

“CALDEIRA SUBCRÍTICA DE ALTA TEMPERATURA COM FORNO SUPERIOR RESFRIADO A VAPOR E MÉTODOS DE PARTIDA”

ANTECEDENTES

[001]A presente revelação diz respeito às técnicas de caldeira, com modalidades ilustrativas incluindo caldeiras subcríticas, caldeiras subcríticas de circulação natural, caldeiras com queima de carvão, caldeiras subcríticas com queima de carvão, caldeiras subcríticas de circulação natural com queima de carvão, e a métodos de fabricar e operar as mesmas.

[002]Caldeiras pequenas com queima de carvão encontram aplicação em configurações distintas, tais como onde exigências de energia são relativamente baixas (por exemplo, áreas rurais, regiões subdesenvolvidas), onde carvão está prontamente disponível e assim por diante. Caldeiras pequenas com queima de carvão típicas para geração de energia elétrica empregam um projeto de circulação natural subcrítica. Um exemplo de um projeto de caldeira como este é o projeto de Caldeira de Radiação do Tipo Carolina da Babcock & Wilcox. Este projeto emprega um forno com paredes de forno resfriadas a água providas de membranas que alimentam um ou mais tambores de vapor. Água passando pelas paredes de forno absorve energia térmica, resfriando de fato os tubos/conduitos expostos diretamente ao calor de combustão. O(s) tambor(s) de vapor alimenta(m) um ou mais superaquecedores primários localizados dentro de uma passagem de convecção, e um ou mais superaquecedores pendentes secundários localizados dentro da parte superior do forno. Este vapor superaquecido é usado para acionar uma turbina de alta pressão. O vapor saindo da turbina de alta pressão é então enviado através de reaquadadores para aumentar a temperatura de novo, de maneira que o vapor pode então ser usado para acionar uma turbina de baixa pressão.

[003]Tubos ou conduitos resfriados a água são projetados para carregar vapor úmido (isto é, uma mistura de vapor/água, ou de modo equivalente, qualidade

de vapor menor que 100%). Para uma dada pressão de operação, a temperatura de vapor úmido é limitada termodinamicamente à temperatura de ebulição de água líquida na dada pressão de operação. Na prática, tubos resfriados a água são projetados para uma temperatura de operação de cerca de 650–670 °F (343,33–354,44 °C), correspondendo a uma pressão de operação de cerca de 2.200-2.600 psig (15.168,46-17.926,37 kPa). Em uma caldeira subcrítica, tubos resfriados a água carregam vapor úmido para o tambor de vapor.

[004]Em contraste, tubos ou condutos resfriados a vapor são projetados para carregar vapor superaquecido tendo uma qualidade de vapor de 100% (isto é, nenhum componente líquido). A temperatura de vapor superaquecido não é limitada termodinamicamente para uma dada pressão, e em projetos do Tipo Carolina os superaquecedores resfriados a vapor de uma maneira geral carregam vapor superaquecido em temperaturas de cerca de 1.000-1.050 °F (537,78-565,55 °C).

[005]Por causa das diferenças em temperatura, tubos resfriados a água podem ser feitos de aço carbono de custo mais baixo, enquanto que tubos resfriados a vapor são feitos de composições de aço muito caras. Um projeto tal como o da Caldeira de Radiação do Tipo Carolina vantajosamente aproveita estes fatores ao projetar o forno total para ser resfriado a água, de maneira que as paredes providas de membranas podem usar tubos de aço carbono de custo mais baixo e conectando membranas. Os componentes de superaquecedor de liga mais alta ficam localizados dentro do forno e passagem de convecção (isto é, dentro das paredes da caldeira), e não são providos de membranas. Em tais projetos, as paredes resfriadas a água providas de membranas de uma maneira geral ficam mais frias do que o gás de combustão ao qual os superaquecedores resfriados a vapor são expostos, por causa de transferência de calor mais eficiente para a mistura de vapor/água carregada pelos tubos resfriados a água.

[006]Em certas aplicações, é desejável obter vapor em altas temperaturas

após superaquecimento e após reaquecimento, por exemplo, de cerca de 1.050 °F (565,55 °C) após ambos os ciclos. Isto pode ser difícil em projetos pequeno, e projetos e métodos adicionais são necessários para obter tais temperaturas altas.

DESCRIÇÃO RESUMIDA

[007]A presente revelação assim diz respeito às caldeiras subcríticas pequenas de alta pressão que podem ter circulação natural e alcançar altas temperaturas de superaquecedor de cerca de 1.050 °F (537,78 °C). De uma maneira geral, o forno inferior de tais caldeiras usa tubos/conduitos resfriados a água, e o forno superior usa tubos/conduitos resfriados a vapor. Dito de outro modo, o forno superior da caldeira é feito de tubos/conduitos de superaquecedor. Os tubos resfriados a vapor do forno superior tipicamente ficam perto da extremidade dos arranjos de superfícies de superaquecimento na caldeira. Entretanto, isto pode fazer causar exposição a tensões térmicas excessivas durante partida. Na presente revelação, um caminho de desvio é acionado durante partida para contornar as outras superfícies de superaquecimento e desviar vapor seco diretamente para os tubos resfriados a vapor no forno superior.

[008]É revelada em várias modalidades neste documento uma caldeira compreendendo: um forno incluindo queimadores e paredes de membranas resfriadas a vapor, as paredes de membranas resfriadas a vapor compreendendo tubos selados por membrana; um separador de vapor tendo uma saída de vapor seco; um circuito resfriado a vapor conectado à saída de vapor seco do separador de vapor, o circuito resfriado a vapor incluindo pelo menos (i) um superaquecedor primário compreendendo tubos sem membrana e (ii) as paredes de membranas resfriadas a vapor do forno, em que as paredes de membranas resfriadas a vapor do forno ficam localizadas a jusante do superaquecedor primário no circuito resfriado a vapor; e conjunto de circuitos de controle de partida configurado para (i) contornar o superaquecedor primário e (ii) desviar fluxo da saída de vapor seco do separador de

vapor para as paredes de membranas resfriadas a vapor do forno.

[009]O conjunto de circuitos de controle de partida pode incluir: pelo menos uma válvula de desvio que quando aberta conecta operacionalmente a saída de vapor seco do separador de vapor às paredes de membranas resfriadas a vapor do forno; e pelo menos uma válvula de redução no circuito resfriado a vapor que é operativa para reduzir fluxo através do superaquecedor primário.

[010]O conjunto de circuitos de controle de partida pode incluir adicionalmente um controlador eletrônico configurado para colocar o conjunto de circuitos de controle de partida em um de: um modo de partida no qual a pelo menos uma válvula de desvio está aberta e a pelo menos uma válvula de redução está operada para reduzir fluxo através do superaquecedor primário; ou um modo de operação normal no qual a pelo menos uma válvula de desvio está fechada e a pelo menos uma válvula de redução está totalmente aberta.

[011]Em outras modalidades, o conjunto de circuitos de controle de partida inclui: um caminho de desvio provido de válvulas conectando a saída de vapor seco do separador de vapor às paredes de membranas resfriadas a vapor do forno; e pelo menos uma válvula de redução no circuito resfriado a vapor que é operativa para reduzir fluxo através do superaquecedor primário. O conjunto de circuitos de controle de partida pode incluir adicionalmente um controlador eletrônico configurado para colocar o conjunto de circuitos de controle de partida em um de: um modo de partida no qual o caminho de desvio provido de válvulas está aberto e a pelo menos uma válvula de redução está operada para reduzir fluxo através do superaquecedor primário; ou um modo de operação normal no qual o caminho de desvio provido de válvulas está fechado e a pelo menos uma válvula de redução está totalmente aberta.

[012]A caldeira pode compreender adicionalmente um superaquecedor secundário localizado a jusante das paredes de membranas resfriadas a vapor do

forno no circuito resfriado a vapor.

[013]O forno pode incluir: um forno superior resfriado a vapor tendo as paredes de membranas resfriadas a vapor; e um forno inferior resfriado a água formado por paredes de membranas resfriadas a água que compreendem tubos selados por membrana, as paredes de membranas resfriadas a água não estando incluídas no circuito resfriado a vapor conectado à saída de vapor seco do separador de vapor.

[014]Também é revelada em várias modalidades neste documento uma caldeira, compreendendo: um forno incluindo pelo menos uma parede de membrana resfriada a vapor, a pelo menos uma parede de membrana resfriada a vapor compreendendo tubos selados por membrana; um separador de vapor tendo uma saída de vapor seco; um ou mais superaquecedores primários compreendendo tubos sem membrana; um circuito resfriado a vapor se estendendo da saída de vapor seco para o um ou mais superaquecedores primários e subsequentemente para a pelo menos uma parede de membrana resfriada a vapor do forno, e contendo uma ou mais válvulas de redução entre o um ou mais superaquecedores primários e a pelo menos uma parede de membrana resfriada a vapor do forno; um caminho de desvio se estendendo da saída de vapor seco através de uma ou mais válvulas de desvio para uma localização a montante da pelo menos uma parede de membrana resfriada a vapor do forno e a jusante do um ou mais superaquecedores primários; e conjunto de circuitos de controle para comutar fluxo de vapor seco proveniente do separador de vapor através do circuito resfriado a vapor ou do caminho de desvio.

[015]O conjunto de circuitos de controle pode incluir um controlador eletrônico configurado para operar a uma ou mais válvulas de redução e a uma ou mais válvulas de desvio.

[016]A caldeira pode compreender adicionalmente uma passagem de convecção formada por paredes de membranas de passagem de convecção

resfriadas a vapor, as paredes de membranas de passagem de convecção estando localizadas a montante do um ou mais superaquecedores primários no circuito resfriado a vapor.

[017]A caldeira também pode compreender adicionalmente superaquecedores secundários compreendendo tubos sem membrana, os superaquecedores secundários estando localizados a jusante da pelo menos uma parede de membrana resfriada a vapor do forno no circuito resfriado a vapor.

[018]O forno pode incluir: um forno superior resfriado a vapor tendo um forno superior que inclui a pelo menos uma parede de membrana resfriada a vapor; e um forno inferior resfriado a água formado por paredes de membranas resfriadas a água, as paredes de membranas resfriadas a água não estando incluídas no circuito resfriado a vapor conectado à saída de vapor seco do separador de vapor.

[019]Também são revelados neste documento métodos de partida de caldeira para iniciar uma caldeira tendo um separador de vapor, paredes de membranas resfriadas a vapor formando pelo menos uma parte de um forno, e um superaquecedor primário colocado em um circuito resfriado a vapor entre uma saída de vapor seco do separador de vapor e as paredes de membranas resfriadas a vapor, os métodos compreendendo: reduzir fluxo de vapor seco através do circuito resfriado a vapor; e desviar fluxo de vapor seco através de um caminho de desvio que se estende da saída de vapor seco para uma localização a montante das paredes de membranas resfriadas a vapor do forno e a jusante do superaquecedor primário, em que o caminho de desvio contorna o superaquecedor primário.

[020]O desviar pode compreender abrir uma válvula de desvio a montante do superaquecedor primário. O reduzir pode compreender fechar uma válvula de redução localizada no circuito resfriado a vapor a jusante do superaquecedor primário.

[021]O método de partida de caldeira pode compreender adicionalmente:

acender a caldeira usando óleo como combustível; terminar a redução e desvio responsivos a uma condição de alteração (por exemplo, tempo, temperatura, pressão, combinações dos mesmos); e após o término mudar de usar óleo como combustível para usar carvão como combustível.

[022]O circuito resfriado a vapor pode compreender adicionalmente paredes de membranas de passagem de convecção resfriadas a vapor, as paredes de membranas de passagem de convecção estando localizadas a montante do superaquecedor primário no circuito resfriado a vapor. O circuito resfriado a vapor também pode compreender adicionalmente superaquecedores secundários compreendendo tubos sem membrana, os superaquecedores secundários estando localizados a jusante das paredes de membranas resfriadas a vapor do forno no circuito resfriado a vapor.

[023]Estes e outros aspectos e/ou objetivos não limitativos da revelação são descritos mais detalhadamente a seguir.

DESCRIÇÃO RESUMIDA DOS DESENHOS

[024]O exposto a seguir é uma descrição resumida dos desenhos, os quais são apresentados para o propósito de ilustrar modalidades reveladas neste documento e não para o propósito de limitar as mesmas.

[025]A figura 1 mostra diagramaticamente uma vista seccional lateral de uma caldeira ilustrativa. Os suplementos A, B e C ilustram partes de tubulação.

[026]A figura 2 é uma vista seccional transversal superior da caldeira da figura 1 através do forno superior ao longo da linha A-A da figura 3.

[027]A figura 3 mostra diagramaticamente uma vista seccional lateral mais detalhada de uma parte da caldeira da figura 1 incluindo um leiaute ilustrativo de superaquecedores.

[028]A figura 4 mostra diagramaticamente um circuito de resfriamento da caldeira da figura 1 e da figura 2.

[029]A figura 5 mostra diagramaticamente o circuito de resfriamento da figura 4 com conjunto de circuitos de controle de partida tal como descrito neste documento.

[030]A figura 6 representa graficamente de forma diagramática uma sequência de partida típica executada usando o conjunto de circuitos da figura 5. A tabela suplementar mostra configurações de válvulas de conjunto de circuitos de partida para os modos de partida e de operação normal. O eixo x é o tempo em horas, e se estende de 0 a 8 com intervalos de 1 hora. O eixo y do lado esquerdo é a pressão em psig (6,89 kPa), e se estende de 0 a 2.500 em intervalos de 500. O eixo y do lado direito é a % de fluxo de vapor e queima, e se estende a 0 a 100 em intervalos de 10. Existem três linhas para pressão de redução, taxa de queima e fluxo de vapor. A pressão de redução é lida no eixo y do lado esquerdo, e a taxa de queima e fluxo de vapor são lidos no eixo y do lado direito.

DESCRIÇÃO DETALHADA

[031]Um entendimento mais completo dos processos e aparelhos revelados neste documento pode ser obtido por meio da referência aos desenhos anexos. Estas figuras são meramente representações esquemáticas baseadas na conveniência e na facilidade para demonstrar a técnica existente e/ou o presente desenvolvimento, e, portanto, não são pretendidas para indicar tamanhos e dimensões relativos das montagens ou componentes das mesmas.

[032]Embora termos específicos sejam usados na descrição a seguir com o propósito de clareza, estes termos são pretendidos para se referir somente à estrutura particular das modalidades selecionadas para ilustração nos desenhos, e não são pretendidos para definir ou limitar o escopo da revelação. Nos desenhos e na descrição a seguir a seguir, é para ser entendido que designações numéricas semelhantes se referem a componentes de função semelhante.

[033]O modificador “de cerca de” usado em conexão com uma quantidade é

inclusivo do valor relatado e tem o significado ditado pelo contexto (por exemplo, ele inclui pelo menos o grau de erro associado com a medição da quantidade particular). Quando usado com um valor específico, ele também deve ser considerado como revelando esse valor. Por exemplo, o termo “de cerca de 2” também revela o valor “2” e a faixa “de cerca de 2 a cerca de 4” também revela a faixa “de 2 a 4”.

[034]Deve ser notado que muitos dos termos usados neste documento são termos relativos. Por exemplo, os termos “entrada” e “saída” são em relação a uma direção de fluxo, e não devem ser interpretados como exigindo uma orientação ou localização particular da estrutura. Os termos “a montante” e “a jusante” são em relação à direção na qual um fluido flui através de vários componentes, isto é, o fluido flui através de um componente a montante antes de fluir através do componente a jusante. Deve ser notado que em um laço um primeiro componente pode ser descrito como estando tanto a montante quanto a jusante de um segundo componente. De modo similar, os termos “superior” e “inferior” são um em relação ao outro em localização, isto é, um componente superior está localizado em uma elevação maior que a de um componente inferior.

[035]Os termos “horizontal” e “vertical” são usados para indicar direção em relação a uma referência absoluta, isto é, o nível do solo. Entretanto, estes termos não devem ser interpretados como exigindo que estruturas sejam absolutamente paralelas ou absolutamente perpendiculares umas às outras. Por exemplo, uma primeira estrutura vertical e uma segunda estrutura vertical não são necessariamente paralelas uma à outra.

[036]Os termos “topo” e “fundo” ou os termos “teto” e “pisso” são usados para se referir às localizações/superfícies onde o topo/teto está sempre mais alto que o fundo/pisso em relação a uma referência absoluta, isto é, a superfície da terra. Os termos “para cima” e “para baixo” também são em relação a uma referência absoluta; um fluxo para cima está sempre contra a gravidade da terra.

[037]O termo “plano” é usado neste documento para se referir de uma maneira geral a um nível comum, e deve ser interpretado como se referindo a um volume, e não como uma superfície plana.

[038]Um fluido em uma temperatura que está acima de sua temperatura de saturação em uma dada pressão é considerado como estando “superaquecido”. A temperatura de um fluido superaquecido pode ser abaixada (isto é, transferir energia) sem mudar a fase do fluido. Tal como usado neste documento, o termo “vapor úmido” se refere a uma mistura de vapor saturado/água (isto é, vapor com menos que qualidade de 100%, onde qualidade é a porcentagem de conteúdo de vapor em massa). Tal como usado neste documento, o termo “vapor seco” se refere a vapor tendo uma qualidade igual ou de cerca de 100% (isto é, água líquida não está presente).

[039]Os termos “tubos” e “condutos” são usados de modo permutável neste documento para se referir a uma forma cilíndrica oca, tal como é comumente entendido.

[040]O termo “circulação natural”, tal como usado neste documento, se refere à circulação de água através da caldeira por causa de diferenças em densidade à medida que a água é aquecida. Circulação de água pode ocorrer sem a necessidade de uma bomba mecânica.

[041]Para a extensão em que explicações de certa terminologia ou princípios das técnicas de caldeira e/ou de gerador de vapor podem ser necessárias para entender a presente revelação, o leitor deve recorrer a “Steam/its generation and use”, Quadragésima Segunda Edição, editado por G.L. Tomei, Direitos Autorais 2015, Babcock & Wilcox Company, ISBN 978-0-9634570-2-8, cujo texto está incorporado a este documento pela referência tal como se totalmente exposto neste documento.

[042]Pressões de vapor úmido maiores não são desejadas para muitas

aplicações de caldeiras pequenas por causa de questões de custo e de segurança (por exemplo, parede de tubo e espessuras de membranas mínimas maiores). Em uma caldeira pequena usando somente paredes de forno resfriadas a água é difícil ou impossível alcançar temperaturas de saída de superaquecedor e de reaquadecor, ambas em 1.050 °F (565,55 °C), para geração de energia líquida de 150-300 MW, porque não é possível fornecer área de superfície de superaquecedor / reaquadecor suficiente para transferência de calor para o vapor seco para obter tais temperaturas altas.

[043]Uma alternativa possível é empregar um projeto de caldeira de passe único sem tambor, tal como um dos projetos de caldeiras de Pressão Universal da Babcock & Wilcox. Entretanto, estes projetos empregam geração de vapor de passe único. Em um projeto de passe único, o ponto de transição de vapor úmido para vapor superaquecido depende de condições de operação, em vez de ser definido usando um separador de vapor (por exemplo, um tambor de vapor). Como um resultado, tubulação mais cara tipicamente é usada para todos os tubos/conduitos em tais projetos de passe único para segurança. Isto resulta em custos de capital aumentados.

[044]Nos projetos de caldeiras subcríticas da presente revelação, o forno é dividido em duas seções: um forno inferior usando paredes de membranas resfriadas a água que alimenta o separador de vapor, e um forno superior usando paredes de membranas resfriadas a vapor que é alimentado (diretamente ou indiretamente) pela saída de vapor seco do separador de vapor. Esta abordagem vantajosamente capacita aço carbono de custo mais baixo para ser usado para as paredes de forno inferior, com tubulação mais cara sendo usada somente no forno resfriado a vapor superior (incluindo as paredes de caminho de convecção em algumas modalidades). Custo é reduzido ao manter o separador de vapor. Uma temperatura de saída de vapor mais alta é alcançável porque o uso de um forno

superior resfriado a vapor e de paredes de passagem de convecção fornece área de superfície adicional para transferência de calor dos gases de combustão/forno para o vapor seco dentro das paredes resfriadas a vapor, resultando em vapor superaquecido de temperaturas desejadas. De novo, tais temperaturas de vapor superaquecido altas não podem ser obtidas com paredes resfriadas a água convencionais no forno superior.

[045]Em algumas modalidades, melhoramento adicional é alcançado em um projeto como este ao reduzir a seção transversal do forno resfriado a vapor superior quando comparado com a do forno resfriado a água inferior. Isto aumenta velocidade de fluxo de gás de combustão no forno resfriado a vapor superior quando comparada com a do forno resfriado a água inferior, o que fornece transferência de calor mais eficiente no caminho de gás de alta temperatura, e também reduz a quantidade de materiais e custo de fabricação.

[046]Em projetos de Caldeira de Radiação do Tipo Carolina, a passagem de convecção fica espaçada ao lado do forno por uma passagem de convecção horizontal cujo comprimento horizontal cria um espaçamento entre o forno e a passagem de convecção. Como um resultado, no projeto de Caldeira de Radiação do Tipo Carolina, o forno inclui uma parede traseira e a passagem de convecção inclui uma parede dianteira. Em um projeto dobrado, estas duas paredes são combinadas em uma parede. Na presente revelação, uma parede comum resfriada a vapor provida de membranas é usada para separar a passagem para cima de forno superior e a passagem de convecção adjacente. Isto elimina a passagem aberta entre o forno e a passagem de convecção, fornecendo compacidade aperfeiçoada para a caldeira e reduz a quantidade de materiais e custo de fabricação.

[047]Estes benefícios expostos anteriormente são alcançados ao substituir o forno resfriado a água convencional por um projeto de duas partes em que o forno superior é resfriado a vapor. Entretanto, uma modificação como esta tem certas

potenciais desvantagens. Custo de material total é aumentado por causa da liga de custo mais alto usada no forno superior, mas isto pode ser mitigado por meio de abordagens reveladas neste documento (por exemplo, seção transversal de forno superior reduzida, empregar uma parede resfriada a vapor comum entre o forno e a passagem de convecção). Uma outra potencial desvantagem são as complicações estruturais para o arranjo suportado pelo topo preferido. Isto surge potencialmente por causa de os tubos de forno inferior preferivelmente serem de aço carbono para reduzir custo, enquanto que os tubos de forno superior são de ligas de custo mais alto para compatibilidade com resfriamento a vapor. Uma dificuldade como esta também é encontrada em alguns fornos supercríticos de passe único que empregam tubos de aço carbono em uma seção de forno inferior para reduzir custo. Um exemplo de um projeto como este é a caldeira Spiral Wound Universal Pressure (SWUP) da Babcock & Wilcox. No projeto de caldeira supercrítica de passe único SWUP, a parte de forno resfriado a água inferior é suportada pelo topo por meio de componentes de suporte de forno inferior dedicados que se conectam com o suporte de caldeira superior por meio de um conjunto de hastes e/ou conexões de amarração verticais para os tubos de forno superior resfriados a água. A montagem resultante é complicada já que o forno inferior deve ser preso ao instalar seus componentes de suporte, seguido por executar a soldagem de tubos.

[048]Uma abordagem como esta empregando componentes de suporte de forno inferior dedicados também pode ser empregada em projetos de caldeiras subcríticas com um forno resfriado a vapor superior e forno resfriado a água inferior, tal como revelado neste documento. Entretanto, em algumas modalidades reveladas neste documento, tais peças fundidas de suporte dedicadas e operações de soldagem de tubos complexas concomitantes são eliminadas, e em seu lugar uma seção de transição com tubulação de transição integral é empregada. A seção de transição contém tanto tubos de água quanto tubos de vapor, e fornece uma

localização onde estes tubos podem ser estendidos para tubos de comunicação. Na seção de transição, pelo menos alguns tubos de transição são projetados para serem tubos orientados verticalmente, e suporte de forno inferior é alcançado por suporte de tensão por meio de soldas destes tubos de transição orientados verticalmente. A seção de transição é projetada para suportar duas vezes a carga do forno inferior. A seção de transição pode ser feita de um material de aço inoxidável fundido que é compatível com resfriamento a vapor - por esta razão ela é superdimensionada para os tubos de transição resfriados a água, mas a capacidade para manter suporte pelo topo para o forno inferior é mais importante que o custo adicional acarretado ao superdimensionar estes tubos de transição resfriados a água relativamente curtos. A seção de transição também age como uma vedação de pressão entre o forno inferior e o forno superior.

[049]Algumas modalidades ilustrativas de tais caldeiras subcríticas são mostradas diagramaticamente e descritas a seguir. Estas são meramente exemplos ilustrativos, e uma dada modalidade pode incluir um, dois, mais ou todos os recursos inéditos revelados descritos neste documento.

[050]A figura 1 e a figura 2 mostram vistas diferentes de uma caldeira subcrítica de circulação natural ilustrativa da presente revelação. A figura 1 é uma vista seccional lateral da caldeira total. A figura 2 é uma vista superior (plana) que atravessa o forno superior da caldeira.

[051]Com referência para a figura 1, uma caldeira subcrítica 10 está mostrada diagramaticamente. A caldeira 10 inclui um forno inferior 12 que é resfriado a água, um forno superior 14 que é resfriado a vapor e uma seção transicional 16 que em modalidades preferidas é formada de um fundido de transição de peça única. A caldeira ilustrativa 10 é um projeto de caldeira dobrada que inclui adicionalmente uma passagem de convecção 18 que é conectada ao forno superior 14 para formar o que pode ser considerado como uma passagem horizontal 20. As

paredes do forno inferior 12, a seção transicional 16, o forno superior 14 e a passagem de convecção 18 coletivamente definem a caldeira.

[052]O gás de combustão/forno 22 está indicado diagramaticamente pelas setas, e estes gases fluem através da caldeira e aquecem a água/vapor nas várias paredes da caldeira. Mais especificamente, ar de combustão é soprado para dentro do forno inferior 12 através de uma entrada de ar 24, onde ele é misturado com um combustível inflamável tal como carvão, óleo ou gás natural. Em algumas modalidades preferidas, o combustível é carvão, o qual é pulverizado por um pulverizador (não mostrado). Uma pluralidade dos queimadores 26 queima a mistura de combustível/ar, resultando em gás de combustão. O gás de combustão se eleva por meio de convecção natural através da passagem para cima formada pelo forno inferior 12, pela seção de transição 16 e pelo forno superior 14, então flui horizontalmente através da passagem de convecção, a qual inclui a passagem de convecção 18, e finalmente sai por uma saída de gás de combustão 28 para processamento adicional a jusante. Preferivelmente, uma tremonha 33 é fornecida para capturar cinza ou outros contaminantes no gás de combustão de saída.

[053]A caldeira subcrítica 10 é suportada pelo topo pela estrutura de construção por meio dos pontos de ancoragem superiores adequados 30. Estes estão indicados diagramaticamente na figura 1. Os tubos do forno superior 14 e da passagem de convecção 18 são orientados verticalmente e são suportados diretamente pelos pontos de ancoragem 30. Os tubos do forno inferior 12 também são orientados verticalmente e são suportados indiretamente por meio de soldas na seção de transição 16.

[054]É desejável capturar a energia térmica presente no gás de combustão/forno 22 para tarefas tais como acionar uma turbina de geração de energia elétrica (por exemplo). Para assim fazer, a caldeira subcrítica 10 inclui superfícies de resfriamento compreendendo tubos ou condutos através dos quais

vapor úmido flui (estes tubos ou condutos são referidos neste documento como resfriados a água) ou através dos quais vapor superaquecido flui (estes tubos ou condutos são referidos neste documento como resfriados a vapor). Mais particularmente, com referência para o Suplemento A da figura 1, o forno inferior 12 inclui os tubos resfriados a água 32 com a membrana 34 disposta entre e soldada aos tubos 32, de maneira que os tubos 32 e a membrana 34 coletivamente formam uma parede de membrana 36, com os tubos 32 carregando fluxo de vapor úmido através da parede de membrana 36. A parede de membrana 36 forma a barreira que contém o gás de combustão 22, isto é, a membrana 34 é soldada ou conectada de outro modo aos tubos 32 para fornecer uma vedação contra vazamento do gás de combustão 22. A parede de membrana resfriada a água 36 do forno inferior 12 não fica exposta a temperaturas de água muito elevadas; por exemplo, se a caldeira subcrítica 10 for projetada para uma pressão de vapor máxima de 2.800 psig (19.305,32 kPa), então o vapor saturado carregado pelos tubos resfriados a água 32 está em cerca de 685 °F (362,78 °C) (correspondendo ao ponto de ebulição da água em 2.800 psig (19.305,32 kPa)), contudo certamente o gás de combustão está em uma temperatura muito maior.

[055]O forno superior 14 e a passagem de convecção 18 são feitos analogamente de uma parede de membrana resfriada a vapor 46 compreendendo os tubos resfriados a vapor 42 com a membrana 44 disposta entre e soldada ou conectada de outro modo aos tubos 42 (ver o Suplemento B da figura 1), com os tubos 42 e a membrana 44 formando coletivamente a parede de membrana 46. Os tubos 42 carregam um fluxo de vapor superaquecido através da parede de membrana 46. A parede de membrana resfriada a vapor 46 carrega vapor em temperaturas de vapor substancialmente maiores que as da parede de membrana resfriada a água 36. Por exemplo, o vapor nas paredes de membranas resfriadas a vapor 46 pode estar em uma temperatura acima de 1.000 °F (537,78 °C), por

exemplo, até 1.050 °F (565,55 °C) em algumas modalidades consideradas. Deve ser notado que o topo 35 do forno e da passagem de convecção também é feito de parede de membrana resfriada a vapor. Também deve ser notado que o diâmetro dos tubos e o espaçamento entre os tubos das paredes de membranas resfriadas a vapor podem diferir entre o forno superior e a passagem de convecção.

[056]Os tubos 32 da parede de membrana resfriada a água de uma maneira geral têm um diâmetro maior que o dos tubos 42 da parede de membrana resfriada a vapor. Em modalidades particulares, o diâmetro interno dos tubos resfriados a água é pelo menos 0,5 polegada (12,7 milímetros) maior que o diâmetro interno dos tubos resfriados a vapor. Os tubos da parede de membrana resfriada a água têm um diâmetro interno de cerca de 1,5 polegada (38,1 milímetros) a cerca de 2,0 polegadas (50,8 milímetros), enquanto que os tubos da parede de membrana resfriada a vapor têm um diâmetro interno de cerca de 1,0 polegada (25,4 milímetros) a cerca de 2,5 polegadas (63,5 milímetros). Os tubos da parede de membrana resfriada a água têm um diâmetro externo de cerca de 2,0 polegadas (50,8 milímetros) a cerca de 2,5 polegadas (63,5 milímetros), enquanto que os tubos da parede de membrana resfriada a vapor têm um diâmetro externo de cerca de 1,3 polegada (33,1 milímetros) a cerca de 2,3 polegadas (58,4 milímetros). Os tubos propriamente ditos podem ter uma espessura de cerca de 0,2 polegada (5,1 milímetros) a cerca de 0,5 polegada (12,7 milímetros).

[057]Em um circuito de fluxo de vapor típico para a caldeira subcrítica 10, água é introduzida nas extremidades inferiores dos tubos resfriados a água 32 por meio de um tubo de comunicação de entrada inferior 50. À medida que a água se desloca para cima através destes tubos resfriados a água 32, a água resfria os tubos expostos ao gás de combustão de alta temperatura no forno inferior 12 e absorve energia do gás de combustão para se tornar uma mistura de vapor-água (isto é, vapor úmido) em pressão subcrítica.

[058]O vapor úmido sai das extremidades superiores dos tubos resfriados a água 32 e flui através de um tubo de comunicação de saída de vapor úmido 52 para uma entrada 53 de um separador de vapor 54. O tubo de comunicação de saída de vapor úmido 52 preferivelmente é soldado aos tubos de transição resfriados a água dentro da seção de transição 16. Preferivelmente, o tubo de comunicação de saída de vapor úmido 52 facilita ventilação dos tubos 32 tal como apropriado durante partida, desligamento ou manutenção, etc. Qualquer tipo de separador de vapor pode ser usado tal como, por exemplo, empregando separação ciclônica ou coisa que o valha. Em modalidades particulares, um separador de vapor vertical é usado, tal como aquele descrito na patente US 6.336.429. Uma saída de vapor seco 56 do separador de vapor 54 em uma extremidade superior do separador de vapor libera vapor substancialmente seco (isto é, vapor com qualidade de 100%). Uma drenagem ou saída de água 58 perto da extremidade inferior do separador de vapor 54 coleta água extraída do vapor úmido para reciclagem de volta para o tubo de comunicação de entrada inferior 50 alimentando o forno inferior 12.

[059]O vapor liberado pela saída de vapor seco 56 flui para a passagem de convecção 18 e então para o forno superior 14. Para fornecer superfície adicional para transferência de calor, um ou mais superaquecedores primários 60, reaquecedores 62 e/ou superaquecedores secundários 64 podem ser fornecidos no volume interno da caldeira, dentro do forno superior 14 e da passagem de convecção 18. Tal como ilustrado aqui, um ou mais superaquecedores 60 são dispostos na passagem de convecção 18; um ou mais reaquecedores (ou superaquecedores de reaquecimento) 62 são dispostos na passagem de convecção 18 e/ou no forno superior 14; e um ou mais superaquecedores secundários 64 são dispostos no forno superior 14. De novo, as paredes de forno resfriadas a vapor 46 do forno superior 14 também agem como superfícies de superaquecedor. Um circuito de vapor ilustrativo mais detalhado é descrito em desenhos posteriores. É

para ser entendido que o circuito de vapor ilustrativo é meramente um exemplo, e outras configurações de circuitos de vapor são consideradas; por exemplo, vários componentes de superaquecedor podem ser omitidos e/ou localizados em outro lugar, etc.

[060]De modo diferente ao das paredes de membranas 46 do forno superior resfriado a vapor 14 e da passagem de convecção 18, os superaquecedores 60, 62, 64 localizados dentro da caldeira são formados dos tubos/conduitos soltos 72 sem membranas unindo os tubos conjuntamente (ver o Suplemento C da figura 1). Estes superaquecedores 60, 62, 64 são dispostos no interior da caldeira, e desejavelmente permitem que gás de combustão passe através deles, aumentando a área de superfície por meio a qual transferência de calor do gás de combustão para o vapor dentro dos tubos pode ocorrer. Os tubos de superaquecedor 72 preferivelmente são feitos de um material de liga de aço. Em algumas modalidades, os tubos de superaquecedor 72 e a parede de membrana resfriada a vapor 46 são feitos do mesmo material de liga de aço, contudo isto não é exigido.

[061]Tal como visto na figura 1, os superaquecedores 60, 62, 64 são circundados pelas paredes de membranas resfriadas a vapor 46. Dito de um outro modo, os superaquecedores 60, 62, 64 são contidos dentro do forno superior 14 e/ou na passagem de convecção 18 tal como mostrado na caldeira ilustrativa 10 da figura 1. O vapor dentro das paredes de membranas resfriadas a vapor 46 pode estar na mesma ou em temperatura maior que aquela nos superaquecedores 60, 62, 64. Por causa da área de superfície adicional disponível para transferência de calor do gás de combustão para o vapor superaquecido dentro das várias superfícies de superaquecimento 46, 60, 62, 64, a caldeira 10 pode alcançar temperaturas de vapor superaquecido maiores que aquelas que seriam alcançáveis com uma caldeira subcrítica resfriada a água convencional cujas paredes de forno são totalmente resfriadas por vapor úmido fluindo através de tubos resfriados a água. Entretanto, a

caldeira subcrítica 10 mantém o leiaute geral de uma caldeira subcrítica, incluindo empregar o separador de vapor 54 disposto (em um sentido de fluxo de vapor) entre o subcircuito de vapor úmido e o subcircuito de vapor superaquecido, mantendo assim vantagens tais como a flexibilidade operacional de um projeto de caldeira subcrítica.

[062]A caldeira subcrítica ilustrativa 10 emprega certos recursos que aprimoram compacidade e eficiência. Um recurso é uma área seccional transversal reduzida para o fluxo de gás de combustão/forno 22 através do forno superior 14 quando comparada com a do forno inferior 12. A área seccional transversal referenciada é a seção transversal horizontal no projeto ilustrativo na qual o gás de combustão 22 flui verticalmente para cima. Na caldeira ilustrativa 10, a redução em área seccional transversal do forno superior 14 em relação ao forno inferior 12 é obtida por meio de uma superfície de “arco” 76, a qual é inclinada à medida que o forno superior continua para cima a partir da seção de transição 16, para reduzir turbulência na transição para maior velocidade de fluxo. Isto tem pelo menos dois benefícios. Primeiro, a área seccional transversal reduzida do forno superior 14 reduz a quantidade de material (por exemplo, área de superfície total da parede de membrana 46), o que reduz custo de capital. Segundo, a maior velocidade do fluxo de gás de combustão 22 por causa da área seccional transversal reduzida aumenta a eficiência de transferência de calor para os tubos resfriados a vapor 42, 72. A seção de transição 16 fica localizada abaixo da superfície de arco 76. A superfície de arco 76 é parte do forno superior, e também é uma parede de membrana resfriada a vapor.

[063]A figura 2 é uma vista plana seccional transversal (superior) da caldeira 10 através do forno superior 14, e fornece uma outra vista dos vários componentes. A parede dianteira 110 do forno superior está mostrada em linha cheia, tal como está a parede dianteira 112 do forno inferior. A área entre estas duas paredes é a

superfície de arco 76. O forno superior inclui uma primeira parede lateral 114 e uma segunda parede lateral 116 oposta à primeira parede lateral, ambas as quais são feitas das paredes de membranas resfriadas a vapor 42. O quarto lado do forno superior é definido por uma parede de membrana resfriada a vapor comum 80. A passagem de convecção é definida por uma primeira parede lateral 124, uma segunda parede lateral 126 oposta à primeira parede lateral e por uma parede traseira 128. Uma parede defletora 130 divide a passagem de convecção em uma passagem de convecção dianteira 17 e uma passagem de convecção traseira 19. Um superaquecedor primário 60 é visto na passagem de convecção traseira 19, enquanto que um reaquecedor 62 é visto na passagem de convecção dianteira 17 e um superaquecedor secundário 64 é visto dentro do forno superior 14.

[064]Um outro recurso que aprimora a compacidade e eficiência deste projeto de caldeira é o uso de uma parede de membrana resfriada a vapor comum 80. A parede de membrana resfriada a vapor comum 80 é tanto uma parede “traseira” do forno superior 14 quanto uma parede “dianteira” da passagem de convecção 18. O forno superior 14 e a passagem de convecção 18 compartilham assim a parede de membrana resfriada a vapor comum 80, a qual compreende uma camada única de tubos selados por uma camada única de membrana disposta entre e conectada à camada única de tubos. O uso da parede de membrana resfriada a vapor comum 80 tem inúmeras vantagens. A passagem aberta usual entre o forno e a passagem de convecção é eliminada, fornecendo um projeto mais compacto e reduzindo custos de capital por causa de área de superfície menor. A parede de membrana resfriada a vapor comum 80 vantajosamente é aquecida tanto por gás de combustão fluindo para cima através do forno superior 14 quanto por gás de combustão fluindo para baixo através da passagem de convecção 18.

[065]Um problema com empregar a parede de membrana resfriada a vapor comum 80 é a grande variação de temperatura entre a temperatura de gás de

combustão no forno superior 14, por um lado, e a temperatura de gás de combustão na passagem de convecção 18 pelo outro lado. Este diferencial entre as duas temperaturas de gás de combustão será sentido pela parede de membrana resfriada a vapor comum 80. Usando modelagem transitória e análise de elementos finitos para determinar a tensão resultante nas paredes da caldeira, foi descoberto que tensão diferencial térmica máxima ocorre durante partida, e mais particularmente ocorre em uma área pequena perto da parte inferior da parede de membrana resfriada a vapor comum 80 adjacente às paredes 114, 124 em um lado e às paredes 116, 126 no outro. Intuitivamente, isto pode ser entendido uma vez que esta parte mais inferior da parede de membrana resfriada a vapor comum 80 é onde existe o maior diferencial de temperatura entre o fluxo de gás de combustão para cima no forno superior 14 e o fluxo de gás de combustão para baixo na passagem de convecção 18. Esta tensão pode causar arqueamento/ruptura de caldeira, e é acomodada ao fornecer vedações na junção da parte inferior da parede de membrana resfriada a vapor comum 80, das paredes laterais de forno 114, 116 e das paredes laterais de passagem de convecção 124, 126, já que análise mostrou que a área tensionada em excesso não se estende significativamente para cima na parede de membrana resfriada a vapor comum 80. Estas vedações estão ilustradas na figura 2 com o número de referência 132.

[066]Deve ser notado que os vários melhoramentos revelados neste documento podem ser usados para vantagem individualmente ou em várias combinações, e/ou em vários tipos de caldeiras. Por exemplo, a parede de membrana resfriada a vapor comum 80 revelada também pode ser usada para auxiliar em um projeto de caldeira de passe único tendo uma passagem de convecção, ou em outros tipos de caldeiras tendo duas paredes de membranas resfriadas a vapor vizinhas.

[067]Com referência agora para as figuras 2-4, um circuito resfriado a vapor

ilustrativo é descrito que pode ser usado na caldeira 10 da figura 1. A figura 3 mostra uma vista seccional lateral do forno superior 14, da passagem de convecção 18 e da passagem horizontal 20 conectando os dois. Também estão mostradas renderizações mais detalhadas dos superaquecedores primários 60, reaquecedores 62 e dos superaquecedores secundários 64. Na figura 3 e na figura 4, os superaquecedores primários 60 estão identificados usando o prefixo "PSH"; os reaquecedores (isto é, superaquecedores de reaquecimento) estão identificados usando o prefixo "RSH"; e os superaquecedores secundários estão identificados usando o prefixo "SSH". Adicionalmente, economizadores estão mostrados, indicados pelo prefixo "ECON". Tubos de comunicação de entrada estão indicados pelo sufixo "IN" enquanto que tubos de comunicação de saída estão indicados pelo sufixo "OUT".

[068]Tal como mostrado na figura 3, existem quatro superaquecedores primários dispostos na passagem de convecção traseira 19. Três destes empregam tubos horizontais, e a partir da elevação mais baixa para a mais alta estão indicados como PSH1, PSH2 e PSH3. O quarto superaquecedor primário PSH4 fica na elevação mais alta e emprega tubos verticais. Fluxo através dos superaquecedores primários está na ordem sequencial pelo número, para cima através da passagem de convecção, e o vapor superaquecido sai pelo tubo de comunicação PSH OUT no topo da caldeira.

[069]Os quatro reaquecedores RSH1, RSH2, RSH3 e RSH4 também são empregados. Três destes (RSH1, RSH2 e RSH3) são dispostos na passagem de convecção dianteira 17, enquanto que o quarto reaquecedor RSH4 é disposto perto do topo do forno superior 14. Tubulação de cruzamento identificada por RSH XOVER transporta vapor do RSH3 na passagem de convecção 18 para o RSH4 no forno superior 14. Fluxo de vapor é proveniente de um tubo de comunicação de entrada inferior RSH IN, através dos reaquecedores em ordem sequencial e para um

tubo de comunicação de saída RSH OUT mostrado à esquerda do forno superior 14 na figura 3.

[070]Os quatro superaquecedores secundários SSH1, SSH2, SSH3 e SSH4 são dispostos no forno superior 14 abaixo do quarto reaquecedor RSH4. Vapor superaquecido flui do tubo de comunicação PSH OUT para o tubo de comunicação SSH IN mostrado à esquerda do forno superior 14, então para cima sucessivamente através do SSH1, SSH2, SSH3 e SSH4 e para o tubo de comunicação SSH OUT de novo mostrado à esquerda do forno superior 14 acima do tubo de comunicação SSH IN.

[071]O circuito resfriado a vapor inclui adicionalmente longarinas de superaquecedor denotadas de SH STRINGER na figura 3, as quais são alimentadas por tubos de comunicação SH STRINGER IN no topo do forno superior e subsequentemente fluem para o tubo de comunicação de saída SH STRINGER OUT. Estas longarinas suportam os superaquecedores secundários. De modo similar, longarinas de reaquecedor são visíveis que suportam os reaquecedores na passagem de convecção dianteira.

[072]Referindo-se agora à figura 4, uma ilustração mais detalhada dos componentes que formam o circuito resfriado a vapor e suas interligações está mostrada. O circuito resfriado a vapor começa na saída de vapor seco 56 do separador de vapor 54. Indo para jusante a partir do separador de vapor, vapor seco fluindo para jusante primeiro flui da saída de vapor seco 56 através do topo 90 da caldeira 10. Vapor seco também flui para baixo na parede traseira 128 da passagem de convecção 18. O vapor seco que fluiu para baixo na parede traseira 128 então flui para cima nas paredes laterais de passagem de convecção 124, 126 e nos suportes de longarina de reaquecedor 91, e então para trás para baixo na parede defletora superior. O vapor seco proveniente do topo 90 da caldeira flui para cima na parede defletora inferior.

[073]Os dois fluxos de vapor superaquecido seco provenientes da parede defletora superior e da parede defletora inferior são então combinados e fluem para dentro dos superaquecedores primários 60 (isto é, PSH1, PSH2, PSH3, PSH4 na figura 3). Favor notar que o vapor superaquecido flui através de todos os quatro superaquecedores primários; o vapor não é dividido de maneira que somente uma parte flua através de cada superaquecedor primário. O vapor superaquecido se desloca para cima para o tubo de comunicação PSH OUT (ver a figura 3). O fluxo superaquecido então se desloca para baixo através das longarinas de superaquecedor (identificadas por SH STRINGER) no forno superior. Daí, o fluxo superaquecido se desloca para cima através da parede dianteira de forno superior 110 e da parede de membrana resfriada a vapor comum 80 (agindo como a parede traseira de forno superior). O vapor superaquecido então se desloca para cima através das paredes laterais de forno superior 114, 116. A seguir, o vapor superaquecido se desloca para cima através dos superaquecedores secundários 64. De novo, o vapor superaquecido atravessa todos os quatro superaquecedores secundários (SSH1, SSH2, SSH3 e SSH4). Após passar pelos superaquecedores secundários, o vapor superaquecido tem uma pressão de 2.000 psig (13.789,51 kPa) ou maior, e em alguns casos 2.500 psig (17.236,89 kPa) ou maior, tal como de cerca de 2.600 psig (17.926,37 kPa). O vapor superaquecido também tem uma temperatura de 1.000 °F (537,78 °C) ou maior, tal como de cerca de 1.050 °F (565,55 °C). O vapor superaquecido é então enviado para uma turbina de alta pressão 92 onde a energia térmica é usada para geração de energia elétrica. O vapor superaquecido perde tanto temperatura quanto pressão dentro da turbina de alta pressão 92. A saída da turbina de alta pressão é então enviada de volta para a caldeira 10 e enviada através dos reaquecedores 62. Após passar pelos reaquecedores, o vapor tem uma pressão de 500 psig (3.447,38 kPa) ou maior, tal como de cerca de 600 psig (4.136,85 kPa), e também tem uma temperatura de

1.000 °F (537,78 °C) ou maior, tal como de cerca de 1.050 °F (565,55 °C). Este vapor superaquecido pode então ser usado para acionar uma turbina de baixa pressão.

[074]Referindo-se de novo à figura 4, água é retornada da turbina de baixa pressão. Esta água atravessa um condensador (COND), uma bomba de alimentação de caldeira (BFP) e um aquecedor de água de alimentação (FWH) antes de ser enviada para o economizador (ECON) para absorver energia térmica residual do gás de combustão saindo da passagem de convecção. Daí, a água aquecida pelo economizador é enviada para o separador de vapor 54. No circuito resfriado a água, água é enviada do separador de vapor para o tubo de comunicação de entrada de forno inferior 50, o qual alimenta as paredes de membranas resfriadas a água do forno inferior 12. Vapor úmido é coletado pelo tubo de comunicação de saída de forno inferior 52 e enviado para o separador de vapor 54 para separação em água e vapor seco.

[075]O circuito resfriado a vapor da figura 3 e da figura 4 é meramente um exemplo ilustrativo, e em outras modalidades o número e localizações de superaquecedores podem ser diferentes, assim como o arranjo das várias paredes de membranas resfriadas a vapor e de componentes de superaquecedor no circuito resfriado a vapor. O forno ilustrativo da figura 1 com o circuito de vapor resfriado a vapor ilustrativo da figura 3 e da figura 4 foi modelado usando software de modelagem de sólido 3D, e foi determinado a partir desta análise como fornecendo desempenho melhorado incluindo uma temperatura/pressão de superaquecedor de 1.050 °F (565,55 °C)/2.600 psig (17.926,37 kPa) e uma temperatura/pressão de reaquecedor de 1.050 °F (565,55 °C)/600 psig (4.136,85 kPa), para uma caldeira projetada para fornecer 150 MW a 300 MW de energia líquida.

[076]Um potencial problema com o projeto de forno da figura 1 é que durante partida não existe vapor passando pelas paredes de membranas resfriadas a vapor

do forno superior. Quando a caldeira 10 é acesa primeiramente na partida, o gás de combustão quente flui através destas paredes de membranas resfriadas a vapor. Durante operação de estado estável, o vapor seco dentro das paredes de membranas absorveria energia térmica, reduzindo assim a temperatura dos tubos e da membrana da parede de membrana, assim como reduzindo a temperatura do gás de combustão. Durante partida, portanto, existe muito pouco vapor por toda a caldeira. Como um resultado, as tensões térmicas nas paredes de membranas resfriadas a vapor do forno superior são maiores que aquelas durante operação de estado estável.

[077]A figura 5 ilustra um circuito de vapor que fornece uma solução para este problema de tensão térmica de partida, o qual aproveita a saída de vapor seco na saída de vapor seco 56 do separador de vapor 54. Este vapor seco ainda não está superaquecido. Tal como visto na figura 5, o conjunto de circuitos de controle de partida do circuito de vapor inclui um caminho de desvio provido de válvulas 100 que conecta a saída de vapor seco 56 do separador de vapor 54 mais diretamente às paredes de membranas resfriadas a vapor do forno superior 14. O caminho de desvio provido de válvulas 100 é provido de válvulas com uma ou mais válvulas de desvio 102 (quatro estão mostradas aqui). O caminho de desvio 100 desvia fluxo da saída de vapor seco 56 do separador de vapor 54 para as paredes de membranas resfriadas a vapor do forno superior 14. O conjunto de circuitos de partida inclui adicionalmente uma ou mais válvulas de redução 104 (duas estão mostradas aqui) localizadas no circuito resfriado a vapor a jusante dos superaquecedores primários 60. O caminho de desvio contorna os superaquecedores primários 60, fornecendo vapor seco mais rapidamente para as paredes de membranas resfriadas a vapor 46 do forno superior 14. O caminho de desvio se estende da saída de vapor seco 56 para uma localização a jusante dos superaquecedores primários 60 e a montante das paredes de membranas resfriadas a vapor 46. Um controlador de partida 106,

por exemplo, um computador ou outro dispositivo de controle eletrônico, opera as válvulas 102, 104 para estabelecer: (1) um modo de partida no qual as válvulas de desvio 102 estão abertas para abrir o caminho de desvio 100 e as válvulas de redução 104 estão fechadas (totalmente ou parcialmente tal como desejado) para reduzir fluxo através dos superaquecedores primários 60 parcialmente contornados e da passagem de convecção 18; ou (2) um modo de operação normal no qual as válvulas de desvio 102 estão fechadas para bloquear o caminho de desvio 100 e as válvulas de redução 104 estão abertas para permitir fluxo total através dos superaquecedores primários 60 e da passagem de convecção 18.

[078]Quando as válvulas de desvio 102 estão abertas, e as válvulas de redução 104 estão parcialmente fechadas, por causa de as paredes de forno superior fornecerem o caminho de resistência mais baixa para fluxo, o vapor seco tenderá a fluir através das paredes de forno superior em vez de através do topo e da passagem de convecção. A presença do vapor seco nas paredes de forno superior protegerá os tubos do forno superior contra diferencial de temperatura excessivo, e também resfriará o gás de combustão. Como um resultado, a passagem de gás de combustão através da passagem de convecção 18 não aplicará tensão excessiva às paredes da passagem de convecção, mesmo que vapor seco não esteja presente em grandes quantidades nestas paredes resfriadas a vapor durante partida.

[079]Gás de combustão aquecido também flui sobre as paredes de membranas resfriadas a vapor da passagem de convecção 18; entretanto, o gás de combustão já terá resfriado substancialmente até este ponto e assim o tensões térmicas de partida primárias surgem no forno superior 14.

[080]Continuando com referência para a figura 5 e com referência adicional para a figura 6, uma sequência de partida típica está mostrada. As válvulas de desvio 102, em algumas modalidades, podem ser ajustadas com base em uma leitura de temperatura de termopar nos tubos de comunicação de saída das paredes

de forno superior, de maneira que um limite de temperatura para as paredes não é excedido. Para paredes de membranas típicas, o limite de uso é de cerca de 1.000 °F (537,78 °C), assim o vapor seco proveniente da saída de separador 56 é suficiente para resfriar as paredes de membranas.

[081]Na figura 6, a taxa de queima indica a quantidade relativa de calor sendo gerado pela caldeira. A caldeira funciona com cerca de 10% durante quatro horas usando óleo antes de funcionar com até 100% de capacidade. Isto permite a formação de vapor suficiente para encher os tubos resfriados a vapor. Para as duas primeiras horas, o caminho de desvio de vapor 100 é aberto, e posteriormente é fechado para permitir que vapor encha as paredes da passagem de convecção. Após quatro horas, a turbina de alta pressão também está totalmente carregada, e o combustível é trocado para carvão. A taxa de queima, fluxo de vapor e pressão de redução são então aumentados para seus valores de operação de estado estável.

[082]Vantajosamente, o fornecimento de vapor para partida usando esta abordagem vem do separador de vapor 54. Isto permite que a caldeira 10 seja colocada em serviço sem o uso de vapor auxiliar e/ou de uma caldeira de vapor auxiliar. De novo será percebido que a abordagem revelada para resfriar paredes de membranas durante partida pode ser empregada em uma faixa ampla de caldeiras além da caldeira ilustrativa 10 da figura 1.

[083]A presente revelação foi descrita com referência para modalidades exemplares. Obviamente, modificações e alterações ocorrerão para outras pessoas ao ler e entender a descrição detalhada precedente. É pretendido que a presente revelação seja interpretada como incluindo todas as tais modificações e alterações para a extensão em que elas ocorram dentro do escopo das reivindicações anexas ou das equivalências das mesmas.

REIVINDICAÇÕES

1. Caldeira, **CARACTERIZADA** pelo fato de que compreende:

um forno incluindo queimadores e paredes de membranas resfriadas a vapor, as paredes de membranas resfriadas a vapor compreendendo tubos selados por membrana;

um separador de vapor tendo uma saída de vapor seco;

um circuito resfriado a vapor conectado à saída de vapor seco do separador de vapor, o circuito resfriado a vapor incluindo pelo menos (i) um superaquecedor primário compreendendo tubos sem membrana e (ii) as paredes de membranas resfriadas a vapor do forno, em que as paredes de membranas resfriadas a vapor do forno ficam localizadas a jusante do superaquecedor primário no circuito resfriado a vapor; e

conjunto de circuitos de controle de partida configurado para (i) reduzir fluxo para o superaquecedor primário e (ii) desviar fluxo da saída de vapor seco do separador de vapor para as paredes de membranas resfriadas a vapor do forno.

2. Caldeira, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADA** pelo fato de que o conjunto de circuitos de controle de partida inclui:

pelo menos uma válvula de desvio que quando aberta conecta operacionalmente a saída de vapor seco do separador de vapor às paredes de membranas resfriadas a vapor do forno; e

pelo menos uma válvula de redução no circuito resfriado a vapor que é operativa para reduzir fluxo através do superaquecedor primário.

3. Caldeira, de acordo com a reivindicação 2, **CARACTERIZADA** pelo fato de que o conjunto de circuitos de controle de partida inclui adicionalmente um controlador eletrônico configurado para colocar o conjunto de circuitos de controle de partida em um de:

um modo de partida no qual a pelo menos uma válvula de desvio está aberta

e a pelo menos uma válvula de redução está operada para reduzir fluxo através do superaquecedor primário; ou

um modo de operação normal no qual a pelo menos uma válvula de desvio está fechada e a pelo menos uma válvula de redução está totalmente aberta.

4. Caldeira, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADA** pelo fato de que o conjunto de circuitos de controle de partida inclui:

um caminho de desvio provido de válvulas conectando a saída de vapor seco do separador de vapor às paredes de membranas resfriadas a vapor do forno; e

pelo menos uma válvula de redução no circuito resfriado a vapor que é operativa para reduzir fluxo através do superaquecedor primário.

5. Caldeira, de acordo com a reivindicação 4, **CARACTERIZADA** pelo fato de que o conjunto de circuitos de controle de partida inclui adicionalmente um controlador eletrônico configurado para colocar o conjunto de circuitos de controle de partida em um de:

um modo de partida no qual o caminho de desvio provido de válvulas está aberto e a pelo menos uma válvula de redução está operada para reduzir fluxo através do superaquecedor primário; ou

um modo de operação normal no qual o caminho de desvio provido de válvulas está fechado e a pelo menos uma válvula de redução está totalmente aberta.

6. Caldeira, de acordo com a reivindicação 5, **CARACTERIZADA** pelo fato de que compreende adicionalmente um superaquecedor secundário localizado a jusante das paredes de membranas resfriadas a vapor do forno no circuito resfriado a vapor.

7. Caldeira, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1-6, **CARACTERIZADA** pelo fato de que o forno inclui:

um forno superior resfriado a vapor tendo as paredes de membranas resfriadas a vapor; e

um forno inferior resfriado a água formado por paredes de membranas resfriadas a água que compreendem tubos selados por membrana, as paredes de membranas resfriadas a água não estando incluídas no circuito resfriado a vapor conectado à saída de vapor seco do separador de vapor.

8. Caldeira, **CARACTERIZADA** pelo fato de que compreende:

um forno incluindo pelo menos uma parede de membrana resfriada a vapor, a pelo menos uma parede de membrana resfriada a vapor compreendendo tubos selados por membrana;

um separador de vapor tendo uma saída de vapor seco;

um ou mais superaquecedores primários compreendendo tubos sem membrana;

um circuito resfriado a vapor se estendendo da saída de vapor seco para o um ou mais superaquecedores primários e subsequentemente para a pelo menos uma parede de membrana resfriada a vapor do forno, e contendo uma ou mais válvulas de redução entre o um ou mais superaquecedores primários e a pelo menos uma parede de membrana resfriada a vapor do forno;

um caminho de desvio se estendendo da saída de vapor seco através de uma ou mais válvulas de desvio para uma localização a montante da pelo menos uma parede de membrana resfriada a vapor do forno e a jusante do um ou mais superaquecedores primários; e

conjunto de circuitos de controle para comutar fluxo de vapor seco proveniente do separador de vapor através do circuito resfriado a vapor ou do caminho de desvio.

9. Caldeira, de acordo com a reivindicação 8, **CARACTERIZADA** pelo fato de que o conjunto de circuitos de controle inclui um controlador eletrônico

configurado para operar a uma ou mais válvulas de redução e a uma ou mais válvulas de desvio.

10. Caldeira, de acordo com a reivindicação 8, **CARACTERIZADA** pelo fato de que compreende adicionalmente uma passagem de convecção formada por paredes de membranas de passagem de convecção resfriadas a vapor, as paredes de membranas de passagem de convecção estando localizadas a montante do um ou mais superaquecedores primários no circuito resfriado a vapor.

11. Caldeira, de acordo com a reivindicação 10, **CARACTERIZADA** pelo fato de que compreende adicionalmente superaquecedores secundários compreendendo tubos sem membrana, os superaquecedores secundários estando localizados a jusante da pelo menos uma parede de membrana resfriada a vapor do forno no circuito resfriado a vapor.

12. Caldeira, de acordo com a reivindicação 11, **CARACTERIZADA** pelo fato de que o forno inclui:

um forno superior resfriado a vapor tendo um forno superior que inclui a pelo menos uma parede de membrana resfriada a vapor; e

um forno inferior resfriado a água formado por paredes de membranas resfriadas a água, as paredes de membranas resfriadas a água não estando incluídas no circuito resfriado a vapor conectado à saída de vapor seco do separador de vapor.

13. Método de partida de caldeira para iniciar uma caldeira tendo um separador de vapor, paredes de membranas resfriadas a vapor formando pelo menos uma parte de um forno, e um superaquecedor primário colocado em um circuito resfriado a vapor entre uma saída de vapor seco do separador de vapor e as paredes de membranas resfriadas a vapor, o método **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende:

reduzir fluxo de vapor seco através do circuito resfriado a vapor; e

desviar fluxo de vapor seco através de um caminho de desvio que se estende da saída de vapor seco para uma localização a montante das paredes de membranas resfriadas a vapor do forno e a jusante do superaquecedor primário, em que o caminho de desvio contorna o superaquecedor primário.

14. Método de partida de caldeira, de acordo com a reivindicação 13, **CARACTERIZADO** pelo fato de que desviar compreende abrir uma válvula de desvio a montante do superaquecedor primário.

15. Método de partida de caldeira, de acordo com a reivindicação 13, **CARACTERIZADO** pelo fato de que reduzir compreende fechar uma válvula de redução localizada no circuito resfriado a vapor a jusante do superaquecedor primário.

16. Método de partida de caldeira, de acordo com a reivindicação 14, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende adicionalmente:

acender a caldeira usando óleo como combustível;

terminar a redução e desvio responsivos a uma condição de alteração; e

após terminar, mudar de usar óleo como combustível para usar carvão como combustível.

17. Método de partida de caldeira, de acordo com a reivindicação 16, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o circuito resfriado a vapor compreende adicionalmente paredes de membranas de passagem de convecção resfriadas a vapor, as paredes de membranas de passagem de convecção estando localizadas a montante do superaquecedor primário no circuito resfriado a vapor.

18. Método de partida de caldeira, de acordo com a reivindicação 17, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o circuito resfriado a vapor compreende adicionalmente superaquecedores secundários compreendendo tubos sem membrana, os superaquecedores secundários estando localizados a jusante das paredes de membranas resfriadas a vapor do forno no circuito resfriado a vapor.

19. Método de partida de caldeira, de acordo com a reivindicação 14, **CARACTERIZADO** pelo fato de que reduzir compreende fechar uma válvula de redução localizada no circuito resfriado a vapor a jusante do superaquecedor primário.

20. Método de partida de caldeira, de acordo com a reivindicação 19, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende adicionalmente:

acender a caldeira usando óleo como combustível;

terminar a redução e desvio responsivos a uma condição de alteração; e

após terminar, mudar de usando óleo como combustível para usar carvão como combustível.

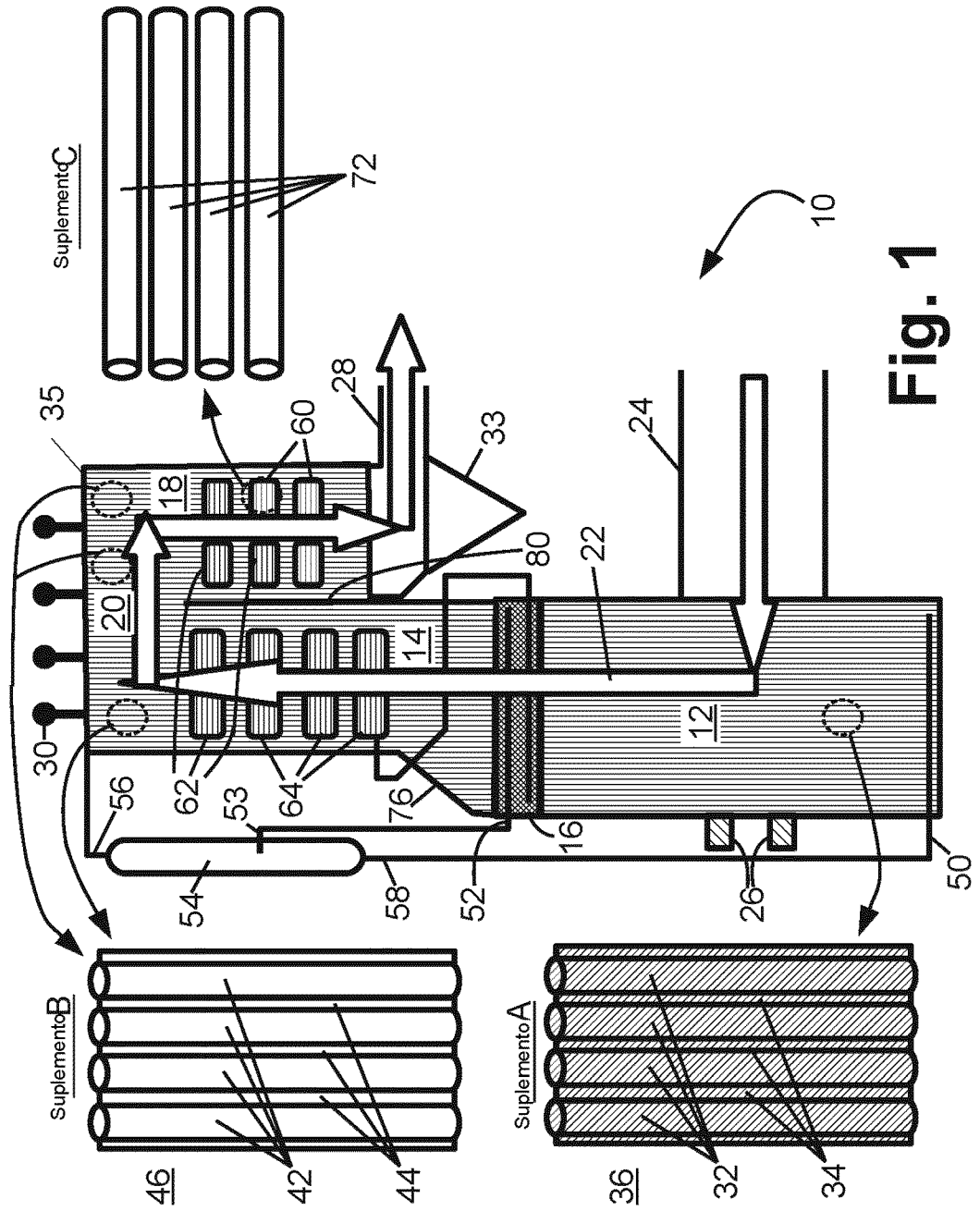


Fig. 1

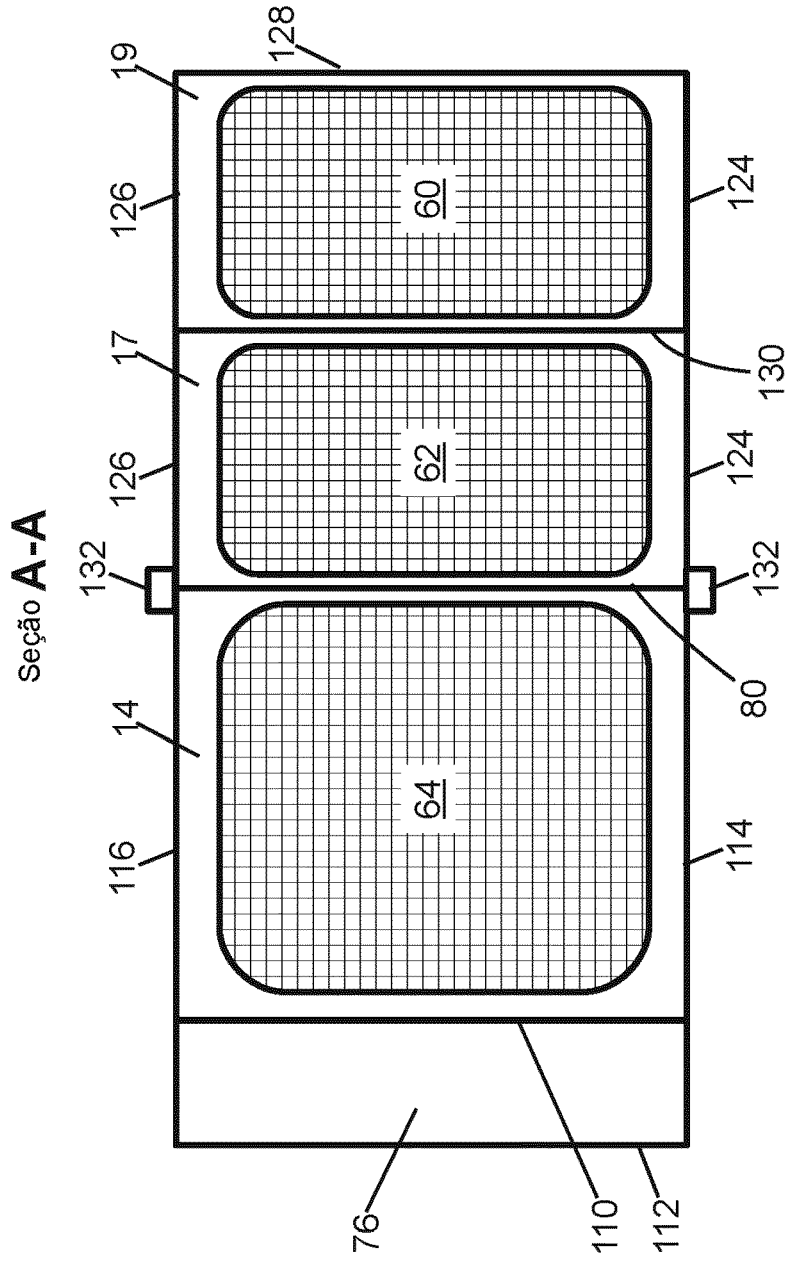


Fig. 2

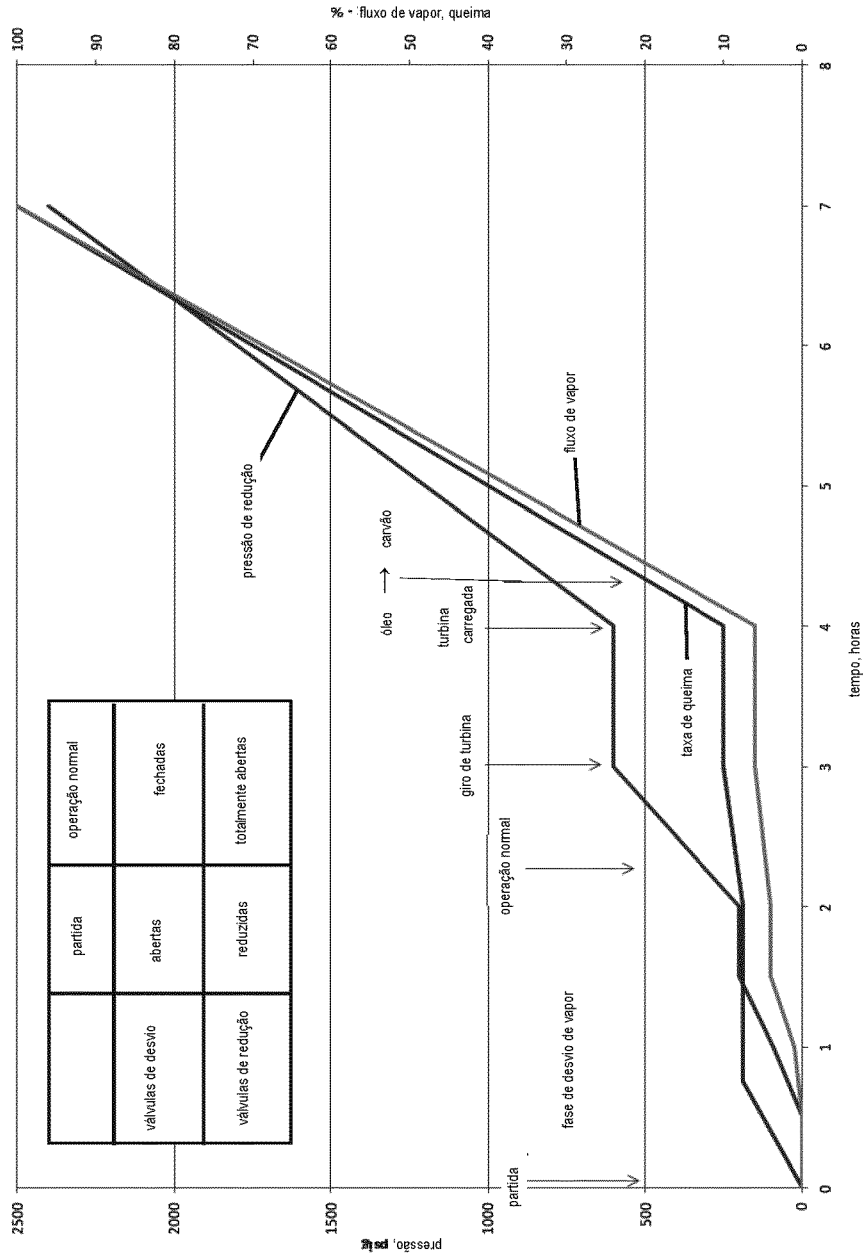


Fig. 6

RESUMO

“CALDEIRA SUBCRÍTICA DE ALTA TEMPERATURA COM FORNO SUPERIOR RESFRIADO A VAPOR E MÉTODOS DE PARTIDA”

Uma caldeira é revelada na qual o forno é dividido em um forno inferior e um forno superior. O forno inferior usa paredes de membranas resfriadas a água, enquanto que o forno superior usa paredes de membranas resfriadas a vapor que agem como superfícies de superaquecimento. Um circuito resfriado a vapor inclui um separador de vapor, um superaquecedor primário e as paredes de membranas resfriadas a vapor do forno superior. Durante partida, um caminho de desvio é aberto que reduz fluxo de vapor seco através do superaquecedor primário e aumenta fluxo de vapor seco através das paredes de membranas resfriadas a vapor do forno superior. Isto protege as paredes de membranas resfriadas a vapor contra tensões térmicas excessivas durante partida.