

**CALDERA SUBCRÍTICA A ALTA TEMPERATURA CON HORNO SUPERIOR
ENFRIADO CON VAPOR**

ANTECEDENTES

5 La presente descripción se refiere a tipos de caldera, donde las formas de realización ilustrativas incluyen calderas subcríticas, calderas de circulación natural subcríticas, calderas a carbón, calderas a carbón subcríticas, calderas a carbón de circulación natural
10 subcríticas y a métodos de fabricación y operación de ellas.

 Pequeñas calderas a carbón hallan aplicación en diversas configuraciones, como cuando los requerimientos de energía son relativamente bajos (por ejemplo, áreas rurales, regiones subdesarrolladas), donde el carbón es fácilmente
15 asequible, etc. Las típicas calderas a carbón pequeñas para generación de energía eléctrica emplean un diseño de circulación natural subcrítica. Un ejemplo de tal diseño de caldera es el diseño de caldera radiante de tipo Babcock & Wilcox Carolina. Este diseño emplea un horno con paredes de
20 horno enfriadas con agua de membrana que alimenta uno o varios tambores de vapor. El agua que pasa a través de las paredes del horno absorben energía térmica, que enfrían en efecto los tubos / caños directamente expuestos al calor de combustión. Los tambores de vapor alimentan uno o varios
25 supercalentadores primarios ubicados dentro de un paso de

convección y uno o varios supercalentadores colgantes secundarios ubicados dentro de la porción superior del horno. Este vapor supercalentado se usa para hacer funcionar una turbina a alta presión. El vapor que sale de la turbina a
5 alta presión se envía luego a través de recalentadores para incrementar nuevamente la temperatura, de modo que el vapor se pueda usar luego para hacer funcionar una turbina a baja presión.

Los caños o tubos enfriados con agua se diseñan
10 para llevar vapor húmedo (es decir, una mezcla de vapor/agua o, de modo equivalente, calidad de vapor menor al 100%). Para una presión operativa dada, la temperatura de vapor húmedo se limita termodinámicamente hasta la temperatura de ebullición de agua líquida a la presión operativa dada. En la práctica,
15 los caños enfriados con agua se diseñan para una temperatura operativa de aproximadamente 650 °F-670 °F, correspondiente a una presión operativa de aproximadamente 2200-2600 psig. En una caldera subcrítica, los caños enfriados con agua alimentan vapor húmedo al tambor de vapor.

20 Por el contrario, los caños o tubos enfriados con vapor se diseñan para llevar vapor supercalentado que tiene una calidad de vapor del 100% (es decir, ningún componente líquido). La temperatura de vapor supercalentado no se limita termodinámicamente para una presión dada y en diseños de tipo
25 Carolina, los supercalentadores enfriados con vapor en

general llevan vapor supercalentado a temperaturas de aproximadamente 1000 °F-1050 °F.

Debido a las diferencias en temperatura, los caños enfriados con agua se pueden hacer de acero al carbono de bajo costo, mientras que los caños enfriados con vapor se hacen de composiciones de acero más costosas. Un diseño como la caldera radiante de tipo Carolina aprovecha ventajosamente estos factores diseñando todo el horno para que se enfríe con agua, de modo que las paredes de membrana puedan usar caños de acero al carbono de menor costo y membranas de conexión. Los componentes supercalentadores de aleaciones superiores se ubican dentro del horno y paso de convección (es decir, dentro de las paredes de la caldera) y no tienen membrana. En estos diseños, las paredes enfriadas con agua de membrana son generalmente más frías que el gas de combustión al que se exponen los supercalentadores enfriados con vapor, debido a una transferencia de calor más eficaz a la mezcla de vapor/agua llevada por los caños enfriados con agua.

En ciertas aplicaciones, es deseable obtener vapor a altas temperaturas después del supercalentamiento y después del recalentamiento, por ejemplo, aproximadamente 1050 °F después de ambos ciclos. Esto puede ser difícil en pequeños diseños y otros diseños y métodos son necesarios para obtener tales altas temperaturas.

La presente descripción se refiere así a calderas subcríticas de alta presión pequeñas que pueden tener una circulación natural y lograr altas temperaturas del supercalentador de aproximadamente 1050 °F. En general, el
5 horno inferior de tales calderas usa tubos/caños enfriados con agua y el horno superior usa tubos/caños enfriados con vapor. Dicho de otra manera, el horno superior de la caldera se hace de tubos/caños supercalentadores.

Se describen en la presente en distintas formas de
10 realización calderas que comprenden: un horno inferior que tiene paredes de membrana enfriadas con agua; un horno superior que tiene paredes de membrana enfriadas con vapor; un separador de vapor que tiene una entrada de fluidos y una salida de vapor seco; un circuito enfriado con agua conectado
15 con la entrada de fluidos del separador de vapor para suministrar vapor húmedo al separador de vapor, donde el circuito enfriado con agua incluye las paredes de membrana enfriadas con agua del horno inferior; y un circuito enfriado con vapor conectado con la salida de vapor seco del separador
20 de vapor para recibir vapor de la salida de vapor seco, donde el circuito enfriado con vapor incluye las paredes de membrana enfriadas con vapor del horno superior.

También se describen en la presente en distintas formas de realización calderas que comprenden: un horno
25 inferior que tiene paredes de membrana enfriadas con agua que

crean una envoltura sellada, donde las paredes de membrana enfriadas con agua comprenden tubos sellados por membrana dispuestos y conectados con los caños; quemadores dispuestos para quemar combustible para crear un gas de combustión en el

5 horno inferior; un horno superior que tiene paredes de membrana enfriadas con vapor que crean una envoltura sellada, donde las paredes de membrana enfriadas con vapor comprenden tubos sellados por membrana dispuestos y conectados con los caños, el horno superior dispuesto para recibir el gas de

10 combustión que fluye hacia arriba fuera del horno inferior; un separador de vapor que tiene una entrada de vapor húmedo y una salida de vapor seco; un circuito enfriado con agua conectado con la entrada de vapor húmedo del separador de vapor, donde el circuito enfriado con agua incluye los caños

15 de las paredes de membrana enfriadas con agua del horno inferior; y un circuito enfriado con vapor conectado con la salida de vapor seco del separador de vapor, donde el circuito enfriado con vapor incluye los caños de las paredes de membrana enfriadas con vapor del horno superior.

20 También se describe en la presente en distintas formas de realización un método para generar vapor supercalentado, que comprende: quemar un combustible en un horno inferior de una caldera; generar vapor húmedo de agua en paredes de membrana enfriadas con agua del horno inferior;

25 separar el vapor húmedo en vapor seco y agua en un separador

de vapor; enviar vapor seco a paredes de membrana enfriadas con vapor de un horno superior y el paso de convección de la caldera para generar vapor supercalentado.

Estos y otros aspectos no limitativos y/u objetos
5 de la descripción se describen más particularmente a continuación.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

Lo siguiente es una breve descripción de estos dibujos, que se presentan para ilustrar las formas de
10 realización reveladas en la presente y no para limitarlas.

La **FIG. 1** muestra en un diagrama una vista de sección lateral de una caldera ilustrativa. Los insertos A, B y C ilustran porciones de tuberías.

La **FIG. 2** es una vista de sección transversal
15 superior de la caldera de la **FIG. 1** a través del horno superior a lo largo de la línea A-A de la **FIG. 3**.

La **FIG. 3** muestra en un diagrama una vista seccional lateral más detallada de una porción de la caldera de la **FIG. 1** que incluye una visualización ilustrativa de
20 supercalentadores.

La **FIG. 4** muestra en un diagrama de un circuito de enfriamiento de la caldera de la **FIG. 1** y la **FIG. 2**.

La **FIG. 5** muestra en un diagrama el circuito de enfriamiento de la **FIG. 4** con circuitos de control de puesta
25 en marcha como se describe en la presente.

La **FIG. 6** grafica en diagramas una típica secuencia de puesta en marcha realizada usando los circuitos de la **FIG. 5**. La tabla inserta muestra las configuraciones de la válvula de circuitos de puesta en marcha para los modos operativos de puesta en marcha y normal. El eje x es tiempo en horas y corre de 0 a 8 a intervalos de 1. El eje y de mano izquierda es la presión en psig y corre de 0 a 2500 a intervalos de 500. El eje y de mano derecha es el flujo de vapor y % de quema y corre de 0 a 100 a intervalos de 10. Existen tres líneas de presión de aceleración, tasa de tasa de disparo y flujo de vapor. La presión de aceleración se lee respecto del eje y de la mano izquierda y la tasa de disparo y el flujo de vapor se leen respecto del eje y de la mano derecha.

DESCRIPCIÓN DETALLADA

Se puede obtener una comprensión más completa de los procesos y aparatos revelados en la presente por referencia a los dibujos adjuntos. Estas figuras son representaciones meramente esquemáticas por conveniencia y la facilidad de demostrar la técnica existente y/o el presente desarrollo y, en consecuencia, no pretenden indicar el tamaño relativo y las dimensiones de las agrupaciones o sus componentes.

A pesar de que se usan términos específicos en la siguiente descripción con fines de claridad, estos términos pretenden referirse sólo a la estructura particular de las formas de realización seleccionadas para ilustración en los

dibujos y no pretenden definir o limitar el alcance de la descripción. En los dibujos y la siguiente descripción que sigue, se ha de entender que iguales designaciones numéricas se refieren a componentes de igual función.

5 El modificador "aproximadamente" usado en conexión con una calidad incluye el valor establecido y tiene el significado dictaminado por el contexto (por ejemplo, incluye al menos el grado de error asociado con la medición de la cantidad particular). Cuando se usa con un valor específico,
10 también se debe considerar como revelador de este valor. Por ejemplo, la expresión "aproximadamente 2" también revela el valor "2" y el rango "de aproximadamente 2 a aproximadamente 4" también revela el rango "de 2 a 4".

Se ha de notar que muchos de los términos usados en
15 la presente son términos relativos. Por ejemplo, los términos "entrada" y "salida" son relativos de una dirección de flujo y no se han de interpretarse como que requieren una orientación o ubicación particular de la estructura. Las expresiones "corriente arriba" y "corriente abajo" se
20 refieren a la dirección en la que un fluido fluye a través de varios componentes, es decir, el fluido fluye a través de un componente corriente arriba antes de fluir a través del componente corriente abajo. Se ha de notar que en un bucle, un primer componente se puede describir tanto como corriente
25 arriba como corriente abajo de un segundo componente. De modo

similar, los términos "superior" e "inferior" se refieren uno respecto del otro a la ubicación, es decir, un componente superior está ubicado en una elevación más alta que un componente inferior.

5 Los términos "horizontal" y "vertical" se usan para indicar la dirección respecto a una referencia absoluta, es decir, el nivel del suelo. Sin embargo, no debería interpretarse que estos términos requieren estructuras que sean absolutamente paralelas o absolutamente perpendiculares
10 entre sí. Por ejemplo, una primera estructura vertical y una segunda estructura vertical no son necesariamente paralelas entre sí.

 Los términos "arriba" y "abajo" o los términos "techo" y "piso" se usan para referirse a
15 ubicaciones/superficies en las que la parte superior/techo siempre está más alta que la parte inferior/piso respecto de una referencia absoluta, es decir, la superficie de la Tierra. Las expresiones "hacia arriba" y "hacia abajo" también se refieren a una referencia absoluta; un flujo hacia
20 arriba siempre está contra la gravedad de la Tierra.

 La expresión "plano" se usa en la presente para referirse en general a un nivel común y debe interpretarse como referencia a un volumen, no a una superficie plana.

 Un fluido a una temperatura que está por encima de
25 su temperatura de saturación a una presión dada se considera

"supercalentado". La temperatura de un fluido supercalentado se puede reducir (es decir, energía de transferencia) sin cambiar la fase del fluido. Como se usa en la presente, la expresión "vapor húmedo" se refiere a una mezcla saturada de vapor/agua (es decir, vapor con menos del 100% de calidad donde la calidad es el contenido de vapor en porcentaje en masa). Como se usa en la presente, la expresión "vapor seco" se refiere a vapor que tiene una calidad igual o de aproximadamente el 100% (es decir, no hay agua líquida presente).

Los términos "caños" y "tubos" se usan indistintamente en la presente para referirse a una forma cilíndrica hueca, como se entiende comúnmente.

La expresión "circulación natural", como se usa en la presente, se refiere a la circulación de agua a través de la caldera debido a diferencias en la densidad cuando el agua se calienta. La circulación del agua se puede producir sin la necesidad de una bomba mecánica en el circuito del agua entre las paredes del horno y el separador de vapor.

En la medida en que las explicaciones de cierta terminología o principios de la técnica de calderas y/o generadores de vapor puedan ser necesarias para comprender la presente descripción, el lector se refiere a *Steam/its generation and use*, 42da edición, publicado por G.L. Tomei, Copyright 2015, The Babcock & Wilcox Company, ISBN 978-0-

9634570-2-8, cuyo texto se incorpora en la presente por referencia como si se estableciera aquí por completo.

No se desean mayores presiones de vapor húmedo para muchas aplicaciones de caldera pequeñas debido a temas de costo y seguridad (por ejemplo, mayores espesores de pared de caño mínimo y espesores de membrana). En una pequeña caldera que usa sólo paredes de horno enfriadas con agua, es difícil o imposible lograr temperaturas de salida del supercalentador y recalentador a 1050 °F para 150-300 MW de generación de energía neta, porque no es posible proporcionar suficiente área superficial de supercalentador / recalentador para la transferencia de calor al vapor seco para obtener estas altas temperaturas.

Una posible alternativa consiste en emplear un diseño de caldera de un paso sin tambor, como un diseño de calderas Babcock & Wilcox Universal Pressure. Sin embargo, estos diseños emplean generación de vapor de un paso. En un diseño de un paso, el punto de transición del vapor húmedo a vapor supercalentado depende de condiciones operativas, más que el definido usando un separador de vapor (por ejemplo, un tambor de vapor). Como resultado, se usa típicamente una tubería más cara para todas las cañerías / tuberías en tales diseños de un paso para seguridad. Esto da como resultado mayores costos de capital.

En el diseño de calderas subcríticas de la presente

descripción, el horno se divide en dos secciones: un horno inferior usando paredes de membrana enfriadas con agua que alimenta un separador de vapor y un horno superior usando paredes de membrana enfriadas con vapor que se alimenta (directa o indirectamente) por la salida de vapor seco del separador de vapor. Este método permite ventajosamente usar acero al carbón de menor costo para las paredes del horno inferior, usando tuberías más caras sólo en el horno superior enfriado con vapor (que incluye las paredes de vías de convección en algunas formas de realización). Se reduce el costo reteniendo el separador de vapor, Se puede obtener una mayor temperatura de salida de vapor porque el uso de un horno superior enfriado con vapor y paredes de paso de convección proporciona un área superficial adicional para la transferencia de calor de los gases de combustión al vapor seco dentro de las paredes enfriadas por vapor, dando como resultado vapor supercalentado de temperaturas deseadas. Nuevamente, estas altas temperaturas de vapor supercalentado no se pueden obtener con paredes convencionales enfriadas con agua en el horno superior.

En algunas formas de realización, se logra una mayor mejora en tal diseño reduciendo la sección transversal del horno superior enfriado con vapor en comparación con el horno inferior enfriado con agua. Esto aumenta la velocidad del flujo de gas de combustión en el horno superior enfriado

con vapor en comparación con el horno inferior enfriado con agua, que proporciona una transferencia de calor más eficaz en la vía de gas de alta temperatura y también reduce la cantidad de materiales y costo de fabricación.

5 En diseños de calderas radiantes de tipo Carolina, el paso de convección se separa del horno por un paso de convección horizontal cuyo longitud horizontal crea un espacio entre el horno y el paso de convección. Como resultado, en el diseño de caldera radiante de tipo Carolina,
10 el horno incluye una pared trasera y el paso de convección incluye una pared frontal. En un diseño plegado, estas dos paredes se combinan en una pared. En la presente descripción, se usa una pared de membrana común enfriada con vapor para separar el horno superior de paso superior y el paso de
15 convección adyacente. Esto elimina el paso abierto entre el horno y el paso de convección, proporcionando una caldera compacta y reduce la cantidad de materiales y costo de fabricación.

 Estos beneficios establecidos con anterioridad se
20 logran al reemplazar el horno convencional enfriado con agua con un diseño de dos partes en donde el horno superior se enfría con vapor. Sin embargo, tal modificación tiene ciertas desventajas potenciales. El costo de material general se incrementa debido a aleaciones de mayor costo usadas en el
25 horno superior, pero esto se puede mitigar por enfoques

revelados en la presente (por ejemplo, sección transversal de horno superior reducido, empleando una pared enfriada con vapor común entre el horno y el paso de convección). Otra desventaja potencial es una complicación estructural para la

5 disposición preferida soportada en la parte superior. Esto surge potencialmente porque los tubos del horno inferior son preferentemente de acero al carbono para reducir costos, mientras que los caños del horno superior son aleaciones de mayor costo para la compatibilidad con enfriamiento con

10 vapor. Esta dificultad también se halla en algunos hornos supercríticos de un solo paso que emplean caños de acero al carbono en una sección de horno inferior para reducir costos. Un ejemplo de tal diseño es la caldera Babcock & Wilcox Spiral Wound Universal Pressure (SWUP). En el diseño de

15 caldera supercrítica de un solo paso SWUP, la porción del horno inferior enfriado con agua es soportada desde arriba por medio de componentes de soporte del horno inferior dedicados que se conectan con el soporte de la caldera superior a través de una dispositivo de varillas de sujeción

20 verticales y/o conexiones con los caños enfriados con agua del horno superior. La disposición resultante se complica porque el horno inferior debe ser asegurado al instalar sus componentes de soporte, seguido por realización de una soldadura de caños.

25 Este enfoque que emplea componentes de soporte de

horno inferior exclusivos también se pueden usar en diseño de calderas subcríticas con un horno superior enfriado con vapor y horno inferior enfriado con agua, como se revela en la presente. Sin embargo, en algunas formas de realización

5 reveladas en la presente, estas fundiciones de soportes dedicadas y operaciones concomitantes de soldadura de caños compleja eliminadas y en su lugar, se emplea una sección de transición con tuberías de transición integrales. En la sección de transición, al menos algunos caños de transición

10 se diseñan para ser caños orientados de forma vertical y se logra un soporte de horno inferior por soporte de tracción por medio de soldaduras en estos caños de transición orientados verticalmente. La sección de transición se puede hacer de un material de acero inoxidable fundido que es

15 compatible con enfriamiento con vapor - por ende, se sobrediseña para los caños de transición enfriados con agua, pero la capacidad de mantener el soporte superior para el horno inferior excede el costo adicional implicado por el sobrediseño de estos caños de transición enfriados con agua

20 relativamente cortos. La sección de transición también actúa como un sello a presión entre el horno y la atmósfera.

Algunas formas de realización ilustrativas de estas calderas subcríticas se muestran en diagramas y se describen más abajo. Estas son meramente ejemplos ilustrativos y una

25 forma de realización dada puede incluir una, dos, varias o

todas las nuevas características reveladas descritas en la presente.

La **FIG. 1** y la **FIG. 2** muestran diferentes vistas de una caldera de circulación natural subcrítica ilustrativa de la presente descripción. La **FIG. 1** es una vista de sección lateral de toda la caldera. La **FIG. 2** es una vista superior (en planta) que pasa a través del horno superior de la caldera.

Con referencia a la **FIG. 1**, en un diagrama, se muestra una caldera subcrítica **10**. La caldera **10** incluye un horno inferior **12** que se enfría con agua, un horno superior **14** que se enfría con vapor y una sección transicional **16** que se forma en formas de realización preferidas a partir de una fundición de transición. La caldera ilustrativa **10** es un diseño de caldera plegado que también incluye un paso de convección **18** que se conecta con el horno superior **14** para formar lo que se considera un paso horizontal **20**. Las paredes del horno inferior **12**, la sección transicional **16**, el horno superior **14** y el paso de convección **18** definen colectivamente una caldera.

La combustión / el gas de combustión **22** se indican en un diagrama por medio de flechas y estos gases fluyen a través de la caldera y calientan el agua / vapor en las diversas paredes de la caldera. Más específicamente, el aire de combustión se sopla dentro del horno inferior **12** a través

de una entrada de aire **24**, donde se mezcla con un combustible como carbón, petróleo o gas natural. En algunas formas de realización preferidas, el combustible es carbón, que se pulveriza por medio de un pulverizador (no mostrado). Una pluralidad de quemadores **26** queda la mezcla de combustible/aire, dando como resultado un gas de combustión. El gas de combustión sube por convección natural a través de un paso superior formado por el horno inferior **12**, la sección de transición **16** y el horno superior **14**, luego fluye horizontalmente a través del paso de convección, que incluye el paso de convección **18** y finalmente sale a través de una salida de gas de combustión **28** para ulterior procesamiento corriente abajo. Con preferencia, se proporciona una tolva **33** para capturar ceniza u otros contaminantes en el gas de combustión saliente.

La caldera subcrítica **10** es soportada desde arriba para la estructura de construcción por medio de puntos de anclaje superiores apropiados **30**. Se indican en un diagrama en la **FIG. 1**. Los caños del horno superior **14** y el paso de convección **18** se orientan verticalmente y se soportan directamente de los puntos de anclaje **30**. Los caños del horno inferior **12** también se orientan verticalmente y se soportan directamente por medio de soldaduras en la sección de transición **16**.

Es deseable capturar la energía térmica presente en

la combustión / el gas de combustión **22** para tareas tales como conducción de turbina una generación de energía eléctrica (por ejemplo). Para hacer esto, la caldera subcrítica **10** incluye enfriamiento de superficies que

5 comprenden caños o tubos a través de flujos de vapor húmedo (estos caños o tubos se mencionan en la presente como enfriados con agua) o a través de flujos de vapor supercalentado (estos caños o tubos se mencionan en la presente como enfriados con vapor). Más en particular, con

10 referencia al inserto A de la **FIG. 1**, el horno inferior **12** incluye tubos enfriados con agua **32** con membrana **34** dispuestos y soldados con los tubos **32**, de modo que los tubos **32** y la membrana **34** forman colectivamente una pared de membrana **36**, con los tubos **32** que llevan el flujo de vapor

15 húmedo a través de la pared de membrana **36**. La pared de membrana **36** forma la barrera que contiene el gas de combustión **22**, es decir, la membrana **34** se suelda o si no se conecta con los tubos **32** para proporcionar un sello contra fuga del gas de combustión **22**. La pared de membrana enfriada

20 con agua **36** del horno inferior **12** no denota temperaturas del agua muy elevadas; por ejemplo, si la caldera subcrítica **10** se diseña para una presión de vapor máxima de 2800 psig, entonces el vapor saturado llevado por los tubos enfriados con agua **32** está a aproximadamente 685 °F (correspondiente al

25 punto de ebullición del agua a 2800 psig), a pesar de que, de

hecho, el gas de combustión está a una temperatura mucho mayor.

El horno superior **14** y el paso de convección **18** se hacen análogamente de una pared de membrana enfriada con vapor **46** que comprende tubos enfriados con vapor **42** con membrana **44** dispuesto y soldado o conectado de otro modo con los tubos **42** (ver el inserto B de la **FIG. 1**), donde los tubos **42** y la membrana **44** forman colectivamente la pared de membrana **46**. Los tubos **42** llevan un flujo de vapor supercalentado a través de la pared de membrana **46**. La pared de membrana enfriada con vapor **46** lleva vapor a temperaturas del vapor sustancialmente mayores que la pared de membrana enfriada con agua **36**. Por ejemplo, el vapor en las paredes de membrana enfriadas con vapor **46** puede estar a una temperatura de más de 1000 °F, por ejemplo, de hasta 1100 °F en algunas formas de realización contempladas. Se ha de notar que el techo **35** del horno y el paso de convección también se hacen de una pared de membrana enfriada con vapor. También se ha de notar que el diámetro de los tubos y el espaciado entre los tubos de las paredes de membrana enfriadas con vapor pueden diferir entre el horno superior y el paso de convección.

Los tubos **32** de la pared de membrana enfriada con agua generalmente tienen un mayor diámetro que los tubos **42** de la pared de membrana enfriada con vapor. En formas de realización particulares, el diámetro interno de los tubos

enfriados con agua es al menos 0,5 pulgadas mayor que el diámetro interno de los tubos enfriados con vapor. Los tubos de la pared de membrana enfriada con agua tienen un diámetro interno de aproximadamente 1,5 pulgadas a aproximadamente 2,0 pulgadas, mientras que los tubos de la pared de membrana enfriada con vapor tienen un diámetro interno de aproximadamente 1,0 pulgada a aproximadamente 2,5 pulgadas. Los tubos de la pared de membrana enfriada con agua tienen un diámetro externo de aproximadamente 2,0 pulgadas a aproximadamente 2,5 pulgadas, mientras que los tubos de la pared de membrana enfriada con vapor tienen un diámetro externo de aproximadamente 1,3 pulgadas a aproximadamente 2,3 pulgadas. Los tubos propiamente dichos pueden tener un espesor de aproximadamente 0,2 pulgadas a aproximadamente 0,5 pulgadas.

En un circuito de flujo de vapor típico para la caldera subcrítica 10, el agua se ingresa en los extremos inferiores de los tubos enfriados con agua 32 a través de una cabeza de entrada inferior 50. Cuando el agua va hacia arriba a través de estos tubos enfriados con agua 32, el agua enfría los tubos expuestos a gas de combustión a alta temperatura en el horno inferior 12 y absorbe energía del gas de combustión para volverse una mezcla de vapor-agua (es decir, vapor húmedo) a presión subcrítica.

El vapor húmedo sale de los extremos superiores de

los tubos enfriados con agua **32** y fluye por medio de una cabeza de salida de vapor húmedo **52** en una entrada de fluido **53** de un separador de vapor **54**. La cabeza de salida del vapor húmedo **52** se suelda preferentemente con caños de transición enfriados con agua dentro de la sección de transición 16. Con preferencia, la cabeza de salida de vapor húmedo **52** facilita la ventilación de los tubos **32**, de ser apropiado, durante la puesta en marcha, la detención o mantenimiento, etc. Se puede usar cualquier tipo de separador de vapor, por ejemplo, empleando separación ciclónica, etc. En formas de realización particulares, se usa un separador de vapor vertical, tal como el que se describe en la patente estadounidense N° 6.336.429. Una salida de vapor seco **56** del separador de vapor **54** en un extremo superior del separador de vapor produce sustancialmente vapor seco (es decir, vapor con 100% de calidad). Un drenaje o salida de agua **58** cerca del extremo inferior del separador de vapor **54** recolecta agua extraída del vapor húmedo para volver a reciclar la cabeza de entrada inferior **50** que alimenta el horno inferior **12**.

La salida de vapor de la salida de vapor seco **56** fluye al paso de convección **18** y luego al horno superior **14**. Para proporcionar una superficie adicional para transferencia de calor, uno o varios supercalentadores primarios **60**, recalentadores **62** y/o supercalentadores secundarios **64** se pueden proporcionar en el volumen interior de la caldera,

dentro del horno superior **14** y el paso de convección **18**. Como se ilustra aquí, uno o varios supercalentadores **60** dispuestos en el paso de convección **18**; uno o varios recalentadores (o supercalentadores de recalentamiento) **62** se disponen en el

5 paso de convección **18** y/o en el horno superior **14**; y uno o varios supercalentadores secundarios **64** se disponen en el horno superior **14**. Nuevamente, las paredes del horno enfriadas con vapor **46** del horno superior **14** también actúan como superficies supercalentadoras. Un circuito de vapor

10 ilustrativo más detallado se describe en los dibujos posteriores. Se ha de entender que el circuito de vapor ilustrativo es meramente un ejemplo y se contemplan otras configuraciones de circuitos de vapor, por ejemplo, se pueden omitir y/o se pueden ubicar en otra parte varios componentes

15 supercalentadores, etc.

A diferencia de las paredes de membrana **46** del horno superior enfriado con vapor **14** y el paso de convección **18**, los supercalentadores **60**, **62**, **64** ubicados dentro de la caldera se forman a partir de caños / tubos sueltos **72** sin

20 que las membranas unan los tubos (ver el Inserto C de la **FIG. 1**). Estos supercalentadores **60**, **62**, **64** se disponen en el interior de la caldera de combustible y permiten deseablemente que el gas de combustión pase a través, incrementando el área superficial, a través de lo cual se

25 puede producir la transferencia de calor desde el gas de

combustión hasta el vapor dentro de los caños. Los caños supercalentadores **72** se hacen preferentemente de un material de acero de aleación. En algunas formas de realización, los caños supercalentadores **72** y la pared de membrana enfriada con vapor **46** se hacen del mismo material de acero de aleación, a pesar de que esto no se requiera.

Como se ve en la **FIG. 1**, los supercalentadores **60**, **62**, **64** están rodeados por las paredes de membrana enfriadas con vapor **46**. Dicho de otro modo, los supercalentadores **60**, **62**, **64** están contenidos dentro del horno superior **14** y/o en el paso de convección **18** como se muestra en la caldera ilustrativa **10** de la **FIG. 1**. El vapor dentro de las paredes de membrana enfriadas con vapor **46** pueden estar a la misma temperatura o una temperatura mayor que en los supercalentadores **60**, **62**, **64**. Debido al área superficial adicional disponible para la transferencia de calor del gas de combustión al vapor supercalentado dentro de las diversas superficies de supercalentamiento **46**, **60**, **62**, **64**, la caldera **10** puede lograr mayores temperaturas de vapor supercalentado que lo que se lograría con una caldera subcrítica enfriada con agua convencional cuyas paredes del horno están enteramente enfriadas por vapor húmedo que fluye a través de los caños enfriados con agua. Sin embargo, la caldera subcrítica **10** retiene el diseño general de una caldera subcrítica, que incluye el empleo del separador de vapor **54**

dispuesto (en un sentido de flujo de vapor) entre el subcircuito de vapor húmedo y el subcircuito de vapor supercalentado, reteniendo así las ventajas tales como la flexibilidad operacional de un diseño de caldera subcrítica.

5 La caldera subcrítica **10** ilustrativa emplea ciertas características que mejoran el carácter compacto y la eficacia. Una característica es un área transversal reducida para la combustión / flujo de gas de combustión **22** a través del horno superior **14** en comparación con el horno inferior

10 **12**. El área transversal mencionada es la sección transversal horizontal en el diseño ilustrativo en donde el gas de combustión **22** fluye verticalmente hacia arriba. En la caldera **10** ilustrativa, la reducción en el área transversal del horno superior **14** respecto del horno inferior **12** se obtiene por

15 medio de una superficie de "arco" **76**, que se inclina cuando el horno superior continúa hacia arriba desde la sección de transición **16**, para reducir la turbulencia en la transición a mayor velocidad de flujo. Esto tiene al menos dos beneficios. Primero, el área transversal reducida del horno superior **14**

20 reduce la cantidad de material (por ejemplo, el área superficial total de pared de membrana **46**) que reduce el costo de capital. En segundo lugar, la mayor velocidad del flujo de gas de combustión **22** debido al área transversal reducida aumenta la eficacia de transferencia de calor a los

25 caños enfriados con vapor **42, 72**. La sección de transición **16**

está ubicada por debajo de la superficie del arco **76**. El arco **76** es parte del horno superior y también es una pared de membrana enfriada con vapor.

La **FIG. 2** es una vista en planta transversal (de arriba) de la caldera **10** a través del horno superior **14** y proporciona otra vista de los diversos componentes. La pared frontal **110** del horno superior se muestra en línea continua, porque es la pared frontal **112** del horno inferior. El área entre estas dos paredes es el arco **76**. El horno superior incluye una primera pared lateral **114** y una segunda pared lateral **116** opuesta a la primera pared lateral, ambas hechas de paredes de membrana enfriadas con vapor **42**. El cuarto lado del horno superior se define por una pared de membrana enfriada con vapor común **80**. El paso de convección se define por una primera pared lateral **124**, una segunda pared lateral **126** opuesta a la primera pared lateral y una pared trasera **128**. Una pared deflectora **130** divide el paso de convección en un paso de convección frontal **17** y un paso de convección trasero **19**. Un supercalentador primario **60** se ve en el paso de convección trasero **19**, mientras que un recalentador **62** se ve en el paso de convección frontal **17** y un supercalentador secundario **64** se ve dentro del horno superior **14**.

Otra característica que mejora el carácter compacto y la eficacia de este diseño de caldera es el uso de una pared de membrana enfriada con vapor común **80**. La pared de

membrana enfriada con vapor común **80** es tanto una pared "trasera" del horno superior **14** como una pared "frontal" del paso de convección **18**. El horno superior **14** y el paso de convección **18** comparten así la pared de membrana enfriada con vapor común **80**, que comprende una capa simple de tubos sellados por una capa simple de membrana dispuesta y conectada con la capa simple de caños. El uso de la pared de membrana enfriada con vapor común **80** tiene numerosas ventajas. El paso abierto usual entre el horno y el paso de convección se elimina, proporcionando un diseño más compacto y reduciendo los costos de capital debidos a una menor área superficial. La pared de membrana enfriada con vapor común **80** se calienta ventajosamente tanto por gas de combustión que fluye hacia arriba a través del horno superior **14** como por gas de combustión que fluye hacia abajo a través del paso de convección **18**.

Un problema con el empleo de la pared de membrana enfriada con vapor común **80** es la amplia variación de temperatura entre el gas de combustión temperatura en el horno superior **14**, por un lado, y el gas de combustión temperatura en el paso de convección **18**, por el otro. Esta diferencia entre las dos temperaturas de gas de combustión será sentida por la pared de membrana enfriada con vapor común **80**. Usando modelación transitoria y análisis finito de elementos para determinar el estrés resultante en las paredes

de la caldera, se halló que la máxima diferencia de estrés térmico se produce durante la puesta en marcha y más en particular, se produce en un área pequeña alrededor de la parte inferior de la pared de membrana enfriada con vapor común **80** de las paredes adyacentes **114**, **124** en un lado, y paredes **116**, **126** en el otro. Intuitivamente, esto se puede entender dado que esta parte más inferior de la pared de membrana enfriada con vapor común **80** es donde hay la mayor diferencia de temperatura entre el flujo de gas de combustión hacia arriba en el horno superior **14** y el flujo de gas de combustión hacia abajo en el paso de convección **18**. Este estrés puede causar la curvatura / desgaste de la caldera y se acomoda proporcionando sellos en la unión de la parte inferior de la pared de membrana enfriada con vapor común **80**, las paredes laterales del horno **114**, **116** y las paredes laterales del paso de convección **124**, **126**, ya que el análisis mostró que el área sobreestresada no se extiende significativamente hasta la pared de membrana enfriada con vapor común **80**. Estos sellos se ilustran en la **FIG. 2** con el número de referencia **132**.

Se ha de notar que las distintas mejoras reveladas en la presente se pueden usar para sacar ventaja individualmente o en varias combinaciones y/o en varios tipos de calderas. Por ejemplo, la pared de membrana enfriada con vapor común **80** revelada también se puede usar para sacar

ventaja de un diseño de caldera de un paso que tiene un paso de convección u otros tipos de calderas que tienen dos paredes de membrana lindantes enfriadas con vapor.

Haciendo referencia ahora a las **FIGS. 2-4**, se describe un circuito enfriado con vapor ilustrativo que se puede usar en la caldera **10** de la **FIG. 1**. La **FIG. 3** muestra una vista de sección lateral del horno superior **14**, el paso de convección **18** y el paso horizontal **20** que los conecta. Además se muestra con mayor detalle representaciones de los supercalentadores primarios **60**, recalentadores **62** y supercalentadores secundarios **64**. En la **FIG. 3** y la **FIG. 4**, los supercalentadores primarios **60** se marcan usando el prefijo "PSH"; los recalentadores (es decir, los supercalentadores de recalentamiento) se marcan usando el prefijo "RSH"; y los supercalentadores secundarios se marcan usando el prefijo "SSH". Adicionalmente, se muestran economizadores, indicados por el prefijo "ECON". Las cabezas de entrada se indican por el sufijo "IN" mientras que las cabezas de salida se indican por el sufijo "OUT".

Como se muestra en la **FIG. 3**, hay cuatro supercalentadores primarios dispuestos en el paso de convección trasero **19**. Tres de ellos emplean tubos horizontales y de la más baja a la más alta elevación se indican como PSH1, PSH2 y PSH3. El cuarto supercalentador primario PSH4 está en la máxima elevación y emplea caños

verticales. El flujo a través de los supercalentadores primarios está en orden secuencial por número, hacia arriba a través del paso de convección y el vapor supercalentado sale en la cabeza PSH OUT en el techo de la caldera.

5 Cuatro recalentadores RSH1, RSH2, RSH3 y RSH4 también se emplean. Tres de ellos (RSH1, RSH2 y RSH3) se disponen en el paso de convección frontal **17**, mientras que el cuarto recalentador RSH4 se dispone cerca de la parte superior del horno superior **14**. La tubería transversal
10 marcada con RSH XOVER transporta vapor de RSH3 en el paso de convección **18** a RSH4 en el horno superior **14**. El flujo de vapor va de una cabeza de entrada inferior RSH IN, a través de los recalentadores en orden secuencial, a una cabeza de salida RSH OUT mostrada en la izquierda del horno superior **14**
15 en la **FIG. 3**.

 Cuatro supercalentadores secundarios SSH1, SSH2, SSH3 y SSH4 se disponen en el horno superior **14** por debajo del cuarto recalentador RSH4. Los flujos de vapor supercalentados de la cabeza PSH OUT a la cabeza SSH IN
20 mostrada a la izquierda del horno superior **14**, luego hacia arriba sucesivamente a través de SSH1, SSH2, SSH3 y SSH4 y a la cabeza SSH OUT nuevamente mostrada a la izquierda del horno superior **14** por encima de la cabeza SSH IN.

 El circuito enfriado con vapor también incluye
25 largueros supercalentadores denotados como SH STRINGER en la

FIG. 3, que son alimentados de cabezas SH STRINGER IN en la parte superior del horno superior y luego fluyen a la cabeza de salida SH STRINGER OUT. Estos largueros soportan los supercalentadores secundarios. De modo similar, los largueros recalentadores son visibles, que soportan los recalentadores en el paso de convección frontal.

Haciendo referencia ahora a la **FIG. 4**, se muestra una ilustración más detallada de los componentes que forman el circuito enfriado con vapor y sus interconexiones. El circuito enfriado con vapor comienza a la salida de vapor seco **56** del separador de vapor **54**. Yendo corriente abajo desde el separador de vapor, el vapor seco que corre corriente abajo fluye primero desde la salida de vapor seco **56** a través del techo **90** de la caldera **10**. El vapor seco también fluye hacia debajo de la pared trasera **128** del paso de convección **18**. El vapor seco que fluía hacia debajo de la pared trasera **128** fluye luego hasta las paredes laterales del paso de convección **124**, **126** y los soportes del larguero del recalentador **91** y luego hacia la pared deflectora superior. El vapor seco del techo **90** de la caldera fluye hasta la pared deflectora inferior.

Las dos corrientes de vapor supercalentado seco de la pared deflectora superior y la pared deflectora inferior se combinan luego y fluyen a los supercalentadores primarios **60** (es decir PSH1, PSH2, PSH3, PSH4 en la FIG. 3). Observar

que el vapor supercalentado pasa a través de todos los cuatro supercalentadores primarios; el vapor no se divide, de modo tal que sólo una porción fluya a través de cada supercalentador primario. El vapor supercalentado va hacia

5 arriba a la cabeza PSH OUT (ver la **FIG. 3**). La corriente de vapor supercalentado va luego hacia abajo a través de los largueros supercalentadores (marcados SH STRINGER) en el horno superior. Desde allí, la corriente de vapor supercalentado va hacia arriba a través de la pared frontal

10 del horno superior **110** y la pared de membrana enfriada con vapor común **80** (que actúa como la pared trasera del horno superior). El vapor supercalentado va luego hacia arriba a través de las paredes laterales del horno superior **114, 116**. A continuación, el vapor supercalentado va hacia arriba a

15 través de los supercalentadores secundarios **64**. Nuevamente, el vapor supercalentado pasa a través de todos los cuatro supercalentadores secundarios (SSH1, SSH2, SSH3 y SSH4). Después de pasar a través de los supercalentadores secundarios, el vapor supercalentado tiene una presión de

20 2000 psig o más y, en algunos casos, 2500 psig o más, como aproximadamente 2600 psig. El vapor supercalentado también tiene una temperatura de 1000 °F o más, como de aproximadamente 1050 °F. El vapor supercalentado se envía luego a una turbina de alta presión **92**, donde la energía

25 térmica se usa para generación de energía eléctrica. El vapor

supercalentado pierde tanto temperatura como presión dentro de la turbina de alta presión **92**. El rendimiento de la turbina de alta presión se envía luego de regreso a la caldera **10** y se envía a través de los recalentadores **62**.

5 Después de pasar a través de los recalentadores, el vapor tiene una presión de 500 psig o más, como de aproximadamente 600 psig y también tiene una temperatura de 1000 °F o más, como de aproximadamente 1050 °F. Este vapor supercalentado se puede usar luego para hacer funcionar una turbina a baja
10 presión.

Volviendo a la **FIG. 4**, el agua regresa desde la turbina a baja presión. Esta agua pasa a través de un condensador (COND), una bomba de alimentación de la caldera (BFP) y un calentador de agua de alimentación (FWH) antes de
15 enviar al economizador (ECON) para absorber energía de calor residual del gas de combustión que sale del paso de convección. Desde allí, el agua calentada desde el economizador se envía al separador de vapor **54**. En el circuito enfriado con agua, el agua se envía desde el
20 separador de vapor hasta la cabeza de entrada del horno inferior **50**, que alimenta las paredes de membrana enfriadas con agua del horno inferior **12**. El vapor húmedo se recolecta de la cabeza de salida del horno inferior **52** y se envía al separador de vapor **54** para la separación en agua y vapor
25 seco.

El circuito enfriado con vapor de la **FIG. 3** y la **FIG. 4** es meramente un ejemplo ilustrativo y en otras formas de realización, la cantidad y las ubicaciones de los supercalentadores pueden ser diferentes, así como la
5 disposición de las diversas paredes de membrana enfriadas con vapor y componentes supercalentadores en el circuito enfriado con vapor. El horno ilustrativo de la **FIG. 1** con el circuito de vapor enfriado con vapor ilustrativo de la **FIG. 3** y la **FIG. 4** se modeló usando software de modelación sólida 3D y se
10 determinó a partir de este análisis para proporcionar mayor rendimiento que incluye una temperatura/presión del supercalentador de 1050 °F/2600 psig y una temperatura/presión del recalentador de 1050 °F/600 psig, para una caldera diseñada para proporcionar 150 MW a 300 MW
15 de potencia neta.

Un problema potencial con el diseño del horno de la **FIG. 1** es que, durante la puesta en marcha, no hay vapor que pase a través de las paredes de membrana enfriadas con vapor del horno superior. Cuando la caldera **10** primero se enciende,
20 el gas de combustión caliente fluye a través de estas paredes de membrana enfriadas con vapor. Durante la operación en estado estable, el vapor seco dentro de las paredes de la membrana absorberá energía térmica, reduciendo así la temperatura de los caños y la membrana de la pared de
25 membrana, así como reduciendo la temperatura del gas de

combustión. Durante la puesta en marcha, sin embargo, hay muy poco vapor a lo largo de la caldera. Como resultado, los estreses térmicos en las paredes de membrana enfriadas con vapor del horno superior son mayores que durante la operación en estado estable.

La **FIG. 5** ilustra un circuito de vapor que proporciona una solución a este problema de estrés por la puesta en marcha, que aprovecha en rendimiento de vapor seco a la salida de vapor seco **56** del separador de vapor **54**. Este vapor seco ya no se supercalienta. Como se ve en la **FIG. 5**, los circuitos de puesta en marcha del circuito de vapor incluyen una vía de desvío de válvulas **100** que conecta la salida de vapor seco **56** del separador de vapor **54** más directamente con las paredes de membrana enfriadas con vapor del horno superior **14**. La vía de desvío de válvulas **100** se conecta con uno o varias válvulas de desvío **102** (aquí se muestran cuatro). La vía de desvío **100** desvía el flujo de la salida de vapor seco **56** del separador de vapor **54** a las paredes de membrana enfriadas con vapor del horno superior **14**. Los circuitos de puesta en marcha también incluyen una o varias válvulas de reducción **104** (aquí se muestran dos) ubicadas en el circuito enfriado con vapor corriente abajo de los supercalentadores primarios **60**. Un controlador de puesta en marcha **106**, por ejemplo, una computadora u otro dispositivo de control electrónico opera las válvulas **102**,

104 para establecer: (1) un modo de puesta en marcha en el que las válvulas de desvío **102** se abren para abrir la vía de desvío **100** y válvulas de reducción **104** se cierran (total o parcialmente según se desee) para reducir el flujo a través de los supercalentadores primarios **60** parcialmente desviados y el paso de convección **18**; o (2) un modo operativo normal en el que válvulas de desvío **102** se cierran para clausurar la vía de desvío **100** y válvulas de reducción **104** se abren para permitir el flujo completo a través de los supercalentadores primarios **60** y el paso de convección **18**.

Cuando las válvulas de desvío **102** se abren y las válvulas de reducción **104** se cierran parcialmente porque las paredes del horno superior proporcionan la vía de resistencia al flujo más baja, el vapor seco tenderá a fluir a través de las paredes del horno superior en vez de fluir a través del techo y el paso de convección. La presencia del vapor seco en las paredes del horno superior protegerá a los tubos del horno superior de una diferencia excesiva de temperatura y también enfriará el gas combustible. Como resultado, el pasaje de gas de combustión a través del paso de convección **18** no estresará excesivamente las paredes del paso de convección, incluso a pesar de que el vapor seco no está presente en grandes cantidades en estas paredes enfriadas con vapor durante la puesta en marcha.

El gas de combustión calentado también fluye por

las paredes de membrana enfriadas con vapor del paso de convección **18**; sin embargo, el gas de combustión se habrá enfriado sustancialmente en este punto, de modo que los estreses térmicos de puesta en marcha primarios se produzcan
5 en el horno superior **14**.

Continuando con la referencia a la **FIG. 5** y con la referencia a la **FIG. 6**, se muestra una secuencia de puesta en marcha típica. Las válvulas de desvío **102** se pueden ajustar en algunas formas de realización sobre la base de una
10 temperatura termopar que se lee en los cabezales de salida de las paredes del horno superior, de modo que no se exceda un límite de temperatura para las paredes. Para paredes de membrana típicos, el límite de uso es de aproximadamente 1000 °F, de modo que el vapor seco proveniente de la salida del
15 separador **56** sea suficiente para enfriar las paredes de membrana.

En la **FIG. 6**, la tasa de disparo indica la cantidad relativa de calor que es generado por la caldera. La caldera se ejecuta a aproximadamente el 10% durante cuatro horas
20 usando aceite antes de que la caldera suba al 100% de su capacidad. Esto permite la formación de vapor suficiente para llevar los tubos enfriados con vapor. Durante las dos primeras horas, la vía de desvío de vapor **100** se abre y luego se cierra para permitir que el vapor llene las paredes del
25 paso de convección. Después de cuatro horas, la turbina a

alta presión se carga también por completo y el combustible cambia a carbón. La tasa de disparo, el flujo de vapor y la presión de aceleración luego se incrementan hasta sus valores operativos en estado estable.

5 Ventajosamente, el suministro de vapor para la puesta en marcha usando este enfoque viene del separador de vapor **54**. Esto permite que la caldera **10** se ponga en servicio sin el uso de vapor auxiliar y/o una caldera de vapor auxiliar. Nuevamente se apreciará que el enfoque descrito
10 para enfriar las paredes de membrana durante la puesta en marcha se pueda emplear en un amplio rango de calderas además de la caldera ilustrativa **10** de la **FIG. 1**.

La presente descripción se describió con referencia a las formas de realización de ejemplo. Obviamente, se
15 producirán modificaciones y alteraciones después de leer un comprender la descripción detallada precedente. Se pretende que la presente descripción se interprete como inclusiva de todas estas modificaciones y alteraciones, siempre y cuando estén dentro del alcance de las reivindicaciones anexas o sus
20 equivalentes.