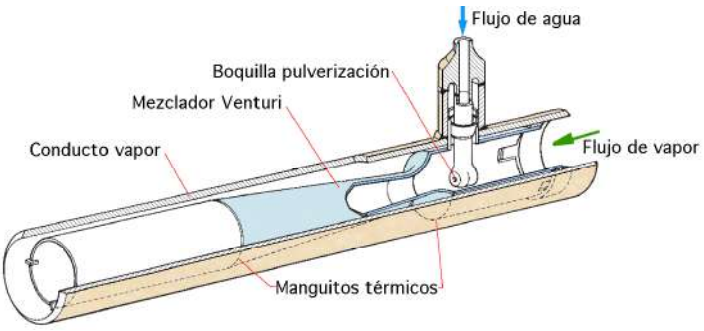


Fig XIX.24.- Atemperador atomizador del sobrecalentador para regular la temperatura del vapor

- Dentro de la tubería de vapor sobrecalentado, a través de una tobera atomizadora, se introduce agua de alta pureza en el cuello de una sección Venturi, sita en el interior de la tubería de vapor

- Como consecuencia de la acción atomizadora y de la alta velocidad de circulación del vapor a través de la garganta del Venturi, el agua se vaporiza, se mezcla con el vapor sobrecalentado y lo enfría

- Una característica constructiva importante es la prolongación de la sección Venturi, en un manguito o escudo térmico, aguas debajo de la tobera atomizadora, lo que protege la tubería de alta temperatura de los choques térmicos

El choque térmico es debido a la presencia de gotitas de agua no vaporizadas, que impactan sobre la superficie caliente de la tubería.

Para regular la temperatura del vapor, el atemperador atomizador permite una acción rápida y un control sensible. Es importante que el agua atomizada sea de la más alta pureza, porque los sólidos arrastrados por el agua pasan al vapor provocando depósitos en los tubos del sobrecalentador, en la tubería y en los álabes de la turbina. La concentración de sólidos en el agua atomizada por el atemperador no debe superar 2,5 ppm. Una fuente de agua extremadamente pura son las purgas de los calentadores de AP del agua del ciclo, aunque se necesita una bomba de AP resistente a la corrosión.

Los requisitos de funcionamiento de la caldera, implican tres disposiciones posibles de atemperadores:

a) Atemperador de simple etapa.- Hay que instalar un atemperador simple en cada una de las tuberías de conexión entre las etapas del sobrecalentador

b) Atemperador doble.- Es un atemperador de simple etapa, con dos atomizadores de agua dispuestos en serie, instalado en la tubería de conexión entre dos etapas de sobrecalentamiento. Esta disposición se emplea cuando $\begin{cases} \textit{el agua de atomización excede de la capacidad de un solo atomizador} \\ \textit{no se puede lograr el reglaje requerido con un único atomizador de agua} \end{cases}$

La aplicación normal exige una válvula de control del atomizador por cada tobera de atomización. La operación del atemperador doble es secuencial, abriendo en primer lugar y cerrando en úl-

timo lugar la válvula de control del atomizador que se encuentra aguas abajo

c) Atemperador de dos etapas.- Se utilizan dos atemperadores de simple etapa; uno se coloca en las tuberías de conexión entre la primera y segunda etapa del sobrecalentador, y el otro se sitúa entre las etapas segunda y tercera del mismo

En primer lugar se usa el atemperador de la primera etapa, hasta que opere con el máximo flujo atomizador, teniendo en cuenta la diferencia mínima admisible entre la temperatura del vapor que sale del atemperador y la temperatura de saturación

El atemperador de la segunda etapa se emplea después de que se alcance el límite de flujo en el de la primera etapa

La presión de la bomba de alimentación de la caldera debe facilitar la presión requerida en el sistema del atemperador; si ésto no es posible se:

- La añade un escalón de presión, o

- Dispone de una bomba independiente para el agua de atomización, o

- Pone una válvula en la tubería de alimentación que incremente la resistencia del sistema de caldera hasta los niveles precisos

Para garantizar la alta calidad del agua en el atomizador, se puede instalar un equipo de limpieza en el retorno del condensado y agua de aporte hacia los calentadores del ciclo.

XIX.8.- APLICACIÓN DEL ATEMPERADOR EN CALDERAS DE PRESIÓN UNIVERSAL

Las calderas de presión universal se suministran sin atemperadores en el sobrecalentador; éstos se pueden incluir para reducir las variaciones de temperatura a la salida del sobrecalentador durante los transitorios.

Los atemperadores del atomizador se instalan entre la salida del $sobrecalentador_{primario}$ y la entrada del $sobrecalentador_{secundario}$, aguas arriba de la válvula de parada o cierre del sobrecalentador de AP. El agua del atomizador se suministra desde la entrada al economizador de la caldera.

La atemperación del atomizador corrige, temporalmente, las desviaciones de la temperatura del vapor principal y no es el medio básico de control de la temperatura del vapor. En condiciones de régimen permanente, la temperatura del vapor se determina mediante la relación entre el régimen de fuegos y el flujo de agua de alimentación

Cortatiros de distribución de los gases.- Los bancos tubulares horizontales de convección, en el paso posterior o zona de recuperación de una caldera, se pueden dividir en dos o más pasos independientes de gases, separados por una pared deflectora o por un tabique.

El uso de cortatiros en estos pasos de gases permite:

- Distribuir los gases entre las superficies termointercambiadoras, colocadas en cada uno de ellos
- Regular las temperaturas del vapor recalentado y sobrecalentado

Las consideraciones de diseño son:

- Los cortatiros se deben colocar en una zona de gases fríos, para asegurar su máxima fiabilidad; normalmente se encuentran aguas abajo de todas las superficies termointercambiadoras de la caldera

- La pérdida de tiro a través de la unidad puede aumentar con combustibles alternativos, por lo que este parámetro se tiene que optimizar

- El diseño y puesta a punto del sistema de control son muy críticos, ya que la respuesta del control de un cortatiros es más lenta que la de los atemperadores del atomizador; por lo tanto, para el control de transitorios se emplean siempre los atemperadores de atomizador

- En condiciones de máximo desequilibrio en la distribución de los gases, su temperatura en la zona de cortatiros y las superficies termointercambiadoras próximas a ellos llegarán a sus valores más altos, por lo que estas temperaturas marcarán los requisitos de diseño del metal

Para la optimización de los sistemas de control de la temperatura de vapor, los cortatiros de distribución de gases se combinan con una atemperación por atomizador, y facilitan el ajuste y control a largo plazo, de las temperaturas del sobrecalentador y del recalentador con una mínima influencia en el rendimiento global de la unidad. Durante los transitorios, los atemperadores del atomizador facilitan el control inmediato de temperatura.

Recirculación de gases.- Es otro método de controlar la temperatura del vapor sobrecalentado y del recalentado; los gases a la salida de la caldera, economizador o calentador de aire se reintroducen en el hogar mediante ventiladores y conductos adecuados. Para controlar la temperatura del vapor, el sistema de gases que los introduce en la zona inicial de combustión del hogar, se conoce como reciclado o recirculación de gases.

La atemperación de gases es el sistema que introduce los gases reciclados a la salida del hogar, para controlar su temperatura cuando le abandonan.

La Fig XIX.25 presenta una aplicación de recirculación de gases a través de la parte superior de la tolva de ceniza, y otra aplicación de atemperación de gases, a través de la parte superior del hogar, en una caldera de tipo radiante. En la mayoría de los casos, a la salida del economizador se obtienen los gases para el reciclado, que se realiza de forma que su introducción evite cualquier interferencia en la combustión del combustible. Aunque los gases reciclados se pueden utilizar con diversos propósitos, su función básica consiste en modificar la distribución de la absorción de calor dentro de la unidad generadora de vapor; en condiciones de funcionamiento variables facilitan, el:

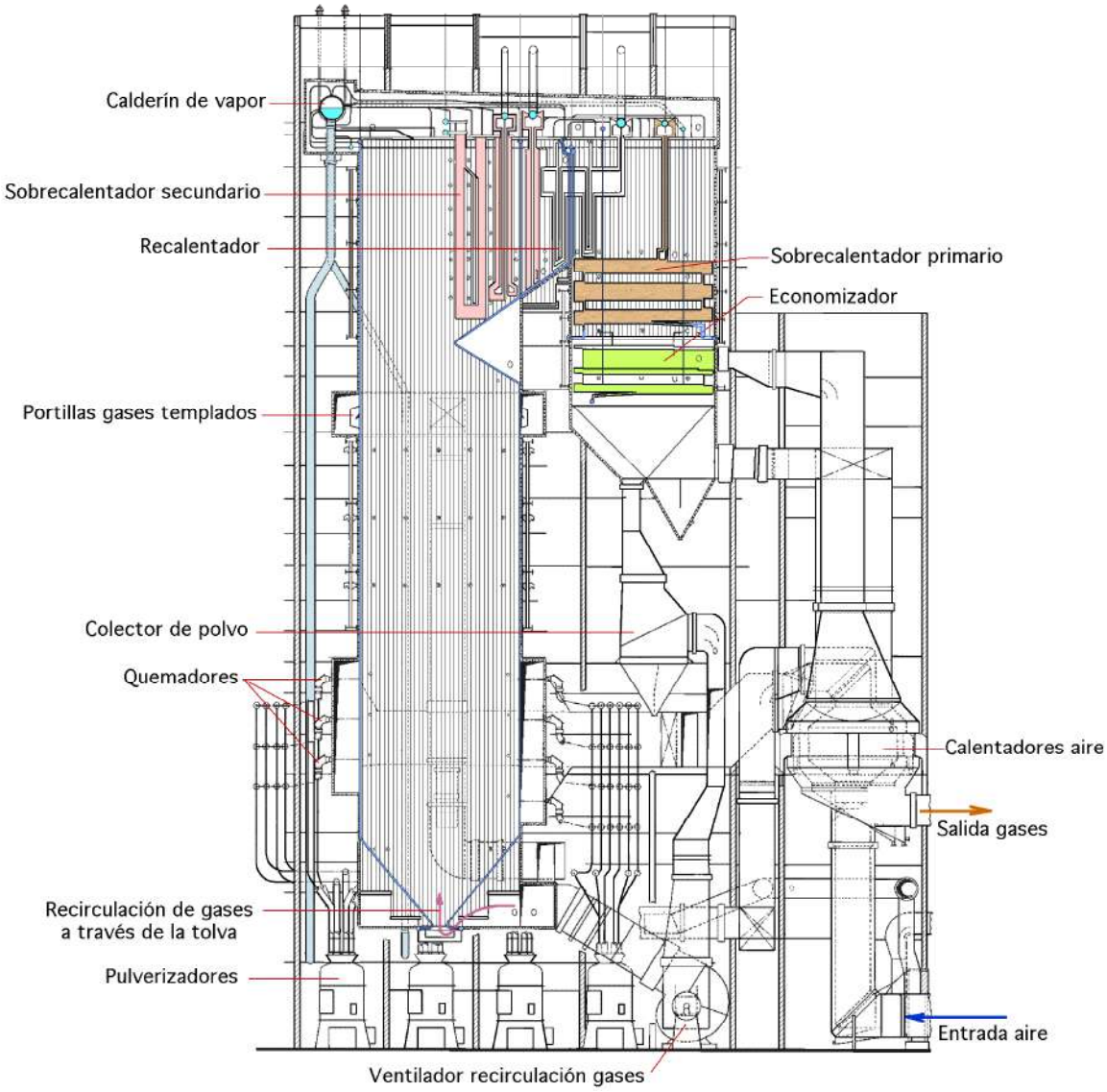


Fig XIX.25.- Caldera radiante con atemperación de gases para control de temperatura gases salida del hogar

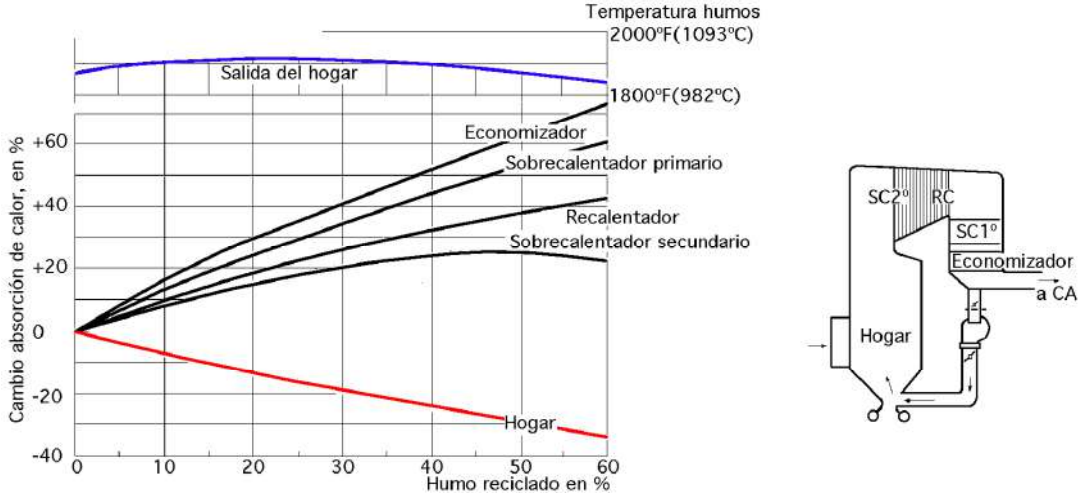


Fig XIX.26.- Efecto de la recirculación de gases sobre la distribución de absorción de calor para un régimen constante de fuegos

- Ajuste de la absorción de calor (que se emplea como parámetro de diseño de la superficie termointercambiadora)

- Control de la distribución de la absorción de calor

Una característica importante de los gases reciclados es que su utilización modifica sólo la absorción de calor a lo largo del generador de vapor, siendo su influencia despreciable sobre la absorción global de la caldera, y sin apenas modificación de los gases enviados a la chimenea.

El efecto térmico del humo reciclado depende de $\begin{cases} \text{- la cantidad de humo reciclado} \\ \text{- la ubicación del punto de introducción} \\ \text{- el régimen de desprendimiento de calor en el hogar} \end{cases}$

La Fig XIX.26 indica la variación en la absorción de calor para un reciclado de gases introducidos por la tolva del hogar. La introducción de los gases en este punto produce una reducción notable de la absorción de calor en el hogar, aumentando la absorción de calor en la zona de convección.

La absorción de calor en el hogar depende de la temperatura de los gases y su distribución, ya que aquí el calor se transfiere principalmente por radiación; la introducción del reciclado de gases en la tolva del hogar reduce su absorción modificando la distribución de temperaturas de los gases en el hogar.

La mayor parte del calor absorbido por el sobrecalentador, el recalentador y el economizador se transfiere por convección, y depende de $\begin{cases} \text{la temperatura de los gases} \\ \text{el régimen de su flujo másico} \end{cases}$, estando ambos parámetros afectados por el reciclado de gases.

Cuando la velocidad másica de gases que fluyen a través del banco de convección se incrementa por la recirculación de gases, la cantidad de calor transferido puede aumentar, disminuir o quedar invariable, según sean las alteraciones producidas entre la temperatura y puesta en servicio de los gases que entran en el banco. Las Fig XIX.26 y 28 ilustran el efecto del reciclado de los gases, según se introduzcan en la tolva o en un punto próximo a la salida del hogar.

La Fig XIX.26 presenta una condición en la que la temperatura de los gases que salen del hogar, igual a la temperatura de los gases que entran en el $sobrecalentador_{secundario}$, permanece invariable con el reciclado de gases; si la cantidad de gases reciclados aumenta, la absorción de calor en el $sobrecalentador_{secundario}$ se incrementa.

La absorción de calor aumenta en el *recalentador*, $sobrecalentador_{primario}$ y *economizador*, teniendo lugar el incremento mayor en el lado frío de la unidad.

Mientras el reciclado de gases hacia la tolva del hogar reduce siempre la absorción de calor en el mismo, su influencia sobre la temperatura de los gases a la salida del hogar depende del régimen

del hogar, que puede aumentar, disminuir o quedar inalterable. Los gases reciclados que se introducen por la tolva del hogar reducen la temperatura de los gases a la salida del mismo, cuando la unidad opera con cargas elevadas y, por el contrario, la temperatura aumenta en el caso de cargas bajas.

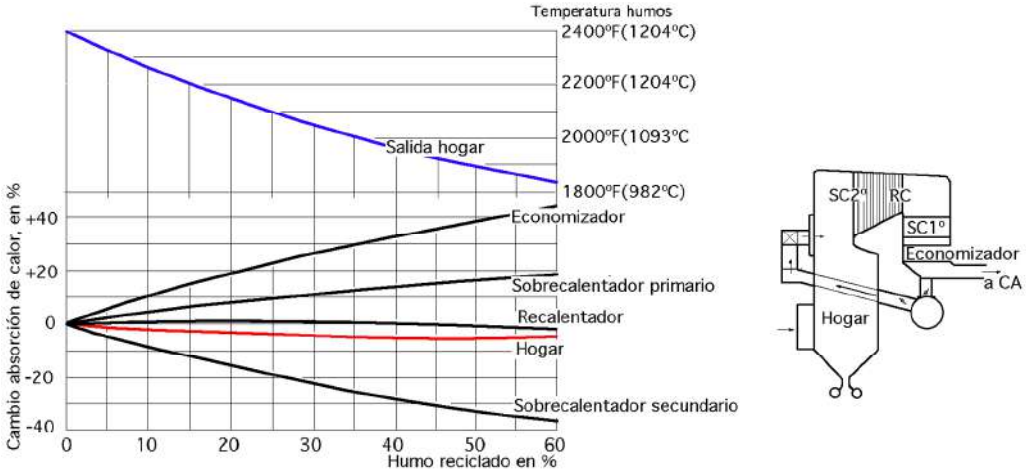


Fig XIX.27.- Efecto de la atemperación de gases sobre la distribución de absorción de calor para un régimen constante de fuegos

En la Fig XIX.27 se presenta el efecto de introducir los gases de atemperación en un punto próximo a la salida del hogar. Como la parte del hogar en que la absorción de calor es mayor no queda afectada por el reciclado de los gases de combustión, la absorción de calor en el hogar disminuye ligeramente. Sin embargo, a la salida del hogar hay un notable descenso en la temperatura de los gases, provocado por la dilución de los gases calientes de la combustión en el gas reciclado más frío. Como consecuencia de la ubicación del recalentador, Fig XIX.27, su absorción se mantiene constante, independientemente del porcentaje de gases extraído correspondiente a la atemperación de gases. La introducción de los gases reciclados en un punto intermedio produce absorciones de calor y temperatura de gases que se sitúan entre las señaladas.

Exceso de aire.- En el caso de un calderín que opera a cargas parciales, los operadores saben que pueden aumentar la temperatura en el sobrecalentador de convección, disminuyendo la absorción de calor en el hogar, incrementando el $aire_{exceso}$ comburente. Los gases que van hacia la chimenea, provocan mayores pérdidas de calor sensible; la caída del rendimiento de la caldera se compensa con el aumento del rendimiento de la turbina.

Selección de quemadores.- La temperatura del vapor se puede regular seleccionando los quemadores requeridos por la carga; para cargas inferiores a la carga nominal se pueden obtener temperaturas más altas, funcionando sólo los quemadores que proporcionan la máxima temperatura de gases a la salida del hogar. Cuando se necesita disminuir la temperatura del vapor, los fuegos se deben cambiar a los quemadores inferiores; éste método de control se mejora mediante:

- Una adecuada distribución de los quemadores a lo largo de la altura de la pared del hogar, ó

- Instalando un quemador especial próximo a la salida de los gases del hogar

Quemadores orientables.- La regulación de la temperatura del vapor, modificando la distribución de la absorción de calor en el hogar, se puede realizar también empleando quemadores orientables, para subir o bajar la zona principal de combustión, dentro del hogar.

Hogares con diferentes caldeos.- En algunos hogares divididos, el sobrecalentador recibe calor sólo desde una de las secciones del hogar, mientras que la otra sólo facilita calor para la generación de vapor saturado o para enviar gases calientes al recalentador.

La temperatura del vapor se regula modificando el aporte de combustible entre los dos hogares. En principio, esta disposición es similar a la de un sobrecalentador autónomo (con fuego independiente), que en el pasado se utilizó ampliamente en aplicaciones navales. El control de la temperatura de vapor mediante un hogar dividido con caldeos independientes, actualmente no se utiliza en proyectos nuevos.

Sobrecalentadores autónomos.- Un sobrecalentador que está totalmente separado de la unidad generadora de vapor, y que está caldeado exclusivamente con un fuego, se puede utilizar para una o varias calderas de vapor saturado; esta disposición no es económica para plantas de generación de energía, ya que normalmente precisan de una gran cantidad de vapor de alta temperatura.

Temperatura del vapor sobrecalentado.- La necesidad de regular la temperatura del vapor recalentado y los métodos de ajuste y control para llevarla acabo, son los mismos que para el vapor sobrecalentado.

En una unidad con calderín, la:

- Eliminación de parte de la superficie de calentamiento de la caldera aguas arriba del recalentador para incrementar la temperatura del vapor sobrecalentado

- Reducción de la superficie del sobrecalentador con el fin de disminuir la temperatura del vapor sobrecalentado

dan lugar a un aumento de la temperatura del vapor recalentado, que puede ser inadmisible.

Para reducir la temperatura de los gases a niveles inferiores a la temperatura de escorificación en los bancos tubulares de convección, al tiempo que se alcanza la temperatura de vapor deseada, una gran parte del aporte total de calor se tiene que absorber en el hogar, en el sobrecalentador y en el recalentador, de modo que no haya superficie de caldera disponible aguas arriba del sobrecalentador.

Algunas calderas disponen de una cierta división del hogar, mediante pantallas o paredes divisoras refrigeradas por agua, que pueden servir como superficies de ajuste, si la temperatura de los gases a la salida del hogar lo permite.

XIX.9.- SISTEMAS BIPASO Y PUESTA EN SERVICIO

Las calderas de AP con calderín y para las calderas de presión universal de proceso directo deben responder a los cambios operativos que se requieren en las grandes plantas de generación de energía que queman combustibles fósiles, lo que exige puestas en servicio y cambios de producción rápidos, frecuentes y fiables, para hacer frente a una producción económica de electricidad. Durante la puesta en servicio, o en condiciones de baja producción < 20%, los sistemas de control de la temperatura del vapor mediante atemperadores con atomizador de agua, resultan ineficaces por cuanto la temperatura del vapor a la salida tiende a ser la misma que la temperatura de los gases, debido a que el flujo de gases es muy superior al flujo de vapor, por lo que habrá que tomar medidas para asumir esa gran diferencia en los flujos, junto a las necesidades de presión y temperatura del vapor en la turbina y en la caldera.

Para cumplimentar estos requisitos en las calderas con calderín y en las calderas de presión universal de proceso directo, se han desarrollado tres sistemas de bipaso y puesta en servicio.

a) SISTEMA BIPASO DE CALDERA CON CALDERÍN.- Consiste en un sistema de control y un conjunto de tuberías y válvulas, Fig XIX.28, en los que una sonda se encarga de monitorizar y vigilar la temperatura de los gases en los tubos de salida del sobrecalentador y del recalentador, para controlar los regímenes de fuego y la temperatura de los gases durante la puesta en servicio.

El sistema bipaso de caldera radiante realiza las siguientes funciones:

- Minimiza el tiempo de puesta en servicio

- Controla las retiradas de servicio con vistas a la nueva puesta en servicio

- Facilita el control de la temperatura del vapor para equipararlo a la temperatura del metal de los álabes de la turbina

- Opera a presión dual

Estas características reducen las tensiones en la turbina, con lo que se mejora su disponibilidad y los costes de mantenimiento.

Tiempo de puesta en servicio.- El sistema bipaso reduce el tiempo necesario para realizar la puesta en servicio desde el estado frío, ya que el sistema controla las diferencias de temperatura de: $\begin{cases} \text{- La superficie de } \begin{cases} \text{la caldera de vapor saturado} \\ \text{el sobrecalentador} \end{cases} \\ \text{- El metal de la turbina} \end{cases}$

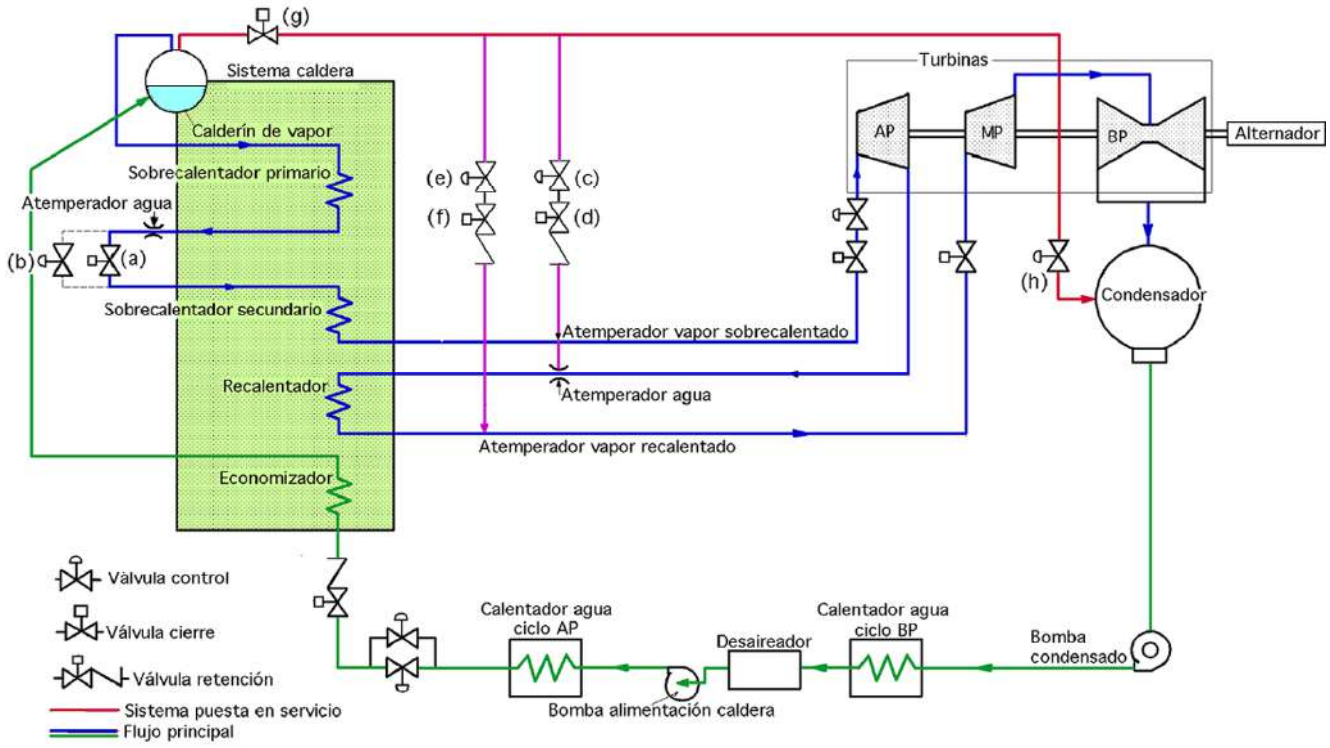


Fig XIX.28.- Diagrama sistema bipaso de caldera con calderín

lo que se realiza mediante el control directo de la temperatura del vapor, (mezcla de vapor saturado y del que sale del sobrecalentador y del recalentador), tal como se indica en la Fig XIX.28, disposición que facilita la temperatura idónea de vapor para la turbina, sin restricción alguna en el régimen de fuegos, para la puesta en servicio de la caldera.

Cambio rápido de la carga.- Mediante un juego de válvulas de $\begin{cases} cierre \\ control\ del\ sobrecalentador \end{cases}$, el sistema puede operar a presión dual, controlando independientemente la presión de admisión en la turbina y en el calderín de la caldera.

El sistema de control durante los cambios de producción facilita el funcionamiento de los principales componentes de la caldera a presión constante, y el de la turbina a presión variable.

La operación a presión dual minimiza las solicitaciones térmicas en la caldera y en la turbina; una retirada de servicio a presión dual, mantiene la $\begin{cases} - \ caldera\ muy\ próxima\ a\ su\ presión\ máxima \\ - \ turbina\ muy\ próxima\ a\ su\ temperatura\ máxima \end{cases}$, con vistas a una rápida nueva puesta en servicio.

Esta forma de operar a presión dual es muy útil y se emplea en el caso de parada y posterior puesta en servicio, que implica el trabajo cíclico a dos turnos, con el fin de mantener la turbina y la tubería de vapor próximas a su máxima temperatura, para facilitar una rápida puesta en servicio con mínimas solicitaciones.

La flexibilidad del sistema bipaso permite su adaptación a gran parte de situaciones operati-

vas; se puede amoldar a un mal funcionamiento de la turbina, desde el sincronismo hasta puntos concretos de la carga, ajustando la temperatura y el flujo de vapor. 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 de la Fig XIX.28, con sus funciones asociadas, facilitan la flexibilidad requerida del sistema, según se resume en la Tabla XIX.2.

Tabla XIX.2.- Funciones asociadas a algunas válvulas

Válvula	*Función*
(a)	*Válvula de cierre (parada) del sobrecalentador secundario* *Separa el sobrecalentador secundario del resto del generador de vapor* *Está cerrada cuando se emplea el sistema bipaso* *Se diseña para abrir por encima del 70% de carga*
(b)	*Válvula de bipaso de la válvula (a)* *Controla la presión del vapor que sale del sobrecalentador secundario, inferior a la del calderín,* *para puesta en servicio, para operación a presión variable y para atemperación del vapor* *La capacidad de diseño es del orden del 70% del flujo de diseño de la caldera*
(c)	*Válvula de control del atemperador de salida del vapor principal* *Reduce la temperatura del vapor principal para equilibrarla con la del metal del primer escalón de la turbina* *durante la puesta en servicio en frío y tras la parada de fin de semana* *Cierra a cargas superiores al 20%*
(d)	*Válvula de cierre que facilita la incomunicación cuando la válvula (c) esté cerrada*
(e)	*Válvula de control del atemperador de salida del vapor recalentado* *Reduce la temperatura del vapor recalentado para equilibrarse con la de zonas no purgables,* *durante puesta en servicio "fría", y puesta en servicio "templada" tras parada de fin de semana* *Cierra a cargas del orden del 20%*
(f)	*Válvula de cierre que facilita la incomunicación cuando la válvula (e) esté cerrada*
(g)	*Válvula de cierre de bipaso del sobrecalentador primario* *Se usa para incomunicar el sistema bipaso durante la operación normal* *Cierra cuando están cerradas las válvulas (c), (e) y (h)*
(h)	*Válvula de control de bipaso del sobrecalentador primario al condensador* *Facilita los fuegos para controlar la temperatura de los gases entrando en el sobrecalentador,* *para lograr una alta temperatura de vapor durante la puesta en servicio* *Se emplea principalmente en la puesta en servicio en caliente y en la retirada de servicio* *Cierra a cargas mayores del 20% de la nominal*

Control de la presión del calderín y salida del sobrecalentador.- En la puesta en servicio que sigue a las paradas nocturnas, los gases que salen del hogar se mantienen a alta temperatura, para así mantener alta la temperatura del vapor principal y del recalentado.

La superficie de la caldera se puede aislar de la superficie del sobrecalentador mediante las válvulas de cierre (a) y de bipaso (b) del $sobrecalentador_{secundario}$.

Para elevar la $\begin{cases} \text{- } temperatura\ del\ vapor \\ \text{- } presión\ del\ calderín \end{cases}$ la caldera puede operar con los fuegos al régimen deseado, mientras las presiones en el $\begin{cases} sobrecalentador_{secundario} \\ a\ la\ entrada\ de\ la\ turbina\ de\ AP \end{cases}$ se mantienen bajas.

Si la presión del calderín aumenta rápidamente, o alcanza su límite, la válvula bipaso (h) del $sobrecalentador_{primario}$ descarga la presión del calderín hacia el condensador, evitando que el con-

densado vaya a sumidero.

Control de la temperatura del vapor recalentado.- Durante la puesta en servicio y parada, el control de la temperatura del vapor recalentado se mantiene por medio de la válvula (e) del atemperador de vapor. Antes de que el vapor entre en la turbina, el recalentador no tiene flujo alguno de vapor; los tubos del recalentador absorben calor de los gases y pueden alcanzar la temperatura de los mismos, del orden de 1000ºF (538ºC).

Para la puesta en servicio en frío y templada (tras la retirada de servicio correspondiente a un fin de semana), cuando el vapor atraviesa el recalentador y comienza a entrar en la turbina de MP, la temperatura del vapor recalentado sube rápidamente hasta alcanzar la de los gases, provocando un importante desequilibrio con la temperatura de las zonas no purgables del vapor recalentado en la turbina.

Los atemperadores de atomización con agua no son efectivos a bajas cargas; la temperatura del vapor recalentado se controla mediante la temperatura de los gases en los bancos de convección.

La atemperación del vapor recalentado, con vapor saturado procedente del calderín, limita el aumento de la temperatura del vapor a la salida del recalentador.

Control de la temperatura del vapor sobrecalentado.- La válvula (c) del atemperador del vapor sobrecalentado controla la temperatura del vapor que sale del sobrecalentador.

Los atemperadores de atomización de agua no son efectivos para cargas bajas de la caldera, ya que la temperatura del vapor sobrecalentado viene definida por la temperatura de los gases en los bancos tubulares del sobrecalentador; por lo tanto, la temperatura del vapor sobrecalentado se controla mediante una válvula del atemperador de vapor, empleando vapor saturado procedente del calderín para reducir la temperatura.

Puesta en servicio fría.- Es la puesta desde el estado frío en el que la unidad no tiene presión alguna en el calderín de la caldera, o que los gases del hogar están a la temperatura ambiente; la temperatura correspondiente al metal de la turbina es inferior a 300ºF (150ºC), y por ello es necesario un precalentamiento.

Puesta en servicio templada.- Es la de una unidad que ha estado retirada de servicio o parada, (del orden de 2 días); la temperatura del metal de la turbina es del orden de los 300ºF (150ºC) y la presión del calderín es elevada del orden de 500 psig (34,5 bar).

Puesta en servicio caliente.- El arranque en caliente es la puesta en servicio de una unidad que ha estado retirada del servicio o parada del orden de 6 a 8 horas. La caldera se mantiene sellada para que se conserve la máxima energía interna. La presión del calderín es bastante alta, mientras que el vacío en el condensador se mantiene normal.

La temperatura del metal de la turbina es del orden de 900ºF (482ºC); tras una controlada retirada de servicio se puede producir en el metal de la turbina una caída de temperatura de unos 100ºF (56ºC), por lo que la mínima temperatura de vapor que se precisa para la nueva puesta en servicio es del orden de 800ºF (427ºC). Cuando el recalentador no tiene flujo alguno en su interior, la temperatura del vapor es menor que la temperatura de los gases entrantes al sobrecalentador.

Si una unidad está retirada de servicio, pero se encuentra preparada para una rápida entrada, la $\begin{cases} \textit{temperatura del metal de la turbina debe ser de 1000ºF (538ºC)} \\ \textit{presión del calderín debe ser la que había en el momento del disparo de la unidad} \end{cases}$

Para alcanzar la temperatura precisa de gases, se pueden mantener los fuegos en el hogar y purgar el exceso de vapor hacia el condensador.

Retirada de servicio.- Cuando la producción de una unidad se va reduciendo a cero, 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 la turbina y la presión en la caldera se deben conservar lo más bajas posible, cuando todavía tenga algo de carga la unidad.

La presión en la admisión se controla por medio de la válvula (b), y la atomización necesaria para reducir las temperaturas del vapor y del metal, de acuerdo siempre con las curvas de enfriamiento, se controla con las válvulas (c) y (e). Una vez desconectada o disparada la unidad, los ventiladores del generador de vapor se deben mantener en servicio para refrigerarlo.

Funcionamiento a presión variable.- En la mayoría de los casos, el consumo de calor que tiene la unidad se puede aumentar a cargas parciales, si la presión de la caldera se reduce con la producción; este modo operativo se identifica como operación a presión variable.

Las válvulas de $\begin{cases} \textit{cierre (a) del sobrecalentador}_{secundario} \\ \textit{bipaso (b)} \end{cases}$, permiten la operatividad de la unidad a un nivel de presión constante en el calderín y en el $\textit{sobrecalentador}_{primario}$, mientras que la presión de salida del $\textit{sobrecalentador}_{secundario}$ varía con la producción. En estas condiciones se mantiene la temperatura del vapor de la turbina en el nivel deseado, en un campo de cargas mucho mayor que el que se podría lograr con la operación a presión constante en la admisión.

Cuando se opera a cargas reducidas manteniendo constante la presión en el calderín y en el $\textit{sobrecalentador}_{primario}$, se facilita un rápido aumento de la producción.

Puesta en servicio sin sistema bipaso.- La unidad se puede poner en servicio y operar sin utilizar el sistema bipaso. La apertura completa de la válvula (a) permite una puesta en servicio de la unidad, como una caldera convencional con calderín.

b) SISTEMA DE PUESTA EN SERVICIO DE CALDERAS DE PRESIÓN UNIVERSAL

Un requisito fundamental para los sistemas de puesta en servicio de unidades de presión universal y de bipaso, 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 la caldera.

Otras características que se incluyen son, la:

- Provisión de un bipaso de turbina, hasta que se equilibren la $\begin{cases} \text{- presión y} \\ \text{- temperatura} \end{cases}$ *del vapor*

- Reducción de la $\begin{cases} \text{- presión y} \\ \text{- temperatura} \end{cases}$ *en el flujo del bipaso, antes de que el vapor penetre en el condensador y en el equipo auxiliar*

- Recuperación de calor durante la puesta en servicio

- Provisión de suficiente agua limpia para la completa puesta en servicio

Existen dos sistemas de puesta en servicio para las calderas de presión universal, a cualquier rango de cargas, funcionando la caldera a presión $\begin{cases} \text{- constante} \\ \text{- variable} \end{cases}$

b.1) SISTEMA DE PUESTA EN SERVICIO A PRESIÓN CONSTANTE.- Para este tipo de puesta en servicio se dispone de un separador de vapor o tanque de expansión, ubicado en un bipaso, que se puede aislar de la caldera durante la operación normal, Fig XIX.29. Durante la puesta en servicio y en operaciones a cargas bajas, la bomba de agua de alimentación suministra el flujo mínimo requerido de agua de alimentación, para proteger los circuitos del hogar.

El fluido que sale del $sobrecalentador_{primario}$ a la máxima presión,se envía a través de la válvula reductora de presión (E) hacia un tanque de expansión, en el que la mezcla *agua-vapor* se separa durante el período de puesta en servicio.

El nivel del agua del tanque de expansión se controla mediante las válvulas de purga (R) y (N)

Para lograr la máxima recuperación de calor la válvula (R) controla el flujo hacia el desaireador térmico; el exceso de agua que supere la capacidad del desaireador se descarga al condensador a través de la válvula (N). Si las purgas no están dentro de los límites de calidad del agua, todo el flujo se conduce a través de la válvula (N) hacia el condensador.

La válvula de bloqueo (K) permanece cerrada hasta que exista un determinado nivel en el tanque de expansión, con el fin de asegurar que el agua no entre en las tuberías de vapor.

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

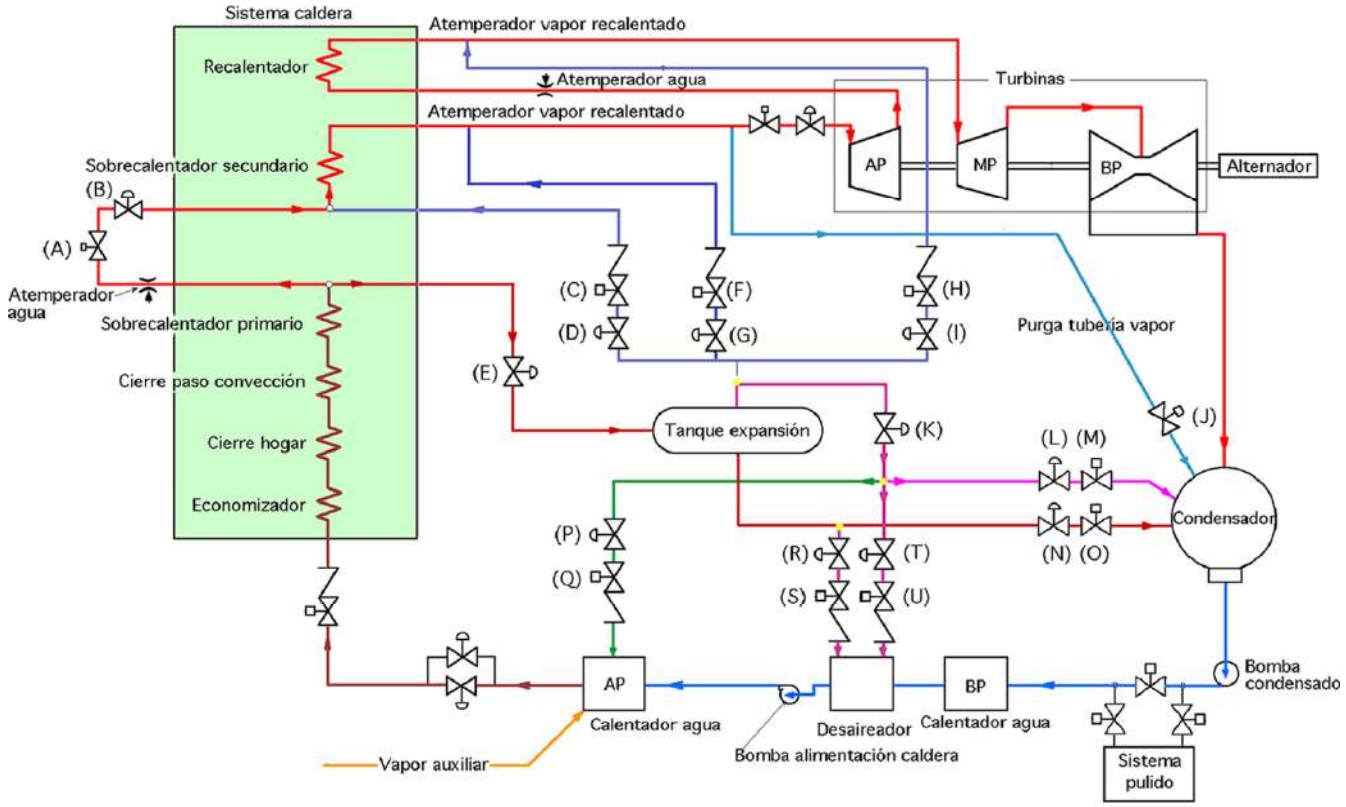


Fig XIX.29.- Diagrama sistema puesta en servicio de caldera de presión universal, operando a presión constante en el hogar

El fluido que sale del $sobrecalentador_{primario}$ a la máxima presión, se envía a través de la válvula reductora de presión (E) hacia un tanque de expansión, en el que la mezcla *agua-vapor* se separa durante el período de puesta en servicio; el nivel del agua del tanque de expansión se controla mediante las válvulas de purga (R) y (N)

Para lograr la máxima recuperación de calor la válvula (R) controla el flujo hacia el desaireador térmico; el exceso de agua que supere la capacidad del desaireador se descarga al condensador a través de la válvula (N). Si las purgas no están dentro de los límites de calidad del agua, todo el flujo se conduce a través de la válvula (N) hacia el condensador .

La válvula de bloqueo (K) permanece cerrada hasta que exista un determinado nivel 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 (K) permite el paso hacia la tubería que va desde el tanque de expansión al desaireador, manteniendo la presión en el desaireador que controla la válvula (T); ésto permite retornar todas las purgas hacia el condensador, a través de la válvula (N), durante el período de depuración en caliente, sin utilizar una fuente de vapor auxiliar que mantenga la presión en el desaireador, sirviendo también para recuperar el calor en el tanque de expansión, durante la depuración.

La conexión entre el tanque de expansión y la entrada del $sobrecalentador_{secundario}$, aguas

abajo de la válvula de bloqueo del *sobrecalentador*$_{secundario}$ y de la válvula de control/parada (B), se realiza mediante la:

$$\begin{cases} \text{- tubería del vapor de } \begin{cases} \text{- baja presión} \\ \text{- alta presión aguas abajo} \end{cases} \\ \text{- válvula de retención (C) del sobrecalentador de baja presión} \end{cases}$$

Para el calentamiento de las tuberías de vapor, una vez establecido el nivel en el tanque de expansión, la válvula (C) se abre a 300 psig (20,7 bar), y el vapor seco fluye hacia el *sobrecalentador-secundario*.

La válvula bipaso (J) de la turbina se abre a 300 psig (20,7 bar) de presión en la tubería de vapor principal (sobrecalentado), para colaborar en el calentamiento y vaporización del sobrecalentador, durante el período inicial de la puesta en servicio. Cuando haya suficiente vapor disponible, empieza el accionamiento de la turbina y 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 (M), la cual actúa también como válvula aliviadora de la sobrepresión, para evitar el disparo de las válvulas de seguridad (accionadas por resorte) que hay en el tanque de expansión; la válvula (M) se puede tarar para mantener diferentes presiones en el tanque de expansión, durante la puesta en servicio. El sistema 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 transitorio desde la operación sobre el tanque de expansión hasta el flujo de proceso directo se efectúa a mínima carga; como el vapor que entra y sale del tanque de expansión es seco y sobrecalentado, el cambio de flujo a través del bipaso hasta el proceso directo se cumplimenta con una mínima fluctuación en la temperatura del vapor, mediante:

- La apertura de la válvula de bloqueo (A) y de la válvula combinada de cierre/control (B)

- O con el cierre de las válvulas bipaso (E) y (C)

Control de la temperatura del vapor.- Los medios para controlar la temperatura del vapor principal (sobrecalentado) y del recalentado, en las diversas fases de funcionamiento normal, no son efectivos durante la puesta en servicio y a cargas muy bajas.

El sistema de puesta en servicio, Fig XIX.29, incluye el equipo de atemperación del vapor, desde el tanque de expansión hacia los colectores de salida del vapor principal y del recalentado, para controlar las condiciones del vapor, y así cumplimentar los requisitos de temperatura del metal de la turbina. La válvula del atemperador (G) del vapor de salida del sobrecalentador se utiliza con cargas inferiores al 20%, para introducir vapor saturado desde el tanque de expansión hacia el colector de salida del sobrecalentador.

Para el arranque en frío, el accionamiento inicial de la turbina se hace con vapor saturado,

que pasa desde el tanque de expansión a través de la válvula (G); este vapor se puede mezclar con una determinada cantidad de vapor que pasa a través de la válvula (C) y del $sobrecalentador_{secund.}$, para controlar la temperatura de entrada a la turbina de AP por debajo de 550ºF (288ºC).

La válvula de control (D) facilita la caída de presión, entre el tanque de expansión y el colector de salida del $sobrecalentador_{secundario}$, con vistas a la atemperación.

La válvula del atemperador (J) 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 del atemperador y el de la turbina de AP se limita, fundamentalmente, por consideraciones relativas a la turbina y a su control.

Reducción de la sobrepresión.- El sistema bipaso se utiliza también para reducir una presión excesiva en la caldera, en un disparo de carga; ésto se realiza mediante el empleo de la válvula (E), que envía el exceso de vapor al tanque de expansión.

b.2) SISTEMA DE PUESTA EN SERVICIO A PRESIÓN VARIABLE.- Para unidades de presión universal capaces de operar a presión variable en la caldera, a cualquier tipo de cargas, el sistema de puesta en servicio tiene un separador de vapor ubicado en el circuito del flujo del vapor principal (sobre-calentado), aguas arriba del $sobrecalentador_{primario}$, Fig XIX.30

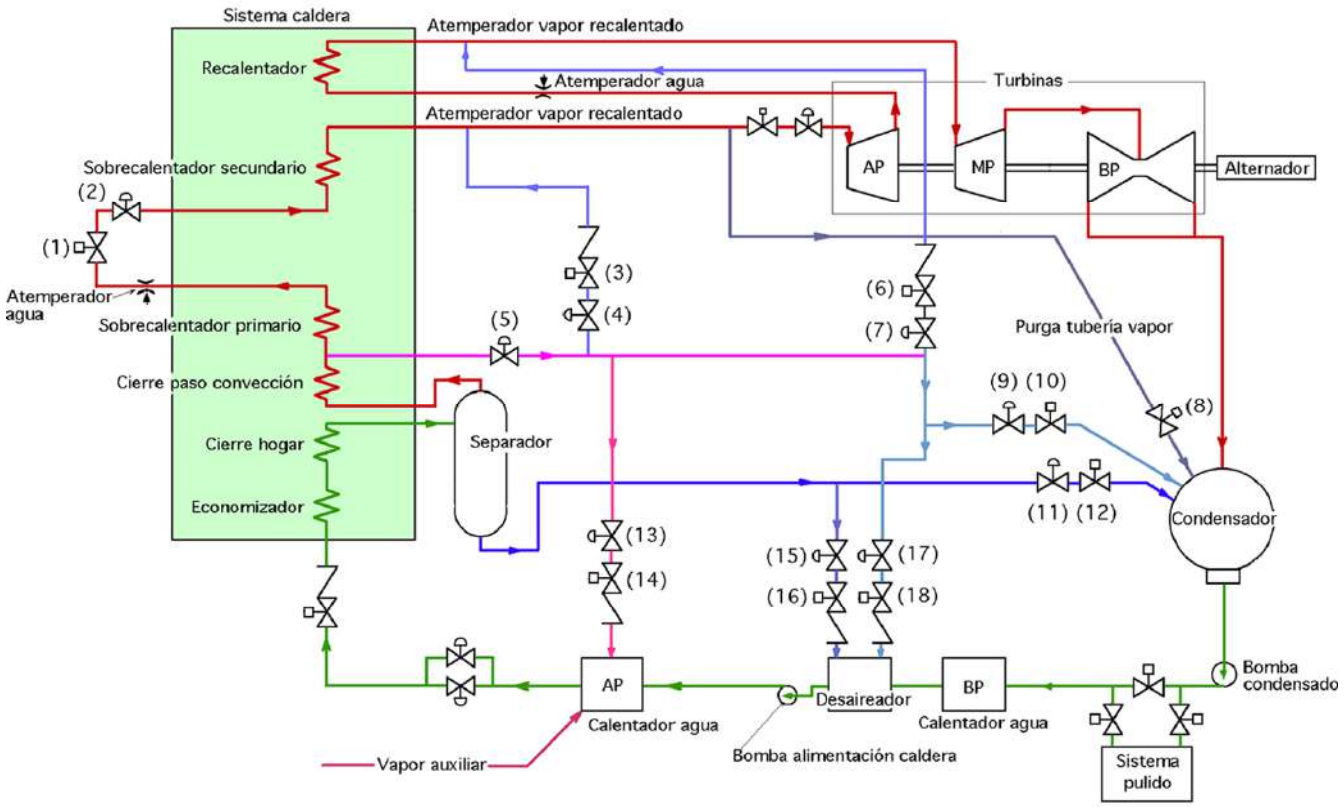


Fig XIX.30.- Diagrama sistema puesta en servicio de caldera de presión universal, operando a presión variable en el hogar

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

En el circuito de puesta en servicio se incluyen:
- *El economizador*
- *El cerramiento del hogar*
- *El separador de vapor*
- *Los pasos apantallados (si los hay)*

La mezcla *agua-vapor* se separa en el separador vertical, durante la puesta en servicio y funcionamiento a bajas cargas. La unidad se pone en servicio con la caldera a baja presión, para obtener la máxima cantidad de vapor, al comienzo de la puesta en servicio; las válvulas (15) y (11) controlan las purgas desde el separador; la válvula (15) controla también el flujo hacia el desaireador, con vistas a la máxima recuperación de calor.

La válvula de bloqueo (5) permanece cerrada hasta que llega al separador una mezcla *agua-vapor*, y se abre en el momento en que se active el indicador de alto nivel en el separador, para evitar que el agua penetre en el sobrecalentador y en el recalentador, a través de los atemperadores de vapor; durante el acondicionamiento en caliente, una vez abierta la válvula (5), la tubería de vapor del desaireador mantiene su presión (controlada por la válvula 17), lo que permite el retorno de todas las purgas hacia el condensador, a través de la válvula (11), sin necesidad de usar una fuente de vapor auxiliar. También sirve para recuperar el calor del vapor separado durante el período de acondicionamiento.

Para el calentamiento de las tuberías de vapor durante la etapa inicial de la puesta en servicio, se establece un flujo de vapor desde el sobrecalentador a través de las purgas de la tubería de vapor principal y de la válvula (8).

Conforme aumenta la entalpía del fluido que entra en el separador, las purgas van disminuyendo hasta que llega vapor seco al separador.

A partir de este momento, las válvulas de purga se cierran, el desaireador se controla con el vapor procedente de la correspondiente extracción de la turbina y la unidad pasa a operar en proceso directo, con todo el flujo de vapor dirigiéndose hacia la turbina.

Válvulas de presión dual.- En la puesta en servicio desde el estado caliente y en las puestas en servicio que siguen a paradas nocturnas, la temperatura de los gases se mantiene elevada, con el fin de conservar las altas temperaturas del vapor principal (sobrecalentado) y del recalentado, lo que produce una subida excesivamente rápida de la presión de admisión, que no es conveniente porque cuando se admite vapor en la turbina se provoca una enorme caída de la temperatura de admisión. Mediante la válvula combinada de cierre y control (2) del sobrecalentador, la superficie de caldera se puede independizar de la superficie del $sobrecalentador_{secundario}$.

El fuego en exceso requerido para subir y mantener la temperatura del vapor, se puede aprovechar para subir la temperatura de saturación o la presión de la caldera, mientras se mantienen bajas presiones en el $sobrecalentador_{secundario}$ y en la entrada a la turbina de AP.

La operación con dos presiones permite regímenes más rápidos en los cambios de carga, ya que como la presión y la temperatura de la caldera se pueden mantener más elevadas, la unidad responde también más rápidamente a cualquier cambio de carga.

Bipaso de sobrecalentador a condensador.- Cuando se alcanza la máxima presión en la caldera, o cuando se hace la puesta en servicio con la válvula de cierre del sobrecalentador abierta, la válvula (9) de bipaso del sobrecalentador al condensador, facilita un medio de control de la presión de la caldera, durante las condiciones de puesta en servicio desde el estado caliente. Durante el transitorio de toma de carga que sigue a la puesta en servicio caliente, la válvula bipaso del sobrecalentador (9) se abre para permitir mayores regímenes de fuegos y mantener el incremento de la temperatura del vapor, hasta que la caldera alcance la carga de control.

El bipaso del sobrecalentador al condensador se emplea:

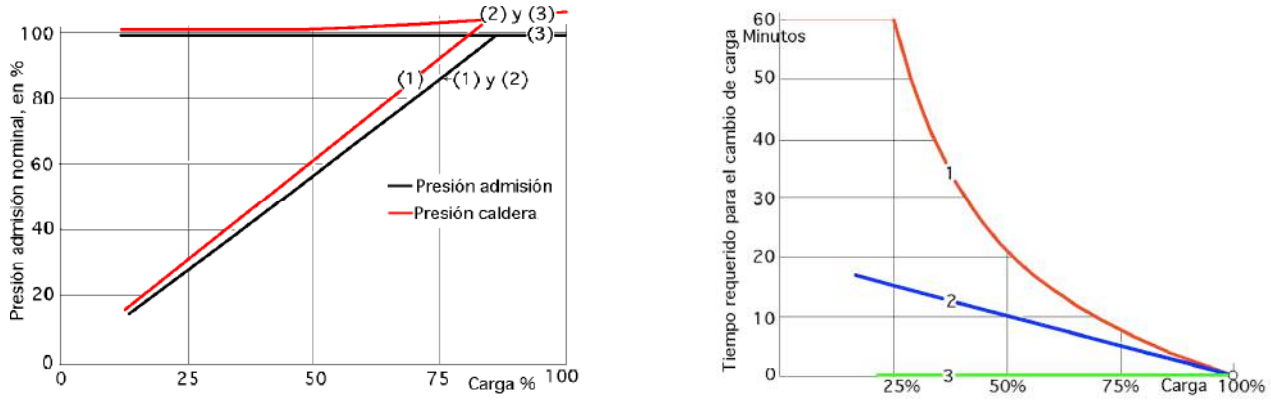
- Para descargar el exceso de presión en la caldera, en el caso de un disparo de la carga

- Como válvula aliviadora de la sobrepresión, para evitar el disparo de las válvulas de muelle de seguridad

Control de la temperatura del vapor.- El sistema de puesta en servicio indicado incluye un dispositivo para la atemperación con vapor saturado. Este vapor se toma aguas abajo del separador y se inyecta en los colectores de salida del vapor sobrecalentado y del recalentado, para controlar las condiciones del vapor durante la puesta en servicio, y cumplimentar los requisitos de temperatura del metal de la turbina.

La válvula (4) del atemperador de vapor de salida del sobrecalentador se utiliza de forma análoga a la válvula (G) del caso anterior. La válvula (2) se utiliza para obtener la caída de presión necesaria, entre el separador y el colector de salida del $sobrecalentador_{secundario}$, con vistas a la atemperación. La válvula (7) del atemperador 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 de flujos, entre el que atraviesa la válvula (7) del atemperador y el que pasa por la turbina de AP, está limitado por consideraciones sobre la turbina y el control de la misma.

c) REGÍMENES PERMISIBLES EN LOS CAMBIOS DE CARGA.- Están basados en regímenes de cambio de temperatura en componentes de caldera para diversos modos de operación, Fig XIX.31.



Curva	*Tipo de operación*	*Presión admisión*	*Presión caldera*
1	*Variable*	*Variable*	*Variable*
2	*Dual*	*Variable*	*Constante*
3	*Constante*	*Constante*	*Constante*

Fig XIX.31.- Regímenes permisibles de cambios de carga, para tres operaciones de la caldera

El mayor tiempo que se requiere para un cambio de carga, funcionando a presión variable, (para evitar roturas de las uniones de la envolvente de las paredes de cerramiento), se debe a:

- Una mayor variación en la temperatura del cerramiento del hogar
- A la necesidad de restringir la velocidad del cambio de temperatura

Con funcionamiento a *presión dual*, el cerramiento del hogar permanece prácticamente a presión y temperatura constantes.

Con funcionamiento a *presión variable*, el colector de entrada del $sobrecalentador_{secundario}$ experimenta un amplio cambio de temperatura; el tiempo necesario para el cambio de carga se basa en la limitación de la velocidad del cambio de temperatura relativa al colector de salida.

Si toda la unidad opera a *presión constante*, para la velocidad del cambio de carga no existe ningún límite impuesto a la caldera, excepto la velocidad del posible cambio del equipo de fuegos.

Con un gran cambio de carga, la velocidad por minuto sería del orden de un 5% de la de plena carga.

REFERENCIAS CAP XIX.- CALDERAS, SOBRECALENTADORES Y RECALENTADORES

B&W.- STEAM 41.- BOILERS, SUPERHEATERS AND REHEATERS.- The Babcock&Wilcox Company.- Barberton, Ohio, USA.-1992

Buecker B.- BASICS OF BOILER AND HRSG DESIGN.- ISBN 0.87814-795-0 Boilers, design and construction, I.Copyright 2002 by Penn Well Corporation, Tulsa, Oklahoma 74112-800-752´9764

Ganapathy V.- INDUSTRIAL BOILERS AND HEAT RECOVERY STEAM GENERATORS.- Design, Applications, and Calculations.- ABCO Industries, Abilene, Texas, U.S.A.- ISBN: 0-8247-0814-8

Nielsen F.S., Danesi P., Radhakrishnan M.V.- MODERN BOILER DESIGN.- BWE Energy India, January 2012

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

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

QUALITY PRODUCTS FOR THE POWER AND STEAM GENERATION INDUSTRY.- B&W, Boilers and Steam Generating Equipment, Environmental Equipment, Auxiliary Equipment