

Sistemas Energéticos

3º ano 6º semestre

Aula 13



Aula 13 - Caldeiras: Tipos e seus componentes

Tópicos

- *Histórico*
- *Tipos de caldeiras*
- *Caldeiras Flamotubulares*
- *Caldeiras Aquatubulares*
- *Caldeiras Mistas*



13.1 – Definição

Uma caldeira é um conjunto de superfícies de aquecimento concebidas para o aquecimento de fluidos térmicos ou produção de vapor de água. Quando a finalidade é o aquecimento e o abastecimento de água quente a processos, geralmente denomina-se caldeira. Tanto o gerador de vapor como a caldeira têm o mesmo princípio de funcionamento, sendo ligeiramente menos trabalhosa a projecção duma caldeira devido aos valores mais baixos de pressão e temperatura relacionados envolvidos no seu projecto.



13.1 - Histórico

O vapor de água é usado como meio de geração, transporte e utilização de energia desde os primórdios do desenvolvimento industrial. Inúmeras razões colaboraram para a geração de energia através do vapor. A água é o composto mais abundante da Terra e portanto de fácil obtenção e baixo custo. Na forma de vapor tem alto conteúdo de energia por unidade de massa e volume. As relações temperatura e pressão de saturação permitem a utilização como fonte de calor a temperaturas médias e de larga utilização industrial com pressões de trabalho perfeitamente toleráveis pela tecnologia disponível, já há muito tempo.



13.1 - Histórico

Grande parte da geração de energia eléctrica do hemisfério norte utiliza vapor de água como fluído de trabalho em ciclos termodinâmicos, transformando a energia química de combustíveis fósseis ou nucleares em energia mecânica, e em seguida em energia eléctrica.

Toda indústria de processo químico tem vapor como principal fonte de aquecimento: reactores químicos, trocadores de calor, evaporados, secadores e inúmeros processos e equipamentos térmicos. Mesmo outros sectores industriais, como o metalúrgico, o metalo-mecânico, o de electrónica, etc., podem utilizar o vapor como fonte de aquecimentos de diversos processos.



13.1 - Histórico

As primeiras aplicações práticas ou de carácter industrial de vapor surgiram por volta do século 17. O inglês Thomas Savery patenteou em 1698 um sistema de bombagem de água utilizando vapor como força motriz. Em 1711, Newcomen desenvolveu outro equipamento com a mesma finalidade, aproveitando ideias de Denis Papin, um inventor francês. A caldeira de Newcomen era apenas um reservatório esférico, com aquecimento directo no fundo, também conhecida como caldeira de Haycock.





13.1 - Histórico

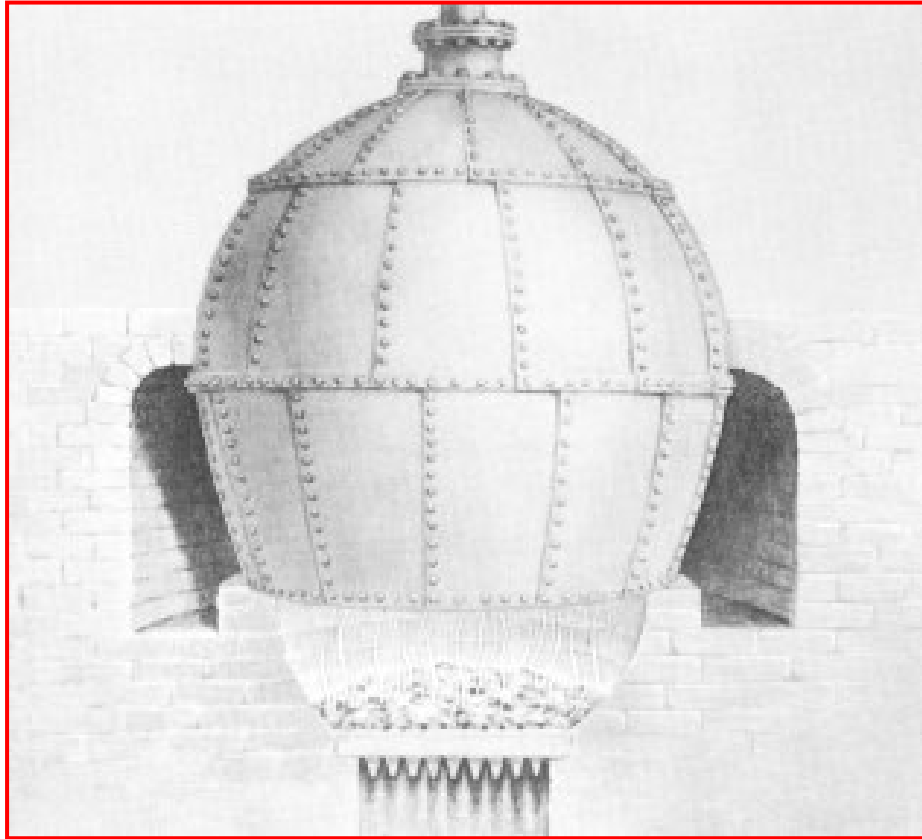


Figura 13.1 Caldeira de Haycock, 1720

13.1 - Histórico

James Watt modificou um pouco o formato em 1769, desenhando a caldeira Vagão, a precursora das caldeiras utilizadas em locomotivas a vapor. Apesar do grande desenvolvimento que Watt trouxe a utilização do vapor como força motriz, não acrescentou muito ao projecto de caldeiras.

Todos estes modelos provocaram desastrosas explosões, devido a utilização de fogo directo e ao grande acúmulo de vapor no recipiente. A ruptura do vaso causava grande liberação de energia na forma de expansão do vapor contido.



13.1 - Histórico

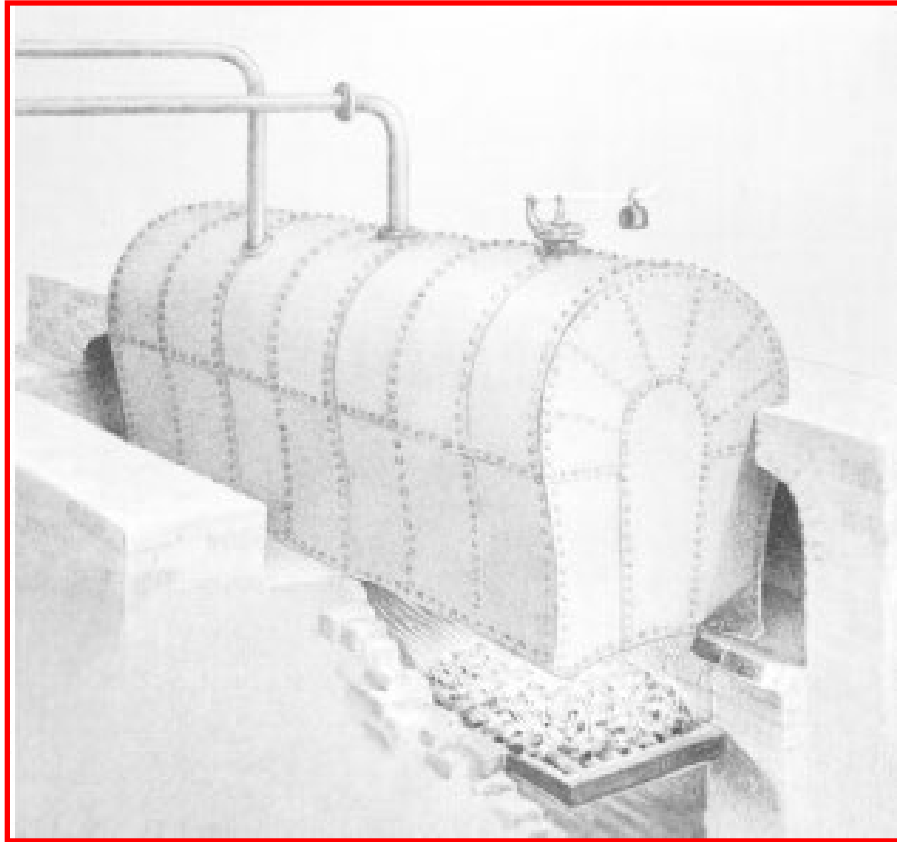


Figura 13.2 Caldeira Caldeira Vagão, de James Watt, 1769

13.2 - Tipos de caldeiras

Quanto a posição dos tubos as caldeiras dividem-se em:

- de tubos verticais; e
- de tubos horizontais.

A classificação mais usual de caldeiras de combustão refere-se à localização de água/gases e divide-as em:

- Flamotubulares;
- Aquatubulares; e
- mistas.





13.3-Caldeiras de tubos verticais

Nas caldeiras de tubos verticais, os tubos são colocados verticalmente num corpo cilíndrico fechado nas extremidades por placas, chamadas espelhos. A fornalha interna fica no corpo cilíndrico logo abaixo do espelho inferior. Os gases de combustão sobem através dos tubos, aquecendo e vaporizando a água que está em volta deles.

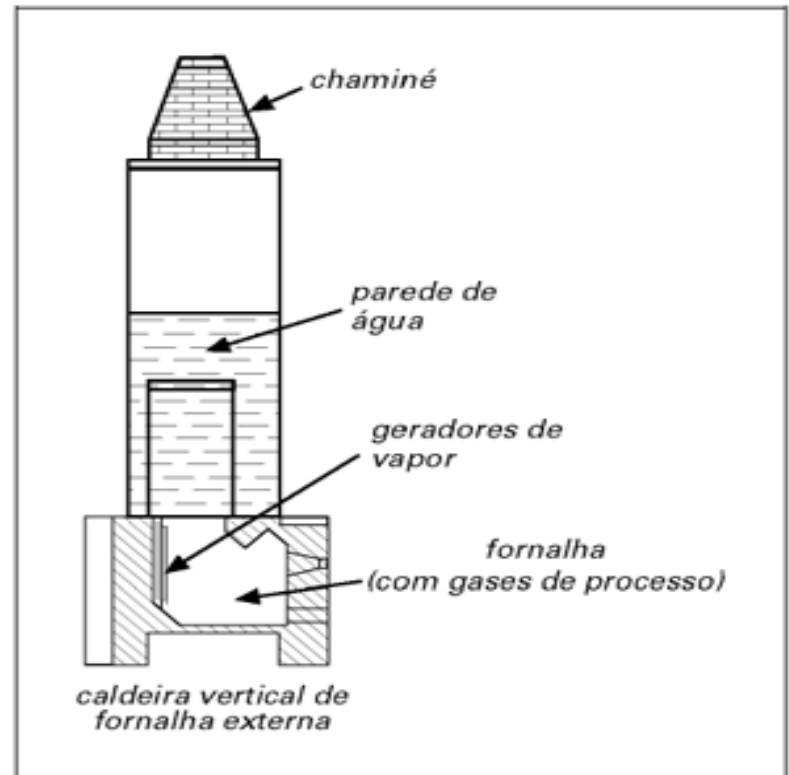


Figura 13.3 caldeira de tubos verticais



13.3-Caldeiras de tubos verticais

As fornalhas externas são utilizadas principalmente no aproveitamento da queima de combustíveis de baixo poder calorífico, tais como: serradura, palha, casca de café e de amendoim e óleo combustível.

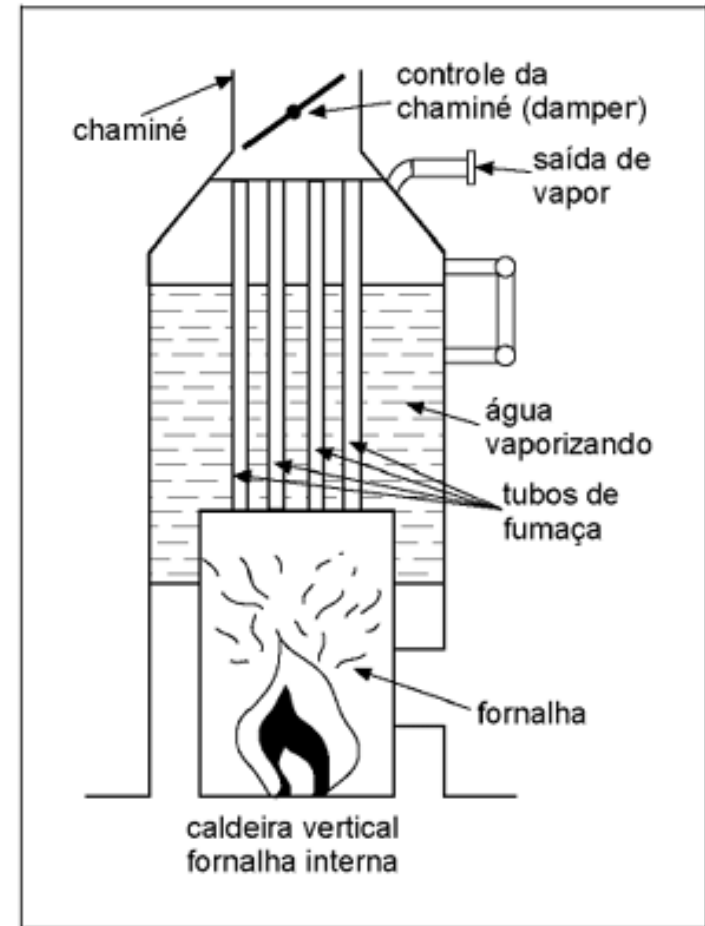


Figura 13.3 caldeira de tubos verticais com fornalha externa

13.4- Caldeiras de tubos horizontais

As caldeiras de tubos horizontais abrangem vários modelos, desde as caldeiras Cornuália e Lancaster, de grande volume de água, até as modernas unidades compactas. As principais caldeiras horizontais apresentam tubulões internos nos quais ocorre a combustão e através dos quais passam os gases quentes. Podem ter de 1 a 4 tubulões por fornalha.

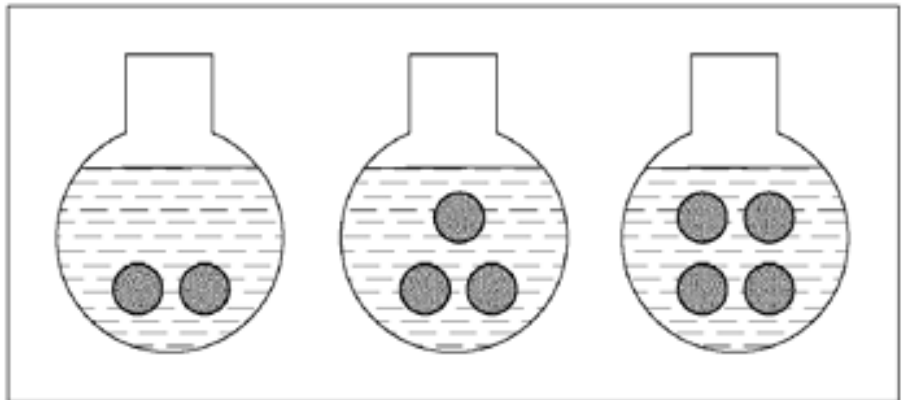
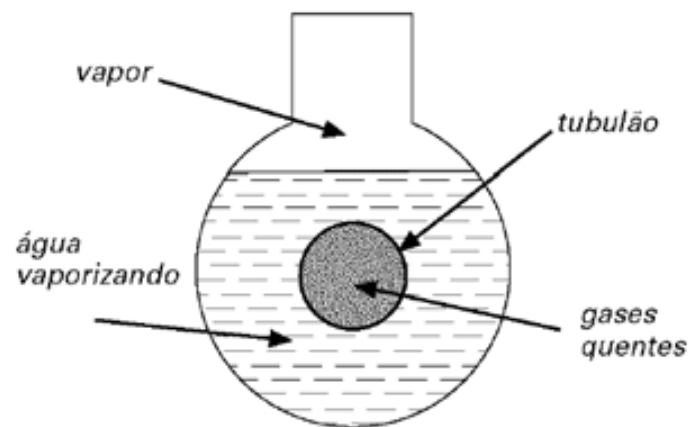


Figura 13.4 Caldeiras de tubos horizontais





13.5 - Caldeiras Flamotubulares

Constituem a grande maioria das caldeiras, utilizadas para pequenas capacidades de geração de vapor (da ordem de até 10 ton/h) e baixas pressões (até 10bar), chegando algumas vezes a 15 ou 20 bar.

As caldeiras flamotubulares horizontais, constituem-se de um vaso de pressão cilíndrico horizontal, com dois tampos planos (os espelhos) onde estão afixados os tubos e a fornalha. As caldeiras modernas têm diversos passes de gases, sendo mais comum uma fornalha e dois passes de gases.

A saída da fornalha é chamada câmara de reversão e pode ser revestida completamente de refractários ou constituída de paredes metálicas molhadas.

13.5 - Caldeiras Flamotubulares

A caldeira flamotubular, como o nome sugere, é uma caldeira em que a queima e os gases dela resultantes fluem dentro de tubos.

A queima processa-se no interior de um cilindro construído em chapa de aço, com dimensões tais que permitam a combustão completa de modo que, após a mesma, só fluam gases quentes para as demais passagens de gases.

Este tipo de caldeira é o mesmo que se adoptava nas locomotivas a vapor e vem sofrendo transformações no sentido de que sejam mais seguras e eficientes.

As caldeiras flamotubulares são empregues geralmente para pequenas capacidades e quando se pretende apenas vapor saturado de baixa pressão.



13.5 - Caldeiras Flamotubulares

As caldeiras flamotubulares apresentam as seguintes partes principais: corpo, espelhos, feixe tubular ou tubos de fogo e caixa de fumaça (Figura 13.5).

O corpo da caldeira, também chamado de casco ou carcaça, é construído a partir de chapas de aço carbono calandradas e soldadas. Seu diâmetro e comprimento estão relacionados à capacidade de produção de vapor. As pressões de trabalho são limitadas pelo diâmetro do corpo destas caldeiras.



13.5 - Caldeiras Flamotubulares

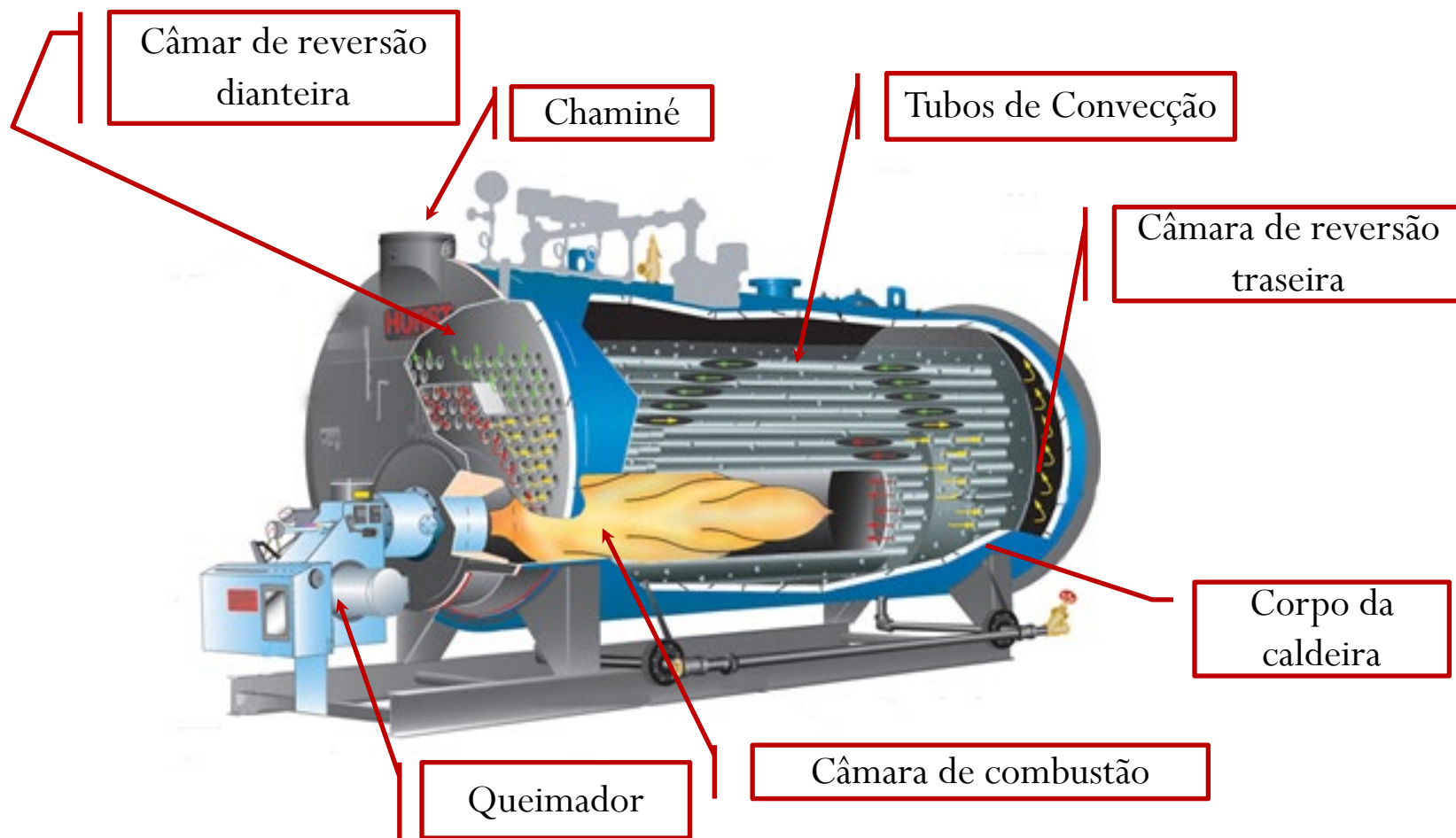


Figura 13.5 Partes principais da caldeira flamotubular

13.5 - Caldeiras Flamotubulares

Os espelhos são chapas planas cortadas em forma circular, de modo que encaixem nas duas extremidades do corpo da caldeira e são fixadas através de soldagem. Sofrem um processo de furação, por onde os tubos de fumaça deverão passar. Os tubos são fixados por meio de mandrilamento ou soldagem.

O feixe tubular, ou tubos de fogo, é composto de tubos que são responsáveis pela absorção do calor contido nos gases de exaustão usados para o aquecimento da água. Ligam o espelho frontal com o posterior, podendo ser de um, dois ou três passes (Figura 20.2).



13.5 - Caldeiras Flamotubulares

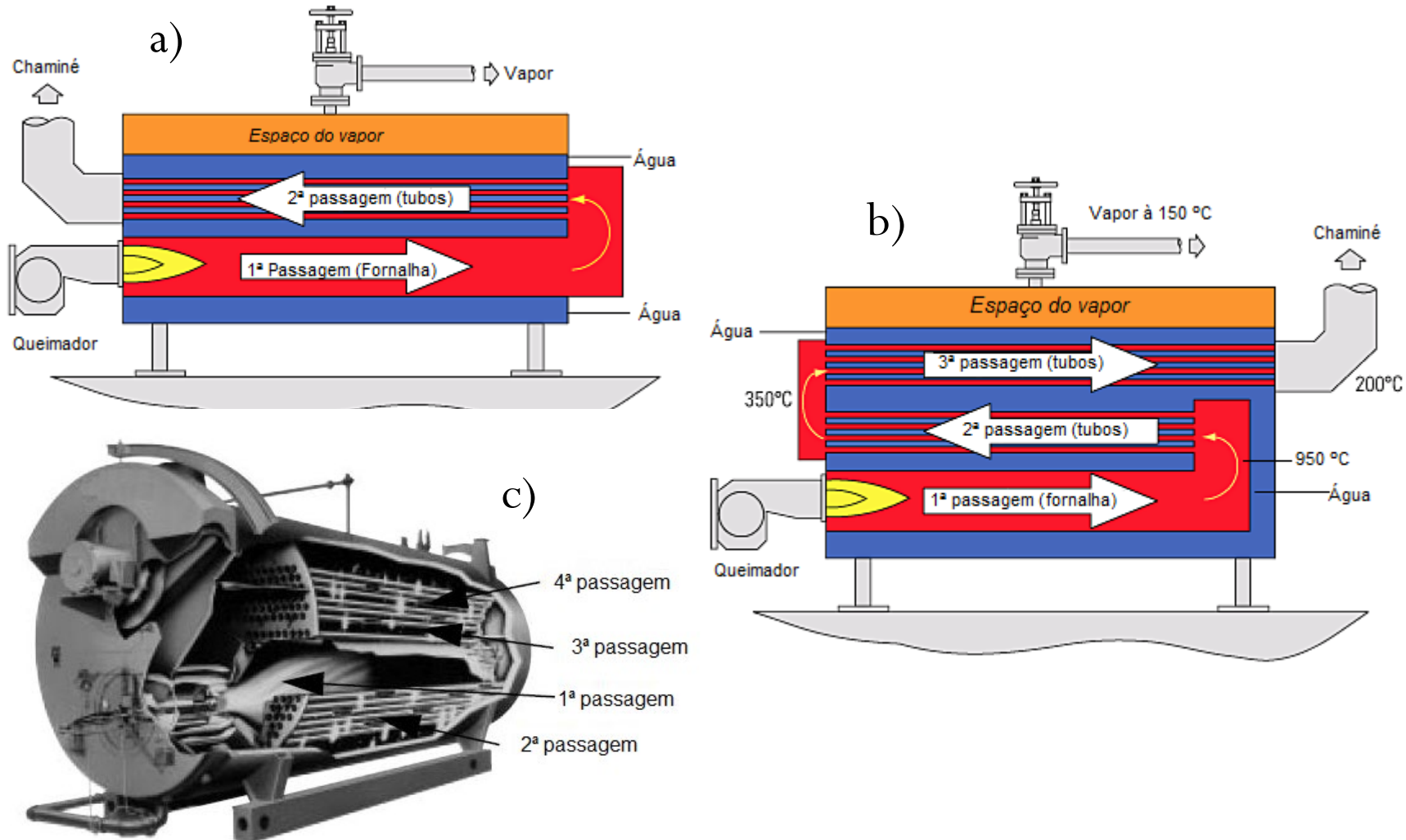


Figura 13.6 Caldeiras com duas a), três b) e quatro c) passagens



13.5 - Caldeiras Flamotubulares

Os tubos são envolvidos pelo casco, que comporta a água, sendo que esta entra, geralmente à temperatura ambiente e sai no estado de vapor.

As câmaras de reversão podem ser secas (Dry Back)

Figura 20.3 ou húmidas (Wet Back) Figura 20.4. Quando elas estão no interior da caldeira em contacto com a água denominam-se húmidas e quando não têm contacto com a água, secas.



13.5 - Caldeiras Flamotubulares

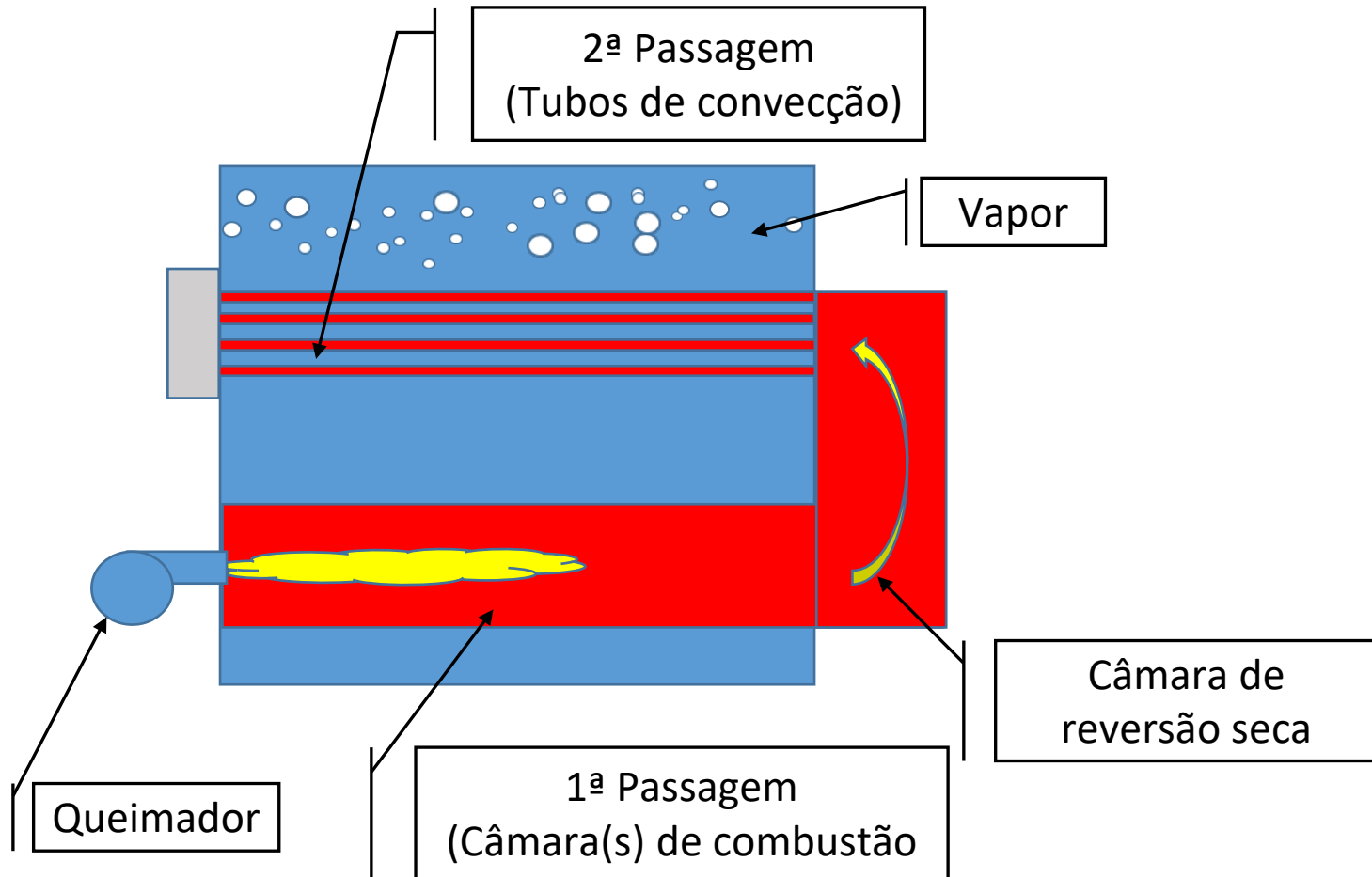


Figura 13.7 Caldeira com câmara de reversão seca



13.5 - Caldeiras Flamotubulares

Na fornalha procede-se à troca de calor por radiação e uma pequena parte por convecção. É o componente mais importante da caldeira, porque é onde ocorre a queima do combustível, ou seja, onde se gera o calor necessário ao sistema. No seu interior é que ocorre a maior temperatura de todo o gerador de vapor, é lá onde se processa a maior troca de calor de toda a caldeira, chegando a ser mais de 50% do total da caldeira. É a fornalha a maior responsável pela limitação da capacidade da caldeira e onde um stress de material acarretaria maiores inconvenientes.



13.5 - Caldeiras Flamotubulares

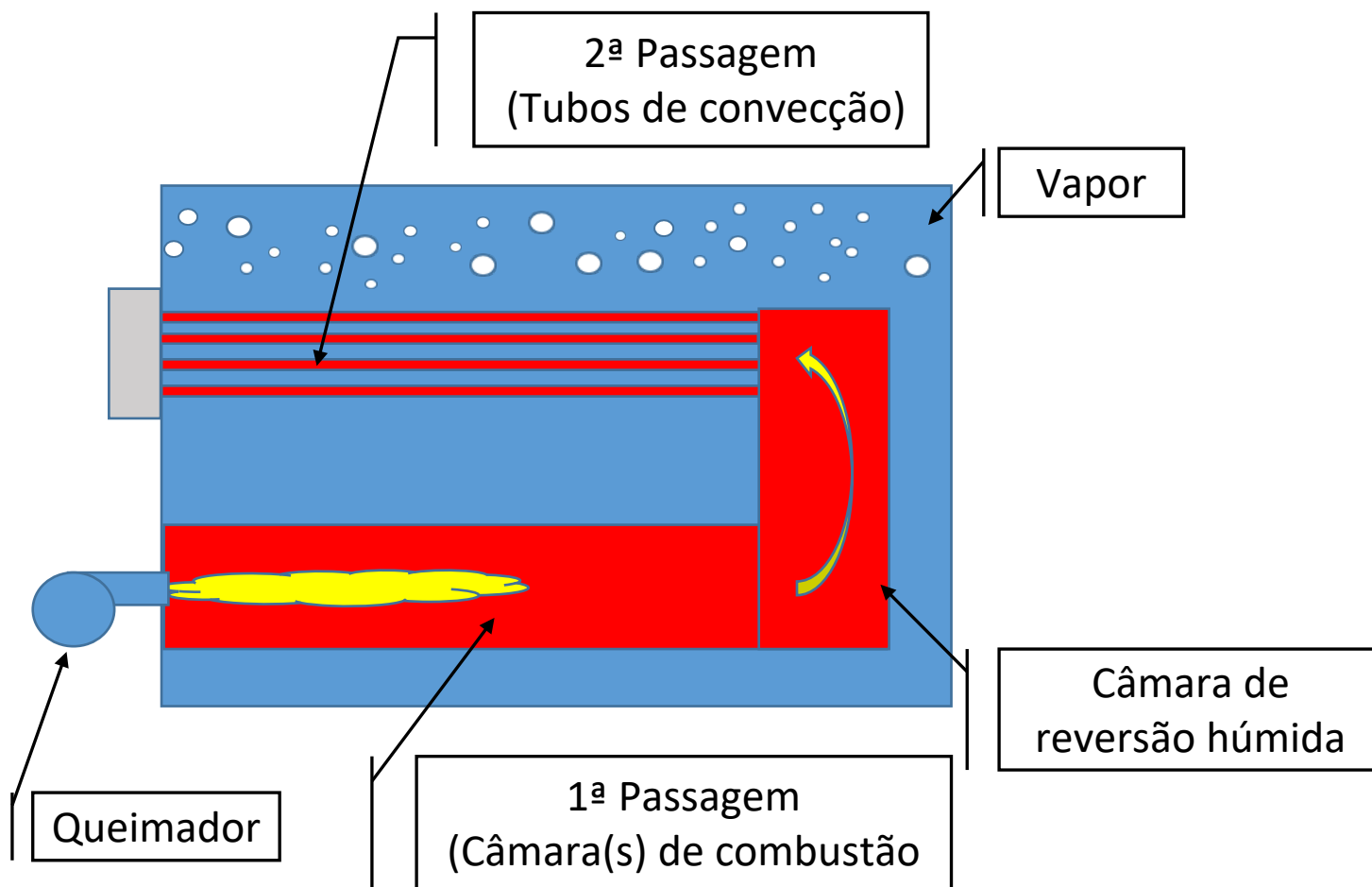


Figura 20.4 Caldeira com câmara de reversão húmida

13.5 - Caldeiras Flamotubulares

A harmonia entre a forma geométrica da fornalha e a chama, determina todo o equilíbrio térmico da caldeira.

Na câmara de reversão traseira efectua-se a troca de calor por radiação. Ela situa-se no fim da fornalha. Habitualmente é cilíndrica, com diâmetro suficiente para conter no seu interior um espelho que ancora a fornalha e aloja a extremidade traseira dos tubos da segunda passagem de gases. É construída em chapa de aço, e resfriada pela água do sistema no caso de câmara húmidas (Wet-Back).

No seu interior, os gases, após descreverem um ângulo de 180° na sua trajectória, são encaminhados para a segunda passagem.



13.5 - Caldeiras Flamotubulares



13.5.1 Vantagens e desvantagens das caldeiras flamotubulares

As principais **vantagens** das caldeiras deste tipo são:

- custo de aquisição mais baixo;
- exigem pouca alvenaria;
- atendem bem a aumentos instantâneos de necessidades de vapor.

Como **desvantagens**, apresentam:

- baixo rendimento térmico;
- partida lenta devido ao grande volume interno de água;
- limitação de pressão de operação (máx. 15 kgf/cm²);
- baixa taxa de vaporização - kg de vapor/(m². hora);
- capacidade de produção limitada;
- dificuldades para instalação de economizador, superaquecedor e pré-aquecedor.



13.6 - Caldeiras Aquatubulares

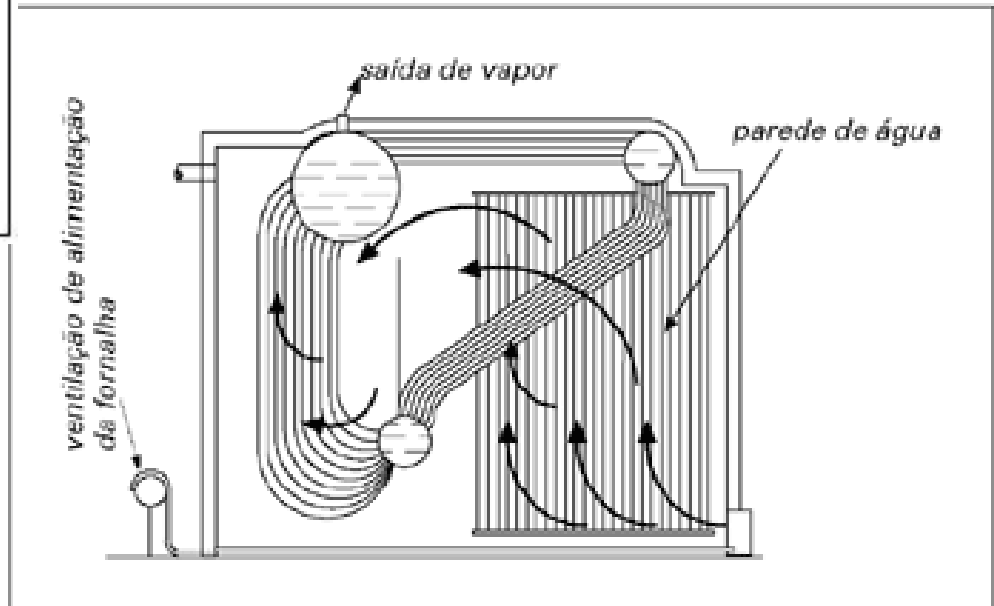
As caldeiras aquatubulares fazem a produção de vapor dentro de tubos que interligam 2 ou mais reservatórios cilíndricos horizontais

- o tubulão superior, onde se dá a separação da fase líquida e do vapor, e
- o tubulão inferior, onde é feita a decantação e purga de sólidos em suspensão.

Os tubos podem ser rectos ou curvados. As primeiras caldeiras aquatubulares utilizavam tubos rectos, solução hoje completamente abandonada, apesar de algumas vantagens, como a facilidade de limpeza interna dos tubos.



13.6 - Caldeiras Aquatubulares

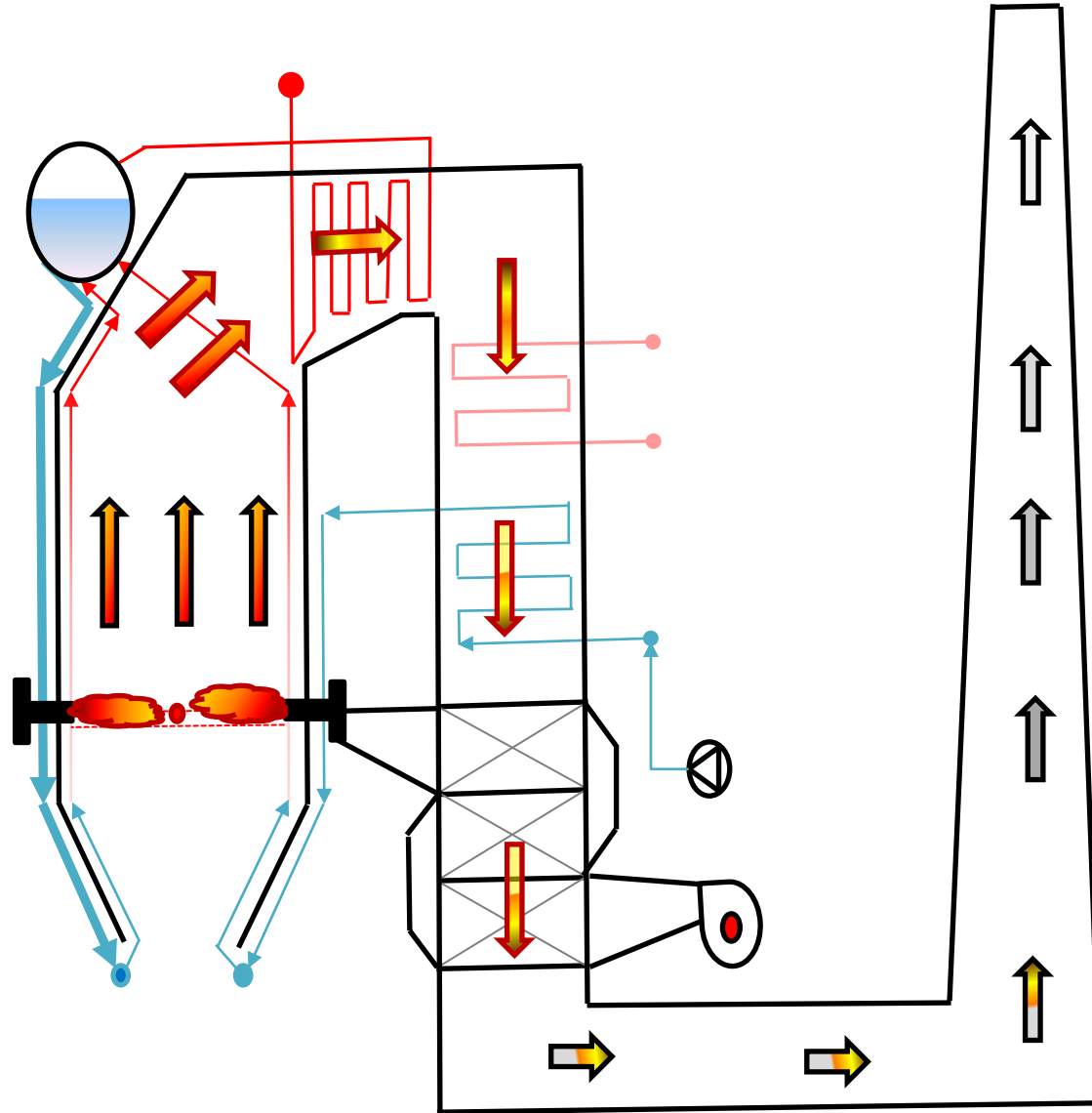


13.6 - Caldeiras Aquatubulares



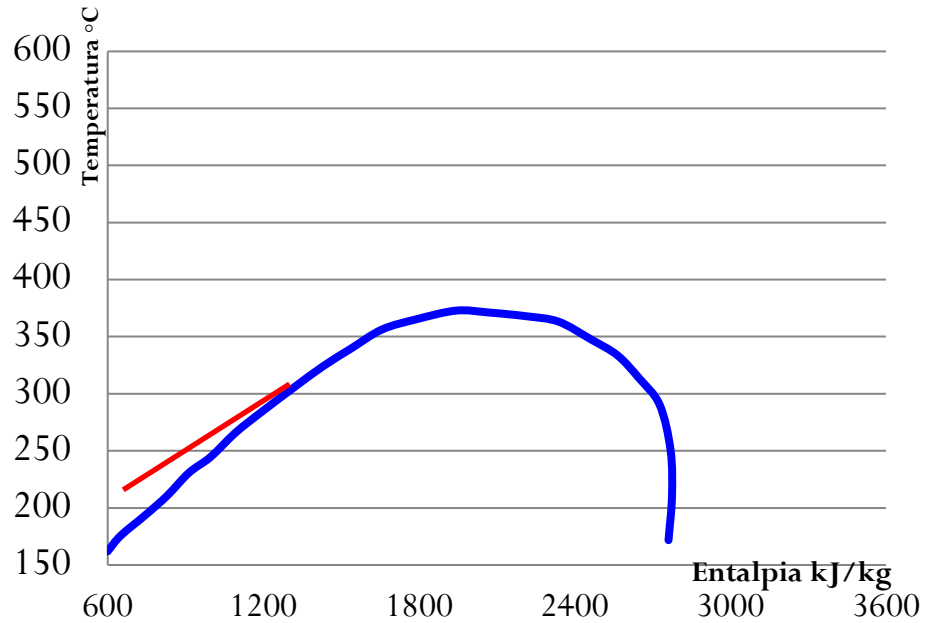
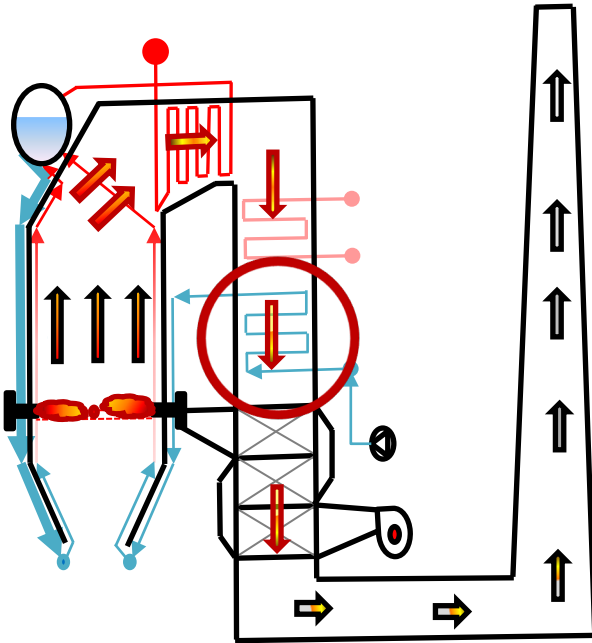
Água que aquece circula dentro dos tubos

13.6 - Caldeiras Aquatubulares





13.6.1 Economizador

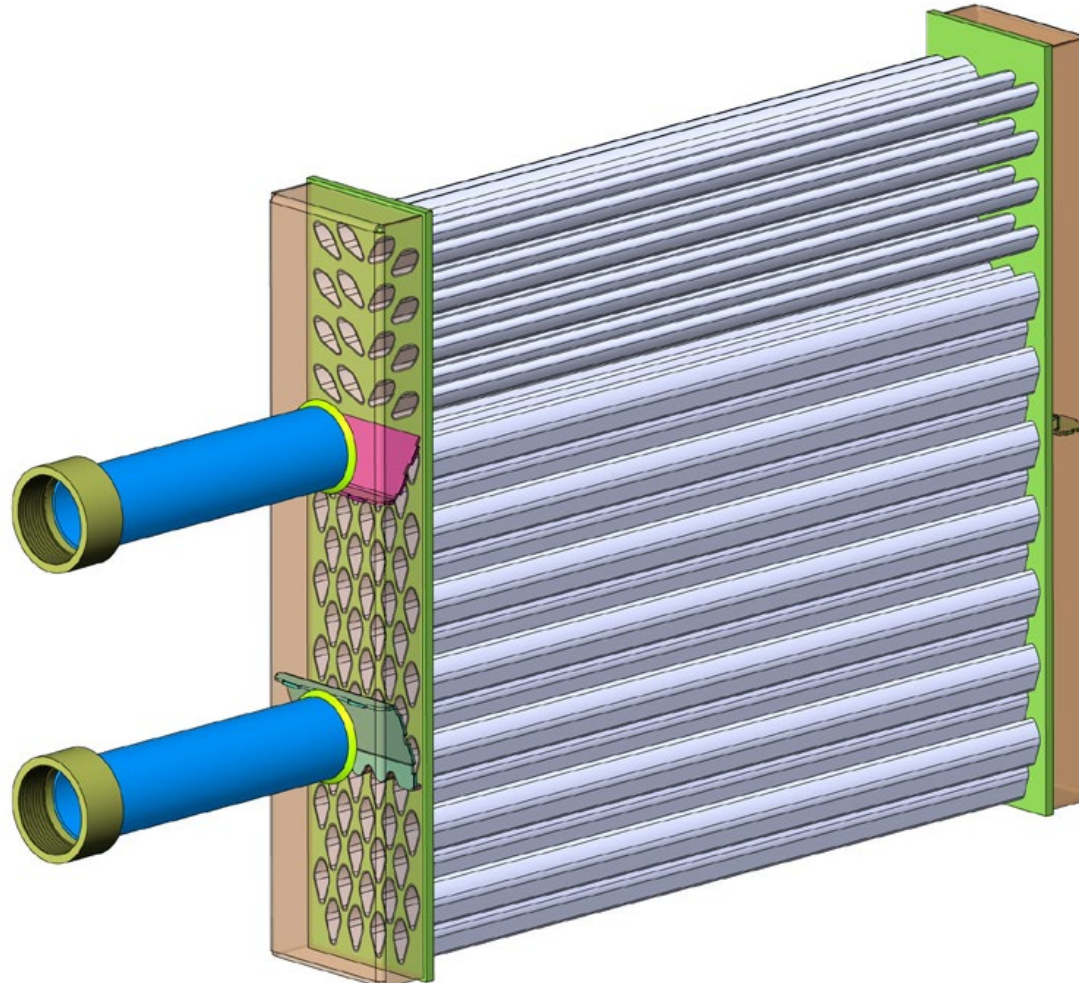




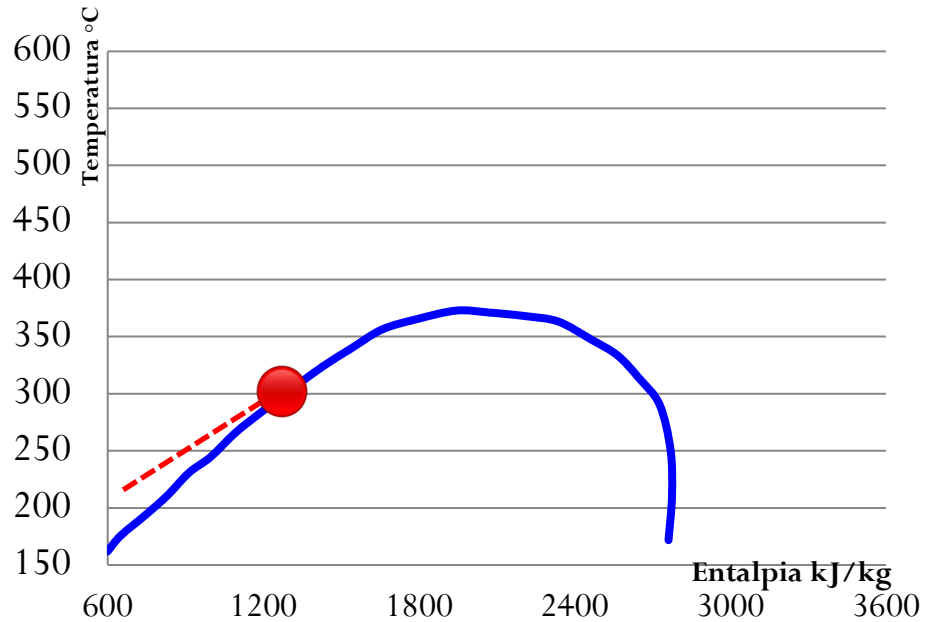
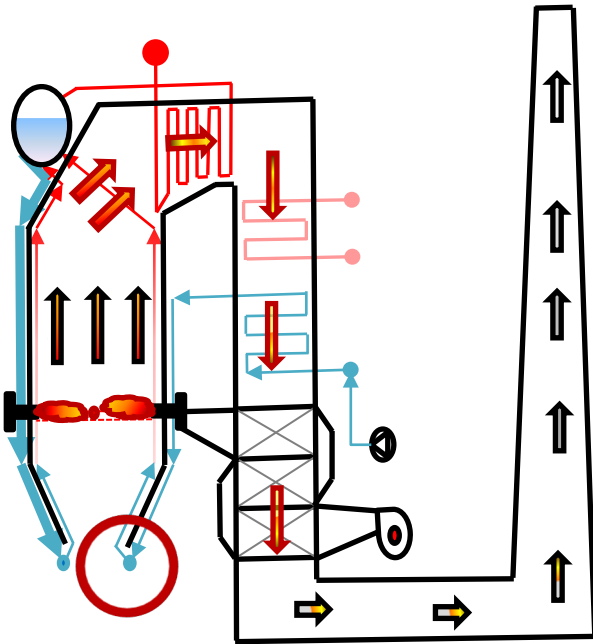
13.6.1 Economizador

Um economizador de um gerador de vapor é um dispositivo de recuperação de calor, que garante que o calor que sai com os gases de escape seja reutilizado. Este calor é utilizado para pré-aquecer a água de alimentação de modo que menos calor seja necessário para levar a água a uma temperatura suficientemente alta para produzir vapor. Pode-se considerar um economizador de um gerador de vapor, um aquecedor de água de alimentação, que assegura que a água utilizada para alimentar o gerador de vapor se torne mais quente para que este não tenha que despender muita energia para transformá-la em vapor.

13.6.1 Economizador



13.6.2 Tubulão inferior

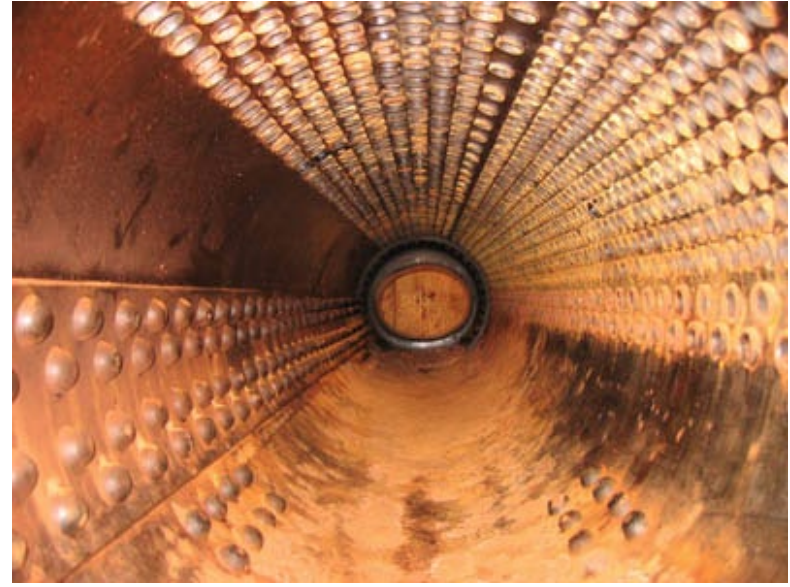


13.6.2 Tubulão inferior

O tubulão inferior, tambor de água, tambor de lama ou barrilet inferior é maior do que o colector, mas ambos são menores do que o tubulão superior ou tambor de vapor. O tambor de água equaliza a distribuição de água para os tubos de geradores. Tanto o tambor de água como o colector recolhem os depósitos de oxidação soltos bem como outras matérias sólidas que se encontrem na água da caldeira. O tubulão inferior e o colector, têm no fundo válvulas de purga. Quando estas válvulas são abertas, uma parte da água é forçada a sair do tambor ou do colector transportando com ele as partículas soltas.

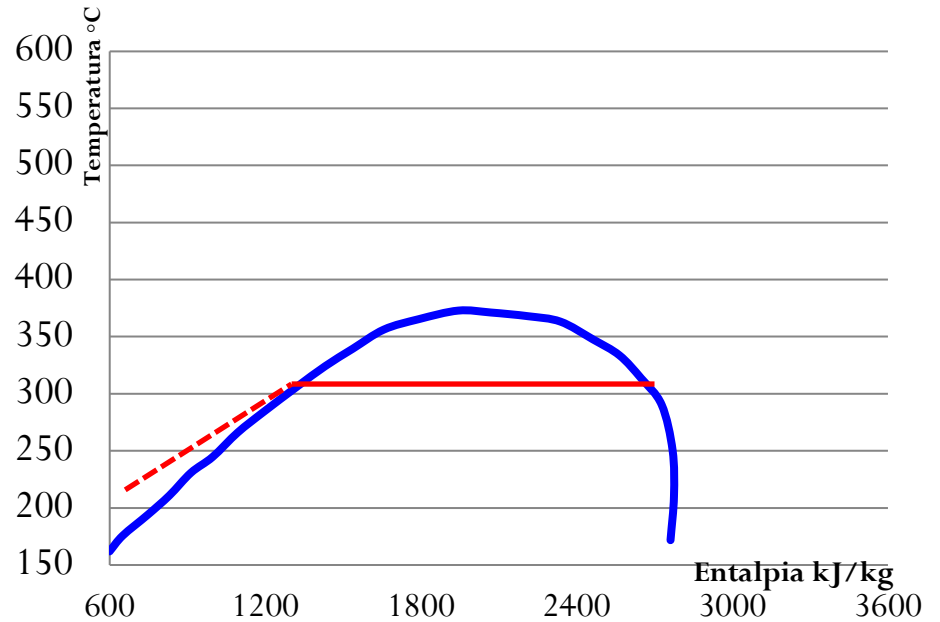
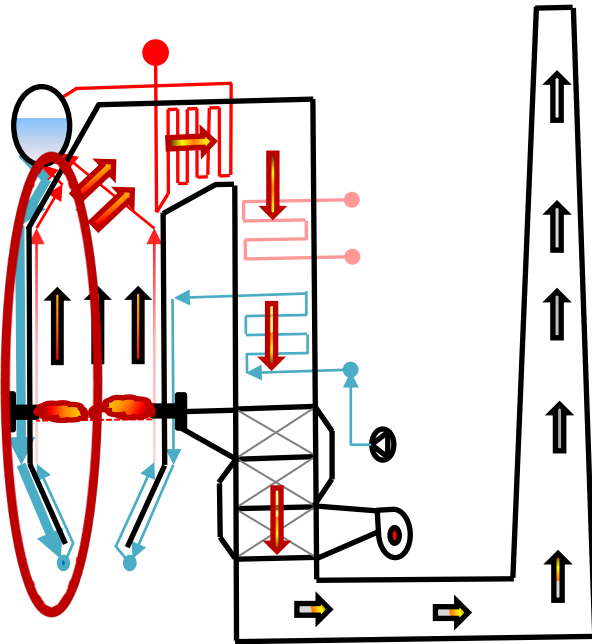


13.6.2 Tubulão inferior





13.6.3 Paredes de água



13.6.3 Paredes de água

É a fornalha ou outra parede no interior de uma caldeira composta por numerosos tubos de água dispostos uns perto dos outros. Estes tubos podem estar nus, ou cobertos por uma camada de cimento mineral.



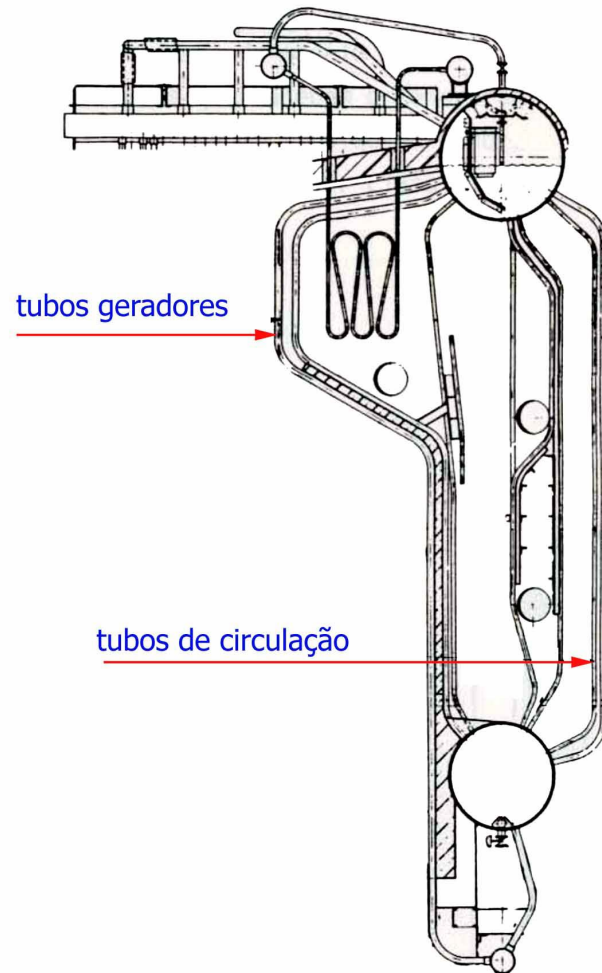
13.6.3 Paredes de água

- **Tubos de Circulação**

São tubos traseiros do feixe tubular que conduzem a água do tubulão de vapor para o tubulão de água, chamadas de tubos descendentes.

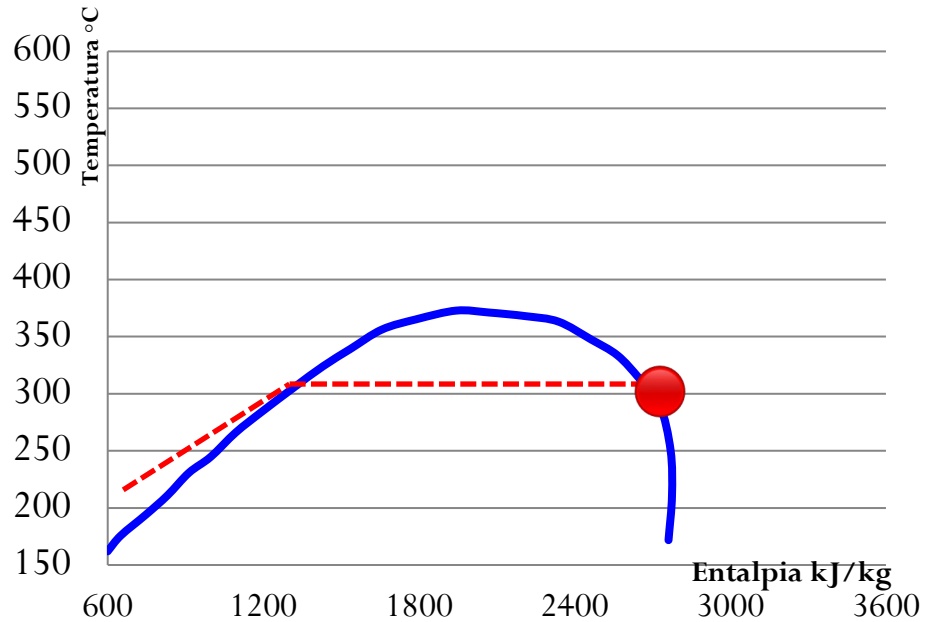
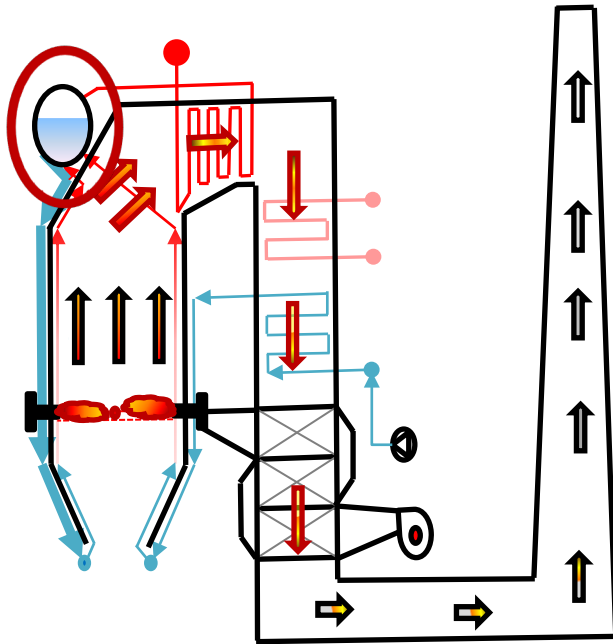
- **Tubos geradores**

São tubos dianteiros do feixe tubular ascendentes e descendentes, que conduzem a mistura água e vapor saturado para o tubulão de vapor. Estes tubos são os que recebem maior quantidade de calor da fornalha e são a caldeira propriamente dita.





13.6.4 Tubulão Superior

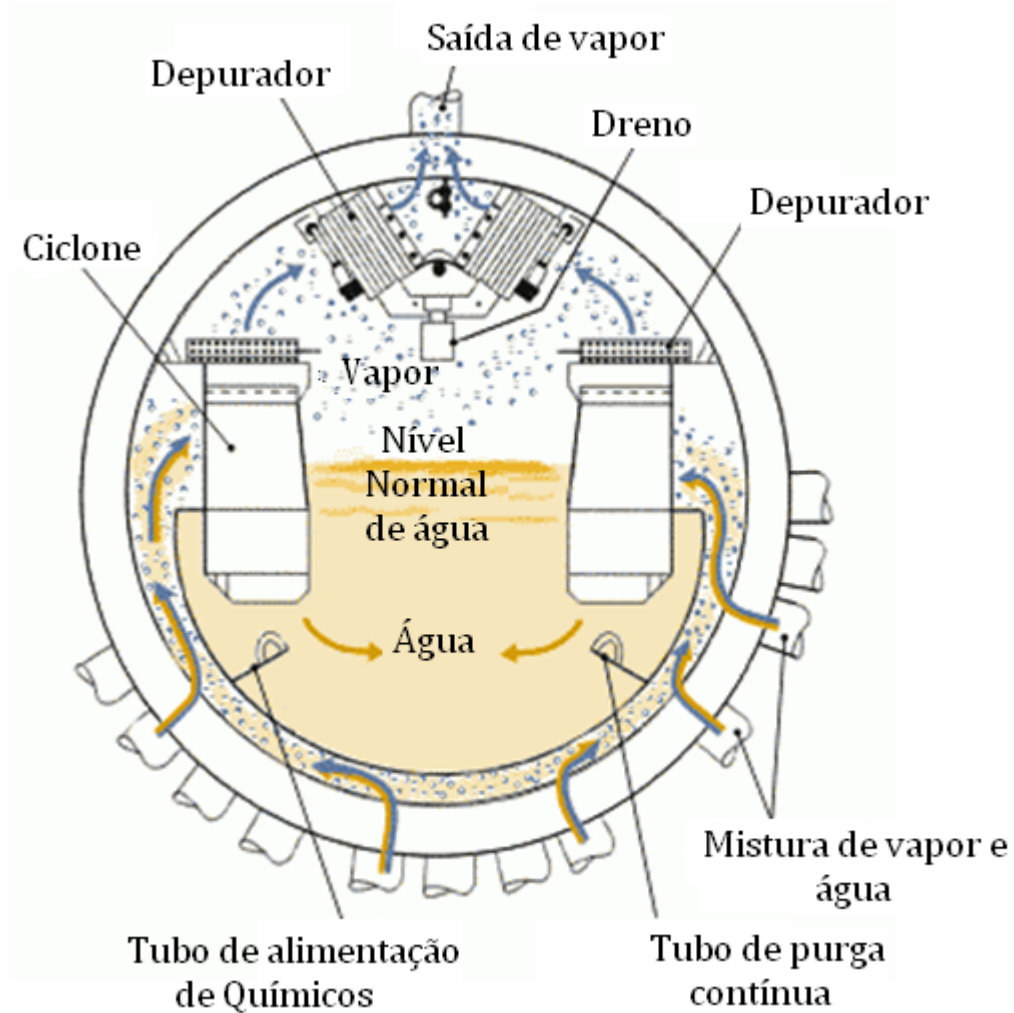




13.6.4 Tubulão Superior

- Vapor que tenha um pouco de humidade arrastada pode deixar indesejáveis depósitos de sílica nos tubos do superaquecedor. As gotículas de água transportadas para uma turbina de uma caldeira podem corroer as pás e levá-las à destruição. Há muitas ocasiões em que a remoção de líquido de um fluxo de gás ou gás a partir de uma corrente de líquido é necessária.
- Uma variedade de técnicas existentes para fazer isso. Para as gotas menores (menores de 10 microns) são usados eliminadores de gotas, de fibra. Quando as partículas tornam-se maiores, dispositivos *impingement* como telas são adotadas. Quando elas ficam ainda maiores, são usados *chevrans*. Finalmente, para as gotas grandes, são adoptados os ciclones. Eles podem operar em toda a gama de caudais na fase líquido-gás.

13.6.4 Tubulão Superior

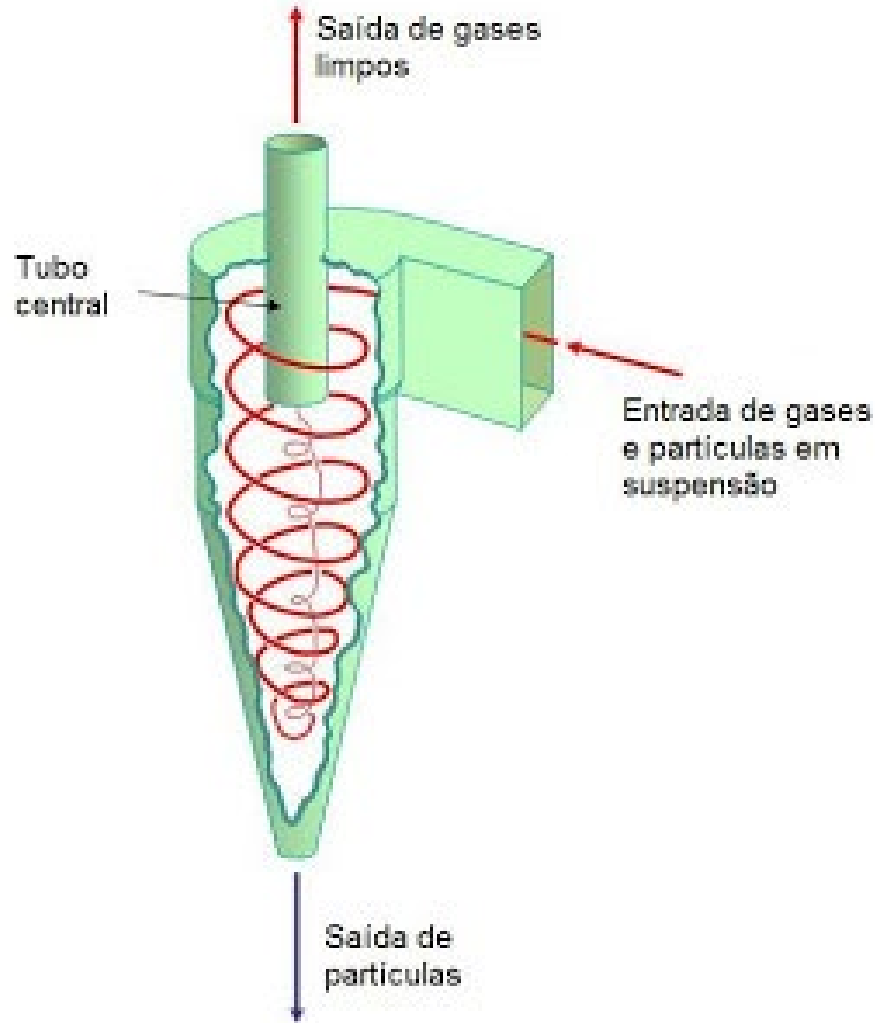


Ciclone

Um gás contendo partículas sólidas ou líquidas é introduzido no ciclone a uma velocidade média de 6 a 20 m/s. Dentro do ciclone, as partículas são separadas da corrente gasosa sob ação da força centrífuga que pode variar de 5 a 2500 vezes o peso da particular, permitindo assim a captura de partículas muito pequenas, depois a força centrífuga no vortex dentro do ciclone envia as partículas radialmente para baixo onde são recolhidas e o gás limpo livre de partículas sai pelo tubo vertical superior.



Ciclone



13.6.4 Tubulão Superior

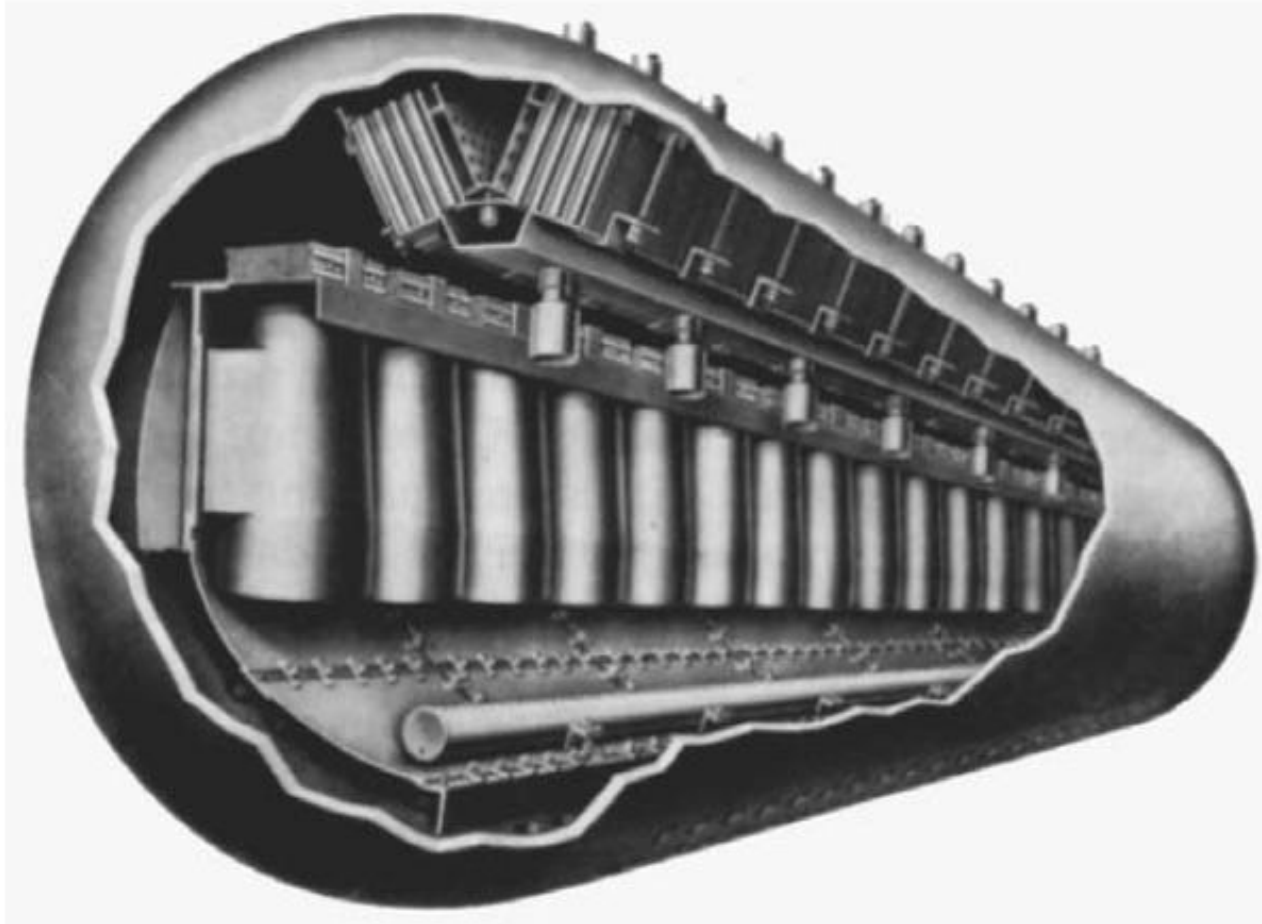
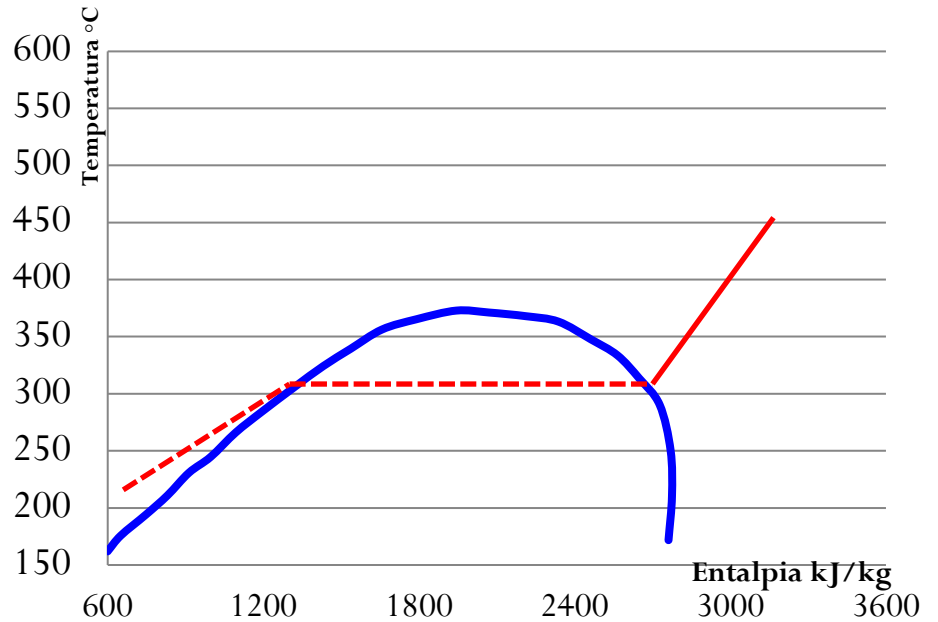
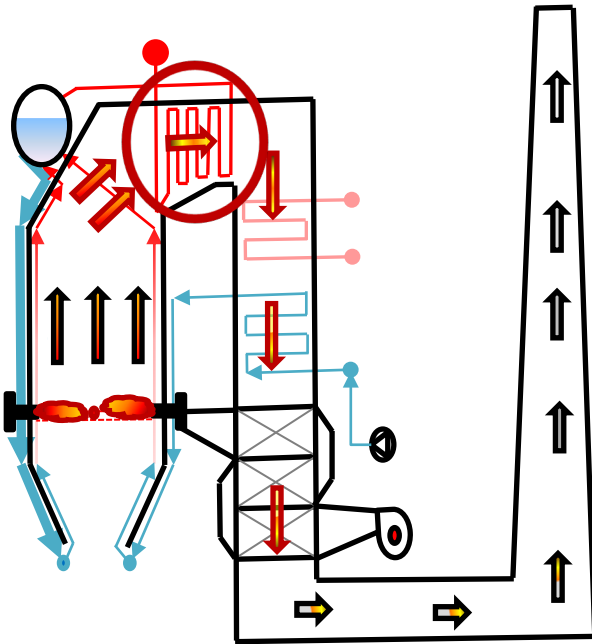


Figure 2.15 Single-row arrangement of cyclone steam separators with secondary scrubbers. (*Babcock & Wilcox, a McDermott company.*)



13.6.5 Superaquecedor



13.6.5 Superaquecedor

Um superaquecedor é um dispositivo que se encontra geradores de vapor, que é usado para converter a vapor saturado húmido em vapor seco. Os superaquecedores são um elemento muito importante do ciclo de vapor, porque o vapor seco contém mais energia térmica e aumenta a eficiência global do ciclo. Para além disso, o vapor seco também é menos susceptível de se condensar no interior dos cilindros de um motor alternativo ou numa turbina a vapor, evitando desta forma a cavitação. Existem três tipos de superaquecedores nos geradores de vapor a saber: superaquecedores radiantes, superaquecedores convectivos e superaquecedores aquecidos fora do gerador de vapor.

A temperatura final do vapor superaquecido está na faixa de 540 a 570 °C para grandes usinas e a pressão a cerca de 175 bar.

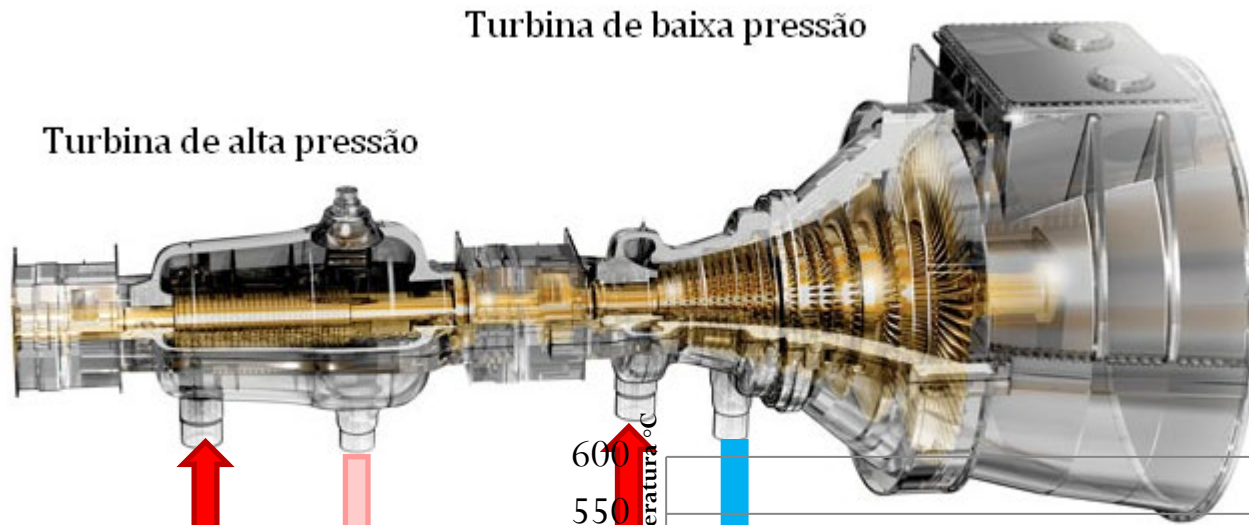




13.6.5 Superaquecedor



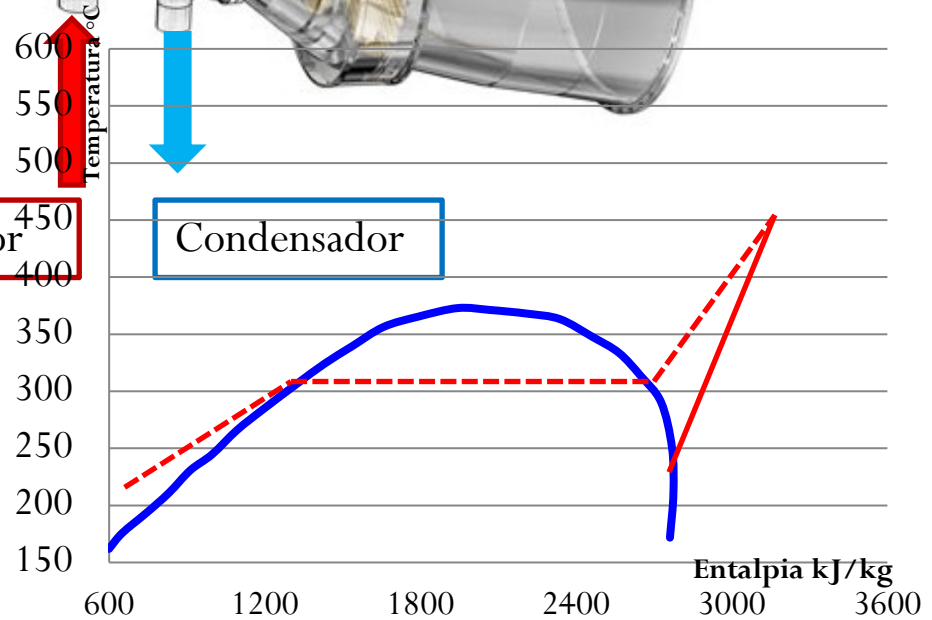
13.6.6 Reaquecedor



Superaquecedor

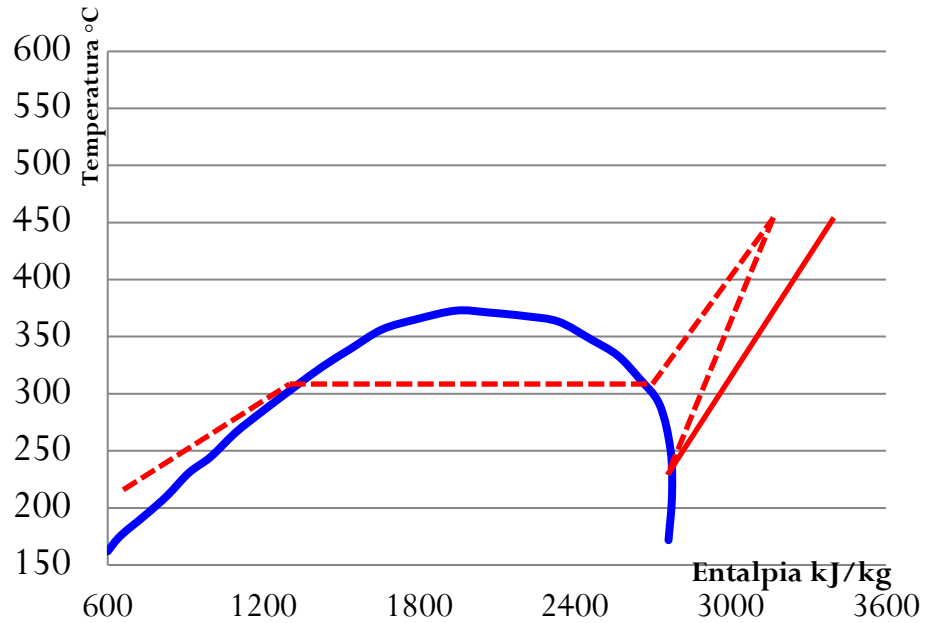
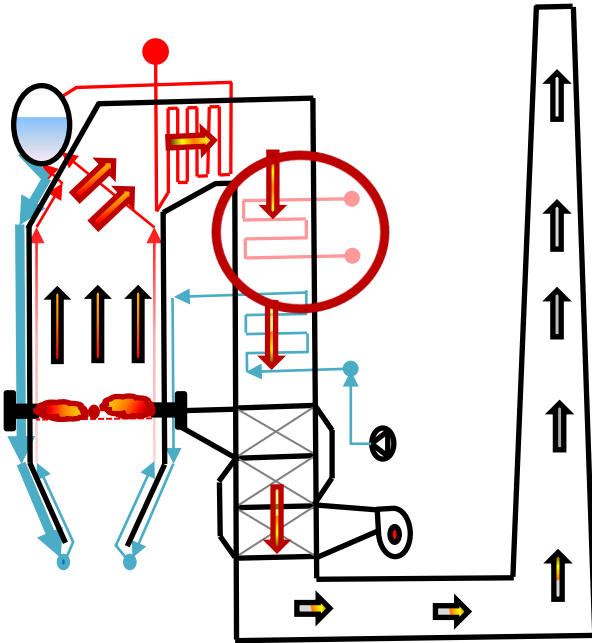
Reaquecedor

Condensador





13.6.6 Reaquecedor



13.6.6 Reaquecedor

O vapor da exaustão do primeiro estágio da turbina, volta a caldeira para o reaquecimento e é retornado para a expansão no segundo estágio. O reaquecedor de serpentinas que se encontra no percurso do gás de escape do gerador de vapor é que reaquece o vapor retornado do primeiro estágio. O vapor reaquecido encontra-se a uma pressão muito mais baixa do que o vapor super-aquecido, mas a mesma temperatura. Reaquecer o vapor a altas temperaturas melhora a produção e eficiência da Usina. As temperaturas finais do vapor reaquecido encontram-se geralmente na gama de 560 a 600 °C. e a pressão em torno de 45 bar.



13.6.6 Reaquecedor



13.6.7 Pré-aquecedores de ar

Os pré-aquecedores de ar são instalados nas caldeiras para pré-aquecer o ar de combustão. Existem dois tipos principais: aquecedores de ar: os recuperativos e os regenerativos.

Os pré-aquecedores de ar tubulares ou de recuperação são instalados em caldeiras de média e pequena capacidade de geração de vapor. Este tipo de pré-aquecedor de ar torna-se de tamanho muito grande se tiver de ser utilizado em caldeiras de alta capacidade, como as 600 toneladas/hora e acima de produção de vapor. Nestes casos são usados pré-aquecedores de ar regenerativos. Os pré-aquecedores de ar regenerativos são compactos e podem ter um corpo fixo ou rotativo. A combinação de pré-aquecedores de ar do tipo tubular e regenerativo é utilizada em caldeiras de alta capacidade.

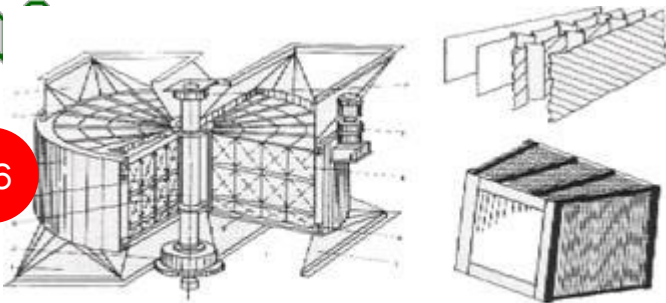
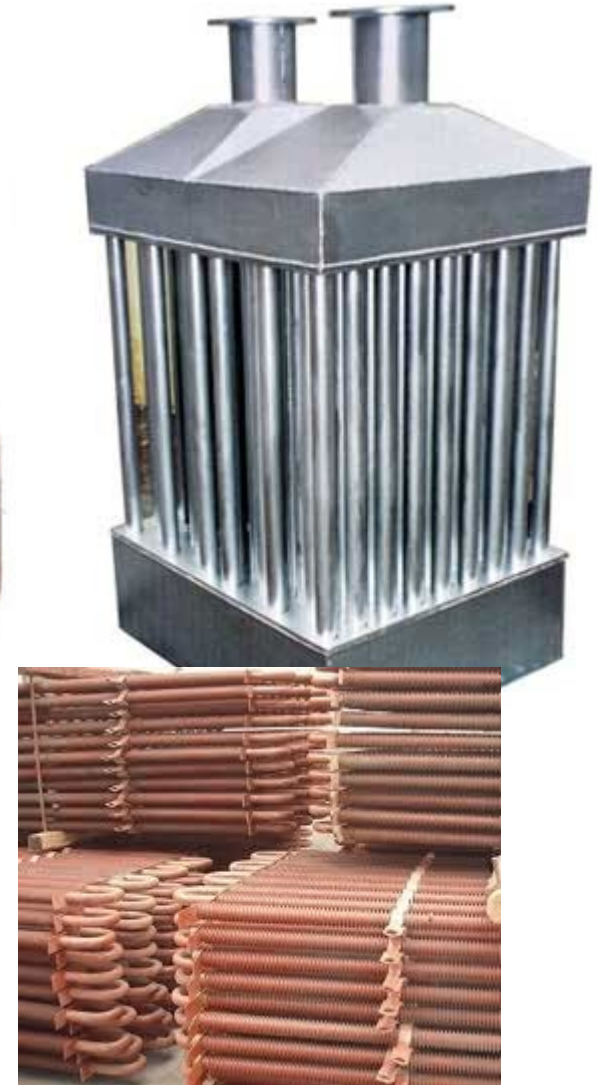
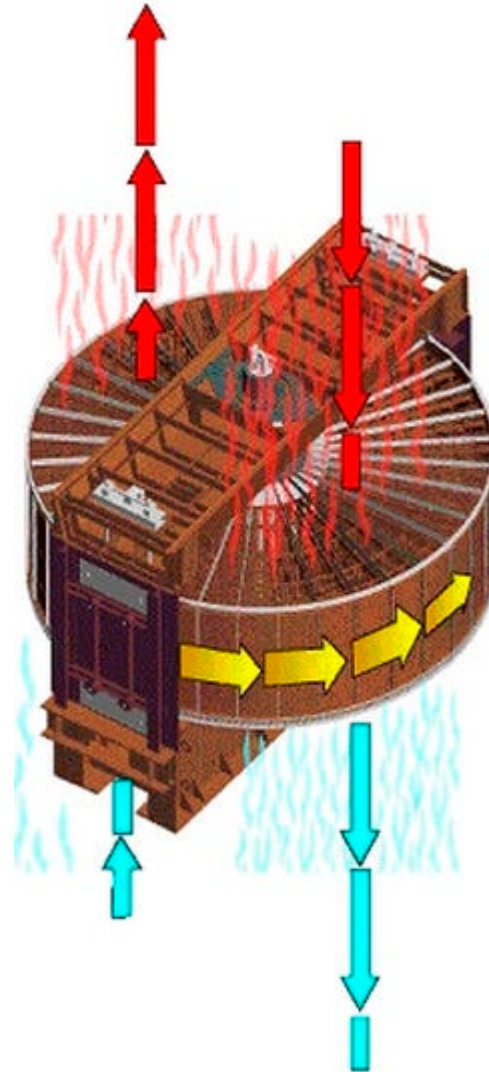


13.6.7 Pré-aquecedores de ar

O pré-aquecedor de ar tubular é utilizado para o aquecimento do ar primário e o regenerativo utilizado para o aquecimento do ar secundário. No caso dos projectistas da caldeira não quererem usar uma combinação de pré-aquecedor de ar tubular e regenerativo, então eles optam pela escolha de um aquecedor de ar regenerativo de três sectores. Normalmente, o ar ambiente é aquecido até cerca de 300-350 graus centígrados o que resulta numa queda da temperatura do gás de combustão de cerca de 230-250 graus centígrados. Assim, para cada grau de aumento na temperatura do ar, corresponde aproximadamente 0,8 grau de redução na temperatura do gás de combustão.



13.6.7 Pré-aquecedores de ar



13.6.7 Pré-aquecedores de ar

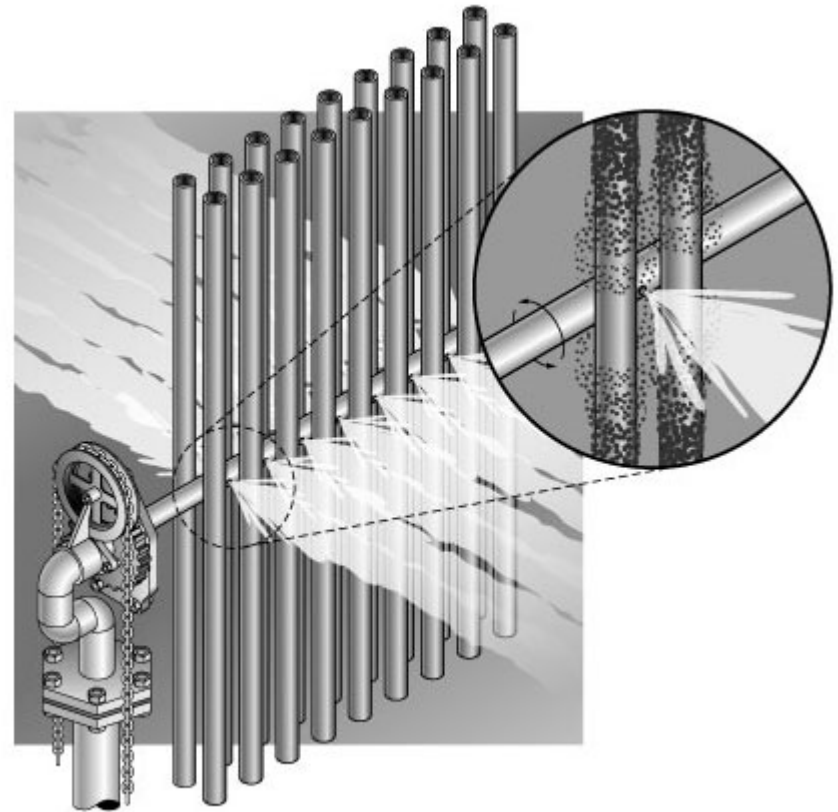
Os pré-aquecedores de ar de serpentina de vapor são outro tipo de pré-aquecedores. Estes são utilizados apenas durante o arranque da caldeira para evitar a corrosão a baixa temperatura. Este aquecedor de ar não contribui para a melhoria da eficiência da caldeira, mas é proporcionado para melhorar a disponibilidade. Como durante o arranque a probabilidade de corrosão devido a baixa temperatura é elevada, torna-se evidente a necessidade de prover o gerador de calor de aquecedores de ar de serpentina.

Tanto os economizadores como os pré-aquecedores de ar, são chamados sistemas de recuperação de calor de uma caldeira. Se não fosse devido a estes sistemas de recuperação de calor, as caldeiras actuais estariam a operar a níveis de eficiência muito mais baixos.



13.6.8 Sopradores de fuligem

Os sopradores de fuligem (ramonadores) permitem uma distribuição rotativa de um jato de vapor no interior da caldeira e tem por finalidade, fazer a remoção da fuligem e depósitos formados na superfície externa da zona de convecção das caldeiras.

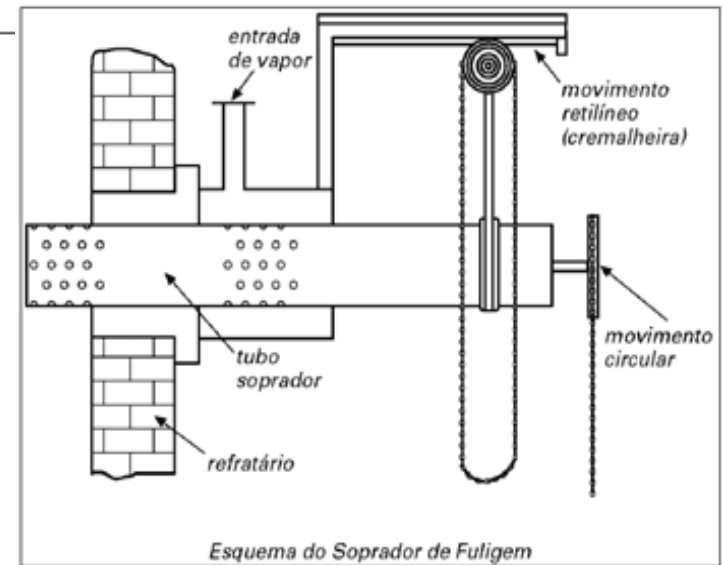
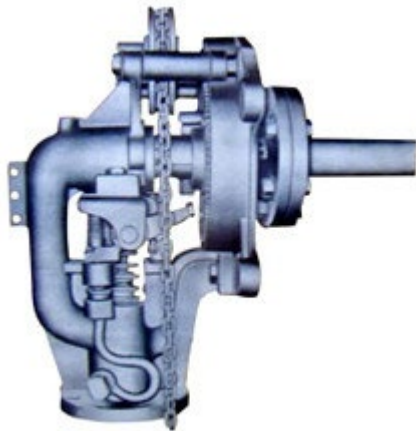
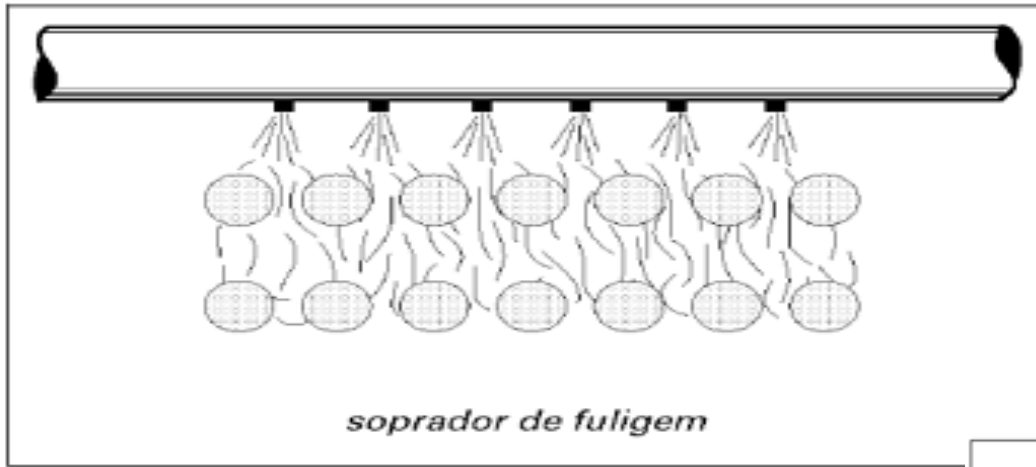


©National Technology Transfer, Inc. All Rights reserved.



13.6.8 Sopradores de fuligem

- A figura a seguir mostra como é feita esta sopragem.



13.7 - Caldeiras Mistas

A necessidade de utilização de combustíveis sólidos para caldeiras de pequena capacidade fez surgir uma solução híbrida que são as caldeiras mistas. Basicamente são caldeiras flamotubulares com uma antecâmara de combustão com paredes revestidas de tubos de água. Na antecâmara se dá a combustão de sólidos através de grelhas de diversos tipos possibilitando assim o espaço necessário para os maiores volumes da câmara de combustão necessários à combustão de sólidos, principalmente em grandes tamanhos, tais como lenha em toras, cavacos, etc, além da possibilidade de retirada de cinzas por baixo das grelhas (o cinzeiro).

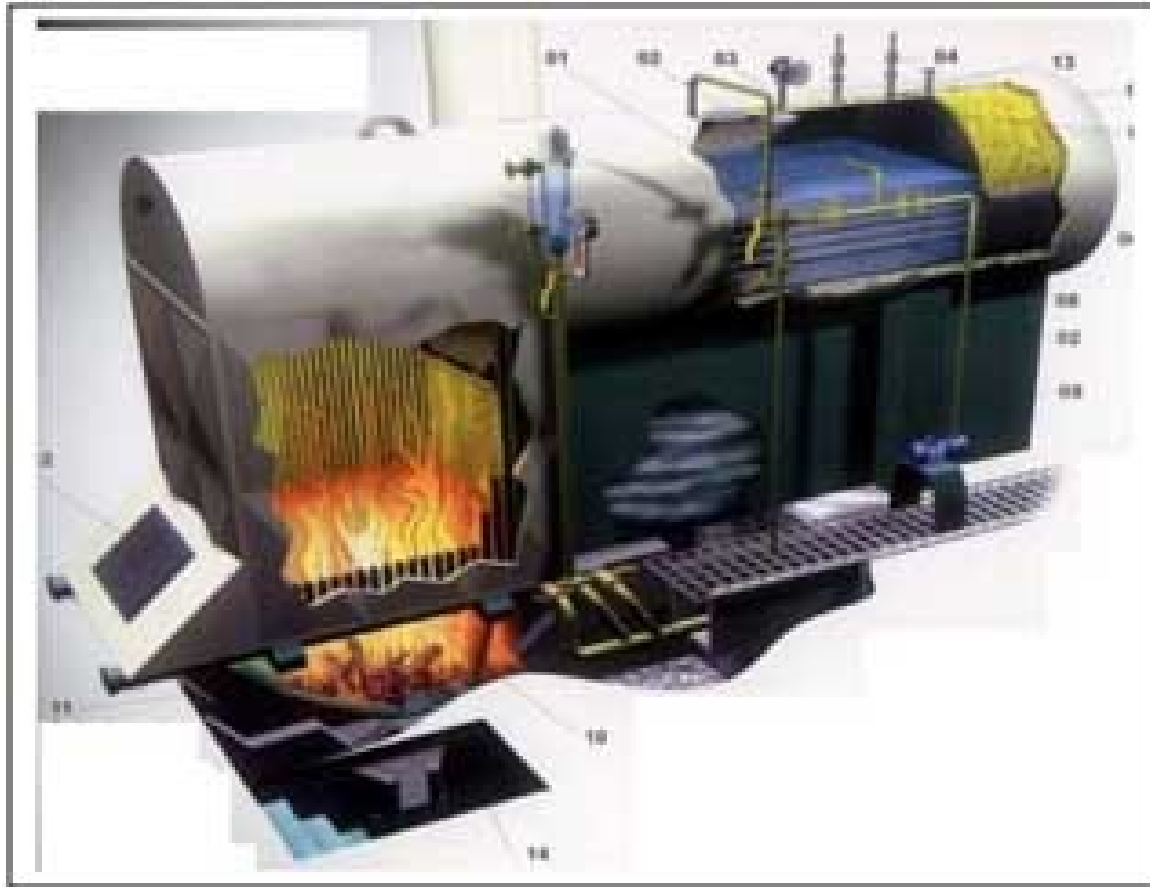




13.7 - Caldeiras Mistas

As caldeiras mistas não reúnem todas as vantagens da aquatubular, como a segurança, maior eficiência térmica, etc., porém, é uma solução prática e eficiente quando se tem disponibilidade de combustível sólido a baixo custo. Tem ainda a possibilidade de queimar combustível líquido ou gasoso, com a instalação de queimadores apropriados. O rendimento térmico destas caldeiras são menores que as flamotubulares, devido a perda de calor pela antecâmara. Dificilmente as paredes frontais e traseira são revestidas de tubos, devido a dificuldade construtiva pelo pequeno tamanho da caldeira.

13.7 - Caldeiras Mistas



Caldeiras Mistas

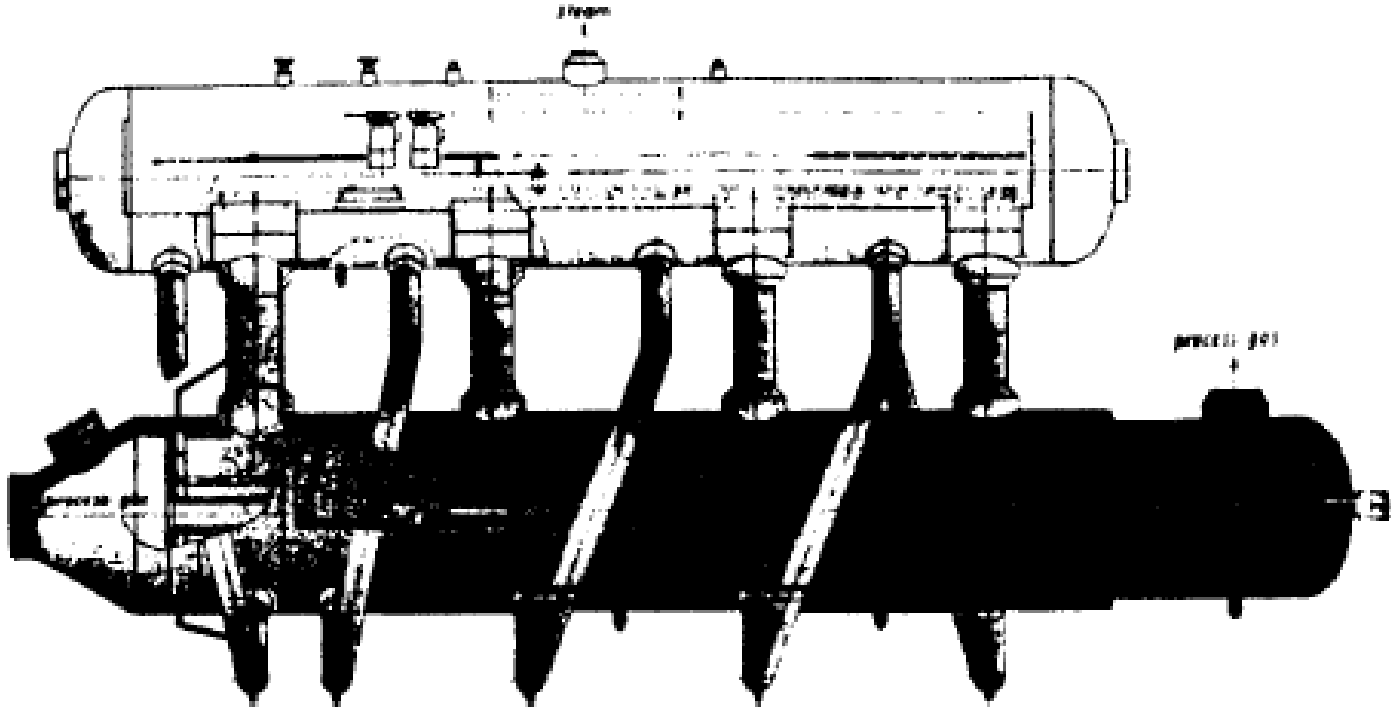


13.8- Caldeiras de recuperação de calor

Alguns processos de fabricação geram gases de processo ou de combustão com temperatura alta o suficiente para se recuperar calor destes. Como exemplo, gases de alto forno ou gases de processos de fabricação de amônia ou produtos de combustão de incineradores e fornos de alta temperatura. Neste caso, a caldeira pode ser tanto aquatubular como flamatubular, valendo ainda a escolha pela capacidade de produção de vapor, optando-se pela aquatubular para maiores capacidades.



13.8- Caldeiras de recuperação de calor



Caldeiras de Recuperação de Calor

