

# Capítulo 3

## CALDERAS DE TUBOS DE AGUA

---

La diferencia fundamental entre las calderas de tubos de agua y las de tubos de humos es que en las primeras el agua circula por dentro de los tubos en vez de alrededor de ellos (calderas de tubos de humos). Los gases calientes pasan alrededor de los tubos en las primeras.

Las calderas de tubos de fuego (o de humos) se diseñan con los tubos contenidos dentro de la envolvente o cáscara de la caldera. Los tubos de la mayor parte de las calderas de tubos de agua están situados en el exterior del calderín (o calderines) de vapor. Las dos ventajas de la modalidad de caldera de tubos de agua son:

1. Puede obtenerse mayor capacidad aumentando el número de tubos, independientemente del diámetro del calderín de vapor.
2. El calderín no está expuesto al calor radiante de la llama.

La mayor ventaja sobre las calderas de tubos de humos (o calderas pirotubulares) es la libertad para incrementar las capacidades y presiones. Esto es imposible con las calderas de tubos de humos ya que el espesor de la chapa exterior delimitante de la caldera y otros requisitos estructurales pueden hacerlas prohibitivas por encima de las 21 toneladas/hora de capacidad y por encima de los 21 kg/cm<sup>2</sup> de presión de vapor. Las elevadas capacidades y presiones de las calderas de tubos de agua han hecho posible los modernos generadores de vapor grandes de las centrales térmicas.

La construcción modular de grandes calderas de tubos de agua permite el montaje en fábrica de los paneles de tubos de agua del hogar y de los paneles del sobrecalentador y recalentadores que se sitúan en obra y después se conectan a los calderines o cabezales. Esto facilita el montaje en obra mediante grúa y, después de situados, se conectan los muros o paneles pantalla a los calderines de vapor. Esto facilita el montaje, da mayor control de calidad en fabricación y es más económico. Sin embargo, las pequeñas calderas compactas de tubos de agua también se diseñan y desarrollan para competir con las calderas de tubos de humo, y para cubrir el gran mercado existente para las calderas más pequeñas. Las ventajas son las siguientes:

1. Al instalar múltiples unidades en lugar de una sola caldera grande, el calentamiento se basa en la carga por caldera, suministrando una gran elasticidad

durante los períodos de demanda baja de vapor. Las calderas producen vapor rápidamente; por otra parte, es posible el corte de fin de semana sin verse afectados por los elevados costes de calentamiento de una caldera grande.

2. Los pequeños generadores de vapor pueden colocarse cerca de la carga de vapor, evitando así las pérdidas de las líneas de vapor y condensado y reduciendo el tamaño de la sala de calderas y el espacio necesario.
3. La capacidad de reserva o punta puede suministrarse con un sistema de calderas múltiples.

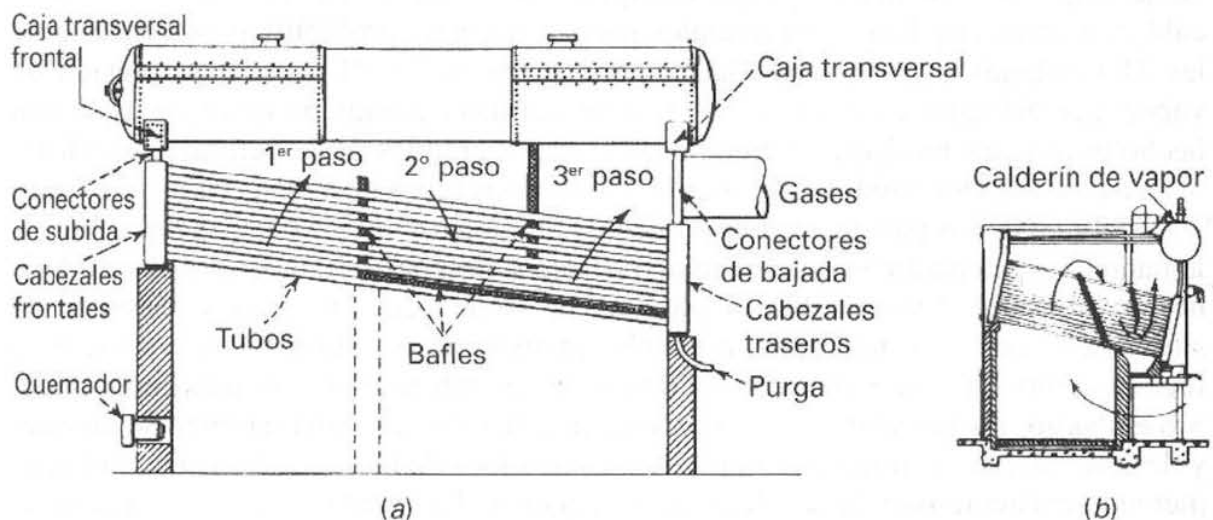
## **ANTIGUAS CALDERAS DE TUBOS DE AGUA, TIPO DE TUBOS RECTOS**

Las primitivas calderas de tubos de agua siguieron los diseños de algunas calderas de tubos de humos siendo de tubos rectos suspendidos sobre el hogar y con los tubos conectados en dos tipos de cabezales:

1. Cabezal tipo caja.
2. Cabezal sinuoso.

### **Calderas de cabezales sinuoso y de caja.**

La Figura 3.1a muestra una antigua caldera de tubos de agua rectos. Los tubos están colocados en el hogar, y el calderín superior se utiliza en principio como depósito de almacenaje de agua y vapor. La circulación desde el calderín superior es hacia abajo y a los cabezales traseros, y desde éstos atravesando los tubos de agua y pasando finalmente a través del cabezal frontal. Con esta exposición, los tubos de las calderas comienzan a estar separados de la «cáscara» o pared interior, en contraste con las calderas de tubos de humos. El diseño mostrado tiene un calderín: las grandes calderas tienen dos o tres calderines. El calderín opera desde el frontal hasta la parte



**Figura 3.1.** Antiguas calderas de tubos de agua rectos. (a) Tipo de calderín longitudinal. (b) Tipo de calderín transversal.

trasera de la caldera. Los tubos rectos de acero inclinados, y normalmente de 4" (100 mm) de diámetro exterior, están conectados con el calderín por cabezales de acero estampado de tipo seccional, estando los tubos colocados por parejas. Un calderín de lodos debajo de los cabezales traseros es utilizado para recoger los sedimentos y es purgado de tiempo en tiempo. Los cabezales de tubos son de una pieza para cada fila vertical de tubos. Los orificios de manipulación (para limpieza de los tubos) están cerrados por tapas atornilladas, con juntas hechas a máquina.

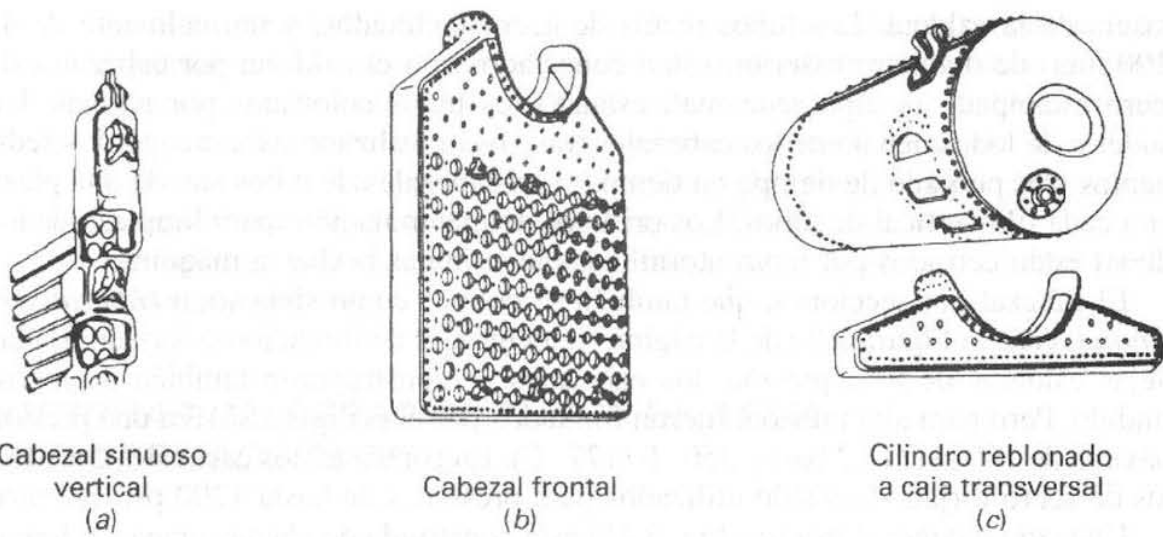
El cabezal por secciones, que también se conoce como sinuoso, o *cabezal serpentin* (véase la Figura 3.2a de la página siguiente), es de fundición o forjado. En las viejas calderas de baja presión, los cabezales se construyeron también de hierro fundido. Pero para alta presión, fueron limitados por el código ASME a una presión máxima de 160 psi (11,2 bar) y 350 °F (177 °C). En contraste, los cabezales contruidos de acero forjado han sido utilizados para presiones de hasta 1200 psi (84 bar).

Una *caja o cabezal frontal* (Fig. 3.2b) está construida de chapas planas, referenciadas como chapa de tubos y chapa de cierre de tubo. Estas chapas deben arriostrarse para evitar el comado o deformación. Los laterales, parte superior e inferior están solapadas y roblonadas (soldados en las calderas modernas) a las chapas de tubos y de cierres de tubo. El atirantado (o arriostrado) de estas chapas limita la presión de trabajo para una caja o cabezal hasta aproximadamente 600 psi (40 bar).

**Calderas de calderín transversal.** Las calderas de tubos de agua de calderín transversal fueron construidas bien con cajas sinuosas o caja-cabezal en los tipos de calderín transversal (véase la Figura 3.1b). Los cabezales delanteros se suministran con la entrada de agua mediante una fila de conectores o bajantes conectados a la parte inferior del calderín transversal. Estos tubos conectores son normalmente del mismo diámetro que los tubos de generación (de vapor). Los finales superiores del frente de los cabezales están conectados al lado frontal del calderín transversal mediante una o más filas de tubos de circulación horizontales que llevan una mezcla de vapor y agua (entregada a los cabezales o cajas frontales por los tubos de generación) al calderín.

Ambos tipos de calderas, de caja sinuosa y de tipo cabezal, tienen tapas de tubos, que son una fuente de pérdidas principal si las juntas o sellos de las tapas no se mantienen bien estancas. Sobre la caldera de cabezal sinuoso puede tener lugar la corrosión sobre la chapa de entrada exterior del tubo como resultado de fugas por los agujeros de limpieza y sus tapas. Las pérdidas y corrosión también tienen lugar entre los cabezales sinuosos, que normalmente van con junta de amianto o asbesto. En las calderas de cajas y cabezales, las pérdidas o fugas en las placas de agujeros de limpieza producen corrosión sobre la envolvente o chapa exterior donde se sitúan las tapas. La fuga de estos agujeros de mano encuentra su camino bajante hacia la parte inferior de los cabezales (Fig. 3.2d) que normalmente están ocultas o revestidas por obra de albañilería (ladrillos). Así, la fuga desde arriba produce una corrosión indetectable. Cuando se inspeccionan calderas de cajas que llevan obra de albañilería en los cabezales interiores, siempre debe tirarse la obra de ladrillos y comprobar las superficies metálicas ocultas para detectar la corrosión.

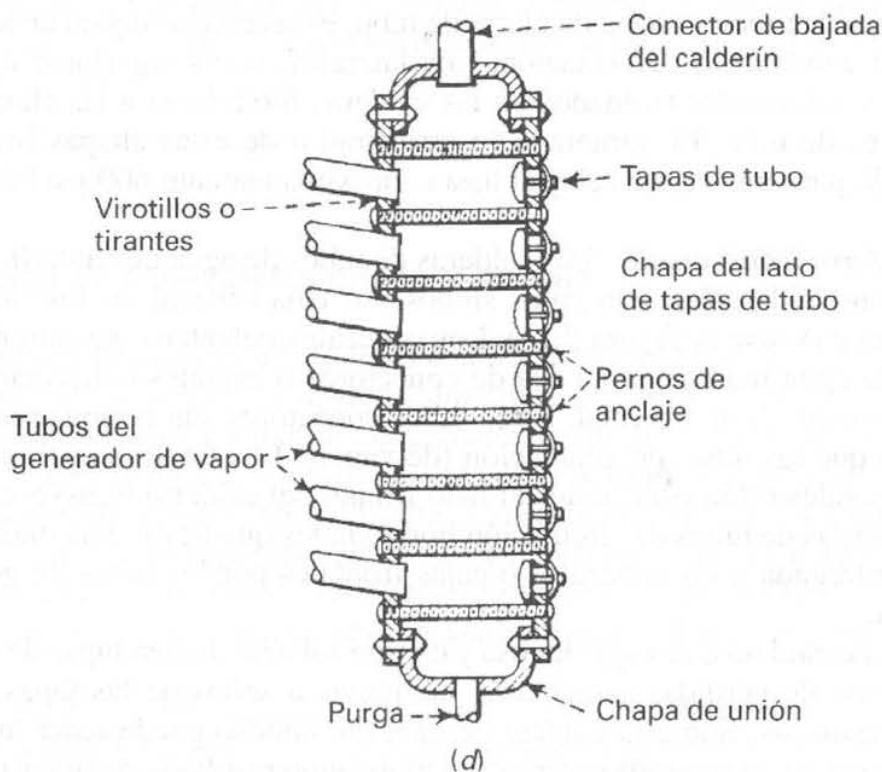
Algunos de los fabricantes americanos que fabrican calderas de tubos de agua del tipo de cabezales y cajas de agua son: Heine, Union Boiler, Murray Boiler, E. Keeler Co., Springfield Boiler Co., Babcock & Wilcox Co., y la Wickers Boiler Co.



Cabezal sinuoso vertical  
(a)

Cabezal frontal  
(b)

Cilindro reblandado a caja transversal  
(c)

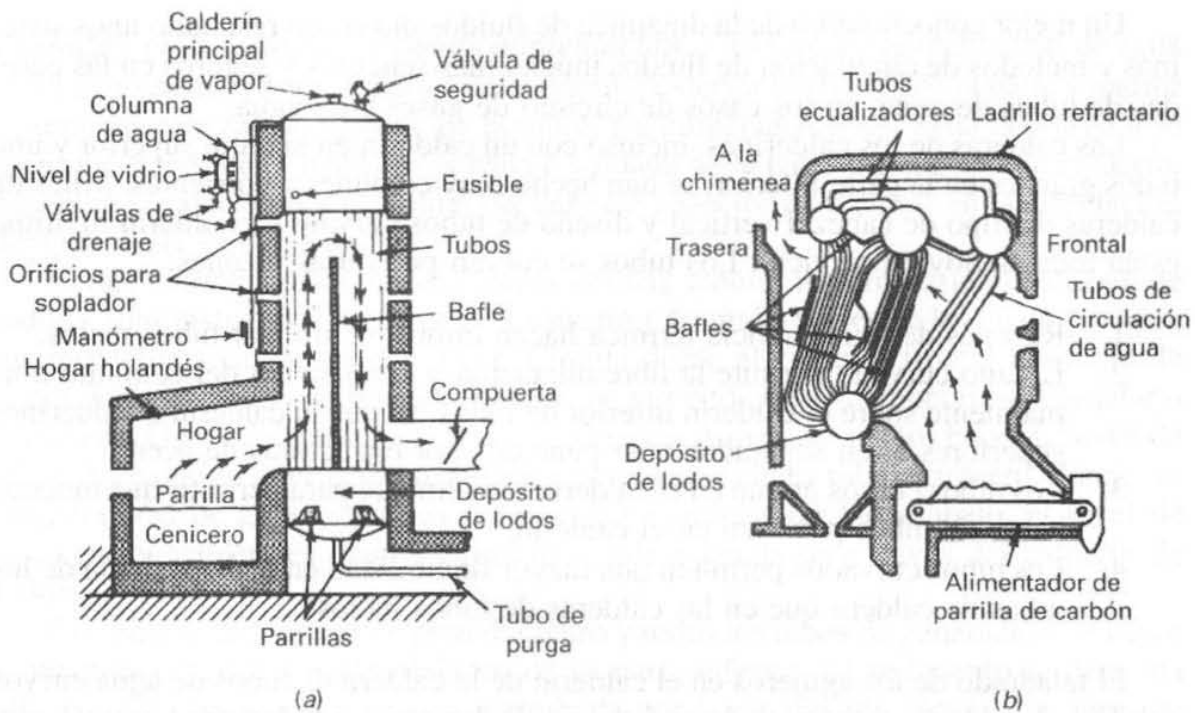


**Figura 3.2.** Las cajas o cabezales fueron utilizados en calderas de tubos de agua rectos. (a) Caja sinuosa (o en «ese»). (b) Caja frontal. (c) Caja transversal y conexión del cilindro a la caja o cabezal. (d) Detalle de caja o cabezal.

### Calderas de tubos de agua verticales, tipo de tubos rectos

La caldera de tubos de agua verticales es un tipo de caldera que requiere un moderado espacio volumétrico y una superficie en planta, por unidad de capacidad, pequeña. La caldera de tubos de agua de la Figura 3.3a representa este tipo. Estas calderas utilizan un hogar holandés o extensión de la cámara de combustión para asegurar un espacio adecuado de combustión. Algunas instalaciones usan la fila frontal de tubos





**Figura 3.3.** (a) Caldera vertical de tubos de agua y detalles. (b) Antigua caldera de tubos curvados del tipo Stirling.

generadores para formar una pared o muro de agua superior o de techo en la prolongación del hogar.

El calderín superior se conoce como calderín de vapor; el inferior como calderín de lodos. Las placas tubulares están arriostradas por tirantes o virotillos de sección y paso adecuados. El cabezal opuesto a la chapa de tubos es el calderín de vapor y en el calderín de lodos no se necesita arriostrado, porque está diseñado con el radio adecuado para soportar la presión de diseño (trabajo).

El cambio de tubos puede realizarse por inserción a través de una salida en circunferencia de agujeros de mano colocados en el cabezal superior del calderín de vapor para este propósito. El acceso a estos calderines se efectúa a través de un agujero de hombre en la cabeza bombeada de cada calderín.

## **CALDERAS DE TUBOS DE AGUA CURVADOS**

Los tubos curvados son más flexibles que los rectos. Pueden construirse calderas anchas y bajas allí donde la altura de sala de calderas es limitada, o estrechas y altas donde el suelo de planta es escaso o caro. También las calderas de tubos curvos permiten que una mayor superficie de calefacción esté expuesta al calor radiante de la llama. Los calderines sirven de puntos colectores muy convenientes en el circuito agua-vapor y como separación del vapor y del agua. Así se han utilizado calderas con dos, tres y a veces hasta cuatro calderines. A medida que las calderas aumentan de tamaño (lo que es posible con el diseño de tubos curvos), se incrementa la demanda de un hogar refrigerado más activo. Así se hicieron las paredes o pantallas de tubos de agua y otras mejoras de diseño.

Un mejor conocimiento de la dinámica de fluidos dio como resultado unos sistemas y métodos de circulación de fluidos mucho más sencillos y seguros en las paredes de tubos de agua, en los casos de circuito de gases y de agua.

Las calderas de los calderines, incluso con un calderín en la parte superior y uno o dos grandes en la parte inferior, se han hecho muy comunes y corrientes. Miles de calderas del tipo de cabezal vertical y diseño de tubos curvados y calderín múltiple están todavía hoy en servicio. Los tubos se curvan por varias razones:

1. Razones de transferencia térmica hacen imposible utilizar tubos rectos.
2. El tubo curvado permite la libre dilatación y contracción del conjunto normalmente sobre el calderín inferior de lodos, ya que el calderín o calderines superiores están separados o suspendidos por estructuras de acero.
3. Los tubos curvos entran en el calderín radialmente para permitir que muchos haces de tubos penetren en el calderín.
4. Los tubos curvados permiten una mayor flexibilidad en la disposición de los tubos de caldera que en las calderas de tubos rectos.

El taladrado de los agujeros en el calderín de la caldera de tubos de agua curvos debilita el calderín respecto a la resistencia de las tensiones longitudinales y circunferenciales. Esto se trata en el código ASME de calderas asignando un rendimiento de unión a la disposición del agujero del tubo al calcular la presión máxima permisible para el acero de la chapa o «cáscara» del calderín. La parte de la «cáscara» del calderín que tiene los agujeros de los tubos se refiere también a la chapa de los tubos, siguiendo la designación de los tubos de fuego (o de humos). Los cálculos de la eficiencia de la soldadura y de la presión admisible en la chapas y calderín se estudian en los últimos capítulos. Generalmente, la sección de la chapa de tubos de un calderín se hace de mayor espesor para reforzar la chapa del calderín y compensar las perforaciones o taladrado de los tubos.

### **Calderas *Stirling***

La caldera *Stirling* fue uno de los primeros tipos de calderas de tubos curvados de utilización común. La Figura 3.3b muestra una unidad con bancadas de caldera frontales y medias conectadas a ambos calderines frontal y medio superior. Esta disposición iguala la descarga de la mezcla de vapor-agua para aumentar la circulación y reducir los arrastres del vapor. Las calderas de este tipo general fueron diseñadas normalmente para presiones desde 11 hasta 70 bar y un rango de producción de 3,5 a 157,5 toneladas/hora de vapor. Ambos calderines, el superior y el inferior, tienen protección parcial de obra de refractario alrededor de ellos. Como el Código de calderas requiere (o requirió) que la junta longitudinal del calderín esté fuera del efecto de la zona térmica del hogar o caja de fuego, la junta está normalmente protegida por debajo de este refractario. Incluso si ello significa picar y descubrir lo que esté debajo del refractario, compruebe siempre las condiciones de las juntas soldadas o remachadas longitudinales y circunferenciales buscando grietas, y revise por si hubiese fragilidad cáustica que afectase a los calderines.

**Entrada y circulación del agua de alimentación.** El tubo de alimentación de agua entra a través de la parte superior del calderín posterior o a través de la parte superior trasera del cabezal de agujero de hombre. La alimentación del agua descarga a lo largo y a través de la junta remachada o soldada de la parte trasera de este calderín. También se conecta por el frontal del cabezal conector para entrar en la circulación de agua de la caldera.

El agua circula hacia abajo a través del haz tubular trasero hasta el calderín de lodos y suministra a los haces de tubos medio y frontal a través de los cuales alcanza los respectivos calderines de vapor. Circula desde el calderín frontal al medio de vapor a través de los tubos de circulación en circuito corto, tendiendo así a igualar o ecualizar el nivel de agua en estos dos calderines. A medida que los haces traseros de tubos del calderín intermedio retroceden para unirse al haz tubular trasero, donde las temperaturas de gases menores permiten una circulación hacia abajo, el nivel de agua en los calderines medio y trasero tiende a igualarse a través del calderín de lodos.

El calderín de lodos es de gran diámetro y todos los tubos de generación de vapor montantes y bajantes están alejados de su parte inferior. El sedimento se deposita allí, porque esta sección no está perturbada por la circulación rápida. La purga se conecta mediante un accesorio forjado de acero remachado o soldado a la parte inferior del calderín de lodos. En el caso de calderas grandes con calderines de lodos grandes, puede suministrarse más de una purga.

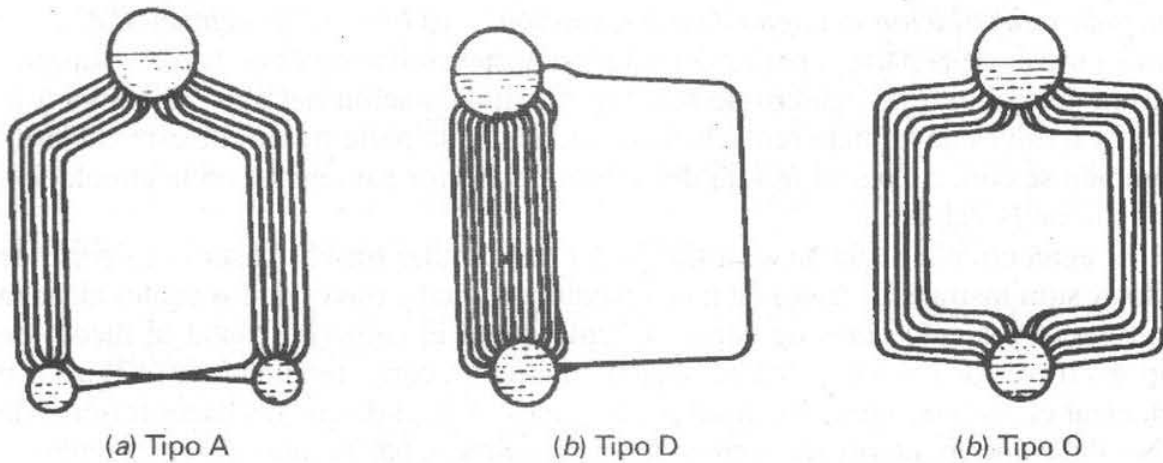
Los *baffles* se utilizan mucho en las calderas de tubos curvados, como se muestra en la Figura 3.3b. Éstos requieren inspección para estar seguros de que están todavía en funcionamiento para evitar las elevadas temperaturas en otras secciones de paso de gases. Esto puede causar problemas de circulación y sobrecalentamiento en las secciones tubulares.

## Calderas modernas de tubos curvados

*Las calderas compactas modernas* han crecido en popularidad y tamaño para las aplicaciones industriales. Hoy en día, la mayoría de las calderas de tubos de agua siguen uno de los tres diseños mostrados en la Figura 3.4 de la página siguiente. Estos se conocen como tipos A, D y O.

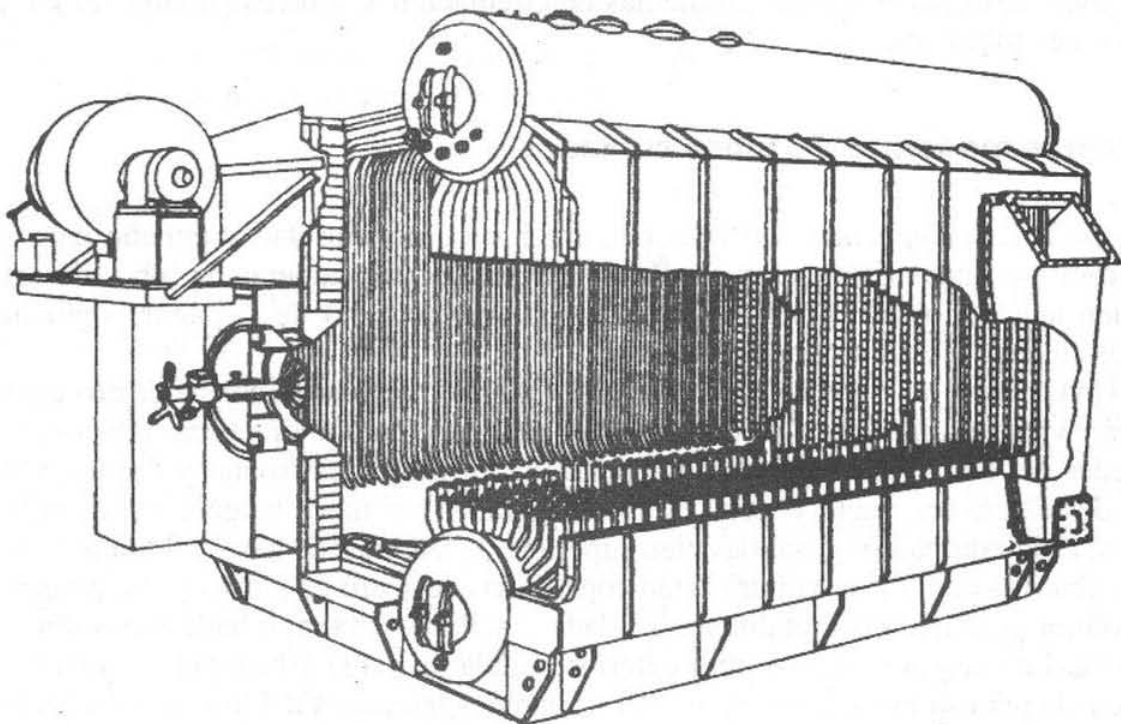
Una caldera de tubos de agua del tipo D montada en fábrica consta de dos calderines y viene equipada con un quemador de atomización por aire a baja presión. Las paredes del hogar están refrigeradas por agua en las partes frontal y trasera, y las paredes exteriores, suelo y techo están refrigeradas por tubos tangentes. La caldera puede estar equipada con salidas bien superiores o laterales de gases o humos. Tanto la «cubierta» como la envoltura están construidas de acero galga 10. La «cáscara» o envoltura principal está totalmente soldada y sellada (y comprobada a presión) en fábrica. La «cáscara» o envoltura exterior pesada en galga 10 soldada y sellada es adecuada para su instalación exterior. Las paredes interiores del hogar están hechas de tubos tangentes. Véase la Figura 3.5 de la página siguiente.

Las calderas compactas de tubos de agua normalmente están equipadas con equipos de encendido y seguridad de combustión y equipos de fallo de llama y encendido. Ambos, el quemador piloto y el principal, están monitorizados por un



**Figura 3.4.** Las calderas compactas modernas se disponen en tres configuraciones: A, D y O.

detector de llama sensible a la radiación de la llama (véanse los capítulos posteriores). Las características de corte por seguridad, interconexión de seguridad y llama de operación principal se suministran por la mayoría de los fabricantes. Las alarmas y conexiones eléctricas se incluyen, por bajo nivel de agua, alta presión de vapor, fallo del ventilador, temperatura baja y presión de combustible para unidades que queman combustibles líquidos y alta y baja presión de gas para las que queman gas natural y dispositivos de fallo de llama para ambos combustibles.



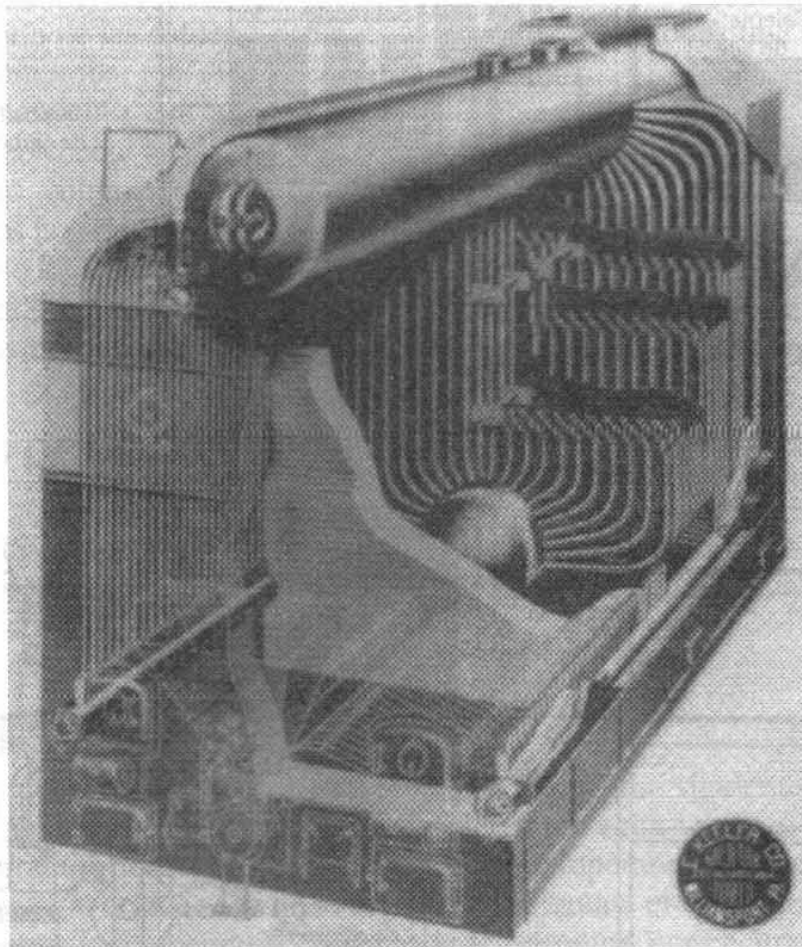
**Figura 3.5.** Caldera tipo D de dos calderines y tubos curvados, equipada para quemar gas o gasoil con hogar refrigerado de tubos de agua. (Cortesía de Combustion Engineering, Inc.)



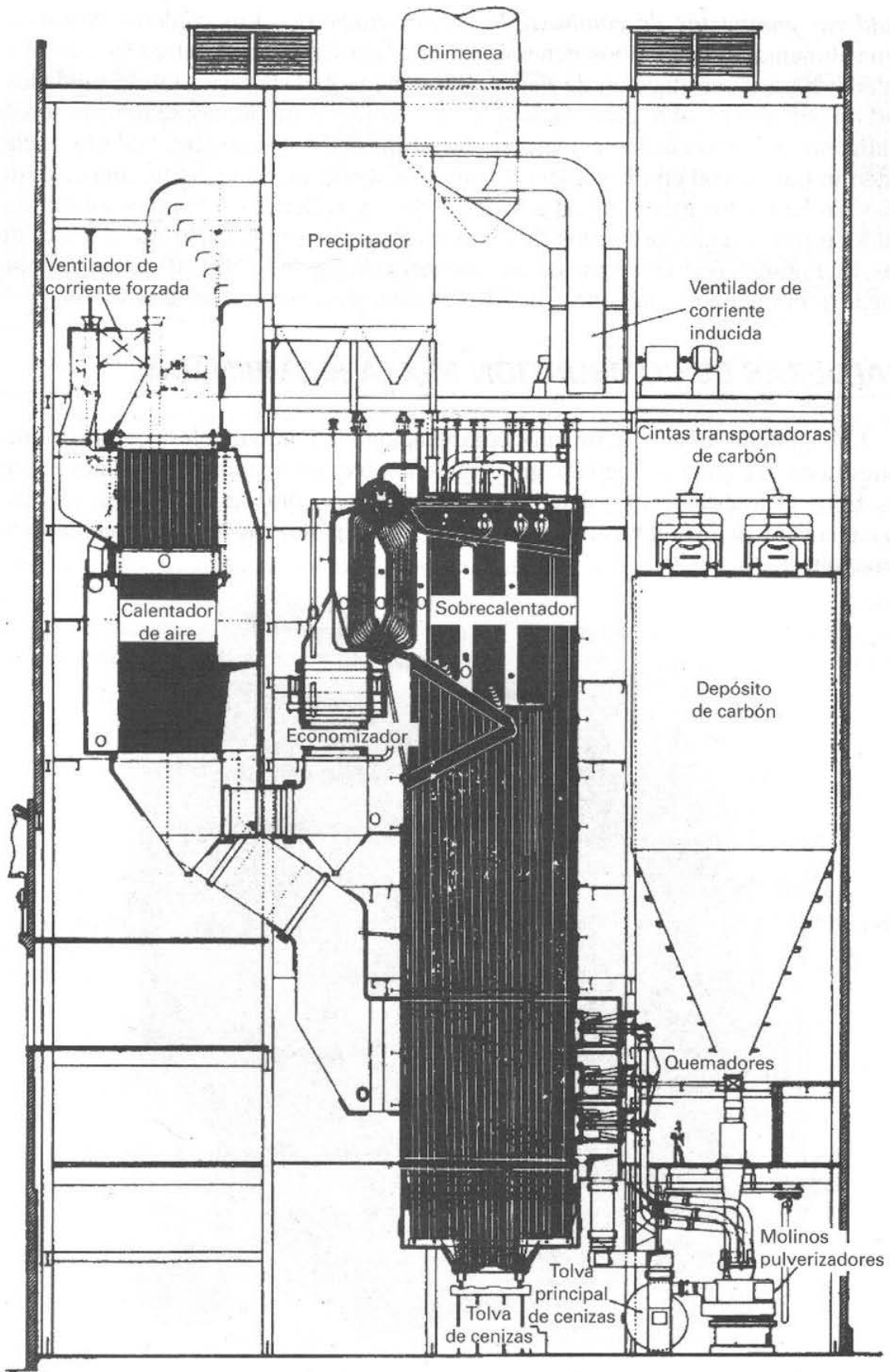
**Calderas compactas de combustible sólido (carbón).** Las calderas de tubos de agua alimentadas con carbón generalmente se fabrican de hasta alrededor de 113 toneladas/hora de producción de vapor. Por encima de esta tasa se usan unidades de carbón pulverizado y hogares ciclónicos. Las calderas modernas de parrilla son normalmente del tipo de dos calderines. Se utilizan los diseños de calderín ancho y calderín transversal con la caldera de tubos de agua curvados. Sobre una caldera de calderín largo, los gases fluyen a lo largo de los calderines, mientras sobre una de calderín transversal, los humos fluyen a través o perpendicularmente a los calderines. La Figura 3.6 es un dibujo de un generador de vapor de 500 HP calentado por un hogar inferior de retorta simple de diseño patentado por E. Keeler Co.

### **CALDERAS DE COMBUSTIÓN MIXTA (COMBINADA)**

Las calderas que queman una combinación de combustibles, como la que se muestra en la Figura 3.7 de la página siguiente, requieren unas condiciones especiales. Entre éstas están las siguientes. Cuando se añade combustible líquido y/o gaseoso a una caldera de combustible sólido, hay que tener en cuenta las siguientes consideraciones:



**Figura 3.6.** Un calderín grande en la parte superior y otro pequeño en la inferior es una característica peculiar del generador de vapor de 500 HP calentado por hogar inferior. (Cortesía de E. Keeler Co.)



**Figura 3.7.** Las calderas preparadas para quemar fuel, gas y carbón pulverizado deben ser diseñadas al efecto. (Cortesía de Babcock & Wilcox Co.)

1. Utilizar recalentador y atemperador.
2. Necesidades de exceso de aire.
3. Normativa de emisiones de  $\text{NO}_x$  a observar.
4. El espacio que los tubos necesitan para evitar el ensuciamiento y restricciones en el tiro.
5. Temperaturas esperadas del metal del precalentador de aire.
6. Temperaturas finales de los gases que deben obtenerse.

Cuando se quema un combustible sólido sobre una parrilla, el aire refrigerador debe suministrarse para las piezas del quemador de combustible sólido o gaseoso para disipar y transportar el calor desprendido por radiación desde el interior del hogar. Esto puede afectar al rendimiento por quemar con exceso de aire. Cuando se quema combustible líquido o gas en quemadores de muro frontal, se requiere un caudal de aire refrigerador a través de las parrillas para evitar el calentamiento excesivo. Por esta razón, es prudente consultar con el fabricante original de la caldera para obtener recomendaciones de diseño cuando se está considerando convertir una caldera para poder quemar varios combustibles.

### **Cambios de combustibles**

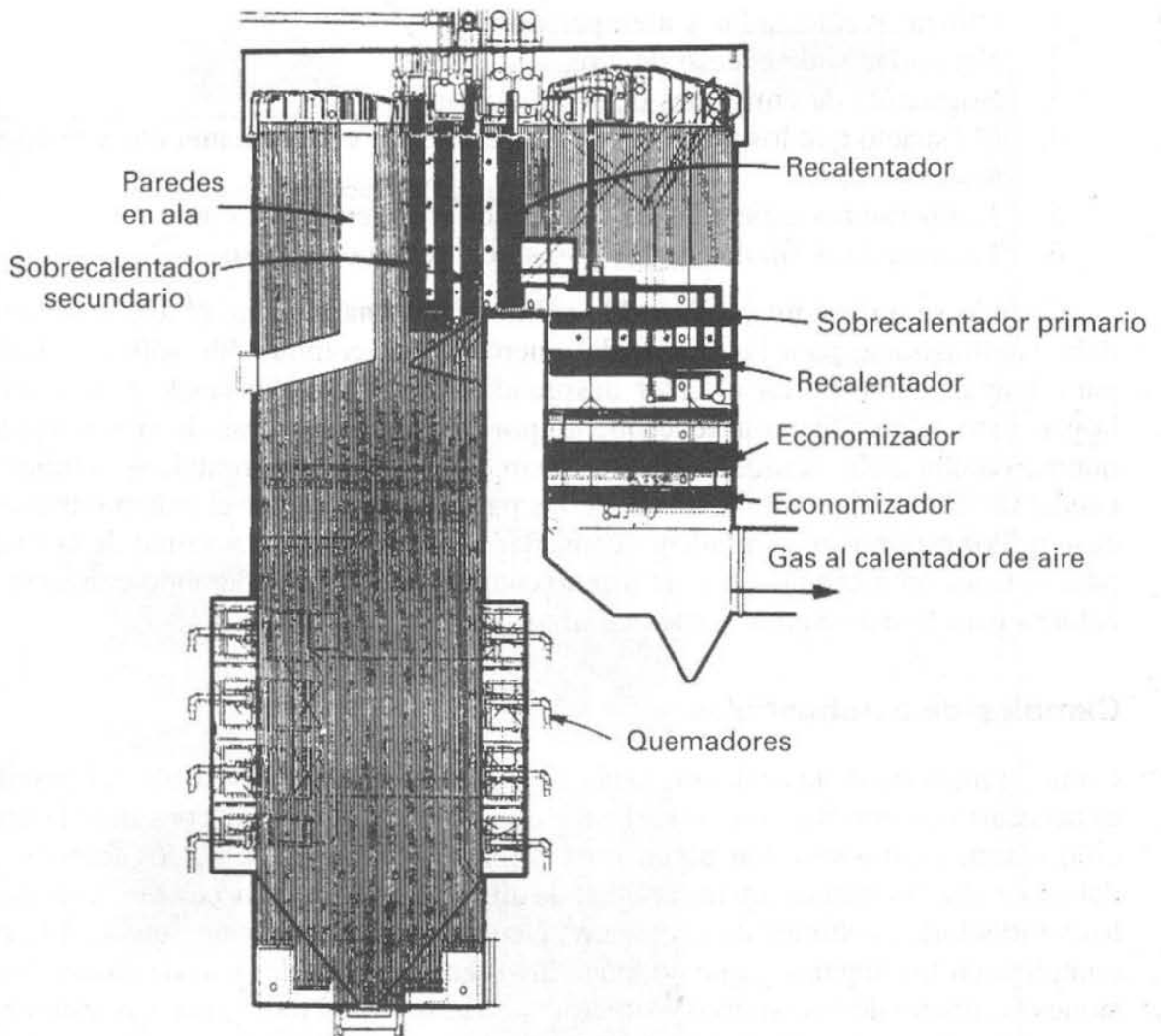
Como la mayoría de las calderas están diseñadas para un combustible determinado, es necesario comprobar con el fabricante de la caldera cuando se considere la operación o funcionamiento con algún otro combustible. Algunos de los factores que deben tenerse en cuenta son la cantidad de aire de combustión necesario, tamaños de los ventiladores, volumen de la cámara de combustión para obtener una combustión completa en los hogares y que no tenga lugar en las zonas de paso de gases, dimensiones y tamaño de los equipos extractores de gases y, en todo caso, que estos equipos puedan tratar los diversos productos de la combustión sin corrosión, erosión y cumpliendo las normas ambientales, como las de  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  y descargas tóxicas.

## **CALDERAS DE CENTRALES TÉRMICAS**

Las calderas de centrales de gran capacidad se clasifican según trabajen a presión subcrítica o supercrítica. Otra clasificación suele hacerse según se utilice circulación de agua natural o forzada.

### **Calderas supercríticas**

Las calderas supercríticas (véase la Figura 3.8 de la página siguiente) son las que trabajan por encima de la presión crítica del diagrama agua-vapor, o sea, 225 bar, y a una temperatura de trabajo por encima de la temperatura crítica del agua de  $374,2\text{ }^\circ\text{C}$ . La presión crítica es la presión a la cual el agua y el vapor tienen la misma densidad, mientras la temperatura crítica es la temperatura por encima de la cual el agua no puede existir como líquido, no importa cuál sea su presión. Esto significa que el agua a la temperatura de  $374,2\text{ }^\circ\text{C}$  tendrá también la presión crítica de 225 bar absolutos. No hay calor latente de vaporización por encima de la presión crítica, ya



**Figura 3.8.** Un generador de vapor supercrítico tarado para 9.775.000 libras/hora a 4.200 psi de presión de salida, con salida del sobrecalentador de 1.010 °F y del recalentador de 1.000 °F, quemando carbón pulverizado y suministrando vapor a un turbogenerador de 1.300 MW. (Cortesía de American Electric Power System.)

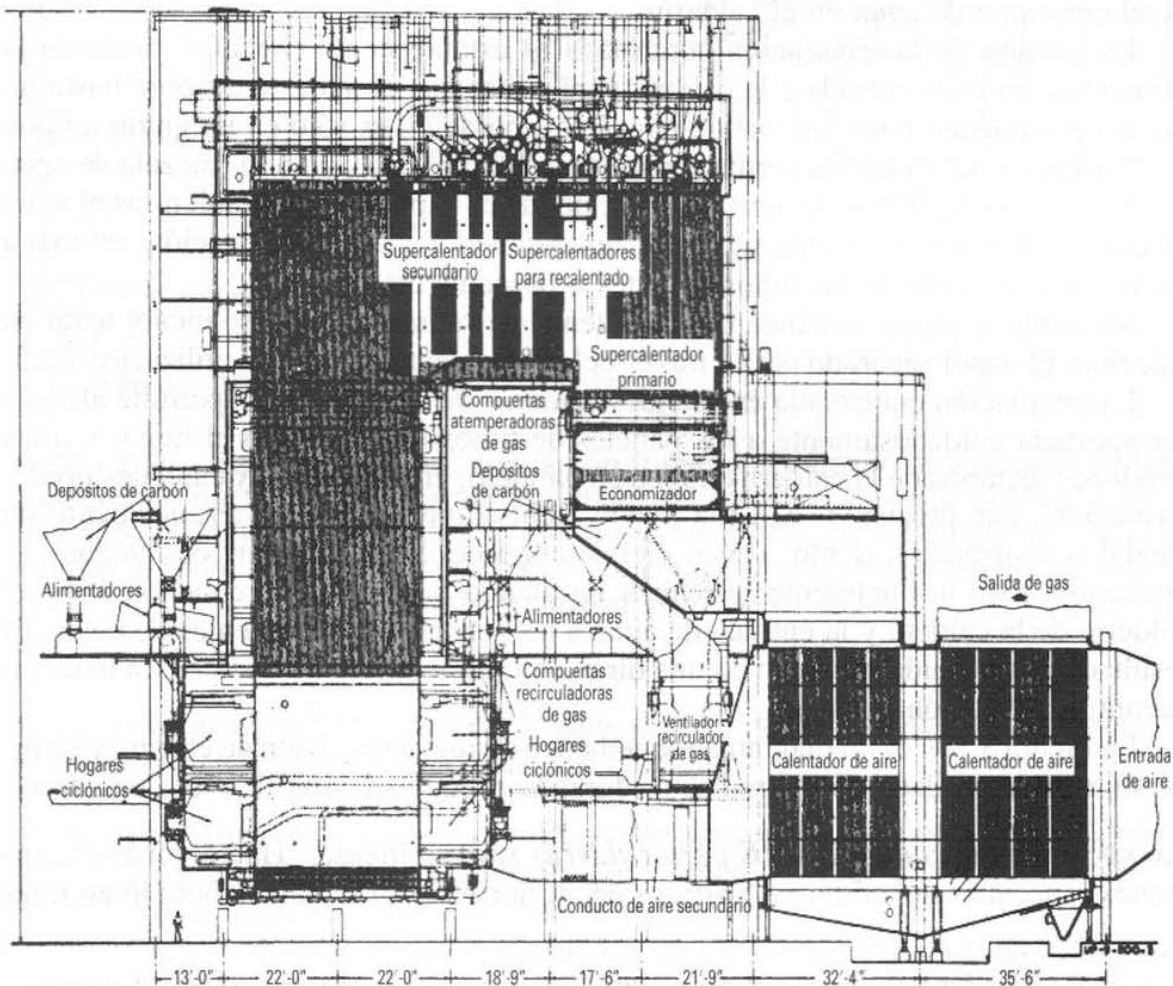
que el agua y el vapor tienen la misma densidad. No hay calderín para separar el agua del vapor. Las calderas hiper-críticas o supercríticas trabajan mediante y a través de los tubos de agua en contraste con las unidades convencionales donde el líquido puede circular a través de los tubos, más que en ellos, antes de convertirse en vapor. Esto se consigue mediante la circulación forzada y a través de la bomba de alimentación de caldera o bomba auxiliar, en contraste con las unidades de circulación natural en las calderas subcríticas.

La alimentación de agua en una caldera supercrítica se bombea a la entrada de la caldera y pasa en un camino o circulación continua a la salida de caldera. El agua de alimentación se introduce a una presión superior a la presión crítica, mientras que la temperatura del agua está por debajo de la temperatura crítica, pero aumenta a medida que pasa a través de la caldera. Hay una zona de transición donde el agua se convierte en vapor. Es necesario que la zona de transición esté en un lugar suficien-



temente caliente para llevar al agua por encima de la temperatura crítica, y suficientemente enfriada para evitar el calentamiento excesivo de los tubos. Además, las calderas supercríticas deben tener un control restrictivo de las condiciones químicas del agua de alimentación para evitar roturas de tubos a causa de impurezas y depósitos del agua. Es necesario purificar el agua de alimentación en un grado mucho mayor que para las calderas convencionales de calderín, de las que los depósitos pueden eliminarse mediante la purga periódica. La Figura 3.8 muestra una caldera supercrítica. La producción máxima continua es de 4.434 toneladas/hora a 269 bar y 543 °C a la salida del recalentador secundario. El recalentamiento es a 538 °C. Esta caldera suministra vapor a un turbogenerador de 1.300 MW.

El flujo del fluido a través de la unidad empieza en el economizador, a través de sus haces, y va hacia los dos cabezales de salida. Dos bajantes llevan el fluido al hogar y pasan por los circuitos de convección yendo hacia los sobrecalentadores primario y secundario. Cuatro líneas *crossover* (puente), o de unión entre los recalentadores primario y secundario, contienen los atemperadores del recalentador y las tuberías de conexiones del *bypass*. Hay dos salidas del sobrecalentador secundario y dos salidas del precalentador. La Figura 3.9 es una unidad supercrítica (245 bar



**Figura 3.9.** Caldera ciclónica de hogar a carbón, de 600 MW, 3.500 psi, 1.000 °F, con generador de vapor con dos recalentadores (Cortesía de Indiana & Michigan Electric Co.)

y 538 °C suministrando vapor a un turbogenerador de 600 MW) y utiliza válvulas de *bypass* para pasar vapor a un tanque *flash* (de vaporización instantánea) en el arranque. El depósito o tanque *flash* actúa como un calderín de caldera separando las partículas de humedad del fluido «flasheado»\* de modo análogo al de un *scrubber*\*\* . El vapor despojado de la humedad se retorna al generador de vapor vía válvula de retorno de vapor y suministra por la bajante del sobrecalentador de vapor primario. Este método de operación del *bypass* de arranque reduce el arrastre de sílice a los sobrecalentadores. El vapor del *bypass* se dirige a través de los calentadores de agua de alimentación antes de ir al condensador, reduciendo así las pérdidas térmicas.

**Calderas de circulación controlada.** La caldera tipo «LaMont» mostrada en la Figura 3.10a se conoce como «caldera de circulación controlada\*\*\*» porque la cantidad de agua que pasa por la caldera es de tres a veinte veces la cantidad de agua evaporada. Así se requieren dos bombas, una para la circulación del elevado caudal a través de los tubos (que no son de circulación natural) y la otra como bomba de alimentación convencional. La bomba de alimentación opera sobre el mismo principio, como la mayoría de las bombas de alimentación de calderas, de mantener un nivel constante de agua en el calderín.

La función de la circulación controlada es establecer un caudal a través de la primera sección de entrada a la caldera para evitar que el agua se evapore hasta un grado de sequedad total. En vez de ello, la evaporación es sólo en un grado tal que los sólidos y sales disueltas permanezcan en solución. Esta solución (mezcla de agua y vapor) pasa al calderín de agua y vapor, donde el vapor se separa mientras el agua en exceso se elimina. El agua separada, junto con el agua de alimentación, retorna a las bombas a través de los tubos bajantes o descendentes.

Mediante la purga continua o intermitente, se retiran algunos sólidos y agua en solución. El vapor separado pasa a través del sobrecalentador para su utilización final.

La circulación controlada en grandes calderas de tubos de agua permite al agua ser aportada cuidadosamente a los paneles de tubos que recubren el hogar y a las secciones de tubos de la caldera o tubos en paralelo, en cantidades y caudales predeterminados con precisión. El agua puede incluso intercambiarse térmicamente en caudal o distribución dentro de un cierto rango de cualquier tiempo siguiente de operación. Esto normalmente se realiza instalando bombas de circulación entre el calderín de la caldera y la entrada de agua a las superficies absorbentes de calor. El resultado es un caudal positivo en una dirección durante todo el tiempo, sin tener en cuenta la aplicación térmica.

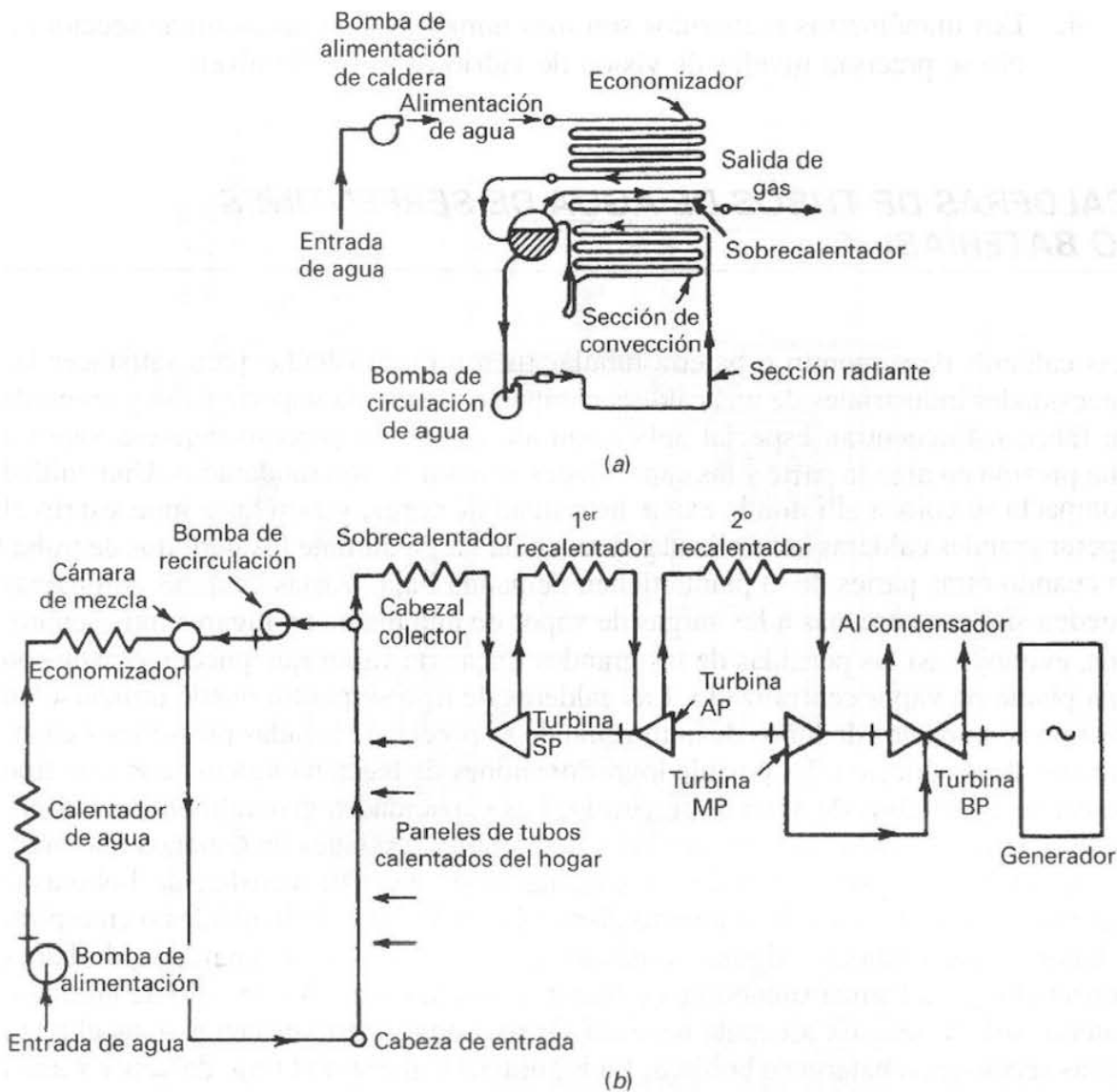
La Figura 3.10b es un diagrama esquemático de una disposición de caldera y turbina supercrítica utilizando recirculación forzada y equipada con dos recalentadores.

**Excepciones del código ASME para calderas supercríticas.** Hay algunas excepciones especiales del código ASME, es decir, normas que se han elaborado en refe-

\* *N. del T.*: Término utilizado en el lenguaje técnico coloquial de calderas para indicar «vaporizado instantáneo».

\*\* *N. del T.*: Otro término técnico coloquial para designar el aparato lavador de gases a contracorriente.

\*\*\* *N. del T.*: Y forzada.



**Figura 3.10.** Las calderas de circulación forzada requieren una bomba separada además de la bomba de alimentación de caldera. (Diseño LaMont.) (a) El principio LaMont precisa bomba separada para vencer la resistencia de rozamiento al flujo. (b) Disposición caldera-turbina usando recirculación forzada en una caldera supercrítica.

rencia a los generadores de vapor de flujo forzado que no tienen líneas de agua y vapor pre fijadas o predeterminadas. Por ejemplo:

1. Es permisible diseñar las partes en presión para diferentes niveles de presión a lo largo del camino recorrido por el flujo de agua-vapor.
2. No se requiere tubería inferior de purga.
3. Si hay válvulas de corte instaladas en el camino del flujo de agua-vapor entre dos secciones cualquiera de línea, se precisan algunas válvulas de seguridad o válvulas de alivio de exceso de presión (incluso motorizadas), controles de enclavamiento por impulsos (esto es diferente a la típica caldera con válvulas de seguridad protegiendo toda la caldera).

4. Los manómetros requeridos son más numerosos en las distintas secciones. No se precisan niveles de visión de vidrio ni grifos de nivel.

## **CALDERAS DE TUBOS DE AGUA DE SERPENTINES (O BATERÍAS)**

---

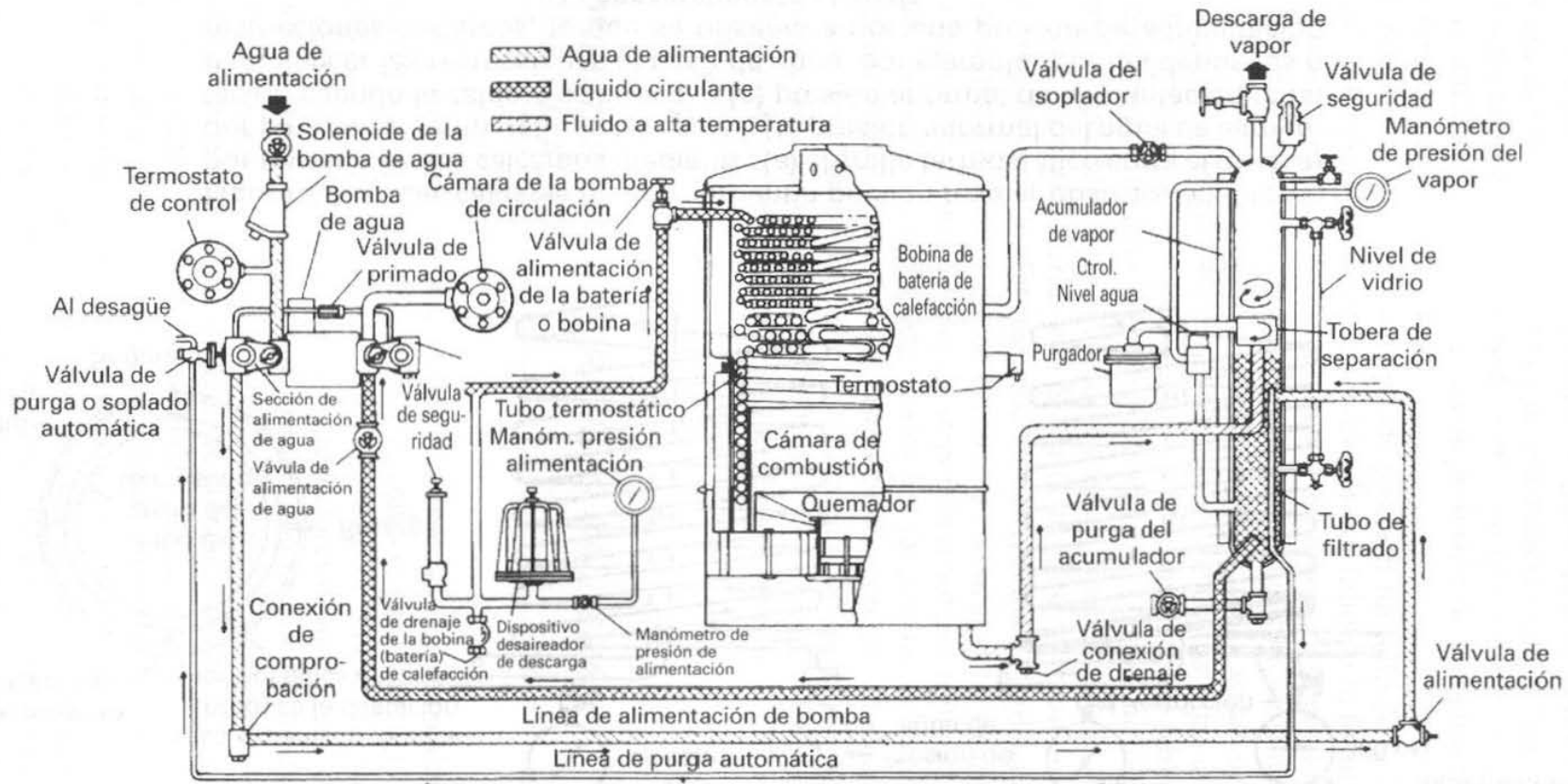
Las calderas de serpentín o batería tubular fueron desarrolladas para satisfacer las necesidades industriales de una caldera compacta, de rápida vaporización y montada en fábrica. Encuentran especial aplicación allí donde un proceso requiere vapor a alta presión en alguna parte y las capacidades necesarias son moderadas. Una unidad compacta se coloca allí donde existe necesidad de carga, y esto hace innecesario el operar grandes calderas centralizadas a reducida carga durante los períodos de trabajo cuando otras partes de la planta tienen demanda baja. Varias calderas compactas pueden situarse cercanas a las cargas de vapor de una planta en lugares muy separados, evitando así las pérdidas de las grandes líneas de vapor que pueden existir con una planta de vapor centralizado. Las calderas de tipo serpentín puede utilizarse en los tipos compactos de tubos de humo cuando se precisan elevadas presiones y capacidades de producción. Es posible lograr presiones de hasta  $64 \text{ kg/cm}^2$  con este tipo de calderas de tubos de agua de serpentín. Las capacidades generalmente están por debajo de las 5 toneladas/hora, pero hay disponibles unidades de tamaños mayores.

Los tubos de generación de las calderas tipo serpentín constan de bobinas o baterías de tubo de pequeño diámetro dispuestas en bobinas helicoidales o en espiral o baterías horizontales. Algunas unidades grandes constan de una serie de haces conectados para formar una bobina o batería continua. En caso de fallo de bobina o batería, sólo la sección afectada necesita ser revisada y permanecen activas el resto de las secciones o baterías o bobinas. La Figura 3.11 muestra el flujo de vapor y agua de una unidad tipo serpentín (batería o bobina). Nótese que la caldera utiliza circulación y recirculación forzadas, lo que permite usar un tubo de pequeño diámetro con velocidades elevadas y altas tasas de transferencia térmica.

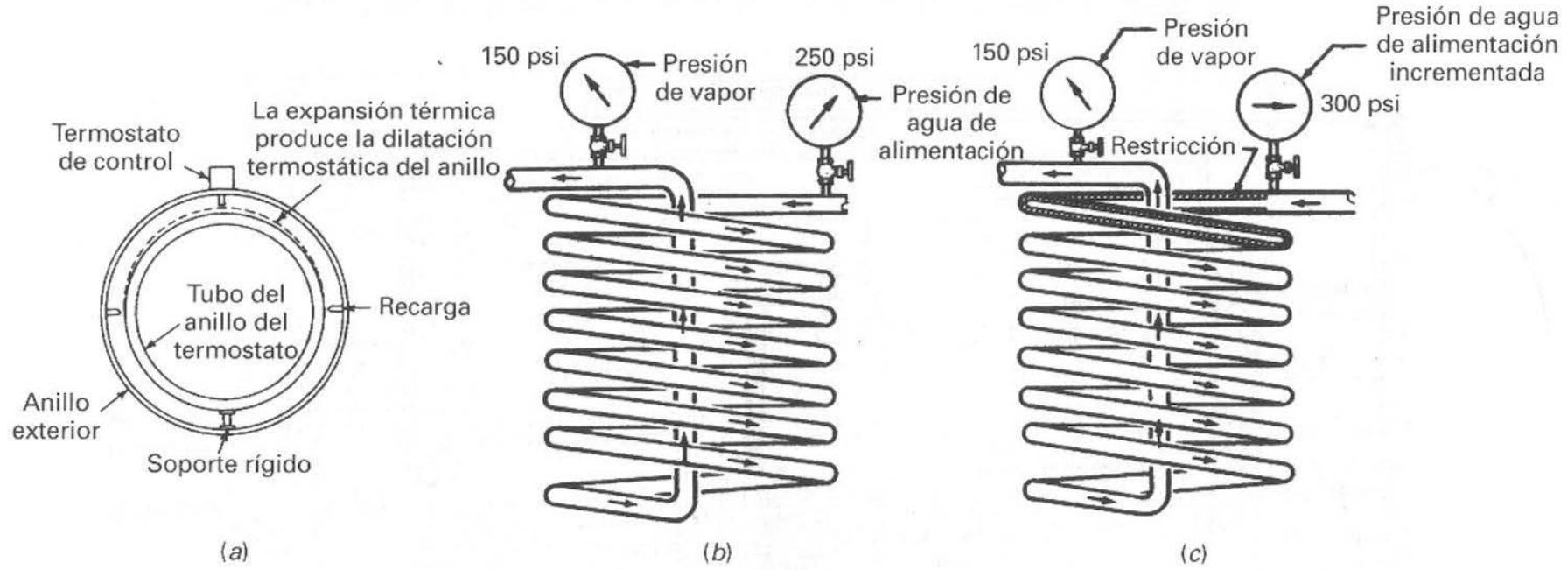
El flujo o caudal de agua y vapor en el sistema mostrado en la Figura 3.11 parte o arranca de la entrada de agua de la bomba de alimentación con el agua bombeada directamente al acumulador de vapor. La tasa de agua de alimentación está controlada por el nivel de agua que a su vez responde al control de nivel líquido del acumulador. El líquido circulante desde el acumulador se bombea a los paneles calentadores de la caldera. El caudal de líquido de los paneles o las baterías arrolladas en espiral (Fig. 3.11) se dirige hacia abajo en contra corriente con los gases calientes de combustión. Cuando abandona la sección espiral de generación, el fluido pasa a través del anillo termostático y la sección del arrollamiento helicoidal de tubo de agua y después a la boquilla separadora del acumulador. La acción centrífuga de la tobera o boquilla separa el vapor seco del líquido y permite al exceso de líquido retornar a la sección inferior. El vapor seco del acumulador se descarga sobre la parte superior a través de la válvula de descarga.

Una característica poco usual es el tubo del anillo termostático mostrado en la Figura 3.12 de la página 100. Este tubo es una parte integrante de la espiral o bobina





**Figura 3.11.** Caldera de serpentín de tubos de agua mostrando el flujo de agua y vapor. (Cortesía de Clayton Mg. Co.)



**Figura 3.12.** Las calderas de tipo serpentín pueden revelar obstrucción interna por revestimientos calcáreos mediante: (a) el anillo termostático corta el quemador para evitar temperaturas excesivas; (b) presión anormal del agua de alimentación cuando la caldera es nueva, o (c) presión anormal de alimentación (alta) para vencer las restricciones al paso de agua, por ejemplo, por los depósitos o restricciones calcáreos, lo que se observará por una presión de alimentación anormalmente elevada.

calentadora, actuada directamente por el calor de combustión. En caso de corte de agua o de condiciones excesivas de calor, el termostato de control se expande o dilata más allá del punto de consigna y de esa manera corta el flujo de combustible.

Otro diseño tiene tres conjuntos de bobina (o tubos arrollados en espiral) y los cabezales de entrada y salida. Se utiliza con profusión en pequeños tamaños de hasta 300 HP y presión de hasta 17,5 bar.

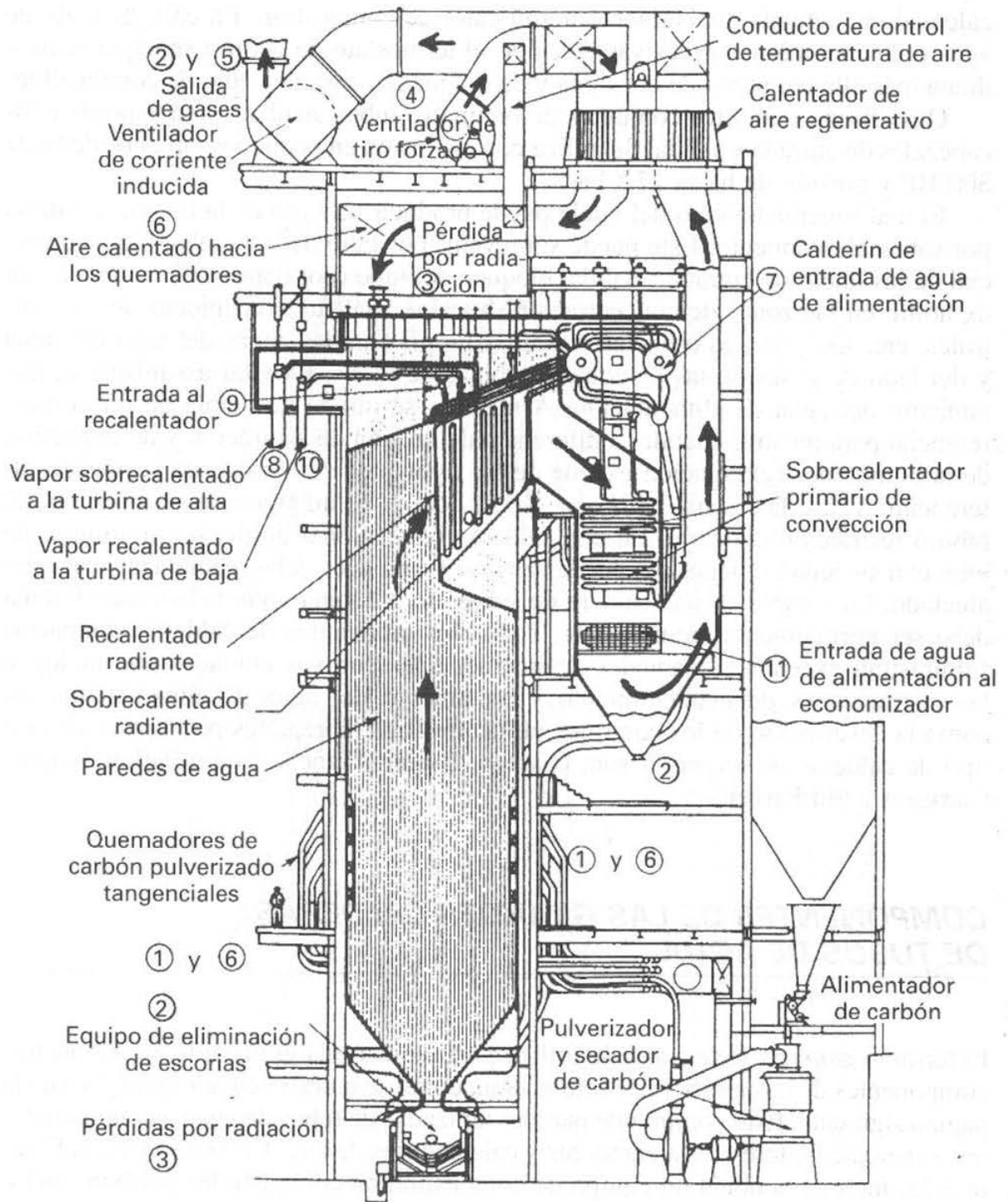
El mal funcionamiento del bucle puede producir un fallo de la bobina o batería por sobrecalentamiento. Éste puede sobrevenir por fallo de la bomba, bloqueo parcial de las líneas de entrada y salida, bloqueo del tubo (por depósitos), acumulación de hollín en las zonas de concentración de calor, mal funcionamiento de los controles, etc. Así pues, es esencial mantener limpias ambas zonas del lado del agua y del lado de gases de las baterías o bobinas de tubos. Es vital así mismo el tratamiento del agua de alimentación. A menudo se utiliza una tabla de presión diferencial para mostrar cuando la diferencia de presión de aspiración y de impulsión de la bomba de recirculación excede de un valor predeterminado de la presión diferencial. Véase la Figura 3.12*b* y *c*. Si así ocurre, es un signo de obstrucción del tubo o restricción del flujo. En una caldera convencional de diseño multitubo, un tubo con suciedad o depósitos puede cerrarse y entonces debe reemplazarse el tubo afectado. En cambio en una caldera de serpentín o bobina, toda la batería o bobina debe ser normalmente reemplazada. Todos los fabricantes de calderas compactas suministran excelentes manuales de instrucciones con sus unidades que incluyen las instrucciones de mantenimiento y tratamiento del agua de alimentación, así como la descripción de los controles utilizados. Los fabricantes principales de este tipo de calderas de serpentín son: Clayton, Besler, Francis, Mund-Parker, Vapor-Clarkson y Sid Parker

## **COMPONENTES DE LAS GRANDES CALDERAS DE TUBOS DE AGUA**

---

El término *generador de vapor* se utiliza para indicar una gran caldera con muchos componentes de la superficie de calefacción, como se muestra en la Figura 3.13 de la página siguiente. Esto comprende paredes tapizadas de tubos de agua, economizadores, supercalentadores, recalentadores y calentadores de aire. Como se ve en la Figura 3.13, incluye también un equipo de combustión de combustibles (carbón, fuel o gas natural), sistemas de tiro, de descarga de gases o eliminación de cenizas, lo mismo que bucles de tratamiento de agua de alimentación en el circuito de suministro de agua. Las grandes calderas de tubos de agua tienen muchos más componentes absorbentes de calor que las calderas del tipo de tubos de humos (pirotubulares), y, lo mismo que otros detalles constructivos, necesita revisarse.

Las viejas calderas, especialmente las del tipo de tubos curvados, se usaban para colocarse por parejas con una pared de separación común entre ellas que cubría los dos colectores próximos a cada recubrimiento o pared. Éste podría ser un calderín de vapor o de lodos. Como las superficies exteriores de los colectores están recubiertas, se denomina a estos calderines-cabezales como *cabezales ciegos*.



**Figura 3.13.** Componentes de un gran generador de vapor. (Cortesía de *Power magazine*.)

Hay una tendencia a depositarse el humo, cenizas y humedad en el espacio entre el refractario y las superficies exteriores de los calderines y cabezales. Y estas condiciones de depósitos no se observan directamente. En las antiguas inspecciones era normal para el inspector insistir en que se quitasen o picasen los refractarios de alrededor de los calderines ciegos. Así, la superficie externa era visible para la inspección y pruebas de espesor. Hoy en día, pueden usarse instrumentos ultrasónicos



para obtener un perfil del espesor del calderín. Estas comprobaciones sobre deterioro se hacen sin perturbar ni picar los refractarios, a no ser que las pruebas ultrasónicas de inspección indiquen que es necesario hacerlo.

*Las puertas o portillos de fuego* en las calderas de tubos de agua se precisa que sean de apertura exterior o de un tipo provisto de cerrojos autobloqueantes y de tipo sin resorte o fricción de contacto, de modo que la puerta no se abra por la presión del hogar en caso de rotura de tubos o explosión del hogar y así se evite la posibilidad de quemaduras o escaldamiento del operador que esté en la caldera\*. Las puertas o trampillas de explosión sí se utilizan y se sitúan en paredes a una distancia de dos metros de las puertas de fuego o plataforma de caldera, y deben estar provistas de deflector, fundamentalmente para dirigir los gases o explosiones en la dirección conveniente (generalmente en la parte superior de la caldera y hacia arriba).

Los *baffles* dirigen los gases calientes convenientemente entre los pasos de tubos el número de veces (o cambios de dirección) necesarios para posibilitar una mayor absorción térmica por los tubos de la caldera. También permiten un diseño para mejorar las diferencias de temperatura entre tubos y gases a través de la caldera. Los *baffles* ayudan a mantener la velocidad de los gases, eliminan las bolsas y depósitos en zonas «muertas», depositan los cúmulos de cenizas volantes para su adecuada remoción y evitan las pérdidas elevadas de tiro. Cuando un baffle del hogar se rompe, los gases cortocircuitan uno o más pasos de gases, dando lugar a temperaturas excesivas de los mismos y a pérdidas de rendimiento y capacidad de la caldera. Puede así ocurrir sobrecalentamiento en aquellas partes de la caldera diseñadas para el paso de gases a temperaturas menores. Así, en una inspección en profundidad los *baffles* deberán siempre ser revisados para detectar erosiones, grietas, fugas (alrededor de los tubos) o dislocación de la que puede resultar una rotura de tubos.

Los *paneles de agua* constan de tubos verticales relativamente próximos y conformando los cuatro muros o paredes del hogar. Originalmente fueron desarrollados para enfriar y proteger el revestimiento refractario del hogar. Un diseño de calderas de una gran central de generación de energía (eléctrica) tiene tubos de 43 metros de altura, 8,6 milímetros de espesor de paredes de los tubos en la zona más caliente del hogar (por debajo de los 25 metros de altura), pero sólo 8,1 mm de espesor en los tubos superiores.

Dependiendo del tipo de calderas, la superficie calefactora de tubos de agua puede suponer sólo el 10 por 100 de la superficie total de calefacción de la caldera, incluso representa, como mucho, el 50 por 100 de la superficie total de absorción térmica. Las paredes de tubos de agua cumplen tres funciones básicas: (1) proteger el aislamiento de las paredes del hogar; (2) absorber calor del hogar para incrementar la capacidad de la unidad generadora; y (3) hacer estanco el hogar (en los hogares presurizados con tubos soldados tangentes).

El calor se transfiere a las paredes de humos como calor radiante desde la zona de mayor temperatura del hogar. A consecuencia de la gran cantidad de calor absorbido por esta parte de la caldera, el agua de alimentación debe ser de la mejor

---

\* *N. del T.*: En la actualidad, los operadores de turno de calderas están en una sala separada y cerrada con aire acondicionado no sólo para ellos, sino para la instrumentación, control y regulación de gobierno de la caldera. Se manda a distancia y se aumenta la seguridad (telemando).

calidad. También la circulación del agua debe ser rápida y plena para asegurar un flujo positivo a través de cada tubo en todo momento.

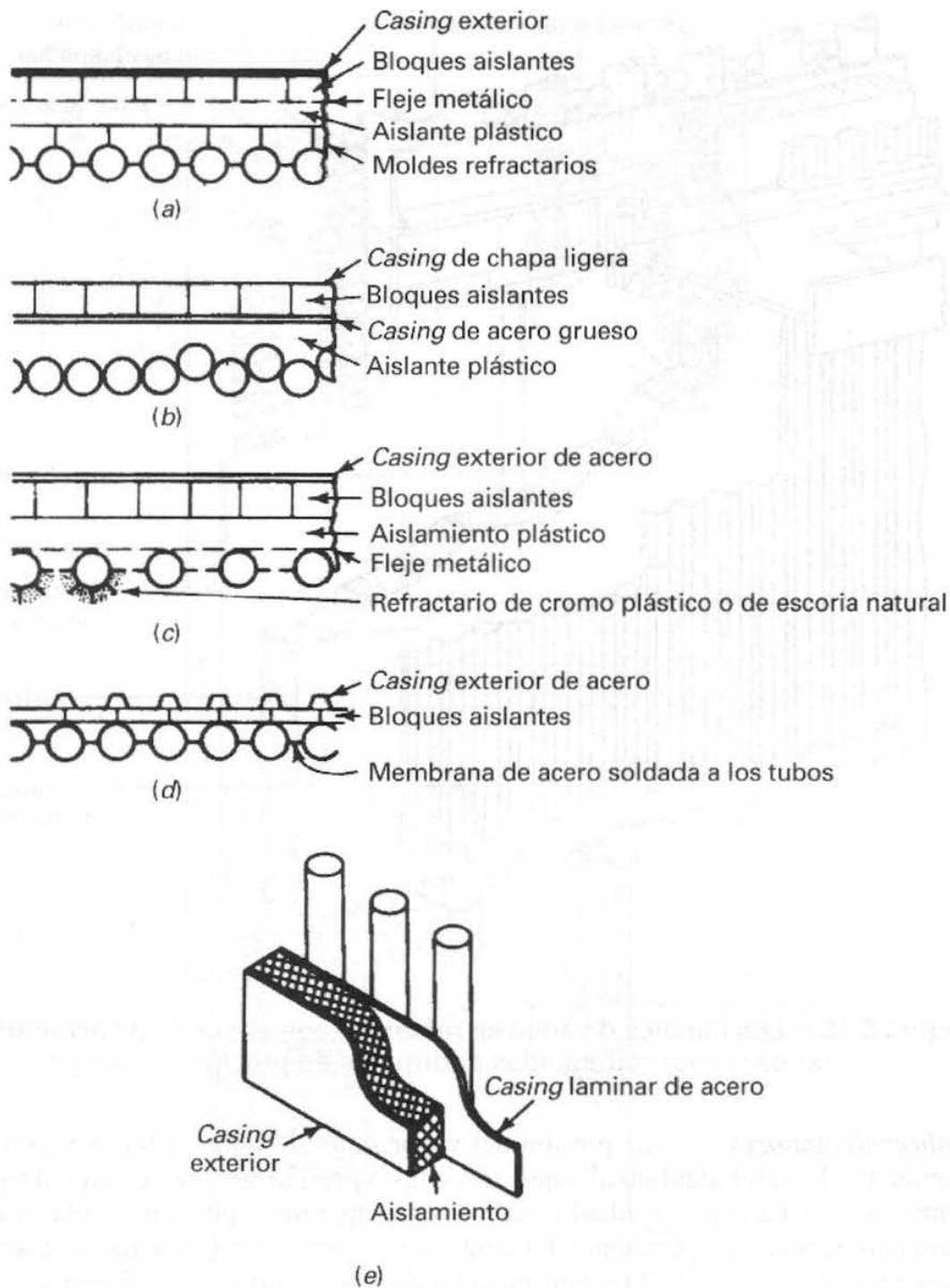
Se necesitan válvulas de purga de cada cabezal o calderín en la parte superior de los colectores de los tubos de agua por las mismas razones que la caldera misma las necesita. La acumulación de sedimentos en un calderín que suministra a las paredes o paneles de tubos de agua puede causar la interrupción de la circulación, con el consiguiente recalentamiento y fallo de los tubos.

**Cuidados y vigilancia.** Bajo ninguna circunstancia los calderines de los paneles de tubos de agua deben purgarse mientras la caldera está trabajando. Si se purgan, la circulación normal de la caldera se verá afectada negativamente y los tubos sobrecalentados se hincharán o romperán. La Figura 3.14 muestra algunas disposiciones típicas. La pared o panel de tubos de agua de la Figura 3.14a está diseñada para una refrigeración moderada. Este diseño tiene los tubos espaciados entre ellos y la superficie de pared está formada de refractarios (ladrillos o piezas aislantes). El ladrillo refractario está protegido con varias capas aislantes y un fuerte *casing* o revestimiento metálico exterior. Los refuerzos metálicos se utilizan a menudo en la construcción de paredes o muros. La Figura 3.14b muestra cómo están colocados unos tubos tangentes en los hogares de muchas calderas pequeñas y grandes. La disposición de tubos tangentes ofrece una superficie altamente absorbente de calor que está respaldada por ladrillos sólidos o plásticos aislantes y un fuerte *casing* o estructura de chapa de cerramiento metálico exterior. La Figura 3.14c muestra unas tiras longitudinales o aletas soldadas a los paneles de tubos no tangentes. En algunos diseños las aletas salen del tubo hacia el hogar y están cubiertas con unos refractarios de base cerámica crónica o de escorias. Para asegurar el espesor del hogar, se sueldan aletas adyacentes a los tubos, constituyendo una pared o panel membrana tubular.

La Figura 3.14d muestra dos modernos *casings* o cerramientos de caldera estancos conocidos como pared o muro membrana. La estanqueidad se obtiene soldando una tira plana de metal entre los tubos. Esto elimina el *casing* o cerramiento exterior metálico y muchos de sus problemas. El aislamiento se aplica directamente al exterior de los tubos, mientras el revestimiento metálico se agrega para dar a la superficie exterior durabilidad y buena apariencia. La Figura 3.14e muestra cómo se construye el *casing* exterior, el aislamiento y el *casing* pelicular de acero.

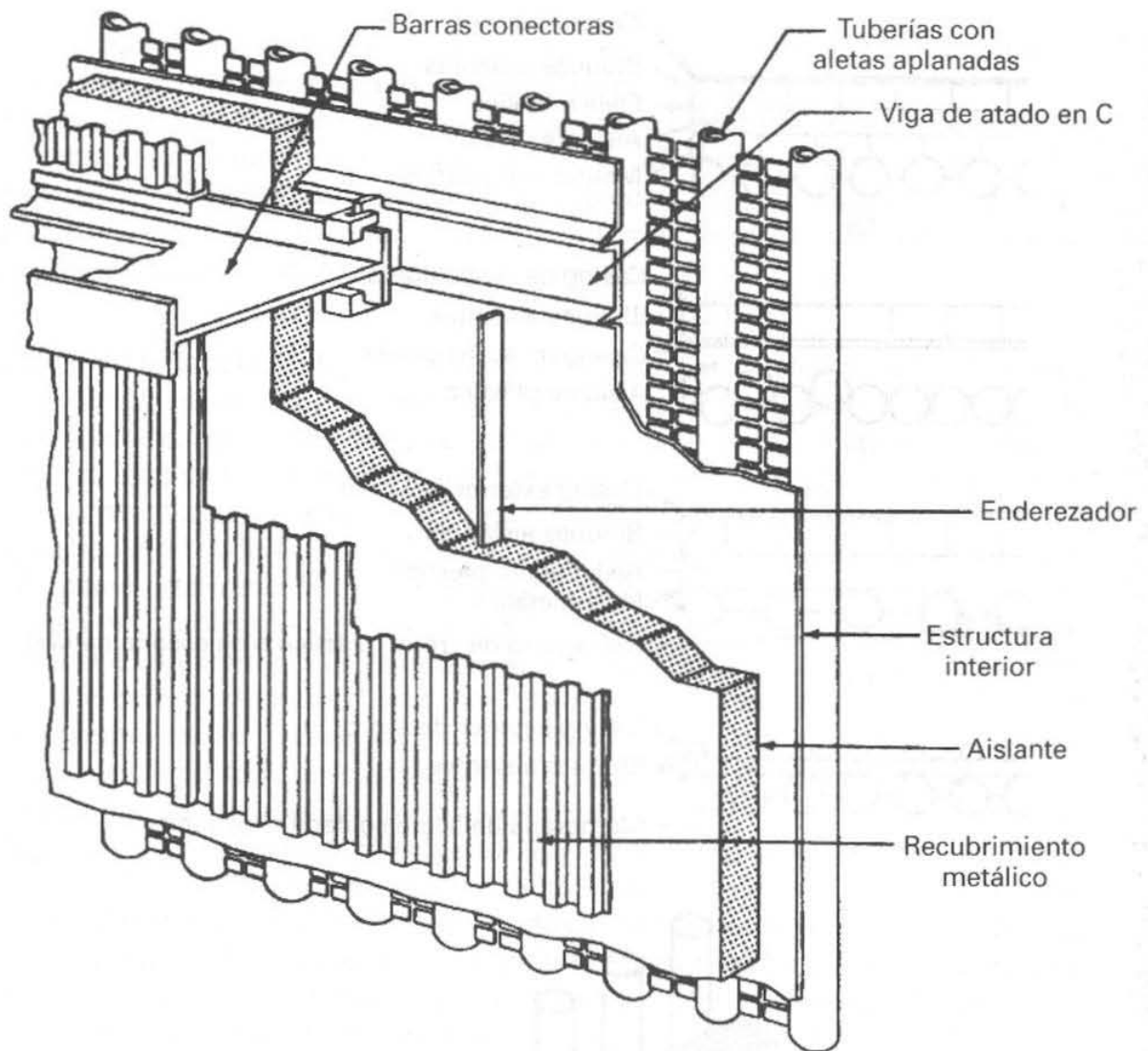
**Tensiones de las paredes de tubos de agua.** La combustión del combustible en suspensión en hogares grandes puede crear una explosión por ignición retrasada en la zona de flujo. En algunos hogares, la presión resultante puede ascender a valores elevados; sin embargo, la mayoría de los diseñadores de generadores de vapor usan refuerzos de las paredes de agua para proteger las paredes contra las explosiones, escapes o explosiones menores que parecen alcanzar cerca de 0,35 bar de presión. Es algo a revisar con el fabricante de la caldera, ya que algunas explosiones de hogar han alcanzado valores mucho más altos de esta presión. Esto produce la expansión de los tubos (doblado) hacia el exterior y, en algunos casos, desprendimiento de los tubos de su conexión a los calderines o cabezales.

Para reforzar las paredes del hogar, los diseñadores de calderas utilizan barras y perfiles en U soldados a los tubos para formar una banda alrededor de las paredes o



**Figura 3.14.** Disposiciones posibles de paredes de tubos de agua en un generador de vapor.

paneles de agua a diferentes niveles, basándose en las fuerzas que deben resistirse a partir de una expansión del hogar. Véase la Figura 3.15 de la página siguiente. *Barras conectoras* se utilizan para transmitir las fuerzas desde las bandas de refuerzo que rodean los muros de agua hasta las vigas soporte del generador de vapor que, a su vez, están conectadas a los pilares o columnas de acero.



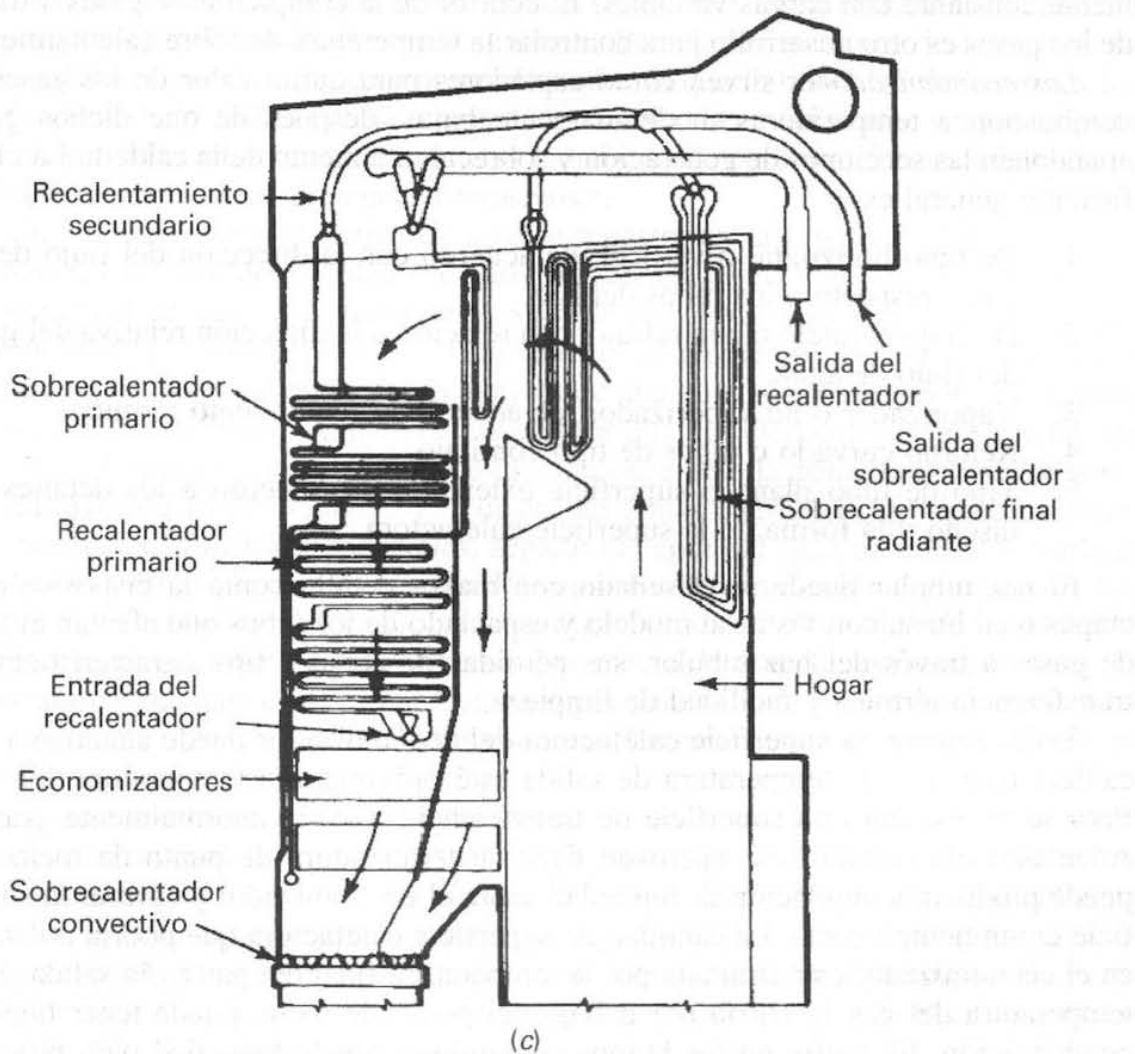
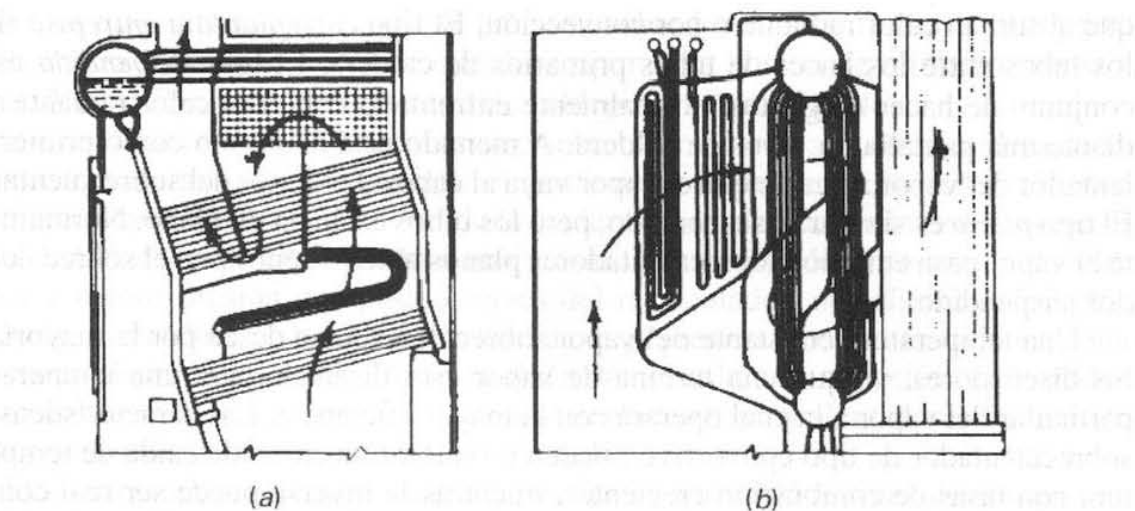
**Figura 3.15.** Los paneles de agua se refuerzan con soportes de acero estructural para soportar subidas anormales de presión del hogar.

**Sobrecalentadores.** Cada presión del vapor saturado tiene su temperatura correspondiente. El calor añadido al vapor seco a esta presión se conoce como de sobrecalentamiento y da como resultado una mayor temperatura que la indicada en la curva para la presión correspondiente. La ventaja del vapor sobrecalentado en los motores primarios es doble: (1) El trabajo puede realizarse a través de la forma de sobrecalentamiento antes de que tenga lugar la condensación. Esto representa un incremento en el rendimiento del uso del vapor. (2) Este período de trabajo realizado con vapor seco elimina los efectos corrosivos y agresivos del condensado. El deterioro de los álabes de alta velocidad de la turbina causado por el choque de las gotitas de condensado puede ser considerable y comparable a la erosión producida por un tiro de perdigones.

El sobrecalentamiento se produce al pasar el caudal de vapor saturado proveniente de una caldera por un sobrecalentador de uno u otro tipo, radiante o convectivo.

La Figura 3.16 muestra algunos sobrecalentadores y sus situaciones en la caldera. La clasificación general incluye los tipos radiante y convectivo, dependiendo de





**Figura 3.16.** Las designaciones del sobrecalentador incluyen: convectivo, radiante, primario, secundario y de acabado (final), dependiendo de la disposición del generador de vapor.

que absorban calor radiante o por convección. El tipo *entreplanta o entrepiso* tiene los tubos entre los haces de tubos primarios de caldera. El tipo *suspendido* es un conjunto de haces colgantes, normalmente enfrentado contra el calor radiante mediante una pantalla de tubos de caldera. A menudo está dispuesto como primer calentador del vapor antes de que el vapor vaya al cabezal exterior del sobrecalentador. El tipo *plano* es similar al suspendido, pero los tubos están en un plano. Normalmente el vapor pasa entre los sobrecalentadores planos antes de entrar en el sobrecalentador suspendido.

Una temperatura constante del vapor sobrecalentado se desea por la mayoría de los diseñadores, ya que una turbina de vapor está diseñada para una temperatura particular del vapor a la cual operará con la mayor eficiencia. Las características del sobrecalentador de tipo convectivo pueden producir una curva de caída de temperatura con tasas de combustión crecientes, mientras la inversa puede ser real con los tipos radiantes. Así pues, se emplea una combinación de los dos tipos, en ciertas instalaciones, para conseguir una temperatura del vapor sobrecalentado prácticamente constante con cargas variables. El control de la compuerta de gases a través de los pasos es otro desarrollo para controlar la temperatura de sobre calentamiento.

*Los economizadores* sirven como captadores para quitar calor de los gases de combustión a temperaturas moderadamente bajas, después de que dichos gases abandonen las secciones de generación y sobrecalentamiento de la caldera. La clasificación general es:

1. De tubo horizontal o vertical, de acuerdo con la dirección del flujo de los gases respecto a los tubos del haz.
2. De flujo paralelo o contraflujo, con relación a la dirección relativa del gas y del flujo de agua.
3. Vaporizador o no vaporizador, de acuerdo al rendimiento térmico.
4. Retorno curvado o tubos de tipo continuo.
5. Tipo de tubo plano o superficie extendida, de acuerdo a los detalles del diseño y la forma de la superficie calefactora.

El haz tubular puede ser diseñado con mayor detalle como la disposición en etapas o en línea, con vistas al modelo y espaciado de los tubos que afectan el paso de gases a través del haz tubular, sus pérdidas de carga o tiro, características de transferencia térmica y facilidad de limpieza.

Teóricamente, la superficie calefactora del economizador puede añadirse a una caldera hasta que la temperatura de salida esté próxima a la temperatura del aire. Pero se necesitaría una superficie de transferencia térmica anormalmente grande. Además, cada combustible quemado tiene su temperatura de punto de rocío que puede producir acumulación de humedad sobre el economizador y corroer la superficie en un tiempo corto. La cantidad de superficie calefactora que podría utilizarse en el economizador está limitada por la temperatura final del gas en la salida. Si la temperatura del gas se enfría por debajo del punto de rocío, puede tener lugar la condensación. El azufre en los humos se combina con la humedad para producir ácido sulfuroso, que es extremadamente corrosivo para todos los aceros de construcción en contacto con los gases entre el economizador y la chimenea.

El agua de alimentación de bajo contenido en oxígeno es muy recomendable para ser usada con los economizadores de tubo de acero. Las válvulas de seguridad

(válvulas de seguridad de vapor) se precisan sobre los economizadores para protegerlo contra la presión excesiva que debe aportar la bomba de alimentación si el regulador o válvula de alimentación de caldera estuviera cerrado.

Un *recalentador* es básicamente otro sobrecalentador usado en la caldera de las centrales modernas para incrementar el rendimiento de la planta. Mientras el sobrecalentador toma vapor del calderín de la caldera, el recalentador obtiene vapor utilizado de la turbina de alta presión a una presión por debajo de la de la caldera. Este vapor a menor presión que pasa a través del recalentador, se calienta a 537 °C y después se introduce en la turbina de media o baja presión. Los recalentadores, como los sobrecalentadores, se clasifican también de acuerdo a su situación en la caldera como convectivos o radiantes. Los sobrecalentadores y recalentadores de convección pueden ser de tipo horizontal o suspendido.

Los *calentadores de aire* hacen la recuperación térmica final de los gases o humos de caldera con los que se precalienta el aire de entrada al hogar para su combustión con el fuel o gas natural o combustible correspondiente. Así algo de combustible se ahorra, ya que de otro modo se utilizaría para precalentar la mezcla aire-combustible hasta su punto de ignición. Pero la temperatura de los gases no debe reducirse por debajo de su punto de rocío, ya que la humedad de los gases los condensaría. Esto podría producir agua que combinada con el azufre y posiblemente con dióxido de carbono, y también con monóxido de carbono, formaría los ácidos sulfuroso y carbónico, altamente corrosivos\*.

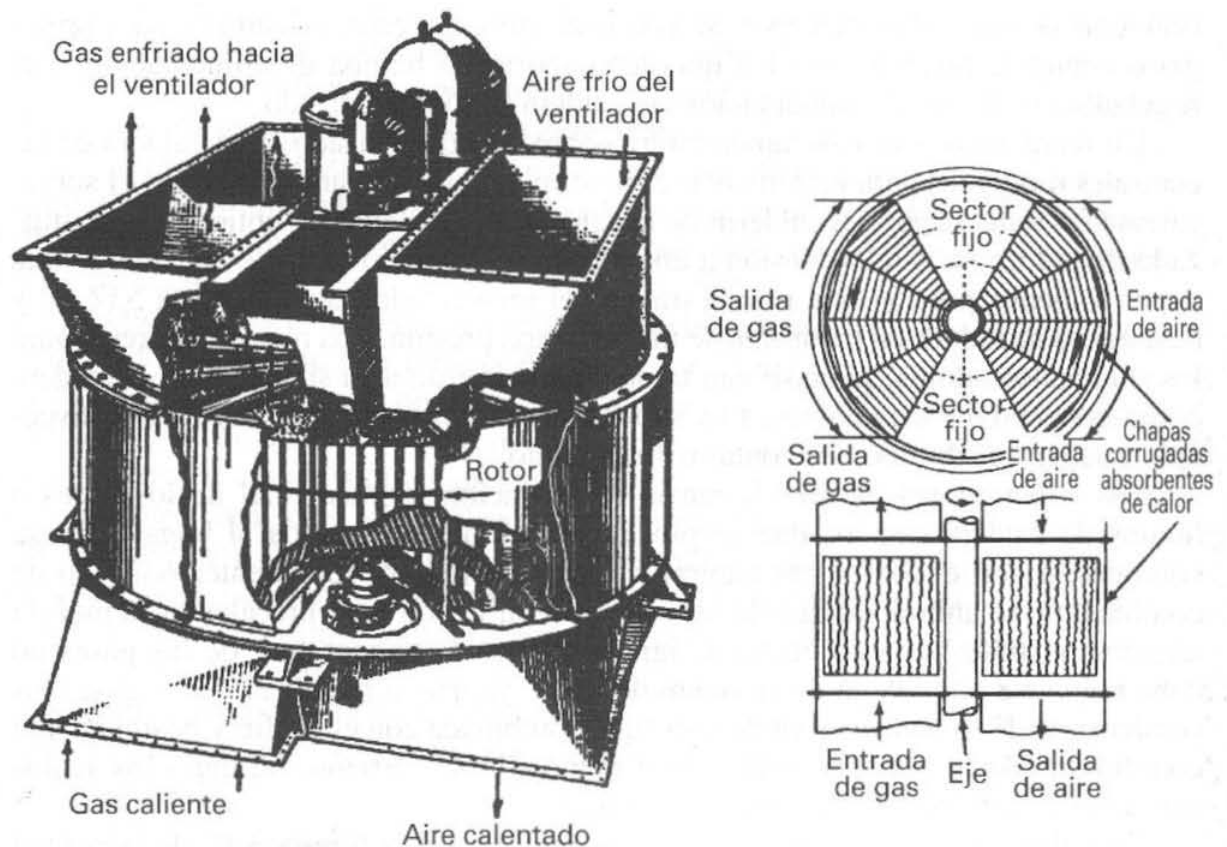
Un *calentador regenerativo de aire* se muestra en la Figura 3.17 de la página siguiente. Este tipo de calentador de aire ofrece una gran superficie de contacto de transferencia de calor. Normalmente consta de un rotor que gira cerca de dos o tres revoluciones por minuto (rpm) y está relleno de elementos corrugados de chapa metálica. Los gases calientes pasan a través de una mitad del calentador, el aire pasa a través de la otra mitad. A medida que el rotor gira, los elementos de almacenaje de calor transfieren el calor obtenido de la zona caliente a la zona de entrada de aire.

La Figura 3.18 de la página 111 ilustra las zonas internas de un típico calderín, que cumple dos funciones esenciales: separar el vapor del agua para suministrarla al sistema de bajantes limpia y separada del vapor para la circulación segura y correcta, y separar la humedad del vapor para entregar vapor de alta calidad. Las partes o piezas internas cumplen estas funciones por medio de dos etapas de separación. El nivel normal de agua es de 1,5" (38,1 mm) por debajo de la línea central horizontal del calderín. Los eliminadores Vortex separan los pasos del vapor y del agua en el calderín.

La mezcla total de agua-vapor del generador de vapor se dirige a los tubos separadores horizontales (Fig. 3.18). Esta mezcla agua-vapor entra a los separadores y es centrifugada al seguir el contorno curvado del domo separador. La mayoría del agua separada se descarga horizontalmente al nivel de agua del calderín. El vapor separado fluye desde el «chevron» a través de la caja separadora y después a la parte superior del calderín, vía los tubos de vapor a través de la cubierta hacia la pared o tabiques del sobrecalentador.

---

\* *N. del T.*: Y no digamos si se produjese ácido nítrico como consecuencia de los óxidos de nitrógeno de la combustión.



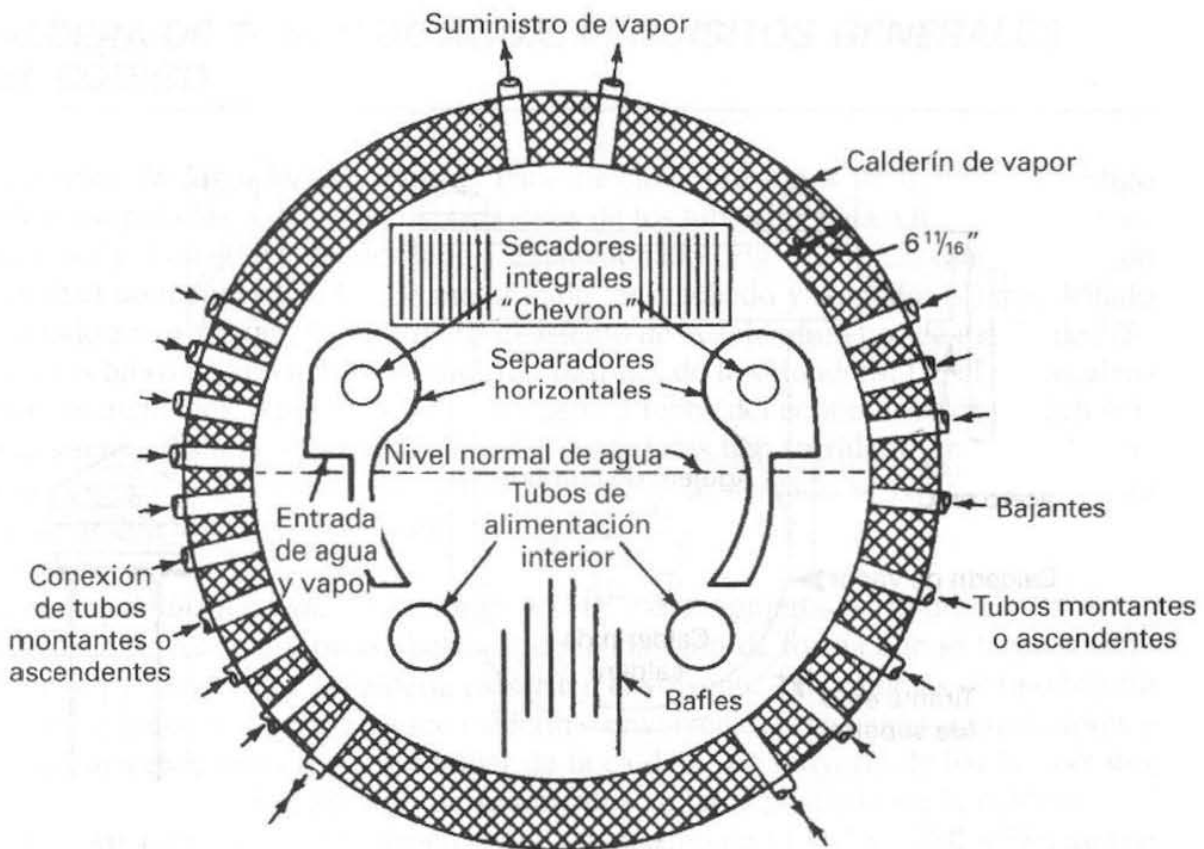
**Figura 3.17.** El precalentador de aire rotativo regenerativo precalienta el aire de combustión. (Cortesía de Air Preheater Corp.)

La salida de la línea principal de vapor será adecuada normalmente para tratar la capacidad nominal de caudal. El código ASME de calderas ha definido normas sobre la salida a la válvula de seguridad. Por ejemplo, el sistema interno de tubos colectores de vapor, chapas o paneles está permitido utilizarlo cerca de las aberturas de las válvulas de seguridad siempre que se cumpla que «el área total para entrada de vapor no sea menor que el doble de las áreas sumadas de las conexiones de entrada de las válvulas de seguridad. Los orificios de tales tubos colectores de vapor deberán ser al menos de 1/4" (6,4 mm) de diámetro».

En el caso de separadores de vapor o secadores, la abertura de 1/4" de diámetro no se aplica, supuesto que «el área neta libre de entrada de vapor del separador o secador es al menos diez veces el área total de las salidas de vapor de la caldera para las válvulas de seguridad». Por otra parte, cuando se inspeccionan las partes internas de los calderines, se deben comprobar las condiciones de los orificios de 1/4" en los tubos colectores. Deben estar libres y limpios. Lo mismo se aplica a las aberturas de los secadores, ya que los secadores cerrados sobre los tubos colectores pueden producir restricciones en las aberturas de la válvula de seguridad. Esto reduciría la capacidad de alivio de caudal, lo que podría ser peligroso.

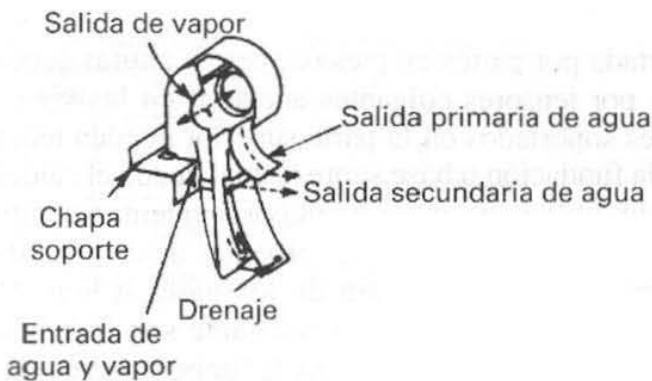
**Soportes del calderín generador de vapor** Los calderines de las calderas de tubos de agua más pequeñas están generalmente soportados en la parte superior como se ve en la Figura 3.19b de la página 112. Los calderines de calderas mayores o generadores





(a) Partes internas del calderín

(b) Separador horizontal de vapor

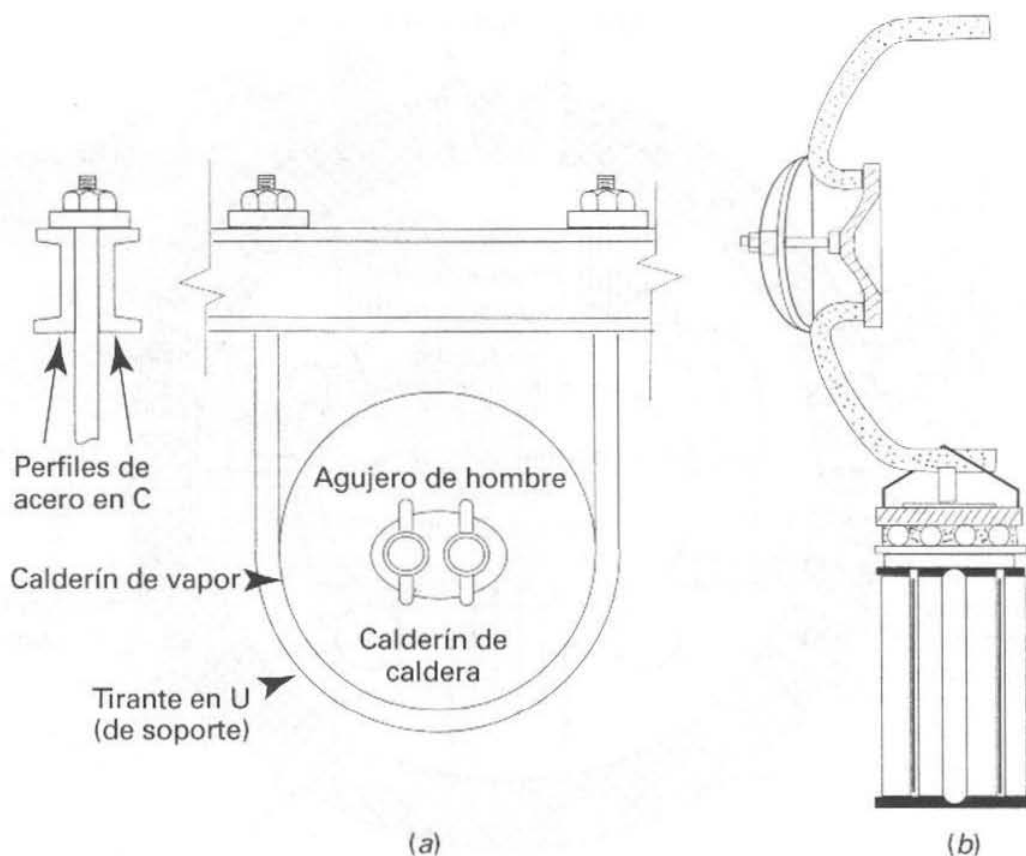


(c) Unidad de secado "Chevron"



**Figura 3.18.** Partes internas de un calderín de vapor de alta presión mostrando el separador de vapor y secador «Chevron».

de vapor grandes están soportados en su parte superior, como se ve en la Figura 3.19a. Los calderines deben ser capaces de moverse y poder dilatar en su dirección longitudinal con los cambios de temperatura de la unidad. Las unidades soportadas en su parte superior tendrán rodillos en un extremo del calderín de forma que puedan dilatar o contraer con los cambios de temperatura. Los cierres o cerramientos normalmente constan de paneles de agua y calderines soportados en la parte superior,



**Figura 3.19.** Soportes superior e inferior para calderín de caldera. (a) Calderín soportado con tirantes en U\*. (b) El calderín soportado queda sobre apoyos que permiten el deslizamiento longitudinal sobre rodillos.

parte de los cerramientos está soportada por partes en presión, pero a alturas superiores, el cerramiento debe soportarse por tensores colgantes anclados en las vigas de acero de la estructura. Los calderines soportados en la parte superior pueden tener el cerramiento también soportado por la fundación o base sobre la cual queda el calderín.

Los *sopladores de ceniza* son muy utilizados en las plantas que queman combustible pulverizado para mantener limpias las superficies absorbentes de calor y libres de cenizas y depósitos. Los cambios en la temperatura de los gases o humos de combustión a carga y tiro constantes o pérdida de carga constante son indicativos necesarios para el soplado de los tubos en los pasos de gases. Es importante comprobar la alineación del soplado de cenizas y la fuga de condensado de los sopladores que pueda afectar a los tubos por erosión o corrosión. La frecuencia del soplado o limpieza de cenizas dependerá del combustible quemado y de las condiciones encontradas durante las inspecciones. Normalmente, el fabricante de la caldera suministrará un modelo de condiciones y mantenimiento, que puede ajustarse y afinarse si es preciso y lo demandan las condiciones encontradas en las inspecciones o una operación normal del trabajo.

\* *N. del T.*: En castellano o español técnico coloquial se denomina «Ues» o «Ces» a estos perfiles estructurales de acero laminado, al igual que a las I se les llama «dobles te» y a los Z buenos «zeta».

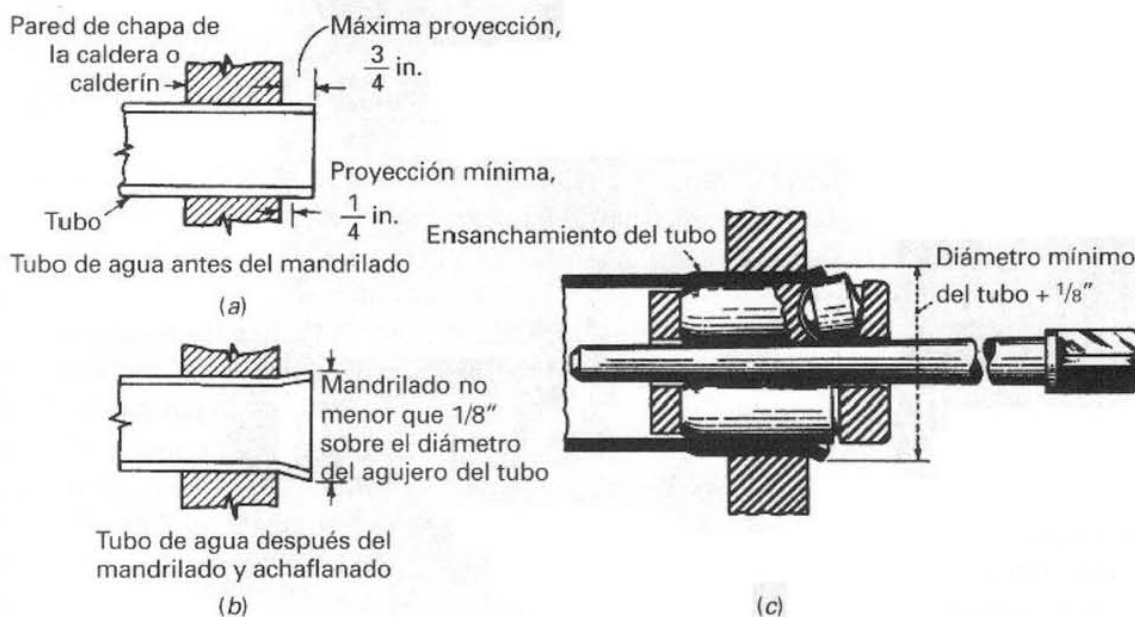
## CALDERA DE TUBOS DE AGUA. REQUISITOS GENERALES DEL CÓDIGO

**Accesorios de los tubos de agua.** Para elevadas presiones de trabajo, el código ASME estipula las siguientes disposiciones de los tubos de agua a tubos membrana, cabezales y drenaje: (1) mandrilado y expansionado (Fig. 3.20); (2) mandrilado con conicidad no menor de  $1/8''$ ; (3) mandrilado, ensanchado y soldado; (4) mandrilado y soldado en su asiento, supuesto que el asiento de la soldadura no sea mayor de  $3/8''$  y que los tubos están vueltos a mandricular después de la soldadura; (5) el sobrecalentador, recalentador, paneles de tubos de agua o tubos del economizador pueden soldarse sin mandrilado, suponiendo que las soldaduras han sufrido un tratamiento térmico después de ser efectuadas y que el proceso de soldado se realiza de acuerdo con los requerimientos del Código.

**Aberturas de inspección.** El código ASME exige agujeros de hombre y agujeros de inspección manual u otras aberturas de inspección de forma que se haga posible el examen y limpieza de la caldera, calderín o envolvente. Las calderas de tipo batería o bobina de tubo no tienen el típico calderín o envolvente, pero tienen acumuladores y separadores exteriores fuera del hogar de la caldera. La mayoría de los inspectores desean comprobar si algún tipo de sedimentos se ha depositado en la caldera.

Las aberturas de hombre deben ser de un mínimo de  $11 \times 15''$  ( $280 \times 380$  mm) o de  $10 \times 16''$  ( $250 \times 400$  mm) si son elípticas y de 380 milímetros de diámetro si son circulares.

Las aberturas de operación manual no pueden ser menores de  $70 \times 89$  mm de tamaño.



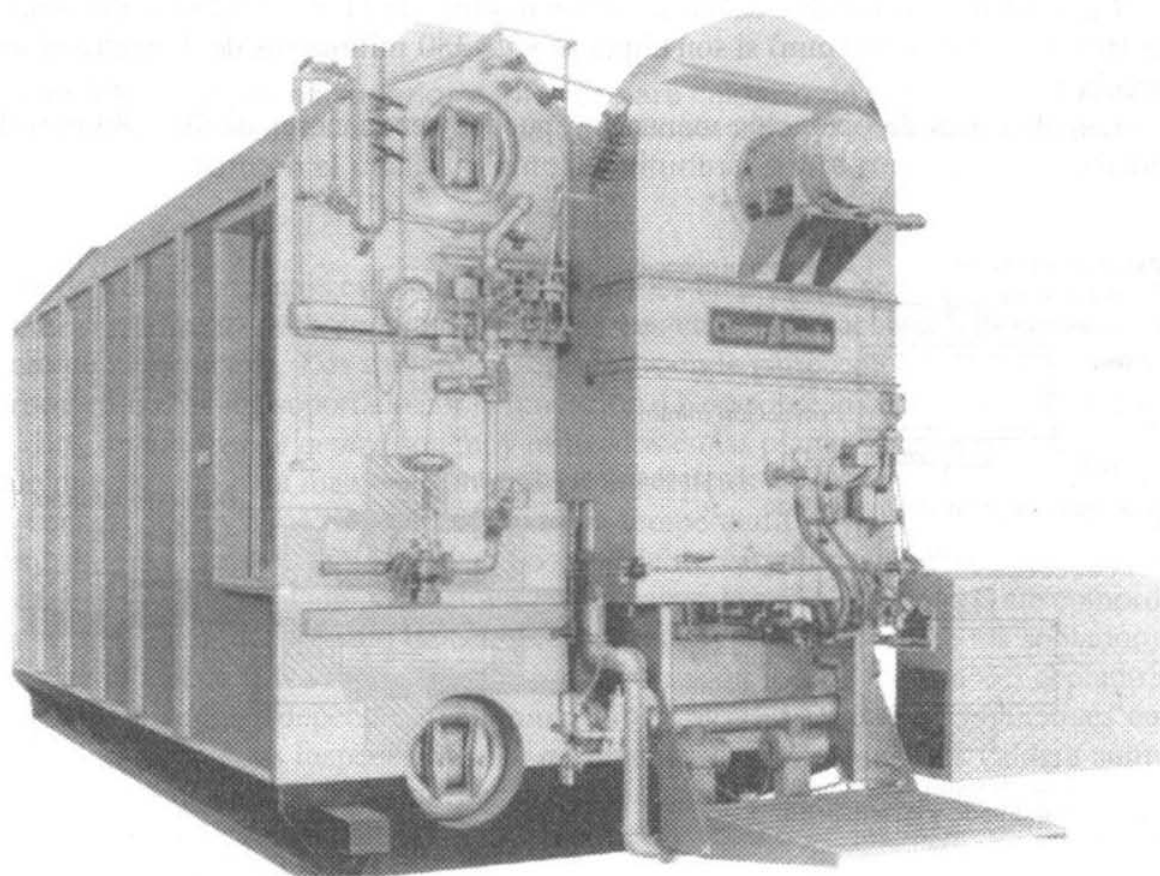
**Figura 3.20.** Los tubos de las calderas de tubo de agua están mandrilados. (a) y (b) Detalles del ensanchamiento y mandrilado según el Código. (c) Rodillos expansores del tubo y acampanado o ensanchado al mismo tiempo.

Los orificios taladrados utilizados para inspección o lavado no deben ser menores de 1" (25,4 mm) de diámetro en tubería. Sobre las calderas de pared-membrana y calderín es normal encontrar un agujero de hombre estándar al menos en cada extremo del calderín. Las aberturas de mano están previstas en la parte exterior de los calderines de lodos para permitir la limpieza e inspección.

**Conexiones de nivel (columnas de nivel de agua).** La columna de agua está conectada a la parte superior e inferior de cabezal delantero del calderín principal de vapor (véase la Figura 3.21). Si hay varios calderines instalados al mismo nivel, no es necesario normalmente instalar una columna de agua separada para cada calderín, ya que el nivel de agua se iguala en todos los calderines.

Las columnas de agua (niveles) deben montarse y ser visibles al operador, de modo que muestren en todo momento si la línea normal de agua de la caldera se mantiene. Las tuberías que conectan la columna (de nivel) a la caldera deben ser de un diámetro mínimo de 1". Para las calderas que trabajan por encima de 28 kg/cm<sup>2</sup>, se precisan empaquetaduras o juntas en la tubería de conexión inferior para reducir el diferencial de temperatura entre los niveles (columnas) y la caldera de forma que exista precisión en el nivel de agua de las columnas.

Las aberturas de inspección y limpieza son necesarias sobre los tubos que conectan los niveles a la caldera. No se permiten válvulas de corte entre el nivel y la



**Figura 3.21.** El agujero de hombre, la columna de agua y el nivel de vidrio están situados en la parte superior de esta caldera compacta tipo D. (Cortesía de Cleaver Brooks Co.)



caldera a no ser que los grifos o conexiones sean de una disposición o construcción tal que evite que se acumulen los sedimentos en las citadas conexiones. Las válvulas o grifos deben tener indicadores para mostrar si están abiertas o cerradas, y deben estar bloqueadas o fijadas en posición abierta durante la operación.

Los *cristales o vidrios de nivel* que muestran el nivel de agua deben ser visibles al operador ubicado en la zona de trabajo de la caldera. Como las calderas grandes de tubos de agua pueden ser muy altas, puede llegar a ser complicado poder ver el cristal o vidrio del nivel desde la zona de trabajo. En estas condiciones, la imagen del (vidrio) nivel de agua se transmite normalmente al área de trabajo mediante una indicación remota de nivel, como espejos, TV en circuito cerrado y disposiciones similares. Sin embargo, el Código requiere que si el vidrio de nivel no puede verse desde el área de trabajo, deben instalarse dos indicadores independientes de nivel de control remoto.

Una regla similar existe para los manómetros de caldera o controles de vapor utilizados por los operadores de caldera. Los manómetros deben instalarse o conectarse con cabinas de control remoto de la zona de operación; sin embargo unos indicadores de presión remotos del sistema neumático, eléctrico o de otro tipo, deben también ser dos de tipo independiente. El Código también requiere que bajo cualquier condición de lectura de presión remota, haya al menos un manómetro de caldera de lectura directa en situación visible dentro del área de zona de trabajo de la caldera.

Muchos organismos requieren plataformas y escaleras permanentes de caldera con pasos de entrada de hombre a cierta altura. Las calderas deberían también equiparse con pasarelas y barandillas de seguridad de modo que permitan y propicien una inspección adecuada y segura y permitir así que se lleve a cabo un adecuado mantenimiento de caldera.

## **PRODUCCIÓN, TARADO Y CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LAS CALDERAS**

---

Las grandes calderas de tubos de agua tienen complejos circuitos de circulación que constan de muros pantalla, paneles de agua, sobrecalentadores de paneles radiantes que están diseñados para que el caudal másico pase a través de los tubos a diferentes cargas con la idea de mantener los tubos metálicos dentro de un límite seguro de temperatura. El caudal másico se define como el peso de fluidos mezclados en kilogramos por hora (o toneladas) que pasan por y a través de los tubos. A medida que la caldera se hace más grande, es obvio que deben hacerse cálculos de diseño más complejos que consideren las distintas variables involucradas con los caudales másicos, tales como velocidades de flujo, zonas de presiones, temperaturas, calores específicos del fluido, conductividad, viscosidad, diámetro del tubo y superficies internas que pueden afectar al rozamiento o fricción del flujo a través del tubo. En comparación, las calderas antiguas de tubos de agua eran relativamente simples de diseño. La producción de todas las calderas de tubos de agua, como las de tubos de humos, está basada en los metros cuadrados de superficie de calefacción. Ésta es la suma de las áreas de superficie de calderines expuestos a los productos de la combustión, el área de todos los tubos así expuestos basada en su diámetro exterior y el

área agregada y proyectada de todos los cabezales o haces de tubos expuestos, así como las demás áreas y zonas especificadas por el código ASME. Las mínimas capacidades de la válvula de seguridad para calderas de tubos de agua se revisan en el capítulo sobre requisitos de la válvula de seguridad.

El código ASME requiere de los fabricantes para poder instalar, señalar o grabar en sus calderas la máxima capacidad de producción de vapor en libras por hora (en España, kg/hora) sobre las bases que sus diseñadores habían calculado (cálculos por masa de flujo). Es pues esencial familiarizarse con estas tasas de capacidad de producción estampadas cuando se trabaja con una caldera de tubos de agua para evitar sobrecargar la caldera por encima de su capacidad tarada.

## ***CALDERAS DE CALEFACCIÓN DE TUBOS DE AGUA***

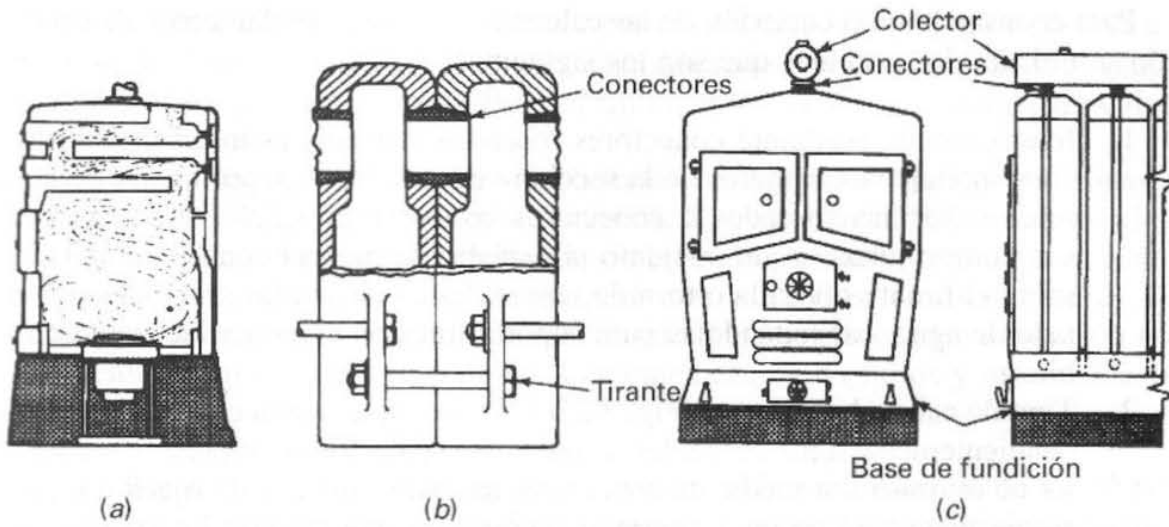
### **Calderas de hierro fundido**

La caldera de fundición es básicamente una caldera del tipo de tubos de agua, ya que el agua está dentro de las secciones de fundición (no tubos) y los productos de combustión están en el exterior. Pero a causa de las limitaciones del hierro fundido, el Código de calderas trata las calderas de fundición como un tipo especial, sin considerar el sistema de transferencia de calor empleado. Muchas calderas de fundición están estampadas por el fabricante como calderas de fundición de tubos de agua, lo que no debería malinterpretarse como clasificación del Código. Fundición es un término aplicado a muchas aleaciones hierro-carbono que pueden ser fundidas en un molde de una manera particular. Pero para las calderas de fundición se utiliza generalmente la fundición gris (acero fundido gris). Cuando la fundición se enfría lentamente en los moldes, parte del carbono se separa y cristaliza como grafito. Esto hace a la fundición gris menos frágil y más fácil de trabajar con máquinas herramientas. También cuando está aleada con níquel, cromo, molibdeno, vanadio o cobre se pueden conseguir propiedades y resistencias considerables. La práctica general es clasificar la fundición por clases:

Clase n.º	Tensión máxima lbs/in <sup>2</sup>	Tensión máxima, kg/cm <sup>2</sup>
20	20.000	1.400
25	25.000	1.750
30	30.000	2.100
35	35.000	2.450
40	40.000	2.800

Las calderas de fundición se construyen en diversas formas y tamaños, pero pueden agruparse en las tres clases siguientes:

1. Las calderas circulares de fundición (Fig. 3.22a) constan de una sección de hogar con base, una sección de coronación, una o dos secciones intermedias



**Figura 3.22.** Tipos de calderas de fundición: (a) Unidad cilíndrica para suministro de Agua Caliente Sanitaria (ACS); (b) caldera por elementos (secciones) formada por elementos de fundición unidos por conectores y atirantados; (c) caldera con colector tipo de elementos unidos por conectores roscados.

y una parte superior o sección del domo. Las secciones constituyen un conjunto atornillado o cogido por tirantes y/o con casquillos o conectores de unión de las partes o secciones de agua. De ese modo el agua circula libremente a través de los conectores de sección en sección. El combustible se quema en el hogar central, con los gases subiendo y fluyendo a través de los diversos pasos de las secciones llenas de agua y finalmente salen por la chimenea. La caldera cilíndrica de fundición usada hasta popularizarse\* para el servicio de suministro de agua caliente fue a menudo estampada como *hy-test* (comprobación máxima) para indicar una presión admisible de  $7 \text{ kg/cm}^2$  para agua caliente sanitaria. Pero está siendo sustituida por calentadores de chapa de acero soldada calentados por combustibles o por electricidad.

2. Las calderas verticales de bloques o secciones constan de secciones ensambladas frontal con trasera y en posición vertical, atornilladas o unidas por medio de conectores roscados.
3. Las calderas por secciones horizontales consisten en secciones ensambladas como tostadas de pan (*pancakes*). Aquí cada sección queda perpendicular en relación a la base. Este tipo de acoplamiento o ensamblaje vertical puede complementarse con dos o tres conjuntos de caldera similares e interconectadas para ganar capacidad adicional. En esta disposición un cabezal común de impulsión y retorno se utiliza sin válvulas de seccionamiento entre secciones. Estas unidades se usan normalmente con gas y con un quemador para cada caldera o sección vertical múltiple.

\* *N. del T.:* En Estados Unidos.

Para el ensamblaje o conexión de las calderas verticales de elementos de fundición se utilizan dos sistemas que son los siguientes:

1. Internamente, mediante conectores roscados y/o tirantes insertados en los correspondientes agujeros de la sección vertical. Esto es, por medio de tensores o varillas roscados o conectores cortos (Fig. 3.22b), las secciones son comprimidas en un conjunto por medio de tuercas contra arandelas y sobre el tirante o varilla o tornillo tensor. Esto conecta las secciones por el lado de agua, capacitándolas para soportar presión como secciones ensambladas.
2. Tipo de cabezales externo (Fig. 3.22c) las secciones están conectadas independientemente a los cabezales o colectores (colector de impulsión y colector de retorno) por medio de conectores roscados, tuercas de fijación y empalme. Este tipo de unión permite reemplazar una sección intermedia, ya que sólo tienen que retirarse tuercas, juntas y enlaces roscados de cada cabezal para desprender una sección de otra. En comparación con la construcción mediante tensores roscados, todas las secciones enlazadas y enfrentadas con la sección intermedia a reemplazar tienen que ser retiradas para llegar a la sección afectada.

Cuando se comprueban las calderas nuevas, es necesario inspeccionar el tipo de tuercas que aseguran los tirantes (redondos roscados). Si se usan tuercas de acero o cobre, deberían apretarse sólo a mano o a lo sumo reapretadas sólo unos pocos hilos de la rosca. La primera elección en calderas nuevas son las arandelas colapsables, con tuercas de cobre separadas. La segunda elección son las tuercas separadas de apriete manual (que rompen cuando tiene lugar una dilatación o tensión excesiva). En una caldera vieja, durante los meses de verano, localizada en su zona baja (basamento), hay que asegurarse de que las tuercas no están excesivamente apretadas. También conviene fijarse si los tirantes o tensores están oxidados en sus alojamientos, lo que puede afectar, por la tensión dada a las tuercas, a un posible estiramiento y rotura de los tensores. Obviamente, si los tensores están libres y las tuercas aflojadas, no habrá problemas de rotura por dilatación. Si el óxido crece y destruye los tensores hasta el límite de que se rompan, la caldera deberá desmontarse y limpiarse el óxido, examinando el estado de tensores y tuercas.

Las calderas tipo colector no tienen tensores o conexiones taladradas, de forma que nada tiene que atirantarse de modo que impida una expansión o dilatación anormal. Además del óxido, depositado entre secciones, el arranque rápido y brusco puede causar daños serios a estas unidades. Esté seguro de que las calderas viejas sin buenos dispositivos de purga no forman depósitos, porque ello producirá rotura. La restricción al suministro y circulación de agua puede también producirse por los depósitos calcáreos en estas unidades, dando como resultado un sobrecalentamiento.

Cuando los aparatos de control no están funcionando adecuadamente, o si la válvula de seguridad está obstruida o es de tamaño inadecuado, la caldera de fundición explotará. Muchas lo han hecho. La gran diferencia entre una explosión de caldera de chapa de acero y una explosión de caldera de fundición está en que la caldera de fundición se fragmentará normalmente en trozos pequeños en la sección



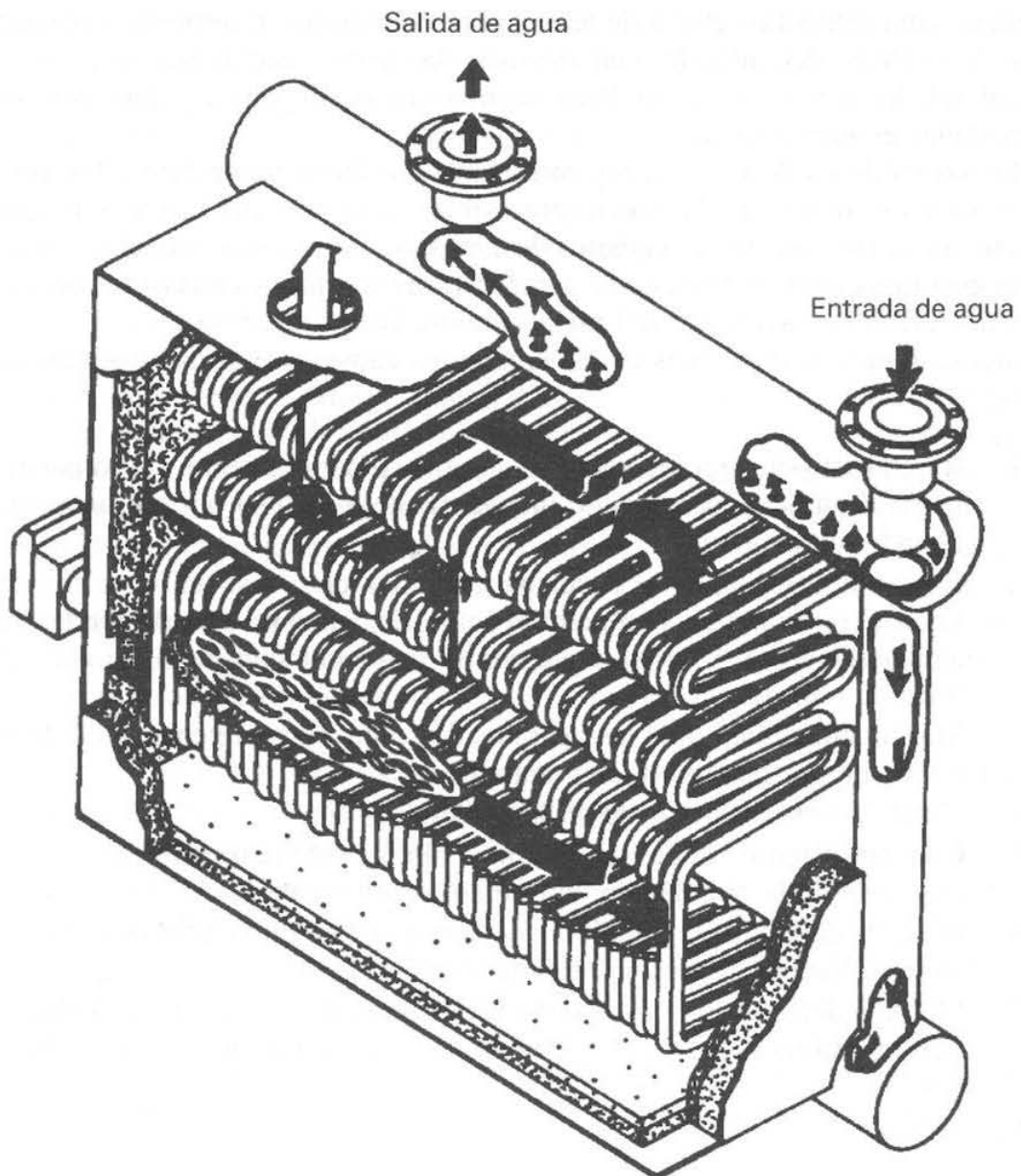
afectada. Una caldera de chapa de acero, por el contrario, se romperá y perderá a lo largo de la chapa del calderín o envolvente. Así pues, volarán por los aires chapas curvadas de los paneles de acero. Pero en ambos casos, el peligro y daño para vidas y propiedades es muy grande.

En las calderas de fundición y modeladas de diferentes formas, las zonas de tensiones y los daños en ellas son imprevisibles; la geometría, factores de servicio, cegado por el lado de agua, depósitos de carbono, inquemados o cenizas en el lado de fuego y los cambios bruscos de temperaturas son todas causas de roturas. Así que nunca fallarán dos veces del mismo modo. Una cuidadosa investigación normalmente apunta a una o más de las siguientes causas de fallos y roturas inesperados:

1. Rápida introducción de agua fría en una caldera caliente, como puede ocurrir con un llenado realizado manualmente o incluso por un dispositivo de llenado automático.
2. Línea de alimentación conectada a un elemento o sección en vez de a la línea de retorno para atemperar el agua fría con el retorno de condensados o agua caliente (el Código exige que la realimentación de agua entre por la línea de retorno).
3. Mal funcionamiento de los aparatos de control y sobretensionado de la caldera bien por presión o temperatura.
4. Nivel de agua insuficiente en la caldera.
5. Concentración de depósitos internos, bloqueando la transferencia térmica u obstruyendo la circulación entre elemento y elemento.
6. Material defectuoso o fundición de la que no han trascendido sus datos hasta varios años posteriores al comienzo del servicio.
7. Montaje defectuoso o instalación inadecuada de la caldera en su alineación, paso, tensionado de tirantes, correcto acoplamiento de conectores roscados, etc.

### Caldera de tubos flexibles

La Figura 3.23 de la página siguiente muestra una caldera de tubos de agua (patente) flexibles fabricada en capacidades de hasta 3 toneladas/hora y presiones de hasta 25 bar para calefacción por agua caliente. Nótese que los tubos están curvados de diversas formatos de S, y esto proporciona una posibilidad de dilatación y contracción en dirección vertical con los cambios de temperatura. Los tubos son recambiables. Están insertados en los alojamientos de los colectores superior e inferior, y asegurados en los orificios por piezas de acoplamiento (perforadas). El final de cada tubo tiene un acoplamiento de acero soldado, que se dirige a la conexión del colector de acero o fundición. Se utilizan refuerzos y enderezadores de diversos modelos para evitar la pérdida de las piezas de acoplamiento de acero. Esta caldera pequeña de tubos de agua viene completamente montada de fábrica para una instalación más sencilla, principalmente para calefacción.



**Figura 3.23.** Características de la pequeña caldera de tubos de agua tipo en S patentada de tubos curvados o doblados para evitar el choque térmico en el servicio de agua caliente. (Cortesía de Bryan Steam Corp.)

## **PREGUNTAS Y RESPUESTAS**

---

1. ¿Por qué están mandrilados los tubos en una caldera de tubos de agua?

RESPUESTA: Para añadir resistencia a los tubos laminados y evitar que tengan holguras y se salgan de los orificios donde se alojan al dilatarse y ensancharse debido al sobrecalentamiento causado por bajo nivel de agua u otras razones.

2. ¿Cuál es la diferencia entre una caldera de tubos de agua y una de tubos de humos (pirotubular)?

RESPUESTA: En la caldera piro tubular, los productos de la combustión pasan a través de los tubos y el agua los rodea. La inversa ocurre en el caso de las calderas de tubos de agua.

3. ¿Cómo se coloca un tubo nuevo en posición para su instalación en una caldera vertical de tubos de agua?

RESPUESTA: A través de una de las aberturas manuales previstas para este propósito en la parte superior del calderín de vapor.

4. ¿Qué tipo de puerta de fuego se requiere en las calderas de tubos de agua? Explique su respuesta.

RESPUESTA: El tipo de puerta de apertura hacia afuera o un tipo provisto de autocierre de un estilo que omita muelles o contacto de fricción, de forma que la puerta no sea abierta por soplo, en caso de rotura de tubos, o explosión del hogar y evite daños a personas que estén próximas.

5. ¿Están rebordeados o mandrilados en una caldera los tubos de agua rectos? Explique su respuesta.

RESPUESTA: Están mandrilados por los extremos que no están en contacto con los gases calientes y no se ganaría nada por el achaflanado.

6. ¿A qué puntos o lugares están conectados los niveles en la mayoría de las calderas de tubos de agua?

RESPUESTA: A las partes superior e inferior de un extremo del calderín principal de vapor.

7. ¿Cuántos pasos de humos (gases) hay en la caldera del tipo de tubo de agua más normal?

RESPUESTA: Tres.

8. Explique el método a utilizar en la inspección de las condiciones de trabajo de un nivel visor de vidrio cuando están cerradas las válvulas en las conexiones a la caldera. ¿Qué impulsa al agua a retornar lentamente al interior del nivel?

RESPUESTA: Primero cierre la válvula superior y purgue la columna de vidrio a través de la válvula de drenaje, con la válvula de conexión interior del nivel abierto. El agua subirá lentamente en el nivel a partir de la válvula de conexión inferior abierta. Después proceda a la inversa este proceso (invierta el proceso) cerrando la válvula o grifo de conexión inferior con la válvula superior de nivel abierta. Vigile la subida del agua en el cristal del nivel. Si el agua sube en el vidrio del nivel durante ambos procesos, indica que las conexiones no están obstruidas. Un pequeño retorno de agua al nivel indica obstrucción en la conexión de la columna de nivel o bien la parte inferior del nivel está obstruida. Esto puede comprobarse utilizando los grifos del nivel.

9. ¿Cuáles son la temperatura y presión máximas de trabajo permitidas en un nivel fabricado de hierro fundido y de acero maleable según el Código?

RESPUESTA: Acero fundido: 17,5 bar y 232 °C; acero maleable: 34,5 bar y 232 °C.

10. ¿Cuál es la máxima y mínima proyección del tubo de un calderín que el tubo puede tener si se mandrila?

RESPUESTA: Por el Código: 1/8" (3,175 mm) de mínimo y 3/4" (9,05 mm) de máximo.

11. ¿Cómo definiría usted un calderín de vapor en una caldera de tubos de agua utilizada para generación eléctrica en una central térmica?

RESPUESTA: Es una vasija o recipiente a presión en la cual el vapor se separa de la mezcla vapor-agua para dirigirse a la sección del sobrecalentador del generador de vapor para aumentar allí la temperatura del vapor.

12. ¿Cuál es la utilidad de un recalentador en las calderas de las centrales?

RESPUESTA: Un recalentador recibe vapor de la turbina de vapor después de que ha cedido parte de su calor original como energía en las etapas de alta presión de la turbina, y se recalienta a una temperatura más elevada en el generador de vapor y después retorna a las etapas de baja presión de la turbina para desarrollar más energía al accionar un generador eléctrico. La línea de vapor que lleva el vapor desde la turbina al recalentador se llama línea fría de recalentamiento, mientras la línea de vapor que lleva vapor recalentado desde el recalentador a la turbina se denomina línea caliente de vapor recalentado.

13. Defina el término «economizador».

RESPUESTA: Ésta es una sección absorbente de calor de una caldera grande de tubos de agua que precalienta el agua de alimentación para la caldera o generador de vapor, absorbiendo calor de la salida de gases al exterior.

14. ¿Cuáles son las ventajas de usar paredes de hogar tangentes en una caldera de tubos de agua?

RESPUESTA: Utilizando tubos tangentes, no se usan ladrillos refractarios propiamente dichos, sino un ladrillo aislante de poco espesor o fieltros aislantes con las paredes de tubos tangentes constituyendo el cerramiento del hogar, para asegurar el máximo efecto refrigerante y absorción uniforme de calor en la zona del hogar.

15. ¿Qué dispositivo de seguridad importante debe evaluarse cuando se cambia de combustible en una caldera?

RESPUESTA: Los combustibles tienen diferentes poderes caloríficos; por otra parte, la capacidad de las válvulas de seguridad debe comprobarse para estar seguro de que excede su capacidad de evacuación del potencial desprendimiento térmico y consiguiente mayor producción térmica del nuevo combustible.

16. ¿Porqué es necesario diferir el drenaje (o purga) de un generador de vapor hasta que se haya enfriado suficientemente?

RESPUESTA: Al enfriar hasta una temperatura segura antes del drenaje se evita el recocado de los lodos sobre las superficies interiores y también la hará más segura para que el personal pueda acceder a partes o zonas del generador de vapor para inspección y mantenimiento.

17. ¿Por qué debería evitarse que el trabajador trabaje en sobrepresión del hogar en aquellas unidades no diseñadas para trabajar con presión positiva?

RESPUESTA: La presión positiva del hogar inducirá a los gases calientes del hogar a escapar por los huecos y grietas en el ajuste o asentamiento de la caldera, produciendo polución en la sala de calderas y condiciones inseguras para el personal además de deterioro del ajuste o cierre de la caldera.



18. ¿Qué táctica de seguridad debería seguirse cuando se purga la caldera y el vidrio de nivel de agua no tiene visibilidad?

RESPUESTA: Debería situarse una persona en las proximidades del nivel para que fuera capaz de señalar a la persona que efectúa la purga y evitar la eventualidad de que el nivel de agua alcanzase un nivel inseguro (por ejemplo por debajo del mismo) de forma que el proceso de purga pueda interrumpirse inmediatamente.

19. Indique dos precauciones que hay que tener al usar los sopladores de hollín y cenizas por vapor.

RESPUESTA: Para evitar la erosión de los tubos, el vapor debería ser seco y el condensado debería drenarse de los sopladores antes de utilizarlos en el soplado de los depósitos de los tubos.

20. ¿Qué puede suceder si se rompe un *baffle*?

RESPUESTA: Los gases cortocircuitarían uno o más pasos de gases, resultando así temperaturas excesivas de los humos de combustión (o gases) y por ello pérdida de rendimiento y capacidad de producción de vapor (mayores pérdidas por calor sensible de humos en chimenea). También se producirían sobrecalentamiento y daños en las zonas de caldera diseñadas para temperaturas menores de los gases.

21. ¿Es la misma la capacidad volumétrica de cada paso de gases en una caldera de tubos de agua? Explique su respuesta.

RESPUESTA: No; disminuye en cada paso sucesivo. Los gases se contraen a medida que se enfrían y para mantener la elevada velocidad de los gases necesaria para no depositar las películas de gases y conseguir una buena transferencia térmica, el área de los pasos debe disminuir y los gases necesitan menos espacio.

22. ¿En qué tipo de caldera de tubos de agua se utilizan los tirantes tensores o separadores?

RESPUESTA: En los tipos de cajas o colectores planos.

23. ¿Qué es un conector de bajante?

RESPUESTA: Es una distancia corta de tubo de caldera situada entre el calderín de vapor y el cabezal, que dirige la circulación bajante del agua de caldera.

24. ¿Dónde se usan los conectores intermedios?

RESPUESTA: En las calderas de doble etapa donde se instalan dos conjuntos de cabezales; uno encima de otro. Los conectores intermedios los conectan verticalmente.

25. Señale las dos chapas principales de una caja cabezal.

RESPUESTA: La chapa tubular y la chapa del agujero de servicio (o tapa de tubo).

26. ¿Cómo se denomina la estrecha placa usada a veces para formar la parte superior de una caja-colector?

RESPUESTA: Cabezal.

27. ¿Cuántos puntos deslizantes hay en un calderín transversal? Explique su respuesta.

RESPUESTA: Normalmente uno, porque un asiento articulado o deslizante no debe interferir con la ligazón o punto fijo de amarre del cilindro.

28. ¿Qué es más difícil enderezar y trabajar: un tubo de una caldera de tubos de agua o de una caldera pirotubular?

RESPUESTA: Normalmente es más difícil en una caldera pirotubular, por la capa de depósitos y suciedades que habrá en la parte exterior del tubo.

29. ¿Cuántos calderines hay en una caldera Stirling de tubos curvados de agua?

RESPUESTA: Normalmente de dos a cuatro.

30. ¿Cuál es una ventaja de la caldera de tipo tubular de varios calderines? ¿Cuál puede ser una desventaja?

RESPUESTA: Las mayores capacidades de almacenaje de agua y vapor capacitarán a la caldera de varios calderines para cubrir las puntas en las fluctuaciones de carga con menos caída de presión. El coste adicional de los calderines puede ser la desventaja.

31. ¿Cuál es el calderín más corto en una caldera Stirling? Explique su respuesta.

RESPUESTA: El calderín inferior (de lodos) es el menor. Está suspendido por los tubos y los cabezales del calderín están dentro de las paredes de la caldera.

32. ¿El nivel de agua es el mismo en los calderines de una caldera de tubos curvados que en una caldera que tiene los calderines al mismo nivel?

RESPUESTA: Lo es cuando la caldera está aislada o trabajando a baja carga. A carga elevada, el nivel de agua en el calderín que suministra a los tubos bajantes es a menudo menor que en las otras calderas.

33. ¿Por qué razones están curvados los tubos de las calderas tubulares de agua?

RESPUESTA: Para permitir la dilatación y contracción; para permitir el recambio de los tubos; para posibilitar la entrada perpendicular de los tubos tangentes al calderín; para dar flexibilidad en el diseño respecto a presión y capacidad.

34. ¿Cuál es el objeto del muro puente en una caldera Stirling?

RESPUESTA: Protege el calderín de lodos de la exposición directa al calor de la llama.

35. ¿Qué puede suceder si el puente Stirling se rompe?

RESPUESTA: El asiento y costura longitudinal del calderín pueden sobrecalentarse y dañarse.

36. ¿Dónde está el agujero de hombre en los calderines de caldera de tubos curvados?

RESPUESTA: En, al menos, un cabezal de cada calderín.

37. ¿Cuál es el objeto de los tubos ecualizadores y de circulación en una caldera de tubos curvados?

RESPUESTA: Los tubos circuladores conectan el volumen de agua de los calderines adyacentes (normalmente del mismo nivel) y ayudan en la ecualización del nivel de agua. Los tubos ecualizadores conectan el espacio de vapor de estos calderines para igualar presiones de vapor.

38. ¿Cuál es la diferencia entre un calderín de lodos de una caldera Stirling y otra de tubos de agua rectos?

RESPUESTA: Un calderín de lodos Stirling es uno de los calderines básicos del sistema de circulación. En las calderas de tubos rectos, el calderín de lodos puede ser un paso del calderín de vapor (caldera Heine) o una caja externa en la parte inferior de los cabezales (como en la caldera Babcock y Wilcox).

39. ¿Dónde están las conexiones de purga en las calderas de tubos curvados y cuántas hay?

RESPUESTA: En la parte inferior del calderín de lodos o calderín inferior; una o más, dependiendo de la longitud del calderín.

40. ¿Cuál es la diferencia entre la chapa tubular en una caldera de tubos curvados y en una caldera HRT (de retorno tubular horizontal)?

RESPUESTA: En la caldera de tubos curvados, la chapa tubular es aquella parte del calderín en la cual se conectan los tubos. En la caldera de retorno tubular horizontal la chapa tubular es la chapa plana de un cabezal.

41. a) Defina el sobrecalentador de una caldera de vapor.  
b) Indique dos modos diferentes de producir vapor sobrecalentado.

RESPUESTA:

- a) Sobrecalentador es una variante de calentador utilizado para elevar la temperatura del vapor saturado por encima de la temperatura debida a su presión. Normalmente consta de un cabezal de entrada y un cabezal de salida, con un haz tubular de interconexión.  
b) Uno calentando separadamente y el otro del tipo localizado y situado en el asentamiento de la caldera o paredes de cierre de la misma y a veces en las paredes del hogar.

42. a) Defina un precalentador de aire y mencione algunas ventajas obtenidas al utilizarlo como parte del generador de vapor.  
b) Defina las paredes refrigeradas por aire usadas en las instalaciones de calderas y qué se gana con su utilización.

RESPUESTA:

- a) Un precalentador de aire es un intercambiador de calor normalmente instalado en la chimenea de gases o en el pantalón correspondiente de la caldera. El aire frío entrante se calienta por los gases de salida, que de otro modo serían desperdiciados, y el aire precalentado se usa de nuevo en el hogar, ahorrando el combustible o el calor necesario para calentar ese aire.  
b) Las paredes refrigeradas por aire están en la zona del hogar. El aire frío preserva los refractarios del hogar de la combustión y el aire actúa como aislante para evitar pérdidas a través de los mismos refractarios de la caldera.

43. ¿Qué es una caja de viento en una caldera de tubos de agua?

RESPUESTA: Es una cámara que rodea las toberas y quemadores donde se suministra el aire precalentado bajo ligera sobrepresión para la combustión.

44. ¿Cómo circula el agua y el vapor en una caldera de tubos de agua rectos?

RESPUESTA: Este tipo de caldera tiene una circulación natural con el agua y el vapor subiendo a lo largo de los tubos inclinados al colector frontal elevado, después a través de los montantes hasta el calderín. El agua circula a través de la bajante y a través del colector trasero a los tubos inclinados hasta completar el ciclo.

45. Nombre dos clasificaciones utilizadas para describir los cierres del hogar de las calderas de tubos de agua.

RESPUESTA: Las dos clasificaciones son las de los cerramientos de hogar que constan principalmente de refractarios para mantener el calor dentro del hogar y la de los hogares con paredes refrigeradas por agua.

46. ¿Cuál es normalmente la parte más débil (desde el punto de vista de construcción) de una caldera de tubos curvados?

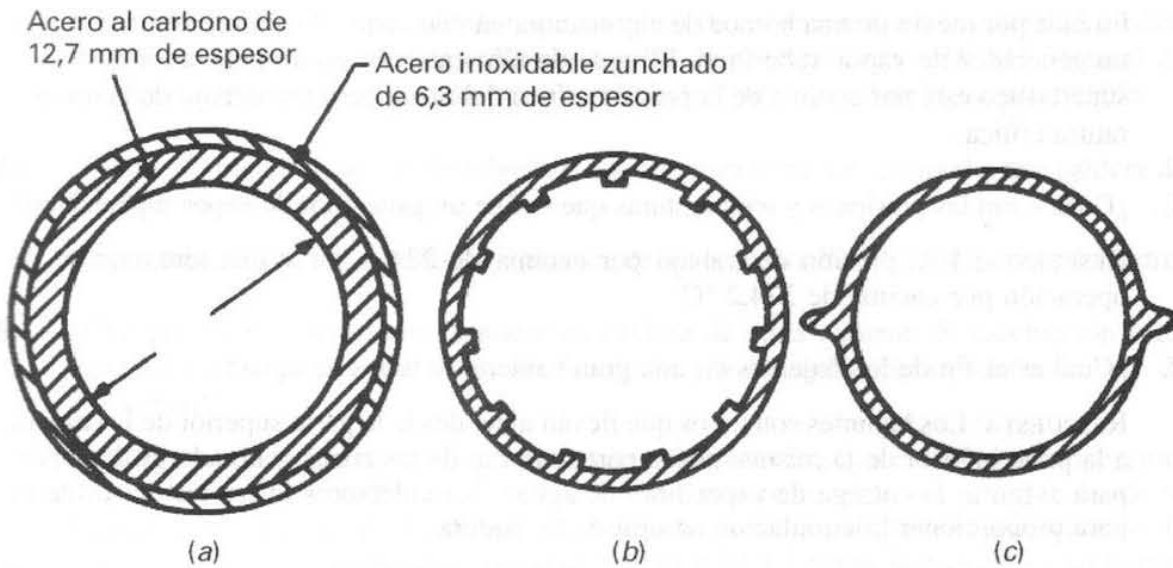
RESPUESTA: La conexión del tubo. Véase el Capítulo 9 sobre cálculos de tensiones.

47. ¿Cuáles son los tipos de tubos que se utilizan en las calderas de tubos de agua?

RESPUESTA: Las condiciones de trabajo han impulsado a los fabricantes a buscar nuevas soluciones a los problemas de operación de las calderas, tales como la combustión agresiva o los combustibles corrosivos en el hogar. Véase la Figura 3.24. Los tubos fabricados para estas condiciones especiales de trabajo incluyen:

- a) Los tubos sin soldadura para servicio ordinario hechos de acero al carbono estirado (laminados) en frío o en caliente. El rango de espesor varía desde 1,24 mm como mínimo hacia arriba.
- b) Tubos de acero al carbono soldados según requerimientos del Código con espesores también partiendo desde 1,24 mm como mínimo.
- c) Aceros aleados y aceros inoxidable laminados en caliente o en frío desde un espesor mínimo de 1,24 milímetros.
- d) Tubos bimetálicos, como se ven en la Figura 3.24a, que tienen un tubo exterior de acero inoxidable rodeando a otro tubo concéntrico interior de acero al carbono, que está diseñado para resistir la presión de trabajo, mientras el tubo exterior de acero inoxidable proporciona resistencia a la corrosión y a la erosión. Estos tubos fueron desarrollados para ser usados en calderas de recuperación de la industria papelera, pero también están siendo utilizados en las instalaciones de combustión de desperdicios y servicios similares de combustión corrosiva.
- e) Tubos ribeteados, como se muestra en la Figura 3.24d, están siendo utilizados para incrementar la circulación y así evitar DNB, o inicio para la evaporación nucleada. Esta tubería tiene un ribeteado interior en espiral.
- f) Los tubos aleteados externamente son utilizados mucho para la confección de paredes membrana en las calderas de tubos de agua. Véase la Figura 3.24e. Esta fabricación elimina la soldadura de barras o aletas a los tubos para formar una pared membrana; los tubos son fabricados como se muestra. Sólo las aletas se sueldan o ensamblan en conjunto para formar normalmente una pared de hogar estanca.





**Figura 3.24.** Tubos especiales de calderas de tubos de agua que se utilizan para diversos servicios operativos. (a) Tubos bimetálicos para resistir corrosión y erosión del hogar de algunas calderas. (b) Tubos ribeteados para incrementar la circulación natural. (c) Tubos aleteados exteriormente para conectarse y formar paredes-membrana, y también en calderas de recuperación de calor, para aumentar las superficies de transferencia o intercambio térmico.

48. Explique las ventajas de los sobrecalentadores y recalentadores drenables.

RESPUESTA: Los sobrecalentadores y recalentadores del tipo drenable permiten establecer el flujo a través de los tubos en el arranque de las calderas grandes, y así evitar el posible recalentamiento del tubo. El tipo drenable también permite mejor limpieza química de los tubos del sobrecalentador y recalentador al asegurar que la solución química circule uniformemente a través de los tubos del circuito. Esto permite una mejor neutralización y lavado con productos químicos, y la limpieza de los residuos depositados cuando el lavado químico está realizado.

49. ¿Qué significa el término «tasa de subida» o «rampa de subida» en una caldera?

RESPUESTA: Es la tasa de aumento de presión y temperatura por unidad de carga permisible y recomendada por el fabricante de la caldera. Esto es especialmente aplicable a las calderas de centrales térmicas. Los cambios excesivos de carga, con los correspondientes cambios de temperatura y de presión, añadirán tensiones adicionales en los componentes de la caldera. La temperatura del metal aumenta debido a las rápidas tasas de incremento de carga, y pueden incrementar la temperatura del metal del sobrecalentador y recalentador por encima de la de diseño, y esto finalmente puede producir roturas o fallos.

50. ¿Cuál es la diferencia entre un generador de vapor de circulación «unitaria» (de una vez) y un generador supercrítico?

RESPUESTA: Los dos términos se aplican a los generadores de vapor supercríticos, donde el agua va a través de los tubos sólo «una vez» en contraste a la circulación natural donde el líquido puede circular a través de los tubos más de una vez antes de convertirse en vapor. El fluido en un generador de vapor de circulación «única» está en circulación

forzada por medio de una bomba de circulación, en contraste a la circulación natural en un generador de vapor subcrítico. El agua de alimentación en un generador de vapor supercrítico está por encima de la presión crítica del agua, pero por debajo de la temperatura crítica.

51. ¿Cuáles son las presiones y temperaturas que define un generador de vapor supercrítico?

RESPUESTA: Una presión de trabajo por encima de 224'4 bar y una temperatura de operación por encima de 374,2 °C.

52. ¿Cuál es el fin de los bajantes en una gran caldera de tubos de agua?

RESPUESTA: Los bajantes son tubos que llevan agua desde la parte superior de la caldera a la parte inferior de la misma, por la parte externa de las zonas generadoras de vapor, para asegurar la entrega de vapor libre de agua a los colectores interiores del calderín para proporcionar la circulación natural de la caldera.

### **Calderas de serpentín (o batería tubular)**

53. ¿Qué limitaciones pone el Código en las calderas de agua caliente de serpentín que no tienen espacio o volumen de vapor?

RESPUESTA: El Código no cubre este tipo de calderas si se cumplen con las siguientes restricciones: (1) tuberías de 3/4" (19 mm) de diámetro sin calderines o cabezales conectados a ella; (2) máxima capacidad del contenido de agua de 6 galones (27 litros); (3) que no se genere vapor en el serpentín.

54. Cite dos razones por las cuales una caldera tipo serpentín puede desarrollar temperatura excesiva en el serpentín.

RESPUESTA: Poco agua y agua insuficiente que está circulando a través del serpentín a causa de obstrucción parcial o fallo de la bomba. Por esta razón, las calderas tipo serpentín deberían tener un dispositivo de seguridad por temperatura elevada y un mecanismo de corte de caudal que cortase el combustible cuando se produjesen temperaturas elevadas en el serpentín. Esto se cumple normalmente con un dispositivo termostático.

55. ¿Cómo se controla la alimentación de agua en una caldera tipo Clayton de serpentín?

RESPUESTA: La alimentación de agua se controla por medio del control de nivel de agua, que a su vez responde al nivel de líquido existente en el acumulador. Cuando el nivel de agua en el acumulador desciende, el solenoide de la bomba de agua se activa para permitir operar a la bomba de alimentación de agua.

56. ¿Qué sistema se recomienda para comprobar fugas en una caldera tipo serpentín?

RESPUESTA: La mayoría de los fabricantes recomiendan probar la caldera hidrostáticamente; si la fuga es pequeña, repararla mediante un proceso de soldadura aprobado. El serpentín debería cambiarse si se encuentran dificultades en la reparación.

### **Calderas de Fundición**

57. ¿Una caldera de hierro fundido necesita tubería y válvula de purga?

RESPUESTA: Sí. El código ASME requiere que toda caldera tenga una conexión tubular de purgado conectada con una válvula o grifo de no menos que 3/4" (19,05 mm) de diámetro. Debe estar conectada con el espacio inferior o nivel de agua practicable.

58. ¿Cuál es el menor diámetro de tubería requerido para conectar un nivel a una caldera de calefacción de vapor?

RESPUESTA: El diámetro mínimo de tubo no debe ser menor de 1" (25,4 mm) de diámetro.

59. ¿Qué prueba hidrostática se requiere en caldera de agua caliente de calefacción o de agua caliente sanitaria construida en fundición y trabajando a una presión de más de 2,9 kg/cm<sup>2</sup>?

RESPUESTA: Cada sección o elemento de una caldera de fundición debe someterse a una prueba hidrostática de 2,5 veces la presión máxima permisible; en el taller donde se fabrica. Las calderas de fundición taradas para presiones de trabajo por encima de 2,8 kg/cm<sup>2</sup> deben someterse a prueba hidrostática de 1,5 veces la presión máxima permisible en campo (donde se instalan y quedan listas para servicio). Una vez que la caldera está en servicio y se precise prueba hidrostática, la prueba será verificada a 1,5 veces la presión máxima permisible.

60. Indique los dos controles de presión requeridos en una caldera de calefacción a vapor y los controles de temperatura requeridos en una caldera de calefacción de agua caliente.

RESPUESTA: Las calderas de vapor automáticas requieren un dispositivo de corte por presión ajustado por debajo de la presión permisible y un corte por límite superior ajustado a una presión no superior a 1,05 kg/cm<sup>2</sup>. Para calderas de calefacción se requiere un dispositivo de corte operado a una temperatura menor que la permisible, así como un dispositivo de corte por límite superior a no más de 121 °C.

61. ¿Cuándo exige el Código de calderas de calefacción un corte de combustible por bajo nivel de agua para las calderas de agua caliente?

RESPUESTA: Cuando la caldera es automática y de potencia superior a 100.000 kcalorías/hora.

62. ¿Qué pruebas hidrostáticas se requieren en los elementos de fundición de una caldera de calefacción a vapor por elementos?

RESPUESTA: Los elementos individuales deben probarse a una presión hidrostática no menor de 4,2 kg/cm<sup>2</sup>. El conjunto montado debe probarse a una presión hidrostática no inferior a 3,15 kg/cm<sup>2</sup>.

63. ¿Qué pruebas hidrostáticas se precisan para una caldera de fundición para utilizarla como caldera de calefacción de agua caliente?

RESPUESTA: Para calderas con presión de trabajo no superior a 2,1 kg/cm<sup>2</sup>, la presión hidrostática debe ser al menos de 4,2 kg/cm<sup>2</sup> para cada elemento individual. Aquellas que trabajan con presiones superiores a 2,1 bar requieren una presión de prueba de 2,5 veces la presión máxima permisible en cada elemento o sección. En ambos casos, los elementos montados y la caldera así formada requieren otra prueba hidrostática no menor de 1,5 veces la presión máxima de trabajo permitida. Estos requisitos se aplican al fabricante de calderas de fundición. Las presiones de prueba requeridas deben controlarse dentro de un margen de 0,7 kg/cm<sup>2</sup>.

64. Cite los tres sistemas o tipos de calderas de fundición.

RESPUESTA: De secciones horizontales, de secciones o elementos verticales y el tipo de una sola pieza.

65. ¿Qué estampillado o marcaje requiere el código ASME en las calderas de fundición?

RESPUESTA: La marca o estampillado debe constar de los siguientes apartados: nombre del fabricante; presión máxima permisible en  $\text{kg}/\text{cm}^2$  (o psi en EE. UU.) y capacidad en  $\text{kg}/\text{hora}$  (libras/hora) para vapor y  $\text{kcalorías}/\text{hora}$  para servicio de agua caliente.

66. ¿Cuál es el menor tamaño de válvula de seguridad permitida en una caldera de fundición para utilizarse en servicio de vapor o de agua caliente en calefacción?

RESPUESTA: El Código ASME requiere una válvula de seguridad mínima de 3/4" (20 mm) de diámetro para ambas calderas: de vapor y de agua caliente del tipo de fundición.

67. ¿Qué aumento de presión está permitido en una caldera antes de que la capacidad de la válvula de seguridad pueda considerarse inapropiada en calderas de calefacción?

RESPUESTA: Para calderas de calefacción de vapor la capacidad de la válvula de seguridad deberá ser suficiente para que, al máximo de combustible, la presión no suba más de  $0,35 \text{ kg}/\text{cm}^2$ . Para las calderas de agua caliente, la capacidad de la válvula de seguridad debe bastar para evitar que la presión suba más de  $0,7 \text{ kg}/\text{cm}^2$  con los quemadores trabajando a la tasa de combustión máxima.