XXV.- CALDERAS PARA PLANTAS ELÉCTRICAS

pfernandezdiez.es

Selección del equipo generador de vapor	*951*
Requisitos del vapor	*953*
Flujo de vapor	*953*
Agua de alimentación de la caldera	*954*
Consideraciones medioambientales	*955*
Combustión de carbón pulverizado	*955*
Caldera radiante (RB)	*955*
Caldera radiante para carbón pulverizado, Carolina (RBC)	*957*
Flujo de combustible	*957*
Flujo de aire	*957*
Flujo de humos	*958*
Flujos de agua y de vapor	*959*
Caldera radiante para carbón pulverizado, tipo Torre	*960*
Flujo de combustible	*960*
Flujos de aire y humos	*963*
Flujos de agua y de vapor	*963*
Caldera de presión universal (UP)	*963*
Caldera de presión universal Zimmer	*966*
Flujo de combustible	*966*
Flujos de aire y humos	*966*
Flujos de agua y de vapor	*967*
Caldera universal (SWUP) para carbón pulverizado, con paredes de tubos del hogar en espiral.	*967*
Esquemas de calderas Bemson de presión universal	*970*
Calderas de gas natural	*971*
Caldera radiante para gas natural y aceite	*972*
Flujos de aire y humos	*973*
Flujos de agua y de vapor	*973*
Referencias	*974*

Las centrales de vapor que utilizan combustibles fósiles y turbinas de alta velocidad generan 1 kW de electricidad por cada $\begin{cases} 8.500 \div 9.500\ Btu \\ 8.968 \div 10.023\ kJ \end{cases}$ suministrados por el combustible, con un rendimiento térmico del $36 \div 40\%$; estas plantas emplean alternadores accionados por turbinas de hasta 1300 MW de potencia, con calderas que generan desde 10^6 a 10^7 libras de vapor por hora.

Las modernas plantas de vapor que utilizan combustible fósil, usan ciclos térmicos con presiones de vapor en la admisión de la turbina entre $\begin{cases} 1.800 \div 3.500\ psi \\ 124 \div 241\ bar \end{cases}$, y temperaturas del vapor sobrecalentado y recalentado entre 950ºF (510ºC) y más de 1.000ºF (538ºC)

XXV.1.- SELECCIÓN DEL EQUIPO GENERADOR DE VAPOR

Para seleccionar un generador de vapor existen diversas tendencias, como:

- La disponibilidad del combustible

- Los requisitos de las emisiones

- La fiabilidad y sincronización del proyecto

Los factores más importantes para el diseño de una caldera moderna son:

- Las condiciones del vapor

- El tipo de combustible

- Las restricciones medioambientales

Las condiciones del vapor identifican la $\begin{cases} \text{- cantidad de vapor requerido} \\ \text{- presión y temperatura del vapor} \begin{cases} \text{- sobrecalentado} \\ \text{- recalentado} \end{cases} \end{cases}$

Los requisitos que constituyen la base para la selección del equipo, se pueden resumir en:

a) Para los combustibles:

- Las fuentes actualmente disponibles o previstas para su futura utilización

- El análisis $\begin{cases} \text{- inmediato} \\ \text{- elemental} \end{cases}$ *de cada combustible y de su ceniza, su coste y futuras tendencias*

b) Para el vapor, su presión, temperatura y cantidad, en cada punto de utilización, incluyendo:

- La capacidad de las unidades para generar el vapor

- Las variaciones admisibles en la temperatura del vapor

c) Para el agua de alimentación de la caldera, su origen, análisis químico y temperatura

d) Para el medio ambiente, las limitaciones aplicables al lugar de implantación de la planta, como:

- Niveles permitidos de NO_x, SO_2, partículas y otras emisiones atmosféricas

- Especificaciones de residuos sólidos

- Otros requisitos legales y comerciales

e) Las consideraciones de tipo espacial, comprenden la reposición y sustitución de equipos en la caldera, normativa para terremotos y resistencia al viento, altitud sobre el nivel del mar, clima y accesibilidad para servicio y construcción

f) Las bases de evaluación del rendimiento de la unidad, energía requerida para servicios auxiliares, volumen de edificación, diversas cargas fijas, etc

g) El coste de la energía para servicios auxiliares

h) El nivel de experiencia del personal de operación y de mantenimiento, y el coste de mano de obra

i) Garantías

Requisitos del vapor.- La temperatura del vapor a la salida del sobrecalentador, se considera igual a la temperatura a la entrada de la turbina más 5ºF (3ºC), para sí compensar las pérdidas de temperatura en las tuberías de vapor.

Funcionamiento a presión constante: Para optimizar las características del $\begin{cases} \text{- funcionamiento} \\ \text{- mantenimiento} \end{cases}$ de la turbina, la temperatura del vapor se mantiene constante en un amplio campo de cargas en las calderas en régimen estacionario. En el funcionamiento la presión del vapor para todas las cargas de la unidad se mantiene constante, lo que permite variaciones de carga más rápidas, minimizando las solicitaciones transitorias en la caldera; sin embargo, la operación a presión constante durante los rápidos cambios de carga, determina un mayor consumo calorífico en las condiciones a carga parcial, lo que da lugar a algunas solicitaciones adicionales en las turbinas.

Funcionamiento a presión variable: La presión del vapor varía con la carga de la caldera; en condiciones de carga parcial, ésto es más eficiente desde el punto de vista energético, y permite un mejor control de la temperatura del vapor que se envía a la turbina durante los transitorios. Sin embargo, la caldera puede ser menos sensible y estar sometida a solicitaciones adicionales debido a la variación de la temperatura del agua saturada.

Funcionamiento a presión dual.- El diseño híbrido a presión dual, tiene el control de presión de la unidad dividido entre el sobrecalentador primario y el sobrecalentador secundario. La caldera se puede mantener a presión constante, de modo que las:

- Solicitaciones de vapor demandadas por la turbina se minimizan

- Respuestas a los cambios de carga se maximizan

Flujo de vapor.- El equipo de generación de vapor debe tener la suficiente capacidad, margen de producción y flexibilidad, que garanticen una rápida respuesta a la demanda de vapor por parte de la turbina, que puede ser estacionaria o fluctuar amplia y rápidamente; los requisitos de flujo de vapor se tienen que establecer con exactitud para las condiciones de flujo punta, flujo máximo permanente, flujo mínimo y régimen de cambio de flujo. El flujo punta determina la capacidad del

equipo generador de vapor y de todos sus auxiliares, operando con una sobrepresión del 5% en la admisión de la turbina; el generador de vapor se diseña para facilitar este flujo de vapor que es un 5% superior al flujo máximo, obteniéndose un 5% más de potencia en la turbina.

Agua de alimentación de la caldera.- El agua procedente de las fuentes superficiales o subterráneas, contiene materiales en disolución susceptibles de formar deposiciones, oxígeno libre y, a veces, ácidos, por lo que es imprescindible eliminar tales impurezas. El oxígeno disuelto ataca el acero, fenómeno que se incrementa cuando aumenta la temperatura.

Altas concentraciones de productos químicos en el agua de $\begin{cases} \textit{- la caldera} \\ \textit{- alimentación} \end{cases}$, provocan deposiciones en los tubos del hogar y facilitan el transporte de sólidos hacia el sobrecalentador y la turbina, con los consiguientes fallos de tubos, incrustaciones y erosiones en los álabes de la turbina.

Conforme aumenta la presión de funcionamiento de las plantas de vapor, el sistema de tratamiento de agua se hace más crítico, lo que conduce a la instalación de equipamientos de tratamiento de agua cada vez más complejos y refinados.

La temperatura del agua de alimentación que entra en el economizador debe ser lo suficientemente alta para evitar $\begin{cases} \textit{- la condensación} \\ \textit{- el ataque ácido en el lado de humos de los tubos del economizador} \end{cases}$

El punto de rocío y la velocidad de corrosión varían con el contenido en S del combustible y con el equipamiento de combustión.

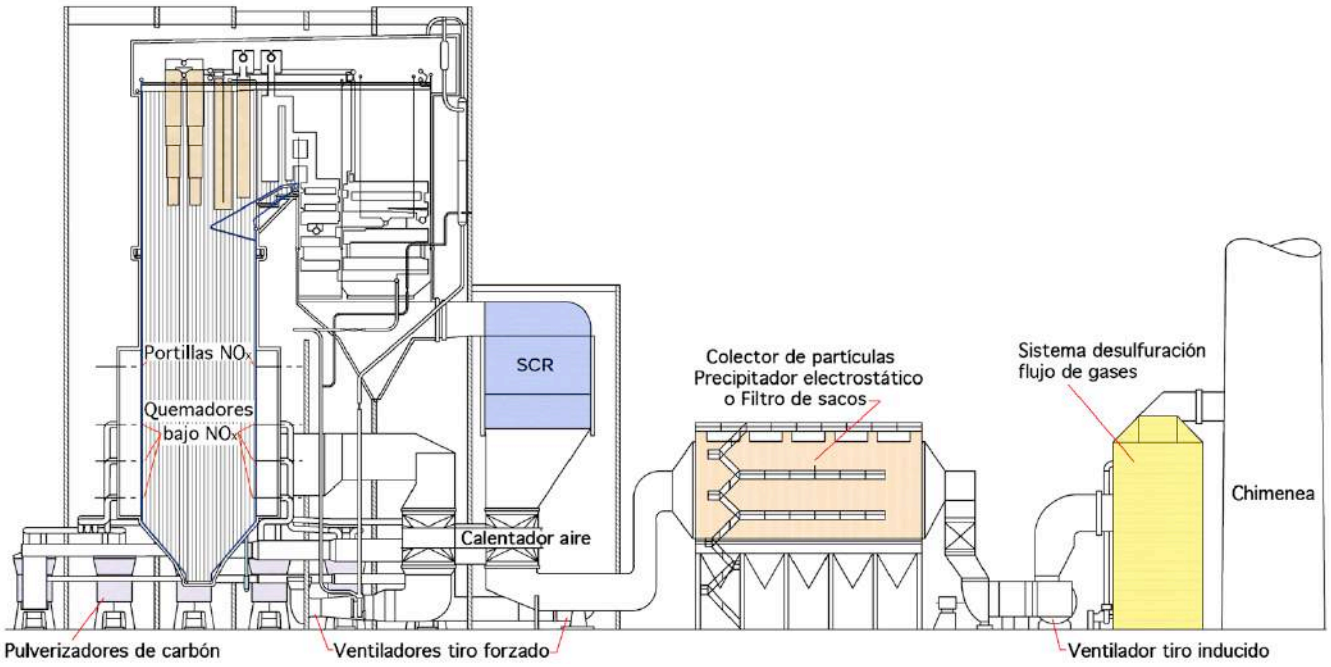


Fig XXV.1.- Sistema de caldera de presión universal radiante que quema carbón pulverizado, con control de emisiones

Consideraciones medioambientales.- La protección del medio ambiente es una parte del proceso de diseño de la caldera y del sistema energético; las calderas emiten a la atmósfera diversos niveles de NO_x, SO_2, partículas y ceniza, cuyo control y regulación se concretan en los equipos de depuración final y en algunos parámetros de diseño de la caldera. En la Fig XXV.1 se presenta una unidad que quema carbón pulverizado, en la que:

- La caldera se diseña con quemadores de bajos NO_x, hogar agrandado y portillas de aire$_{terciario}$ o de NO_x, que minimizan las emisiones de No

- Un precipitador electrostático o un filtro de sacos que recoge las partículas de sólidos en suspensión

- Un sistema de desulfuración por vía húmeda o de lavadores de humos, que se encarga de retirar la mayor parte del SO_2

- Se puede añadir un equipo suplementario de control de NO_x como es un sistema de reducción catalítica selectiva

XXV.2.- COMBUSTIÓN DE CARBÓN PULVERIZADO

El tamaño de las grandes unidades, con calderas quemando carbón y grupos turboalternadores, alcanza 1300 MW y más. El equipo se diseña para que pueda quemar cualquier carbón bituminoso, subbituminoso o lignito disponible comercialmente.

La antracita se puede quemar con éxito en forma pulverizada, pero el gasto que ello conlleva en las más modernas unidades conduce a su exclusión.

Los aspectos de la combustión de carbón pulverizado en generadores de vapor son:

- La idoneidad del método para casi todos los carbones del mundo y la economía para un amplio campo de capacidades de la caldera

- La flexibilidad en el funcionamiento y un alto rendimiento térmico

- La necesidad de equipos adecuados de preparación, manipulación y secado

- El control de las emisiones atmosféricas procedentes de los elementos constitutivos del carbón y del proceso de combustión

CALDERA RADIANTE (RB).- En ella, la absorción de calor por una superficie termointercambiadora con fluido saturado, tiene lugar principalmente por radiación. Sus componentes se diseñan y proyectan con la flexibilidad suficiente, para adaptarse a diversos combustibles y a una amplia gama de condiciones del vapor.

En las unidades modernas
- *el hogar está completamente refrigerado por agua*
- *el tiro es equilibrado*
- *la salida de ceniza es en forma de escoria seca*

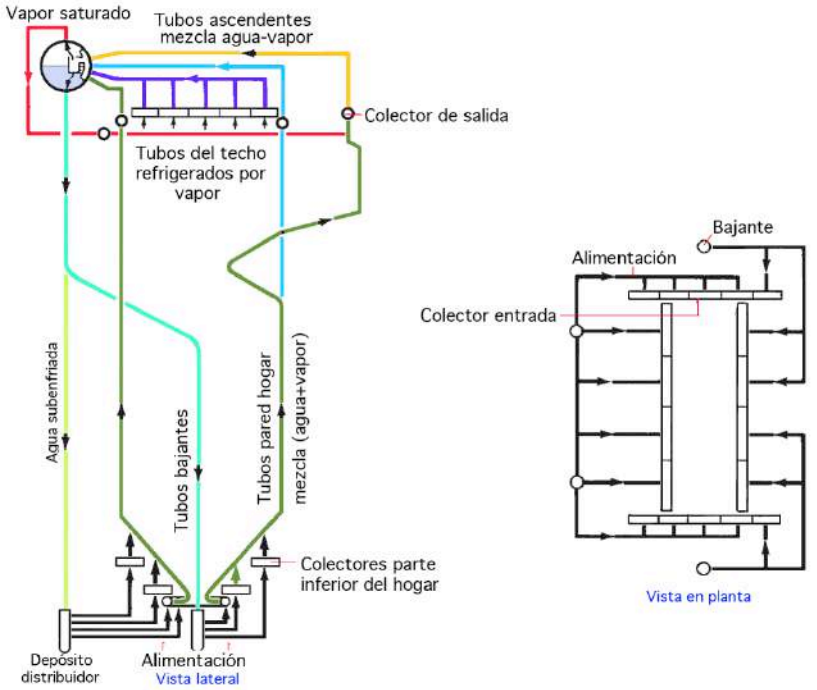


Fig XXV.2.- Diagrama de circulación en el hogar de una caldera radiante (RB)

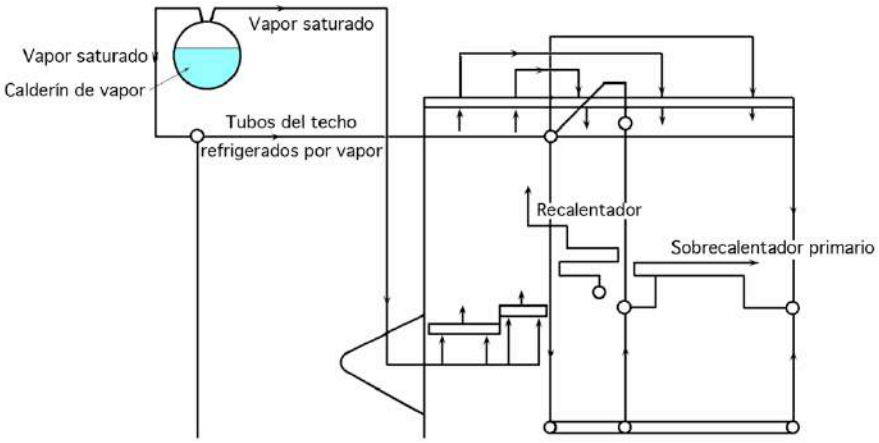


Fig XXV.3.- Circuitos de techos y paredes del paso de convección con refrigeración por vapor, para una caldera radiante

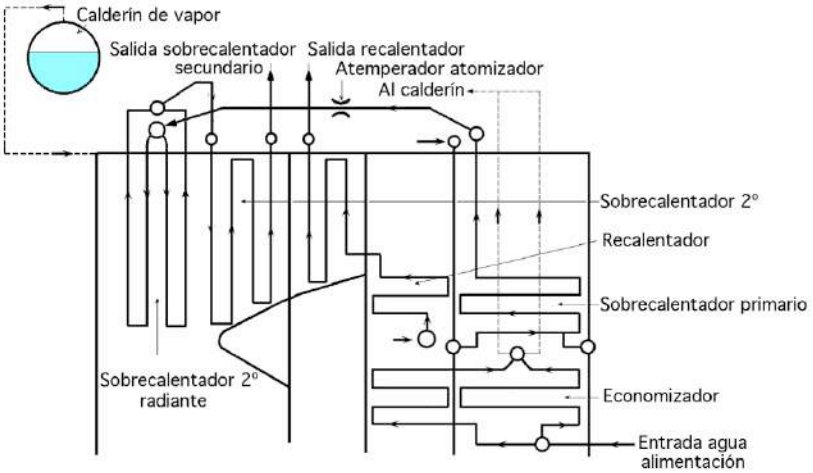


Fig XXV.4.- Circuitos del sobrecalentador, recalentador y economizador para una caldera radiante

Las superficies del sobrecalentador y recalentador pueden ser de diseño $\begin{cases} \text{- vertical (colgadas)} \\ \text{- horizontal} \end{cases}$

El control de la temperatura del vapor sobrecalentado se realiza mediante un atemperador, y el del vapor recalentado se hace por medio de cortatiros de distribución de humos o por $aire_{exceso}$.

- La producción de vapor se extiende está en el intervalo $\begin{cases} 300.000\ lb/h\text{, hasta más de } 7.000.000\ lb/h \\ 37{,}8\ kg/s \text{ hasta más de } 882\ kg/s \end{cases}$

- El campo de presiones de admisión en la turbina, normalmente subcríticas, va desde $\begin{cases} 1800 \div 2400\ psi \\ 124 \div 165\ bar \end{cases}$ *con posibilidad de sobrepresión del 5%*

- Las temperaturas de salida del sobrecalentador y recalentador se ajustan a lo especificado por la admisión en la turbina, normalmente 1000°F (538°C)

- ***CALDERA RADIANTE PARA CARBÓN PULVERIZADO, CAROLINA (RBC).-*** Esta unidad generadora de vapor es una caldera radiante de combustión con tiro equilibrado, que comprende un hogar de fondo seco (escoria sólida) con paredes refrigeras por agua, y los componentes correspondientes al sobrecalentador, recalentador, economizador y calentador de aire. La unidad está diseñada para quemar carbón, con una finura tal que el 70% pase a través del tamiz de 200 mallas (75 micras).

El paso posterior de convección y las superficies termointercambiadoras colgadas presentan las siguientes ventajas: $\begin{cases} \text{- Soportes de alta temperatura fuera del flujo de humos} \\ \text{- Mínimo movimiento entre las penetraciones del techo} \\ \text{- Mayor control en el diseño del espaciado de secciones colgadas} \end{cases}$

La menor altura del hogar, comparada con la de otros diseños para carbón pulverizado, reduce el acero estructural y los costes de montaje.

Flujo de combustible.- El carbón bruto va desde los alimentadores a los pulverizadores; el carbón pulverizado se transporta por el $aire_{primario}$ a los quemadores, a través de un sistema de tuberías presurizadas con aire y combustible.

Flujo de aire.- El aire procedente de los ventiladores de tiro forzado se calienta en los calentadores de aire, y posteriormente se dirige como $aire_{secundario}$, hacia la caja de aire desde la que se distribuye entre los quemadores. En la Fig XXV.5, unos ventiladores de alta presión (ventiladores de $aire_{primario}$) suministran aire atmosférico a una sección independiente del calentador de aire, denominada calentador de $aire_{primario}$.

Una parte del aire que procede de estos ventiladores circunvala el calentador de $aire_{primario}$ mediante un bypass, para usarlo como aire de atemperación. Las cantidades de $aire_{primario}$ calentado y de atemperación se mezclan previamente a su entrada a cada molino, para obtener a la salida la

temperatura deseada en la mezcla *combustible-aire*. El $aire_{primario}$ se utiliza para el secado y transporte de combustible desde el molino, a través de los quemadores, hacia el hogar.

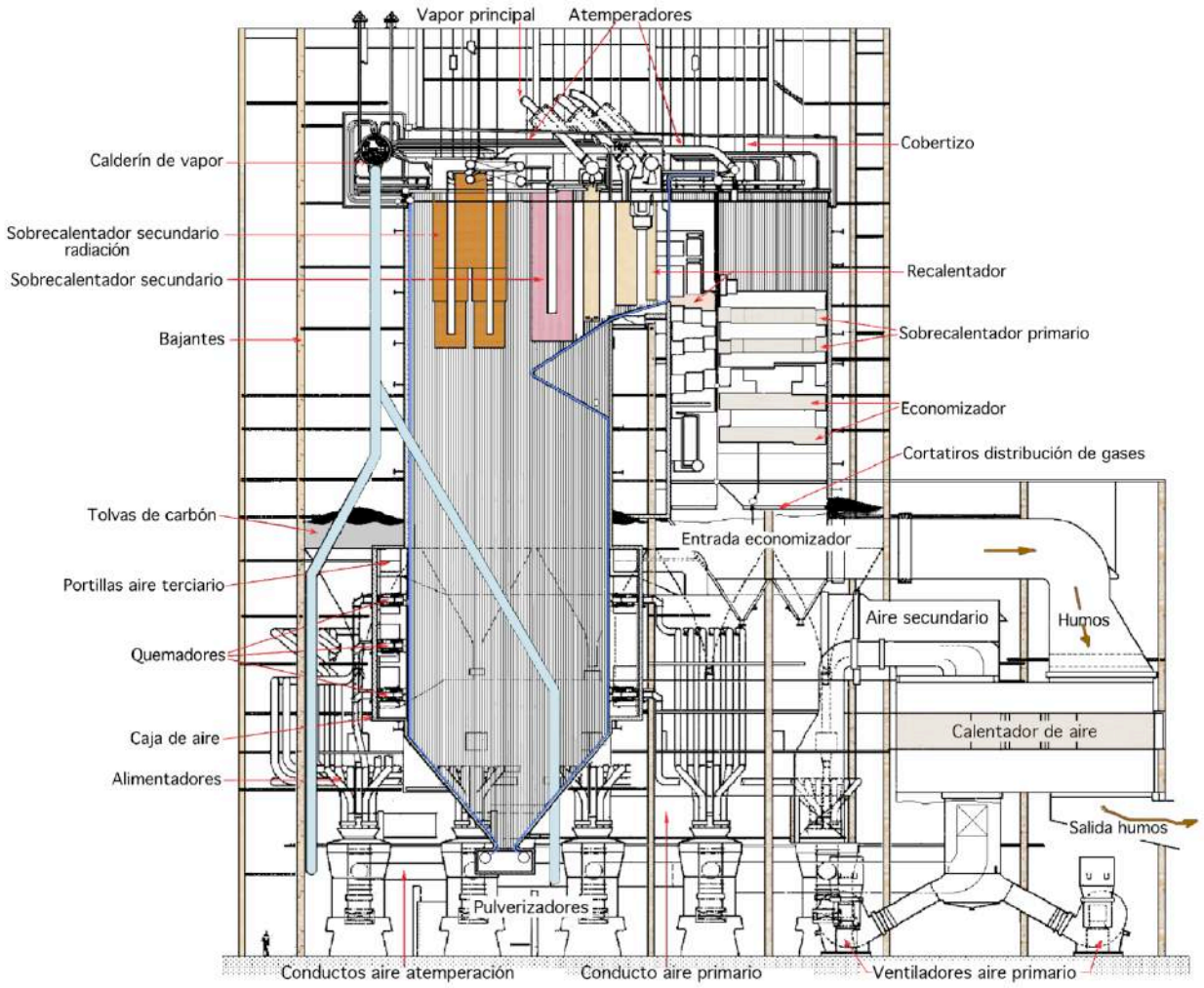


Fig XXV.5.- Caldera radiante Carolina de 405 MW que quema carbón pulverizado

Flujo de humos.- Los humos calientes procedentes del hogar pasan sucesivamente a través de los bancos correspondientes a las secciones finales del sobrecalentador y recalentador.

Antes de salir de la caldera, el flujo de humos se divide en dos:

- Uno atraviesa una sección del recalentador

- El otro atraviesa una sección del sobrecalentador

La distribución del flujo de humos entre estos dos recorridos, según cambie la carga de la unidad, proporciona una herramienta muy económica de control de la temperatura del vapor recalentado. Los flujos se ajustan por medio de un juego de cortatiros dispuestos a la salida de la caldera:

- Una cantidad controlada de humos pasa a través de una sección del recalentador, para alcanzar el punto de ajuste de la temperatura del vapor recalentado

- Los humos restantes circulan paralelamente a través de otra superficie intercambiadora del sobrecalentador

En los sistemas correspondientes del sobrecalentador y recalentador se instalan atemperadores; para mantener el máximo rendimiento del ciclo, el atemperador del recalentador se utiliza con cantidades de agua de atomización mínimas $\begin{cases} \text{- en los transitorios de carga} \\ \text{- cuando las temperaturas sean superiores a la de ajuste} \end{cases}$

El atemperador del sobrecalentador se utiliza para mantener la temperatura del vapor principal sobrecalentado. Esta disposición de la superficie de convección y cortatiros facilita la posibilidad de mantener las temperaturas de diseño del vapor, en el $\begin{cases} \text{- sobrecalentador} \\ \text{- recalentador} \end{cases}$, en un amplio rango de cargas.

Los humos salen de las secciones del sobrecalentador y recalentador instaladas en el paso de convección, cruzan el economizador, pasan al calentador de aire y llegan al equipo de control del medio ambiente.

Flujos de agua y de vapor.- El agua de alimentación entra en el colector inferior del economizador, asciende por el banco tubular de éste y por los tubos soporte que discurren entre las filas de tubos del sobrecalentador primario; calentada en la superficie termointercambiadora del economizador se unifica en los colectores de salida de éste, que se encuentran en la parte superior de la unidad y, a continuación, se dirige hacia el calderín de vapor.

La circulación natural facilita un flujo de agua descendente desde el calderín de vapor, por medio de unos tubos bajantes de gran diámetro, o alimentadores, que se conectan individualmente a los colectores inferiores del hogar; a continuación, este agua asciende por los tubos del hogar, conforme se calienta, y pasa a través de los tubos ascendentes para llegar de nuevo al calderín de vapor, ya como mezcla de *vapor-agua*.

La mezcla, que vuelve a entrar en el calderín de vapor, se separa en dos flujos, de vapor y de agua, por medio de separadores ciclón:

- El agua, sin vapor alguno, se dirige a las entradas de los tubos bajantes

- El vapor se somete a una purificación complementaria, pasando a través de unos depuradores o lavadores de vapor

El vapor depurado procedente del calderín de vapor pasa a través de múltiples conexiones a un colector que lo suministra al techo del hogar y a los tubos de las paredes, anterior, posterior y divisora del paso de convección, que conectan directamente con el colector de entrada al sobrecalentador primario de vapor. El vapor que sale del calderín se lleva también a una serie de colectores que facilitan el vapor de refrigeración de las paredes laterales del paso de convección, antes de dirigirse al colector de entrada al sobrecalentador primario.

El vapor asciende por el sobrecalentador primario hasta alcanzar su colector de salida y luego fluye a través de unas tuberías de conexión, equipadas con un atemperador atomizador. A continuación, el vapor parcialmente sobrecalentado entra en el sobrecalentador secundario y fluye a lo largo de las diversas secciones del mismo, hasta alcanzar la salida y las correspondientes tuberías de descarga, que finalizan en puntos situados en el exterior de la cámara muerta superior de la unidad; éste vapor sobrecalentado es el que se lleva al cuerpo de alta presión (AP) de la turbina de vapor.

Después de una expansión parcial en el cuerpo de AP de la turbina, el vapor a MP retorna a la caldera para su recalentamiento, se reintroduce en el colector de entrada al recalentador, fluye por el banco tubular del mismo hasta la salida del recalentador y se lleva al cuerpo de MP de la turbina, circulando por éste y por el de BP de la misma.

CALDERA RADIANTE PARA CARBÓN PULVERIZADO, TIPO TORRE.- Una configuración de caldera radiante tipo Torre, se presenta en la Fig XXV.6; una característica constructiva de este diseño es que todas sus superficies son purgables, característica constructiva que en su momento se diseñó para operar en latitudes muy frías, y así facilitar una protección contra la congelación. Si se quiere lograr un control más amplio de la temperatura del vapor sobrecalentado y recalentado se puede equipar con equipos de recirculación y atemperación de humos.

Otras ventajas incluyen:

- Una entrada del flujo de humos más uniforme en todas las secciones de convección

- Erosión mínima en las curvas tubulares al no existir cambios de dirección en el paso de convección

- La retirada de la mayor parte de la ceniza volante en polvo y de la escoria a través de la tolva principal del hogar

Los componentes facilitan la suficiente flexibilidad para adaptar el diseño a los diversos combustibles, y a un amplio rango de condiciones de vapor.

Las características generales de diseño son: $\begin{cases} \text{- hogar con paredes refrigeradas por agua} \\ \text{- tiro equilibrado} \\ \text{- circulación natural} \\ \text{- construcción colgada} \\ \text{- unidad totalmente purgable} \end{cases}$; una característica constructiva para conseguir un completo drenaje consiste en colocar todas las superficies que contengan agua o vapor en posición horizontal, de forma que se puedan purgar por completo, cuando la unidad se retira de servicio.

Flujo de combustible.- La caldera radiante se dispone de modo que el carbón bruto se descargue desde los alimentadores hacia los pulverizadores. El $aire_{primario}$ se utiliza para transportar el carbón pulverizado desde los molinos hacia los quemadores correspondientes, a través de un sistema de tuberías presurizadas de *combustible-aire*.

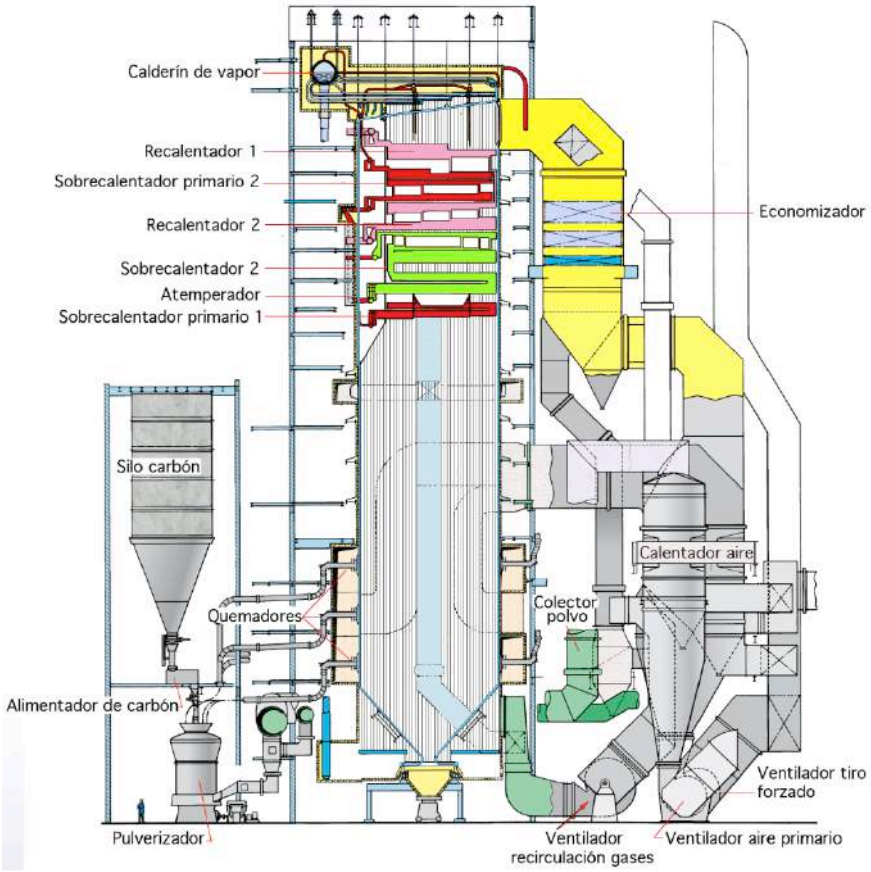


Fig XXV.6.- Caldera radiante para carbón pulverizado, tipo Torre de 400 MW

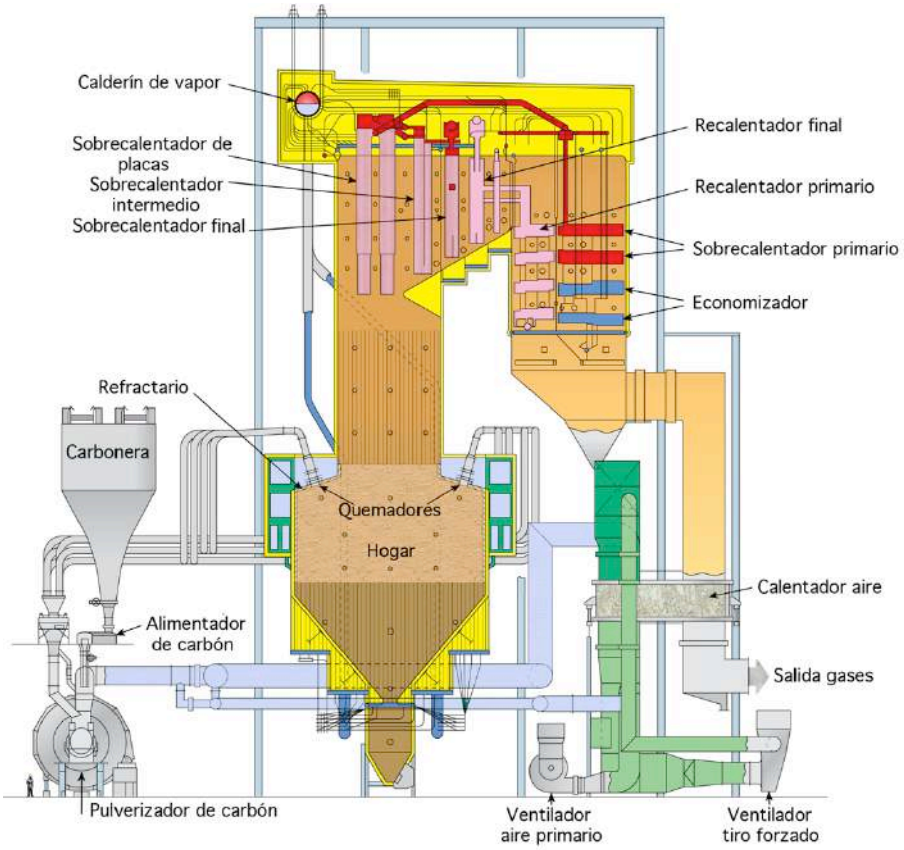


Fig XXV.7.- Caldera de tiro descendente radiante Downzhot, que quema carbón bajo en materia volátil, particularmente antracita

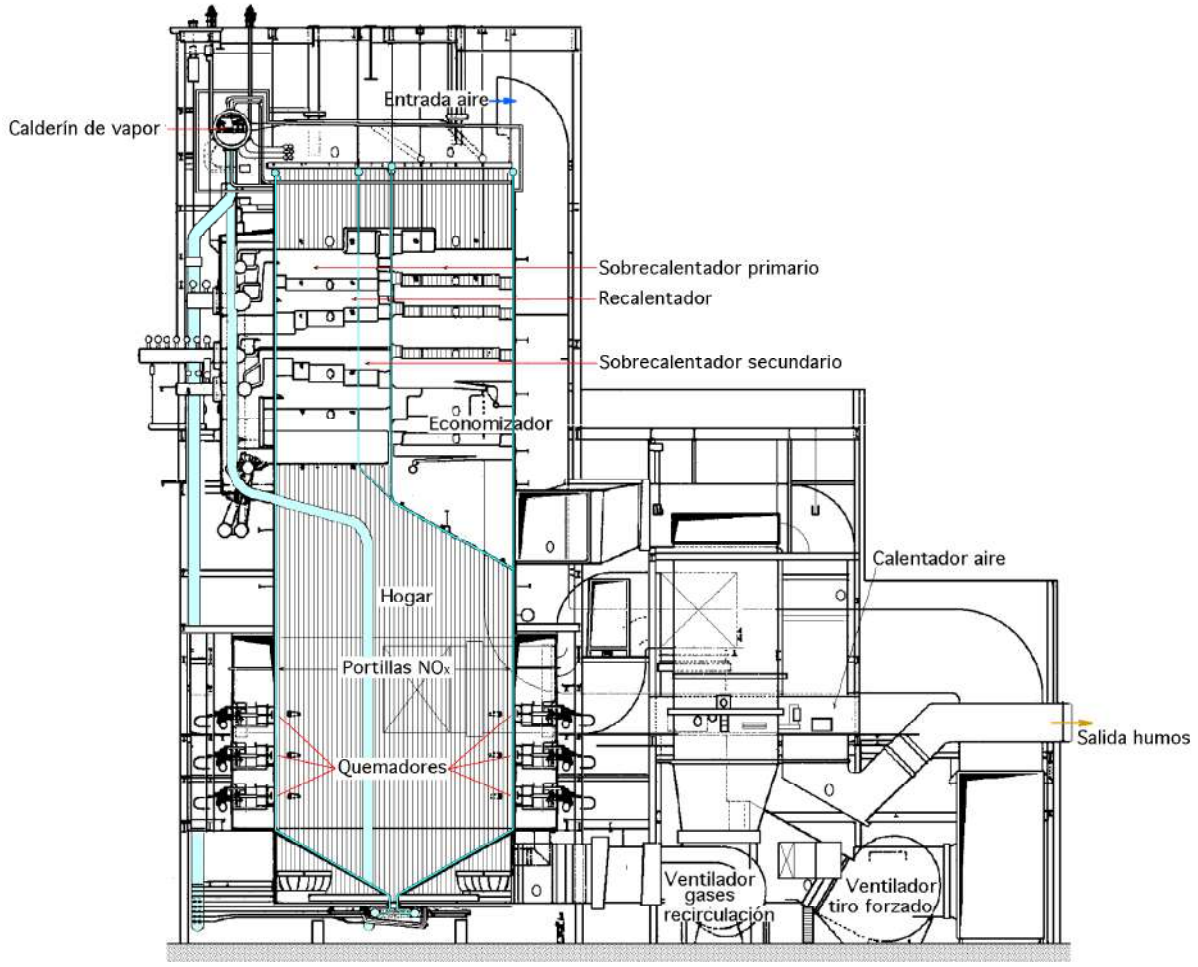


Fig XXV.8.- Caldera radiante tipo El Paso (RBE) para quemar aceite y gas

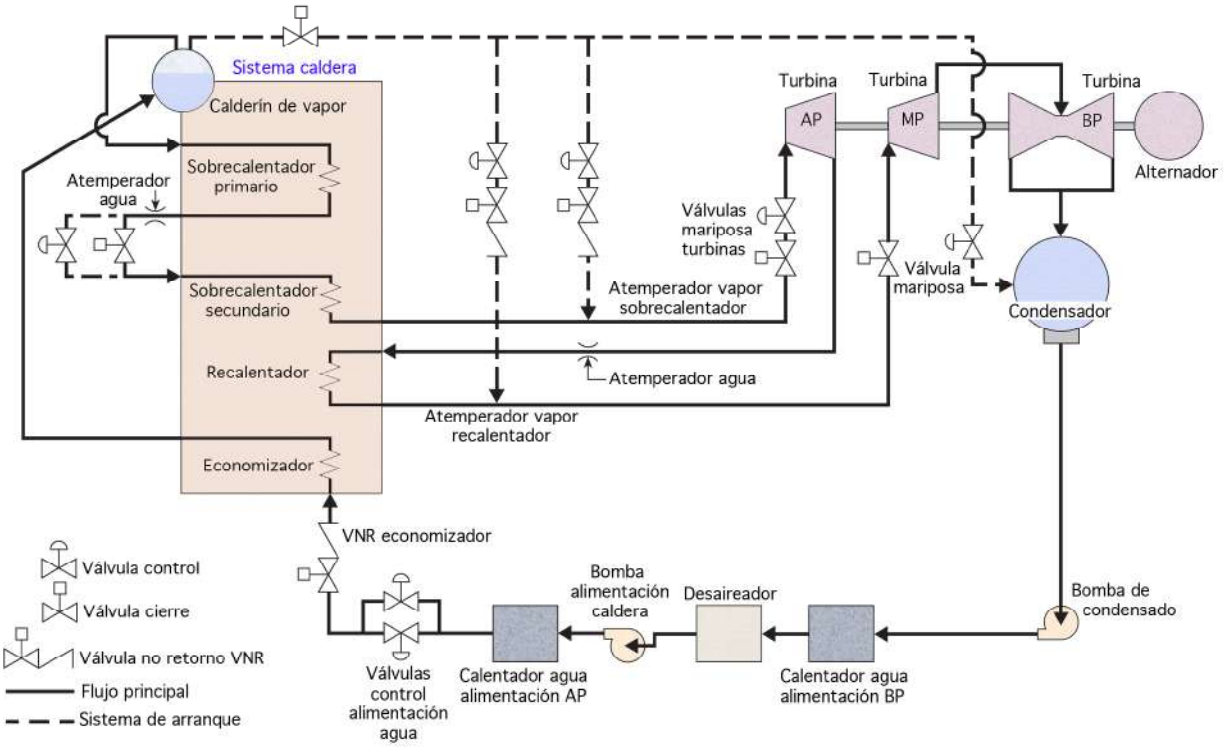


Fig XXV.9.- Esquema del sistema bypass de la caldera con calderín de vapor

Flujos de aire y de humos.- El sistema de circulación del aire es similar al de la unidad Carolina. Los humos calientes ascienden en el hogar hacia la parte superior del mismo, pasando por los bancos tubulares del sobrecalentador y recalentador, ubicados en la sección más alta de la caldera. A partir de aquí bajan directamente hacia el economizador, ubicado fuera del cerramiento de caldera, y pasan finalmente al sistema del calentador de aire y al equipo de control medioambiental, para su limpieza.

Flujos de agua y vapor.- El agua de alimentación se introduce en el sistema de caldera a través del economizador, en el que se calienta, y de él sale hacia el calderín de vapor. Con el sistema de circulación natural, los circuitos en el hogar tienen recorridos parecidos a los descritos para el diseño Carolina.

El vapor saturado procedente del calderín desciende hacia la sección de salida del hogar, donde está colocado un pequeño banco tubular que conforma el sobrecalentador primario 1, cuyos tubos de salida constituyen los soportes refrigerados por vapor de otros bancos tubulares de una superficie termointercambiadora ubicada más aguas abajo en el flujo de humos. El vapor procedente de los tubos soporte se mezcla y dirige hacia los bancos tubulares finales, correspondientes al sobrecalentador primario 2.

La conexión de los sobrecalentadores primario y secundario se hace por medio de tuberías que contienen un atemperador atomizador, que controla la temperatura del vapor sobrecalentado. El vapor entra en el sobrecalentador secundario y fluye por sus secciones tubulares hacia el colector de salida, que lo descarga en un punto ubicado en el exterior de la unidad. El vapor sobrecalentado se dirige hacia el cuerpo de AP de la turbina y después de una expansión parcial, retorna a la caldera y se introduce en el recalentador, fluye por el banco tubular del mismo y se dirige una vez recalentado, al cuerpo de MP de la turbina, y de allí al de BP.

CALDERA DE PRESIÓN UNIVERSAL (UP).- Se conoce como caldera de proceso directo o caldera de un paso, Fig XXV.10, y se puede diseñar para todas las temperaturas y presiones comerciales, subcríticas y supercríticas. Desde un punto de vista económico, esta caldera es más atractiva en el campo supercrítico para grandes tamaños, con características funcionales como:

- Capacidad de producción de vapor desde $\begin{cases} 300.000\ lb/h \\ 38\ kg/s \end{cases}$ *hasta más de* $\begin{cases} 10.000.000\ lb/h \\ 1260\ kg/s \end{cases}$

- Presiones subcríticas de admisión en la turbina a $\begin{cases} 2400\ psi \\ 166\ bar \end{cases}$ *y supercríticas a* $\begin{cases} 3500\ psi \\ 241\ bar \end{cases}$ *con un 5% de sobrepresión.*

- Temperatura de vapor sobrecalentado de 1000ºF (538ºC), que se puede mantener constante a carga mínima.

El principio operativo es el que corresponde al ciclo Benson de proceso directo (un paso). El agua se bombea hacia la unidad en condiciones de líquido subenfriado, recorre sucesivamente todas las superficies termointercambiadoras de las partes a presión y absorbe calor para convertirse en vapor a la temperatura deseada.

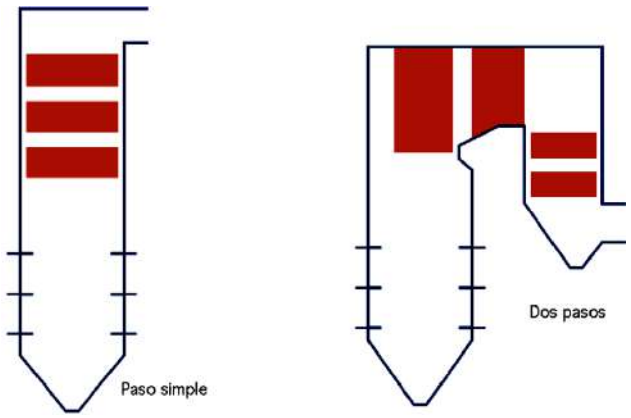


Fig XXV.10.- Diseño de la caldera Benson simple y de doble paso

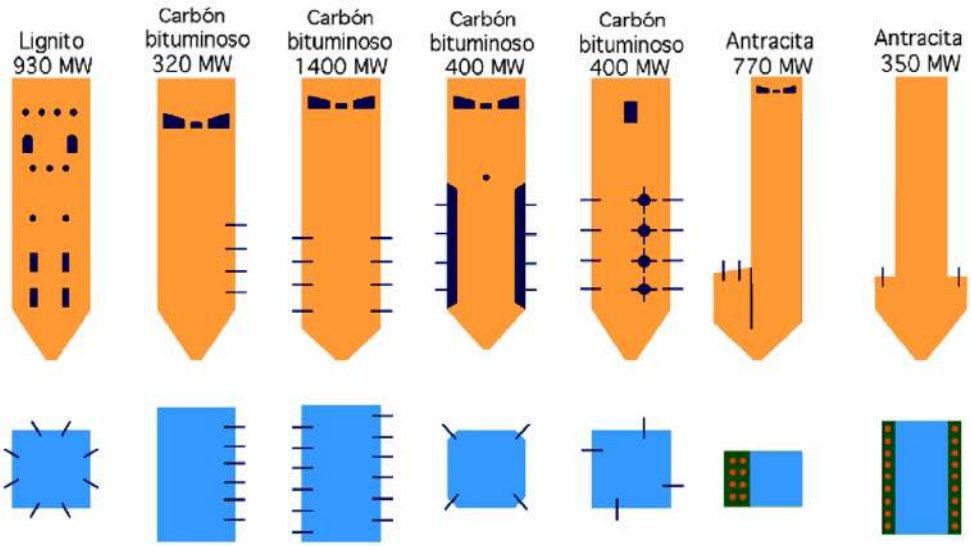


Fig XXV.11.- Diversos diseños de hogares Benson, indicando la posición de los quemadores, para diversas potencias y combustibles

No hay agua recirculada en la unidad, por lo que no se requiere de calderín para separar el vapor del agua. El hogar tiene las paredes totalmente refrigeradas por el fluido y se diseña para tiro equilibrado, incorporando una o dos etapas de recalentamiento intermedio.

El flujo y la presión de vapor se controlan por
- *El régimen de combustión*
- *El caudal de agua de alimentación,*
- *Las válvulas de división del sobrecalentador*
- *Las válvulas de admisión en la turbina*

La temperatura del *vapor sobrecalentado* se controla coordinando los regímenes de
- *fuegos*
- *bombeo*

La temperatura del *vapor recalentado* se controla por $\begin{cases} \text{- los cortatiros de distribución de los humos} \\ \text{- la recirculación de humos} \\ \text{- el aire}_{exceso} \\ \text{- la atemperación} \end{cases}$

La caldera de presión universal se diseña para mantener un flujo mínimo en el interior de los circuitos del hogar, y evitar el recalentamiento de los tubos durante el funcionamiento; este flujo mínimo se establece antes de la puesta en servicio de la unidad. En la caldera, turbina y sistema del agua de alimentación y condensado del ciclo, se incluye un sistema de bypass para garantizar el flujo mínimo de diseño a través de todas las partes a presión, expuestas a las altas temperaturas de los gases de combustión, tanto durante la puesta en servicio como en los períodos en que la demanda de vapor de la turbina excede el flujo mínimo de diseño.

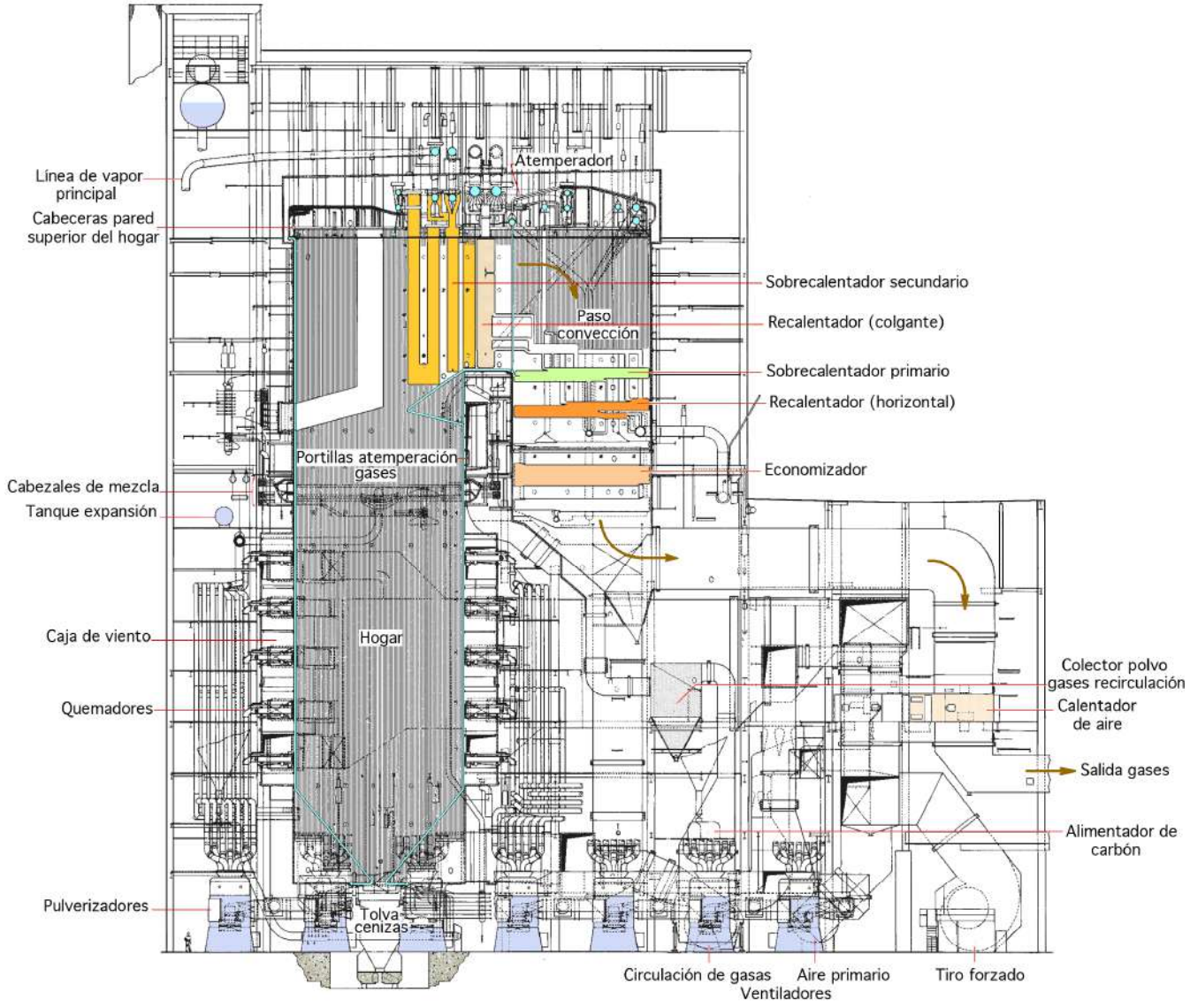


Fig XXV.12.- Caldera de presión universal de 1.300 MW Zimmer para quemar carbón pulverizado

CALDERA DE PRESIÓN UNIVERSAL ZIMMER.- La unidad generadora de vapor que se muestra en la Fig XXV.12, es una caldera de presión universal de tiro equilibrado para quemar carbón, que comprende un hogar de fondo seco (escoria sólida) con paredes refrigeradas por agua, y los componentes correspondientes al sobrecalentador, recalentador, economizador y calentador de aire. La unidad está diseñada para quemar carbón pulverizado hasta una finura tal que el 70% pase a través del tamiz de 200 mallas (75 micras).

Flujo de combustible.- El carbón bruto se descarga desde los alimentadores hacia los molinos, ubicados en el frente o a los lados de la unidad. El carbón pulverizado se transporta por el *aire-primario* hacia los quemadores mediante un sistema de tuberías presurizadas de *combustible-aire*.

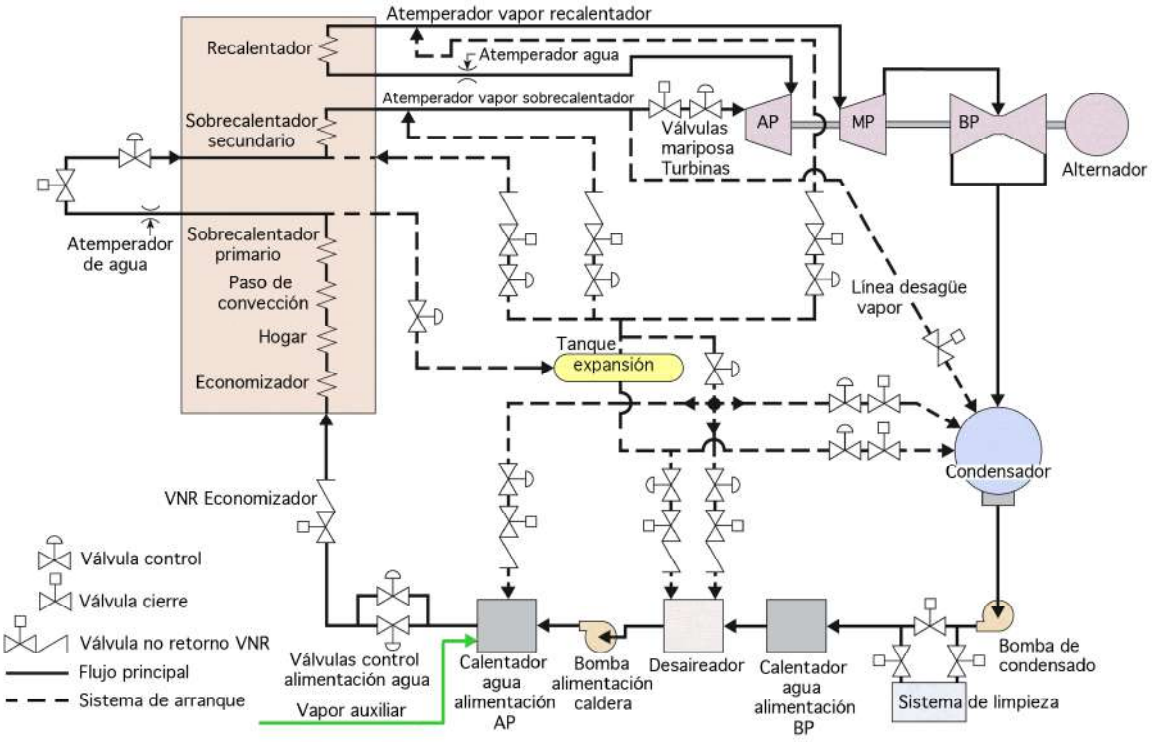


Fig XXV.13.- Sistema de arranque de la caldera de presión universal, operando el hogar a presión constante

Flujos de aire y de humos.- La disposición del flujo de aire y su recorrido es parecida a la que se usa en la caldera radiante Carolina. El flujo de gases puede ser de paso simple o de dos pasos. Los gases calientes que salen del hogar pasan sucesivamente a través de las superficies refrigeradas por el fluido (paredes o tabiques divisorios) en la parte alta del hogar, el sobrecalentador secundario y el recalentador vertical (colgado). Estos últimos, ubicados en el paso de convección fuera del alcance de la zona del hogar, tienen una elevada transferencia de calor por radiación.

A continuación, los humos giran hacia el paso de convección y cruzan el sobrecalentador primario horizontal, el recalentador horizontal y el economizador, antes de pasar al calentador de aire.

Flujos de agua y de vapor.- El agua de alimentación entra por el colector inferior del economizador, asciende por los tubos hasta el colector de salida del mismo y se lleva a la zona inferior del hogar en donde se distribuye a los colectores inferiores del mismo a través de múltiples tubos de alimentación.

Desde los colectores inferiores de las paredes del hogar, el fluido asciende por los tubos verticales del mismo hasta otro conjunto de colectores, en donde los flujos se mezclan, lo que uniformiza la temperatura del fluido; éste se lleva hacia los colectores $\begin{cases} - \textit{ frontal} \\ - \textit{ posterior} \end{cases}$ del techo, en donde se vuelve a mezclar y, a continuación, mediante un sistema de tuberías de distribución, se conduce a los colectores inferiores de las paredes del paso de convección

El fluido asciende por los tubos de las paredes y pantalla del sobrecalentador, y de ahí unas tuberías lo llevan a un colector común y luego al colector de entrada del sobrecalentador primario.

El fluido se mezcla antes de entrar en el sobrecalentador primario, luego se mezcla parcialmente conforme pasa del primario al secundario, de forma que las conexiones transversales entre ambos sobrecalentadores reducen los posibles desequilibrios de la temperatura y, finalmente, el vapor sobrecalentado se expansiona parcialmente en la turbina de AP; el vapor a MP procedente de la salida de la turbina de AP, se introduce en el colector de entrada del recalentador horizontal, fluyendo por los tubos de las secciones horizontal y colgada del recalentador hacia el colector de salida, antes de retornar a las turbinas de MP y BP.

A veces se añade un segundo recalentador intermedio, si es viable económicamente.

La atemperación de humos se puede utilizar para controlar su temperatura, mientras que la recirculación de humos y el exceso de aire se emplean para controlar la absorción en el hogar.

CALDERA UNIVERSAL SWUP PARA CARBÓN PULVERIZADO, CON PAREDES DE TUBOS DEL HOGAR EN ESPIRAL.- Se utiliza cuando las cargas exigen rapidez en la puesta en servicio y en la capacidad en el seguimiento de la demanda de cargas. Es similar, en todos los aspectos, a la caldera universal anteriormente descrita, salvo en lo que se refiere a la configuración del circuito de circulación del hogar. Su geometría, que utiliza la tecnología del proceso directo o de un paso, comprende los tubos que se arrollan en forma de espiral alrededor del recinto del hogar, Fig XXV.14.

El agua introducida por la tubería procedente del economizador, se calienta en las mismas condiciones de presión y temperatura, minimizándose las perturbaciones térmicas que restringen los rápidos cambios de carga. Este diseño es capaz de operar con el sistema de presión variable, Fig XXV.15 lo que constituye una mejora, cuando se utilizan los sistemas de puesta en servicio y de bypass, diseñados específicamente para cambios de carga rápidos. El diseño es importante para cal-

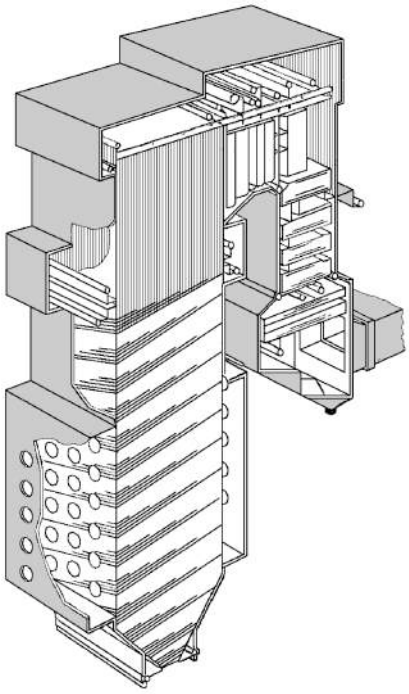


Fig XXV.14.- Caldera de presión universal con tubos en espiral

deras pequeñas de un paso, en las que la refrigeración del hogar a bajas cargas, puede constituir el punto más crítico del diseño.

Cuando se la combina con los sistemas de puesta en servicio y recirculación apropiados, es capaz de operar a presión variable en un campo de cargas entre el 15% ÷ 100%.

Las características de diseño de la caldera de la Fig XXV.14 son:

- Carga variable de funcionamiento supercrítico, con una capacidad de 400 MW o más; consta de un horno de fondo seco, sobrecalentador, recalentador, economizador, calentador de aire, SCR, etc. Genera vapor a partir de $\begin{cases} 2.000.000\ lb/h \\ 252\ kg/s \end{cases}$ *hasta más de* $\begin{cases} 10.000.000\ lb/h \\ 1260\ kg/s \end{cases}$

- La presión de funcionamiento en la válvula reguladora es de 3500 psi (24,1 MPa), con una sobrepresión del 5% sobre la más alta disponible

- La temperatura del vapor del recalentador es de 1100°F (595°C)

- El combustible es carbón pulverizado

Se tienen que instalar dispositivos de protección en las superficies del calentador de aire, como serpentines de vapor o de agua caliente, para evitar la condensación y el ataque ácido del lado de humos.

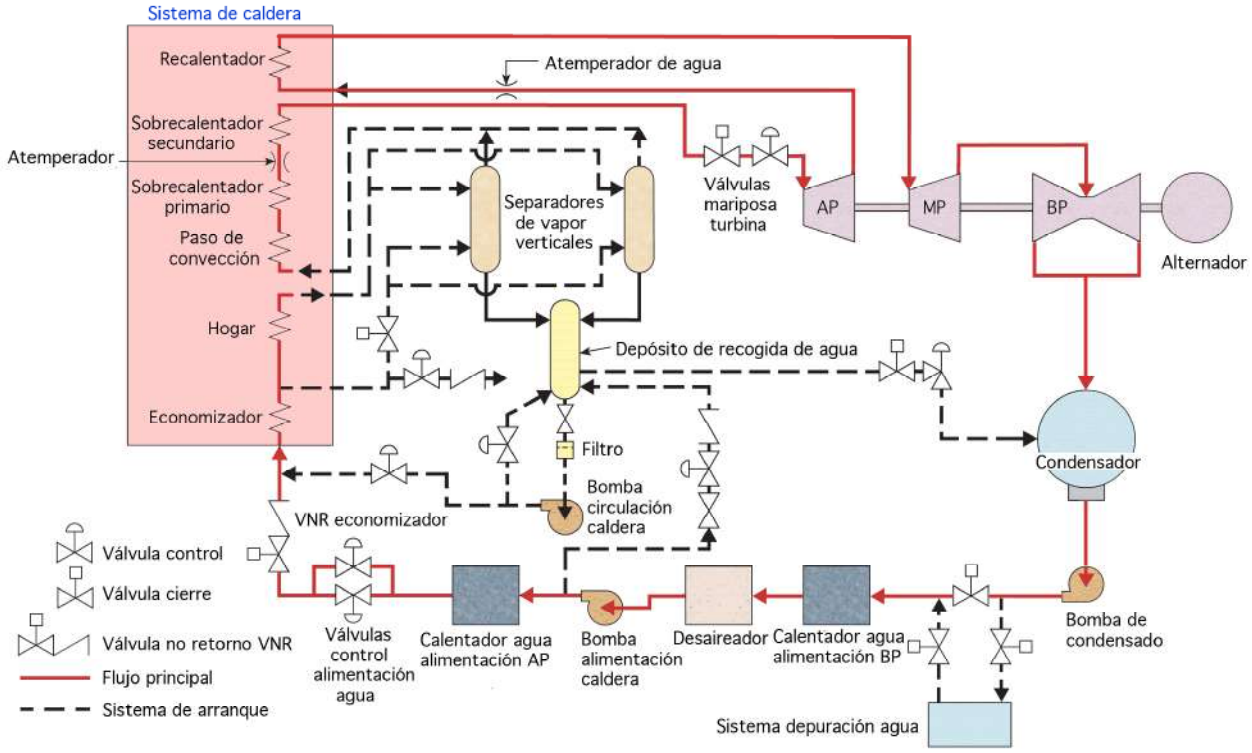


Fig XXV.15.- Sistema de arranque de la caldera de presión universal, de paredes del hogar en espiral, a presión variable

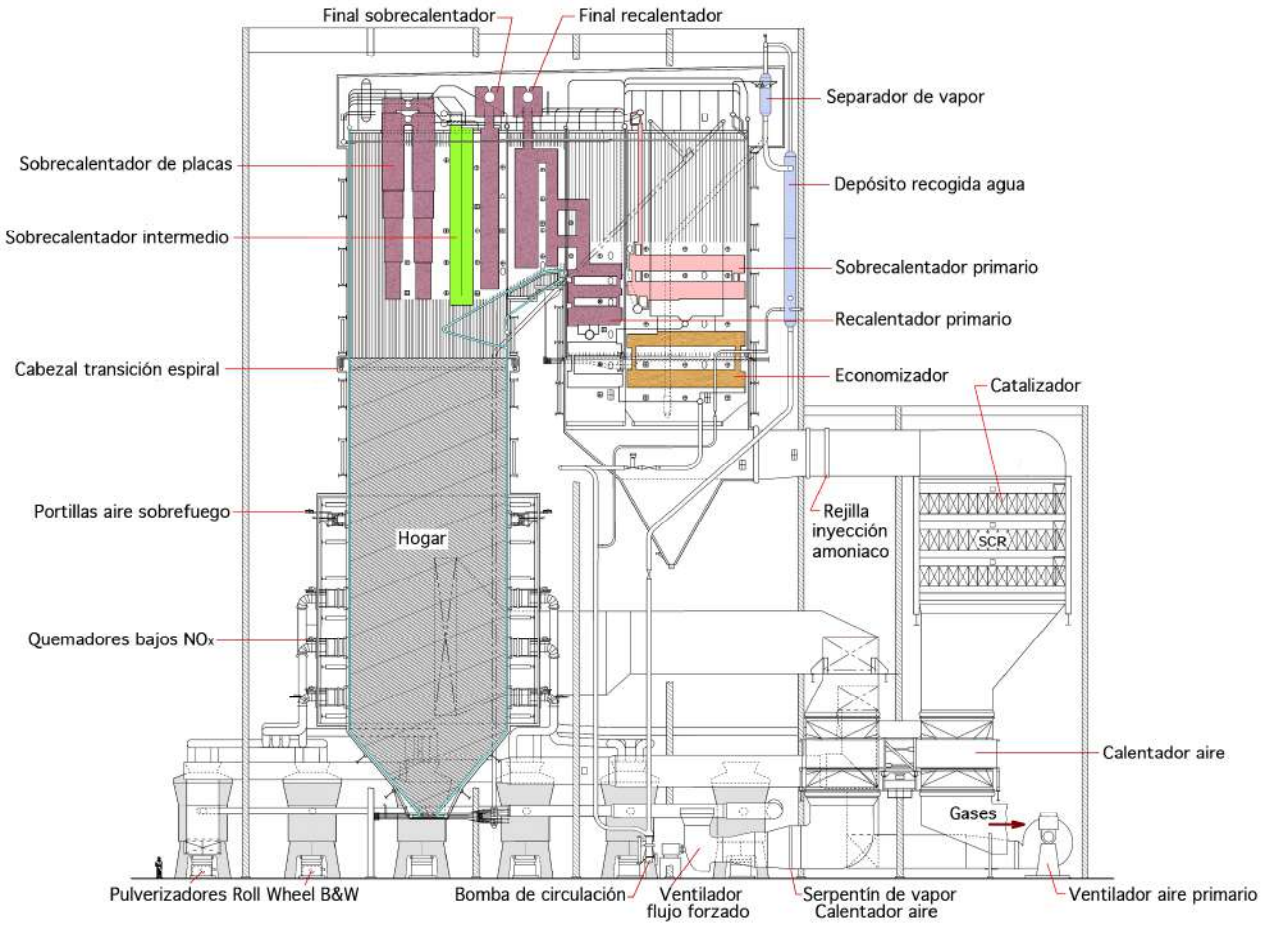


Fig XXV.16.- Caldera B&W de presión universal con tubos en espiral (SWUP), que quema carbón pulverizado (750 MW)

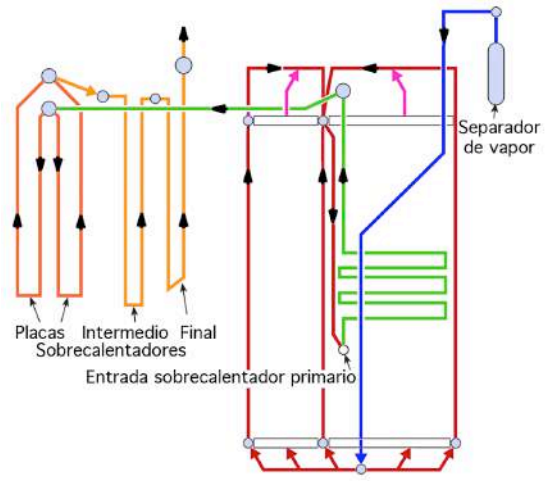


Fig XXV.17.- Flujo del vapor en una caldera (SWUP)

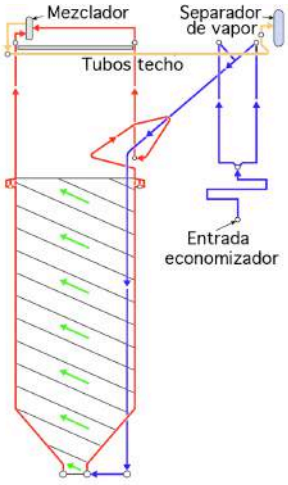
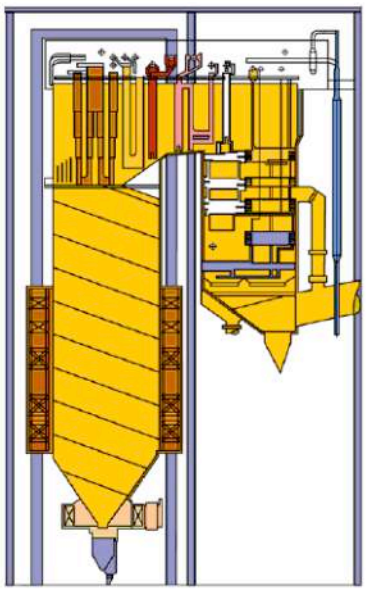
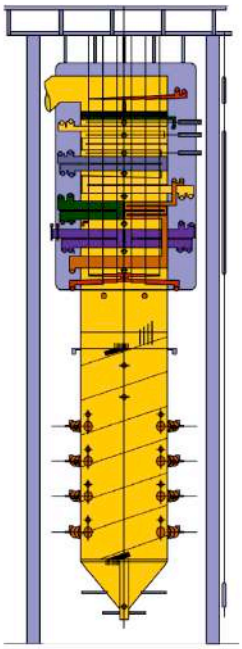


Fig XXV.18.- Flujo de fluidos en una caldera (SWUP)

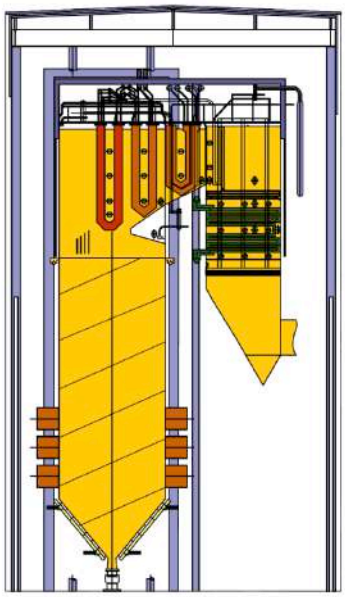
El diseño del hogar con tubos en espiral reduce el número de tubos en el mismo, lo que incrementa $\begin{cases} \text{- } el\ flujo\ másico \\ \text{- } la\ velocidad\ en\ cada\ uno\ de\ ellos \end{cases}$ y garantiza una adecuada refrigeración en todas las condiciones de carga. El elevado flujo por cada tubo individual incrementa la $\begin{cases} \text{- } caída\ de\ presión \\ \text{- } potencia\ de\ bombeo \end{cases}$, en comparación con los diseños de tubos verticales en el hogar.



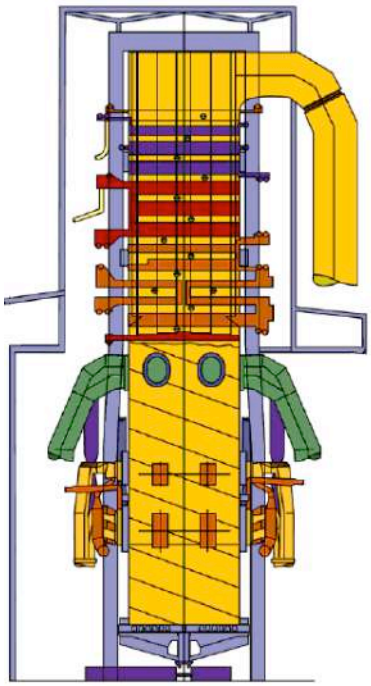
Caldera Benson de carbón pulverizado,
255 bars, 543 a 569°C, 639 kg/seg
Hekinan, Japón
Manufacturada por Babcock-Hitachi



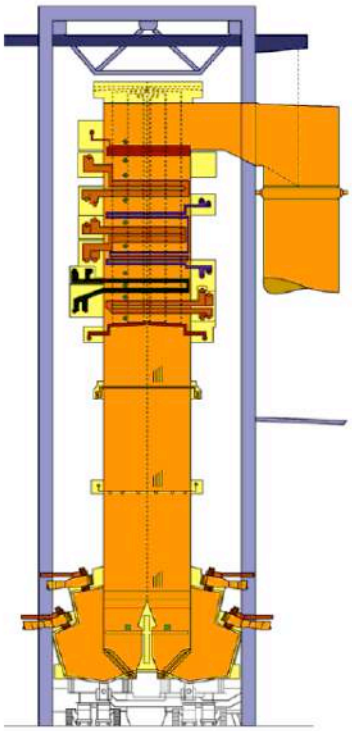
Caldera Benson con doble recalentador,
310 bars, 580°C, 270 kg/seg
Nordjyllandsvaerket, Denmark
Manufacturada por Burmeister&Wain



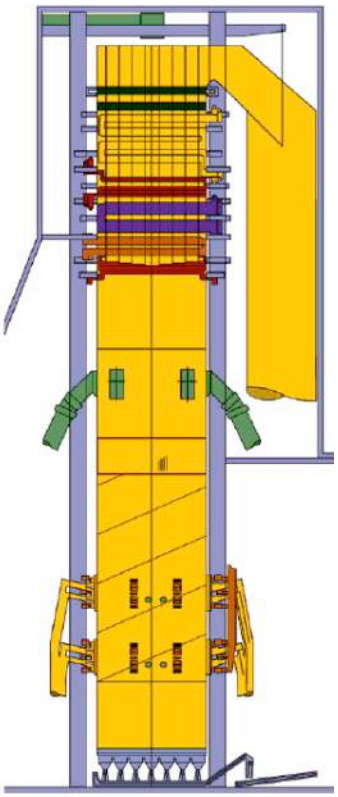
Caldera Benson de carbón bituminoso,
261 bars, 540°C, 530 kg/seg
Hemweg, Netherlands
Mitsui Babcock Energy/Stork



Caldera que quema lignito,
242 bars, 540°C, 286 kg/seg
Aghios Dimitrios, Greece
Manufacturada por AE&E



Caldera que quema antracita,
220 bars, 530°C, 600 kg/seg
Ibbenbüren, Germany
Manufacturada por Steinmüller



Caldera Benson que quema lignit
285 atm, 554 a 583°C, 672 kg/se
Lippendorf, Germany
Manufacturada por Deutsche Babc

Fig XXV.19.- Calderas Benson de presión universal

Los tubos en espiral no pueden soportar por sí solos las paredes del hogar, como ocurre en los diseños de tubos verticales, por lo que requieren de un sistema de soporte.

CALDERAS DE GAS NATURAL.- El gas natural es el combustible que tiene las menores restricciones de diseño por su limpieza y facilidad para ser quemado.

Si se quema sólo gas natural, sobran:
- *las instalaciones de almacenamiento*
- *las tolvas de polvo*
- *la tolva de escoria*
- *el sistema de manipulación de ceniza*
- *los sopladores*
- *los colectores separadores de ceniza volante en polvo*

El control del calor aportado se simplifica al máximo. Las superficies termointercambiadoras se pueden disponer para unas óptimas transferencias de calor y pérdida de tiro, sin considerar la deposición o la erosión de la ceniza. El volumen contenido en el cerramiento es mínimo y se incrementa la adaptabilidad para el servicio a la intemperie.

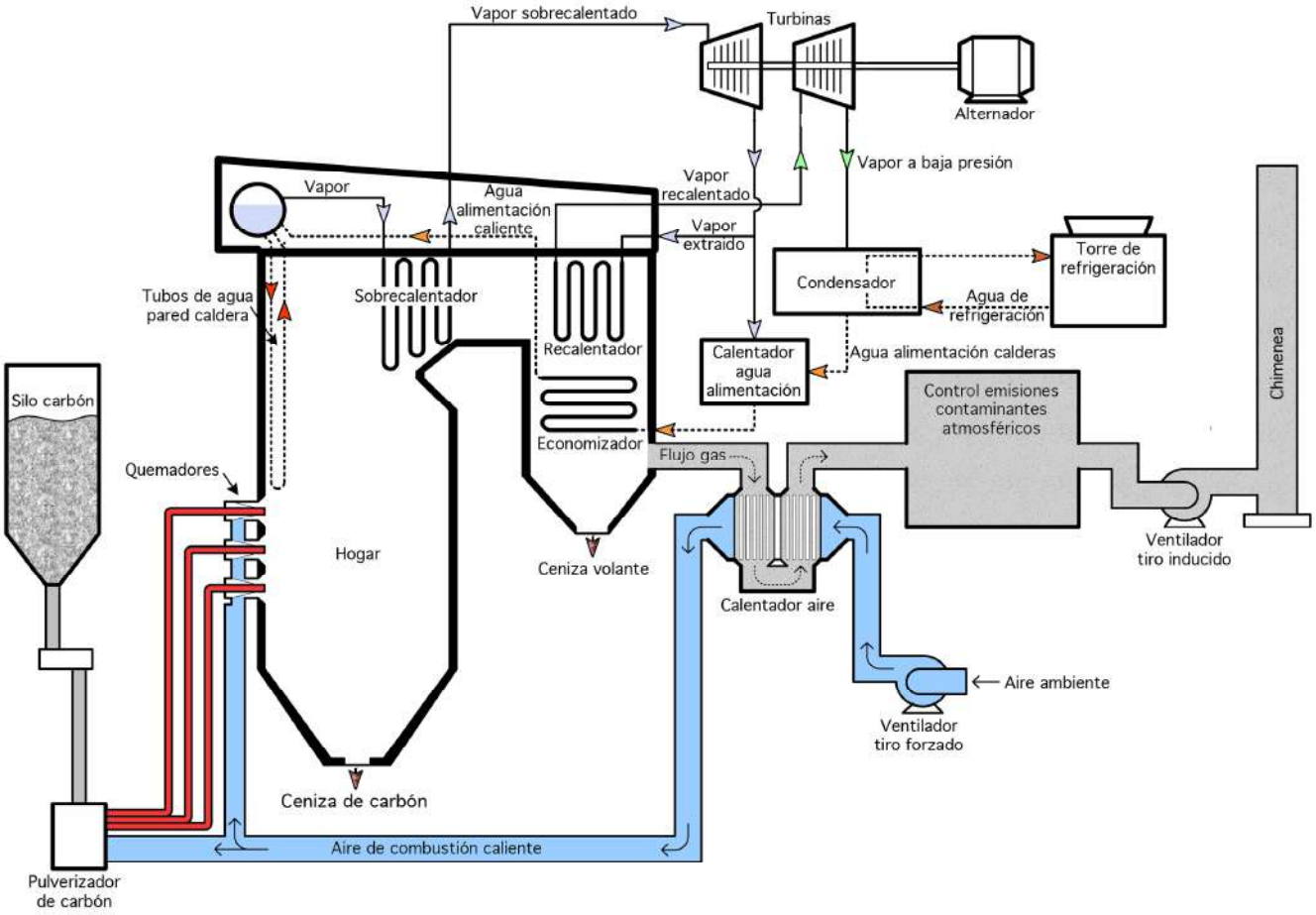


Fig XXV.20.- Esquema simplificado de una central con caldera de carbón PC subcrítica

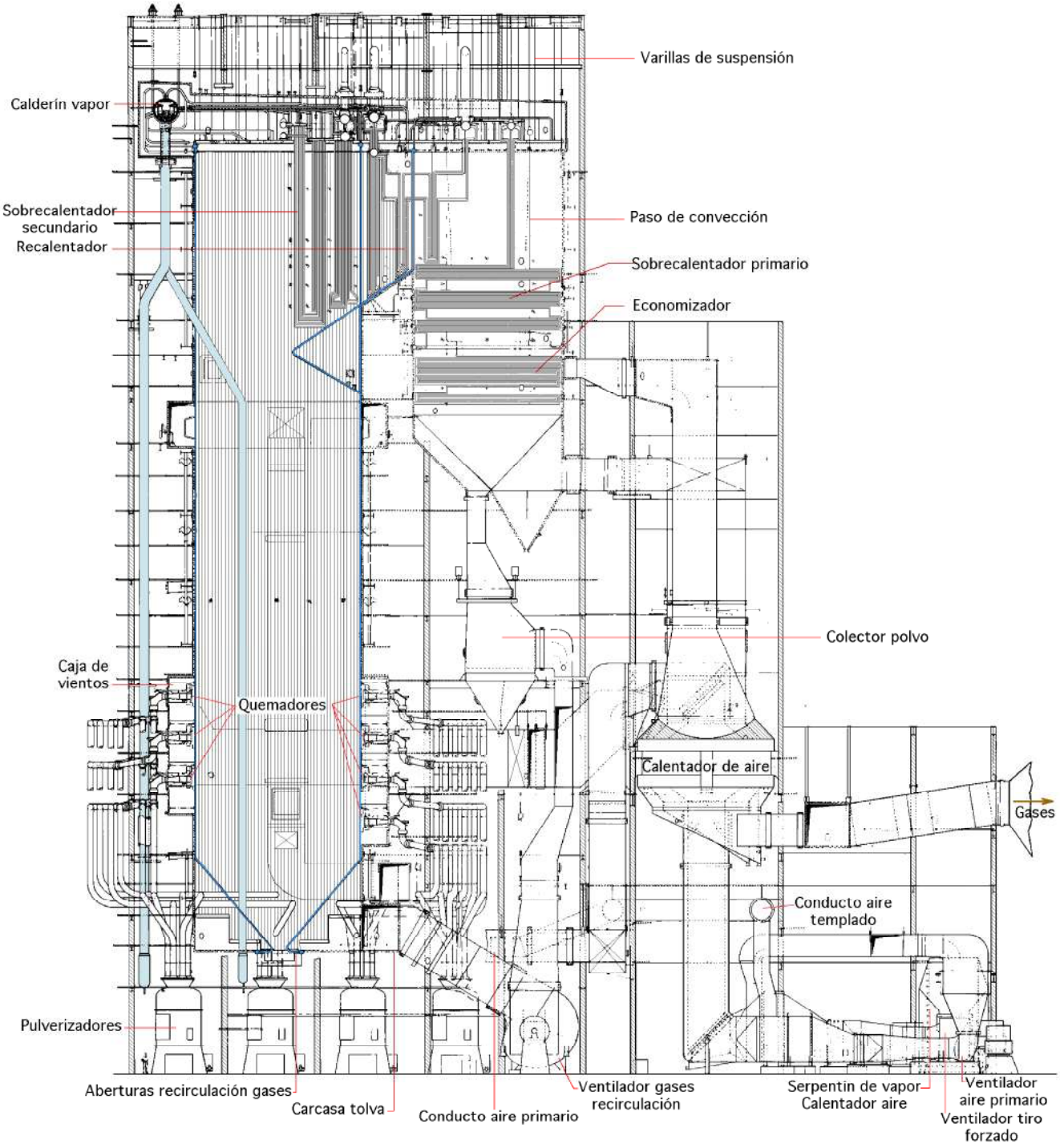


Fig XXV.21.- Caldera que quema carbón pulverizado

CALDERA RADIANTE PARA GAS NATURAL Y ACEITE.- El generador de vapor mostrado en la Fig XXV.8 es una unidad de caldera radiante tipo El Paso (RBE). La disposición comprende un hogar refrigerado por agua con tolva inferior (tolva de escoria) y los componentes correspondientes al sobrecalentador, recalentador, economizador y calentador de aire. La unidad está diseñada para utilizar, conjunta o separadamente, gas natural y aceite. Algunos aspectos del diseño El Paso son: la eliminación del paso vertical de convección y la inclusión de dos pasos de convección, ascen-

dente y descendente, dentro de la superficie ocupada por el hogar de la caldera.

Flujos de aire y humos.- El aire procedente del ventilador de tiro forzado se calienta en el calentador de aire y se distribuye hacia la caja de aire de quemadores. Los humos calientes procedentes del hogar ascienden y pasan sucesivamente a través de las correspondientes secciones horizontales del sobrecalentador secundario y del recalentador y de un banco del sobrecalentador primario; el humo da la vuelta y desciende a través de las secciones correspondientes al resto del sobrecalentador primario y al economizado y, finalmente, sale del cerramiento refrigerado por agua y se dirige hacia el calentador de aire.

Flujos de agua y de vapor.- El agua de alimentación entra por el colector inferior del economizador y fluye en sentido ascendente por su interior, hasta el colector de salida de éste. Unas tuberías que parten de ese colector llevan el agua directamente hasta el calderín de vapor. El agua fluye hacia abajo por los tubos descendentes por circulación natural, y luego entra en los tubos distribuidores, que la llevan hasta los colectores inferiores del hogar. El agua asciende por los tubos de la caldera, que encierran el área de convección), hasta los colectores superiores, desde los cuales la mezcla *vapor-agua* se conduce por los tubos ascendentes hasta el calderín de vapor, pasa por unos separadores ciclón que facilitan un agua exenta de vapor para los tubos descendentes, al tiempo que el vapor se purifica pasando a través de las secciones de secadores (lavadores) primarios y secundarios de vapor, también dentro del calderín.

El vapor seco pasa por parte del sobrecalentador primario y, por medio de tuberías de conexión se dirige directamente hacia el resto del sobrecalentador primario, ubicado en el primer paso de humos.

El flujo de vapor, tras llegar al colector de salida del sobrecalentador primario, se conduce por tuberías que contienen un atemperador atomizador al colector de entrada del sobrecalentador secundario, y fluye por las secciones de éste hasta el colector de salida, del que parte la tubería de salida de la unidad generadora de vapor. El vapor de baja presión se introduce, de nuevo, en la unidad por el colector de entrada del recalentador, fluye por el mismo hasta su colector de salida y de éste, por otra tubería, se lleva a otro punto terminal, en el frente de la unidad.

REFERENCIAS CAP XXV.- CALDERAS PARA PLANTAS ELÉCTRICAS

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

B&W.- STEAM: ITS GENERATION AND USE.- 40th Edition, chapter 23.- The Babcock&Wilcox Company.- Barbeton, Ohio, USA.- 1992

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

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

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

AVAILABLE AND EMERGING TECHNOLOGIES FOR REDUCING GREENHOUSE GAS EMISSIONS FROM COAL-FIRED ELECTRIC GENERATING UNITS.- Prepared by the Sector Policies and Programs Division.- Office of Air Quality Planning and Standards.- U.S. Environmental Protection Agency. Research Triangle Park, North Carolina 27711

P. Basu.- PULVERIZED COAL FIRED FURNACE.- Unit 15

RADIANT BOILERS FOR RELIABLE SUBCRITICAL STEAM APPLICATIONS.- B&W Power Generation Group

PFI/PFT BOILERS: RUGGED, COST-EFFECTIVE AND DEPENDABLE UNDER FIRE.- B&W Power Generation Group

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

V. Ganapathy.- INDUSTRIAL BOILERS AND HEAT RECOVERY STEAM GENERATORS DESIGN, APPLICATIONS, AND CALCULATIONS.- ABCO Industries.- Abilene, Texas, U.S.A.

V Ganapathy.- WASTE HEAT BOILER DESKBOOK.- Atlanta, GA: Fairmont Press, 1991.

Sebastian Teir.- MODERN BOILER TYPES AND APPLICATIONS.- Helsinki University of Technology.- Department of Mechanical Engineering.- Energy Engineering and Environmental Protection.- 2002

Combustion Engineering.- COMBUSTION: FOSSIL POWER SYSTEMS.- 3rd ed. Windsor. 1981.

Jyrki Appelgren.- CFB BOILER COMPONENTS.- TCP Training April – May 2006.- Foster Wheeler Energia Oy