



ENGENHEIRO DE SUPRIMENTOS
DISCIPLINA DE FABRICAÇÃO E MONTAGEM DE CALDEIRAS E
TROCADORES DE CALOR
AGOSTO/SETEMBRO DE 2008
Escola Politécnica – Depto. Enga. Mecânica

TIPOS E APLICAÇÕES DE CALDEIRAS

Nilson Ribeiro Leite, ribeiroleiti@ig.com.br¹
Renato de Abreu Militão, Renato_militao@hotmail.com²

¹ Escola Politécnica- Depto. de Engenharia Mecânica da EPUSP-PROMINP, ribeiroleiti@ig.com.br

² Escola Politécnica- Depto. de Engenharia Mecânica da EPUSP-PROMINP, Renato_militao@hotmail.com

Resumo: *Este trabalho teve como objetivo, estudar as caldeiras ou geradores de vapor, que são equipamentos utilizados para transformar água em vapor. Abordaremos as suas classificações: Flamotubulares e Aquotubulares.*

Esses equipamentos são usados para instalações onde se deseja ter a obtenção de vapor ou vapor superaquecido, na qual trocamos calor com um fluido de menor temperatura. Este trabalho foi desenvolvido na disciplina do curso de Fabricação e Montagem de Caldeiras e Trocadores de Calor do programa do Curso de Especialização de Engenheiro de Suprimentos – Construção e Montagem amparado pelo Depto. de Engenharia Mecânica da EPUSP.

Palavras-chave: *caldeiras, flamotubular, aquotubular*

1. INTRODUÇÃO

Caldeira ou Gerador de vapor é um equipamento que se destina a gerar vapor através de um troca térmica entre o combustível e a água, sendo que isto é feito por este equipamento construído com chapas e tubos cuja finalidade é fazer com que a água se aqueça e passe do estado líquido para o gasoso, aproveitando o calor liberado pelo combustível que faz com que as partes metálicas da mesma se aqueçam e transfiram calor à água produzindo o vapor.

A finalidade de se gerar o vapor veio da revolução industrial e os meios da época que se tinha era de pouca utilização, mas o vapor no início serviu para a finalidade de mover máquinas e turbinas para geração de energia e locomotivas, com o advento da necessidade industrial se fez necessário à necessidade de cozimentos e higienização e fabricação de alimentos, se fez necessário à evolução das caldeiras.

Com isto se utiliza o vapor em laticínios, fábricas de alimentos (extrato de tomate, doces), gelatinas, curtumes, frigoríficos, indústrias de vulcanização, usinas de açúcar e álcool, tecelagem, fábricas de papel e celulose entre outras.

2. CALDEIRAS

2.1. Descrição

As caldeiras ou geradores de vapor, são equipamentos destinados a transformar água em vapor.

A energia necessária à operação, isto é, o fornecimento de calor sensível à água até alcançar a temperatura de ebulição, mais o calor latente a fim de vaporizar a água e mais o calor de superaquecimento para transformá-la em vapor superaquecido, é dada pela queima de um combustível.

2.2. Classificação

Conforme o tipo, as caldeiras podem ser classificadas em:

- Flamotubulares;
- Aquotubulares.

2.2.1. Caldeiras flamotubulares

No primeiro caso, os gases quentes passam por dentro de tubos, ao redor dos quais está a água a ser aquecida e evaporada. Os tubos são montados à maneira dos feixes de permutadores de calor, com um ou mais passos dos gases quentes através do mesmo. Na figura 01, podemos ver em corte uma caldeira deste tipo. As caldeiras flamotubulares são empregadas apenas para pequenas capacidades e quando se quer apenas vapor saturado de baixa pressão.

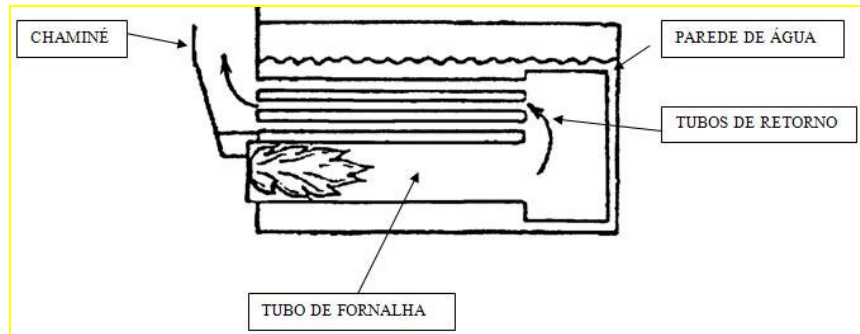


Figura 1. Caldeira flamotubular de traseira molhada, com dois passes, para óleo e gás.

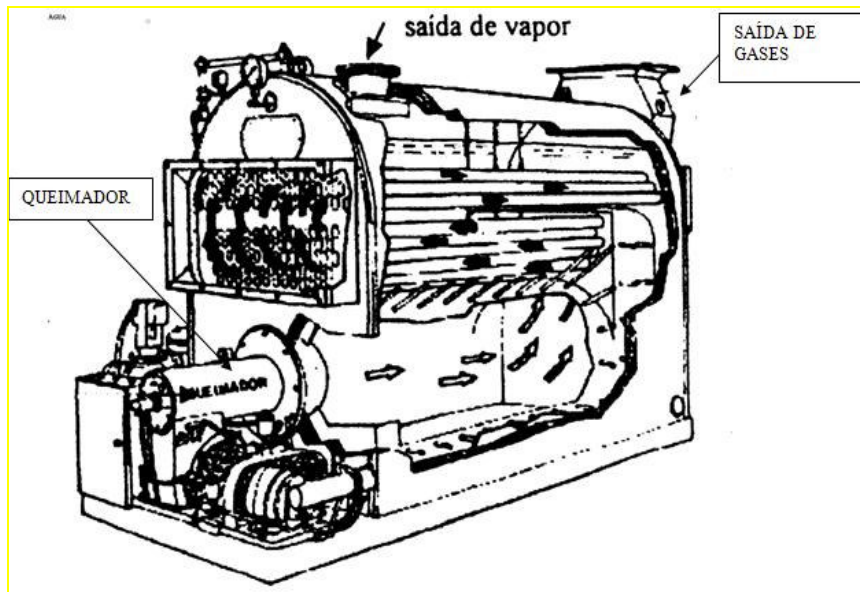


Figura 2. Caldeira flamotubular de três passes.

2.2.2. Caldeiras aquotubulares

O outro tipo, que é o mais empregado, como o próprio nome indica, tem circulação de água por dentro dos tubos e os gases quentes envolvendo-os. São usados para instalações de maior porte e na obtenção de vapor superaquecido. Sendo este tipo o mais importante, veremos com mais detalhes seus componentes.

2.2.2.1. Componentes

Encontramos nestas caldeiras, geralmente, os seguintes componentes:

- Câmara de combustão
- Tubos
- Coletores
- Tubulão
- Superaquecedor
- Sopradores de fuligem
- Pré-aquecedor de ar.
- Economizador
- Alvenaria (refratários)
- Queimadoras
- Ventiladores
- Chaminé
- Válvulas de segurança

A câmara de combustão é a região onde se dá a queima do combustível, com produção dos gases de combustão que fornecem calor à água.

Os tubos servem para a circulação de vapor e água dentro da caldeira, a fim de permitir a troca de calor entre os gases quentes de combustão e a água ou vapor.

Os coletores são peças cilíndricas, às quais chegam e saem conjuntos de tubos, cuja finalidade, como o próprio nome indica, é coletar água ou vapor.

O tubulão é um tambor horizontal, situado no ponto mais alto do corpo principal da caldeira, ao qual acham-se conectados, através de tubos, os coletores, que se encontram em níveis diferentes dentro da caldeira.

A água circula várias vezes através do conjunto tubulão-coletores descendo pelos tubos externos e retornando pelos internos. Essa circulação natural é provocada pela diferença de pressão exercida pelas colunas líquidas e pelas correntes de convecção formadas. A coluna externa contendo somente água é mais pesada do que a coluna interna contendo água + vapor, promovendo então a circulação. A parte vaporizada vai se armazenando no tubulão, enquanto o líquido volta a circular.

Além de acumular o vapor, o tubulão recebe também a água de alimentação, que vem do economizador. O espaço acima do nível d'água no tubulão, chama-se espaço de vapor.

Para evitar o arraste de gotículas de líquido junto ao vapor no espaço de vapor existem chicanas com a finalidade de separar o líquido arrastado.

O vapor saturado separado no tubulão passa a outro conjunto de serpentinas, o superaquecedor, onde é obtido o seu superaquecimento. As serpentinas do superaquecedor têm suas extremidades ligadas a dois coletores de vapor. O superaquecedor pode situar-se na zona de radiação ou convecção, conforme o grau de superaquecimento para o qual as caldeiras são projetadas.

O pré-aquecedor de ar é utilizado para, aproveitando parte do calor dos gases residuais de combustão, aquecer o ar de alimentação das chamas.

No economizador, a água de alimentação passa por uma serpentina ou feixe tubular, a fim de aproveitar também o calor dos gases residuais da combustão, para depois ir, então, ao tubulão já pré-aquecido, o que representa uma economia de energia.

As paredes da caldeira são revestidas internamente de tijolos refratários, resistentes a altas temperaturas, que protegem as partes metálicas estruturais da caldeira contra deterioração por alta temperatura e produzem homogeneização da temperatura por reflexão do calor das chamas.

Os maçaricos das caldeiras são semelhantes aos dos fornos.

Os sopradores de fuligem são tubos providos de orifícios, inseridos transversalmente aos tubos das serpentinas, em diversos locais da caldeira. São ligados, externamente à caldeira, ao sistema de vapor. Durante a operação da caldeira, há deposição de fuligem nos tubos, o que dificulta a transferência de calor. De tempos em tempos, então, é injetado vapor através deste sistema com a finalidade de remover a fuligem. Para melhorar a atuação dos mesmos, os sopradores geralmente têm movimento de rotação, atuando assim em maior área.

Os ventiladores têm a finalidade de movimentar o ar de combustão até os queimadores na câmara de combustão e os gases da câmara de combustão até a chaminé. Existem dois tipos funcionais de ventiladores: de tiragem forçada, que apanha o ar atmosférico e o envia através dos dutos da caldeira para os queimadores e o de tiragem induzida, instalado na saída da caldeira, que succiona os gases de combustão de dentro da câmara e os conduz à chaminé.

A chaminé é a parte que conduz os gases de combustão à atmosfera (em altura suficientemente grande para que não venham a ser danosos ao meio ambiente).

As válvulas de segurança são válvulas especiais, instaladas no tubulão, cuja finalidade é dar saída ao vapor no caso deste atingir uma pressão superior a um máximo admitido pelas condições de segurança operacional.

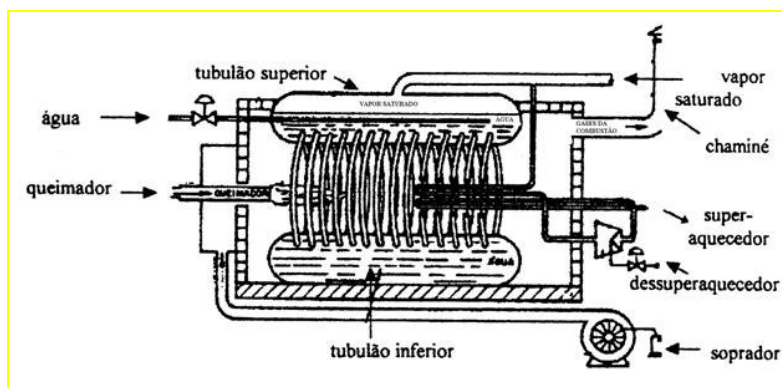


Figura 3. Caldeira aquotubular típica.

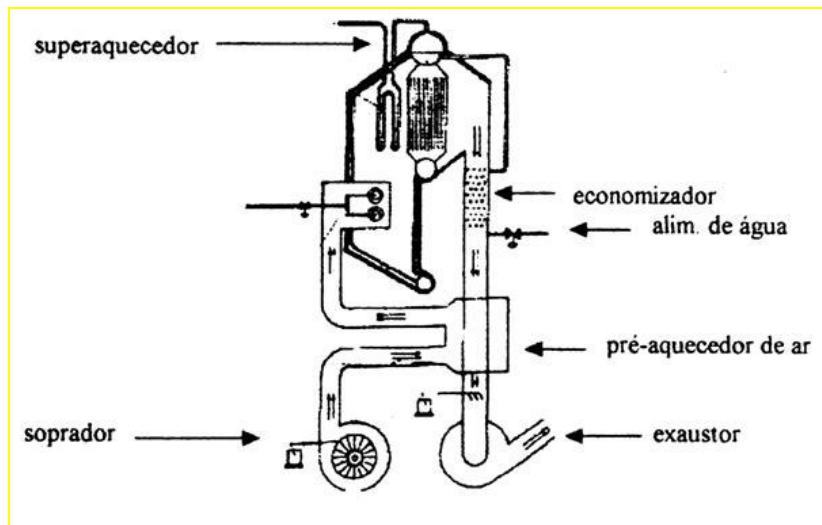


Figura 4. Superaquecedor.

2.3. Causas de deterioração de caldeiras

Veremos a seguir três tipos de males que ocorrem em caldeiras, os quais podem ser agravados pela ocorrência de mais de um, simultaneamente.

2.3.1. Superaquecimento

O superaquecimento consiste na elevação da temperatura de componentes ou de partes de componentes, acima da temperatura máxima a que o material pode resistir sem sofrer danos.

Esta elevação de temperatura localizada pode ser devida:

❖ **Deposições nas paredes dos tubos:**

- externas —> devido ao óleo combustível;
- internas —> devido à incrustação de material existente na água.

❖ **Incidência de chama, provocada por:**

- funcionamento anormal
- deficiência de montagem
- defeito do queimador.

❖ **Circulação deficiente de água devido a:**

- Obstruções internas;
- Falha de alimentação.

❖ **Deterioração do refratário**

2.3.2. Corrosão

- **Internamente aos tubos, tubulão, coletores etc.,** devido a deficiência de tratamento da água e, no caso da presença de oxigênio (O_2) e dióxido de carbono (CO_2) dissolvidos, devido a má desaeração.
- **Externamente aos tubos,** devido à formação de sais de vanádio, no caso de o mesmo estar presente no óleo combustível, que agem como catalisadores na formação de ácido sulfúrico a partir de SO_2 (formado pela combustão de produtos de enxofre, que se encontram no óleo combustível).
- **Na parte externa da caldeira,** devido às condições atmosféricas.

2.3.3. Deterioração mecânica

Aparecimento de trincas e ruptura de materiais devido a:

- Fadiga térmica
- Fluência ou “creep”
- Choques térmicos

- Explosão na câmara de combustão
- Uso impróprio das ferramentas de limpeza
- Recalque das fundações.

2.4. Tipos de Caldeiras Flamotubulares

As caldeiras de tubos de fogo ou tubos de fumaça, fogotubulares, flamotubulares ou ainda gás-tubulares são aquelas em que os gases provenientes da combustão (gases quentes) circulam no interior dos tubos e a água a ser aquecida ou vaporizada circula pelo lado de fora.

Este tipo de caldeira é o de construção mais simples, e pode ser classificado quanto à distribuição dos tubos, que podem ser tubos verticais ou horizontais.

2.4.1. 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.

As fornalhas externas são utilizadas principalmente no aproveitamento da queima de combustíveis de baixo poder calorífico, tais como: serragem, palha, casca de café e de amendoim e óleo combustível (1A, 2A ... etc.)

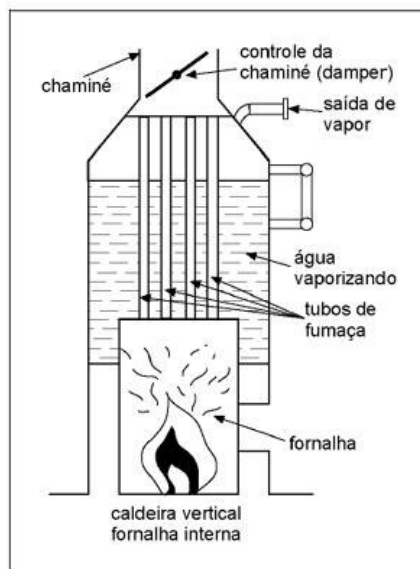


Figura 5. Exemplo de caldeira flamotubular vetical.

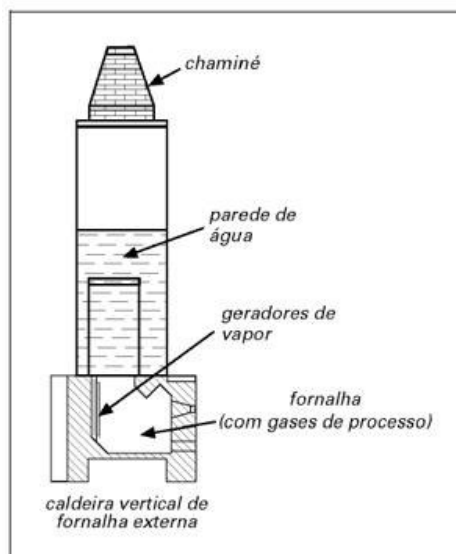


Figura 6. Um outro exemplo de caldeira flamotubular vetical.

2.4.2. 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.

2.4.2.1. Tipos de caldeiras de tubos horizontais

2.4.3. Caldeiras de Cornuália

A caldeira Cornuália, um dos primeiros modelos desenvolvidos, é constituída de um tubulão horizontal ligando a fornalha ao local de saída de gases. É de funcionamento simples, porém de rendimento muito baixo.

Suas principais características são: pressão máxima de operação de 10 kgf/cm², vaporização específica 12 a 14 kg de vapor/m² e máximo de 100m² de superfície.

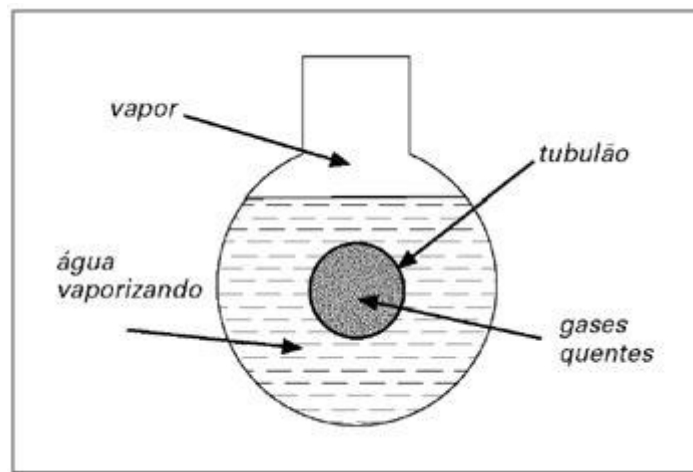


Figura 7. Exemplo de caldeira Cornuália.

2.4.4. Caldeiras Lancaster

A caldeira Lancaster são de construção idêntica à anterior, porém tecnicamente mais evoluída.

Pode ser constituída de dois a quatro tubulões internos e suas características são: área de troca térmica de 120 a 140m² e vaporização de 15 a 18 kg de vapor/m². Algumas delas apresentam tubos de fogo e de retorno, o que apresenta uma melhoria de rendimento térmico em relação às anteriores.

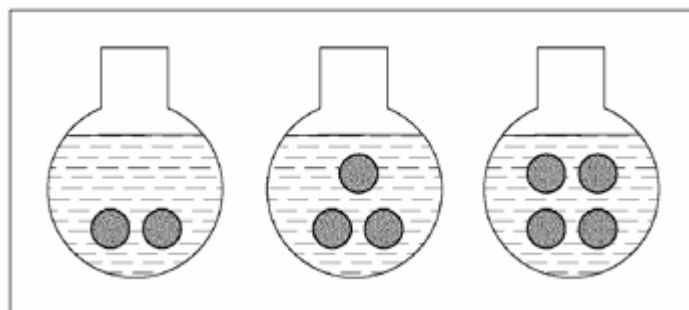


Figura 8. Exemplo de caldeira caldeira Lancaster.

2.4.5. Caldeiras multitubulares de fornalha interna

Como o próprio nome indica possui vários tubos de fumaça. Podem ser de três tipos:

2.4.5.1. Tubos de fogo diretos

Os gases percorrem o corpo da caldeira uma única vez.

2.4.5.2. Tubos de fogo de retorno

Os gases provenientes da combustão no tubulação da fornalha circulam tubos de retorno.

2.4.5.3. Tubos de fogo diretos e de retorno

Os gases quentes circulam pelos tubos diretos e voltam pelos de retorno.

2.4.6. Caldeiras multitubulares de fornalha externa

Em algumas caldeiras deste tipo a fornalha é constituída pela própria alvenaria, situada abaixo do corpo cilíndrico.

Os gases quentes provindos da combustão entram inicialmente em contato com a base inferior do cilindro, retornando pelos tubos de fogo.

Na caldeira multitubular, a queima de combustível é efetuada em uma fornalha externa, geralmente construída em alvenaria instalada abaixo do corpo cilíndrico. Os gases quentes passam pelos tubos de fogo, e podem ser de um ou dois passes. A maior vantagem é poder queimar qualquer tipo de combustível.

Na figura a seguir, temos um exemplo de caldeira multitubular:

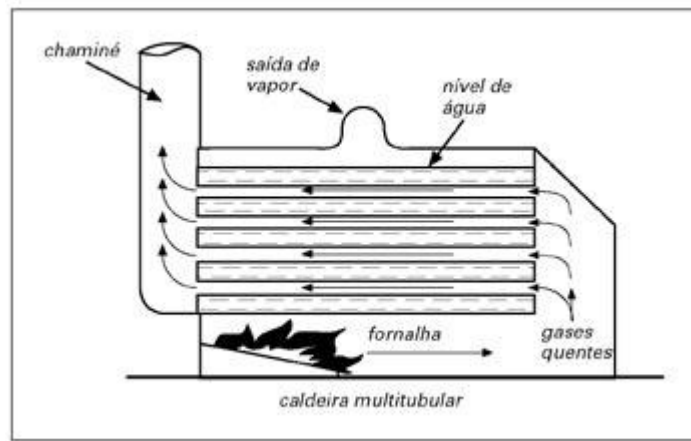


Figura 9. Exemplo de caldeiras multitubulares.

2.4.7. Caldeiras locomóvel

As caldeiras locomóveis, também do tipo multitubular, têm como principal característica apresentar uma dupla parede em chapa na fornalha, pela qual a água circula.

Sua maior vantagem está no fato de ser fácil a sua transferência de local e de poder produzir energia elétrica. É usada em serrarias junto à matéria-prima e em campos de petróleo.

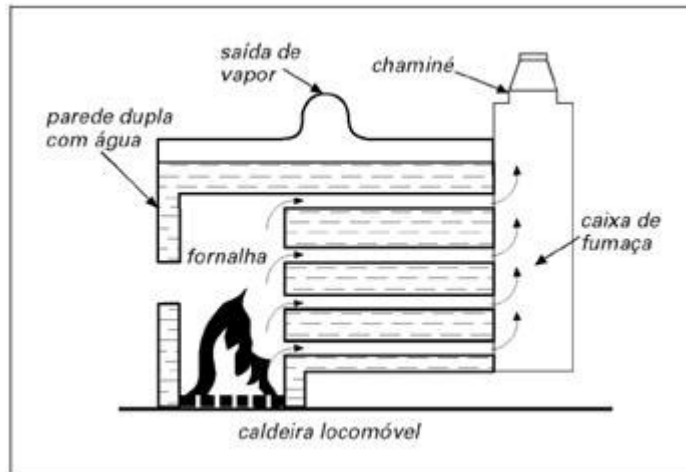


Figura 10. Exemplo de caldeiras locomóvel.

2.4.8. Caldeiras escocesas

A caldeira escocesa, criada basicamente para uso marítimo, é o modelo de caldeira industrial mais difundido no mundo. É destinada à queima de óleo ou gás, tendo ainda pressão máxima de 18 kgf/cm², rendimento térmico em torno de 83% e taxa de vaporização de 30 a 35 kg de vapor/m².

2.4.9. Vantagens e Desvantagens das Caldeiras Flamotubulares

2.4.9.1. Vantagens

As principais vantagens das caldeiras deste tipo são:

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

2.4.9.2. Desvantagens

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

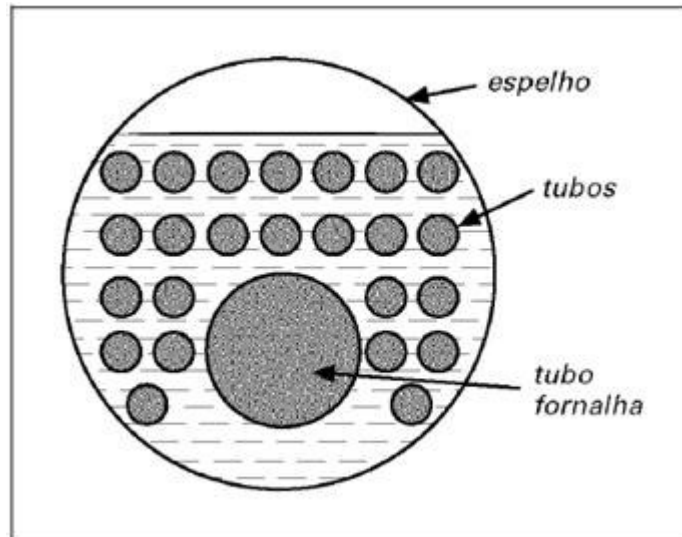
2.5. Partes das Caldeiras Flamotubulares

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

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 (normalmente máximo de 20 kgf/cm²) pelo diâmetro do corpo destas caldeiras.

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.



2.6. Figura 11. Partes das caldeiras flamotubulares.

A caixa de fumaça é o local por onde os gases da combustão fazem a reversão do seu trajeto, passando novamente pelo interior da caldeira (pelos tubos de fogo).

O desenho a seguir mostra os componentes de uma caldeira flamotubular típica.

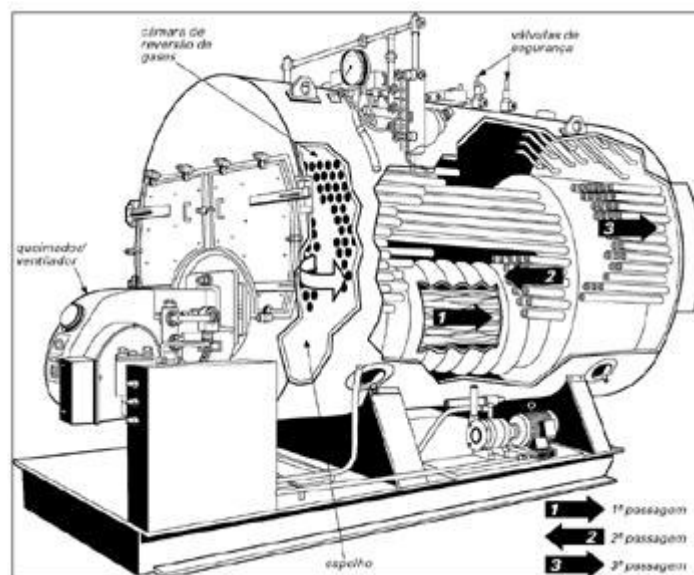


Figura 12. Caldeira flamotubular típica

2.7. Eficiência de uma caldeira fogotubular

A eficiência de uma caldeira fogotubular não é um cálculo misterioso. esta breve explanação tem o objetivo de orientar técnicos e engenheiros sobre a eficiência das caldeiras e para os usuários do programa eficiência steammaster. e, se para muitos o assunto já é repetitivo, para outros pode ser muito esclarecedor. persistindo dúvidas entre em contato. eficiência da combustão eficiência de combustão é a indicação da habilidade do queimador em queimar o combustível.

a quantidade de combustível não queimado e o ar em excesso são usados para definir a eficiência de combustão de um queimador. a maior parcela das perdas apresentadas por uma caldeira se dá pelos gases da combustão que são lançados pela chaminé. se um queimador não consegue obter uma queima limpa com baixo excesso de ar, é então regulado para trabalhar com excesso de ar, sendo que este excesso de ar só abaixa a temperatura da chama e reduz a capacidade de geração da caldeira, rebaixando também drasticamente a eficiência.

Queimadores trabalhando com níveis baixos de combustíveis não queimados e operando a um nível de excesso de ar baixo (em torno de 15%) são considerados eficientes.

2.7.1. Eficiência Térmica

Eficiência térmica é a medida da eficácia da troca de calor da caldeira. Ela mede a habilidade em transferir calor do processo de combustão para a água ou vapor na caldeira. Por ser unicamente uma medida da eficácia da troca de calor da caldeira, ela não leva em conta a radiação e perdas de convecção do casco da caldeira, coluna d'água, ou outros componentes. Desta forma não é verdadeira sua indicação do uso do combustível na caldeira; Contudo, aliada à verificação da combustão, pode nos fornecer uma boa indicação de como está a eficiência da caldeira. De fato, se você verifica que não há pontos com temperaturas muito altas, no casco ou outras partes da caldeira, não há vazamentos de vapor ou gases de combustão. Uma simples análise da temperatura e composição dos gases da chaminé pode nos oferecer dados confiáveis para o cálculo da eficiência. Além disto existem graficos fornecido pela Steammaster com a estimativa das perdas diversas de acordo com a carga de trabalho.

2.7.2. Eficiência da Caldeira

Eficiência da caldeira é a eficiência pura da transferência de calor do combustível para o vapor, a qual leva em conta a radiação e perdas de convecções. É uma indicação verdadeira da eficiência total da caldeira.

Como descrito no ASME POWER TEST CODE, PTC 4.1, a eficiência combustível-vapor de uma caldeira pode ser determinada por 02 métodos; o método entrada-saída e o método perdas de calor.

2.7.2.1. Método entrada-saída:

A eficiência por este método é baseada na proporção da saída e entradas de calor na caldeira. Ela é calculada em se dividindo a saída da caldeira (Kcal) pela entrada da caldeira (Kcal) e multiplicando por 100. A entrada atual e saída da caldeira são determinadas pela instrumentação e os dados são usados nos cálculos que resultam na eficiência combustível para vapor sendo ainda hoje o método mais difícil de se realizar devido à necessidade de se conhecer com precisão, no mínimo os seguintes parâmetros: vazão de vapor, água, combustível e a temperatura destes.

2.7.2.2. Método perdas de calor:

O método de medida de eficiência Equilíbrio de Calor é baseado na consideração de todas as perdas de calor da caldeira. O método para cálculo atual consiste da subtração de 100% do total das perdas, sendo que o valor resultante é a eficiência combustível vapor da caldeira.

2.7.3. Perdas na chaminé:

É a maior porção das perdas do calor onde muito dinheiro é jogado fora todos os dias. Este é um bom indicador da eficiência da caldeira. A temperatura na chaminé é a temperatura dos gases de combustão (seco ou úmido) deixando a caldeira e refletindo diretamente na energia que não se transferiu do combustível para o vapor ou água quente.

Quanto menor a temperatura na chaminé, maior será a eficiência da caldeira, e hoje nenhuma caldeira no Brasil consegue temperaturas de chaminé menores que a Steammaster.

2.7.4. Perdas de Convecção e Radiação:

Todas as caldeiras têm perdas de convecção e radiação. As perdas representam a radiação do calor da caldeira para o ambiente.

Radiações e perdas de convecções expressas em Kcal/h, são essencialmente constantes na área de caldeira, mas variam entre diferentes tipos de caldeiras, tamanhos, pressões de operação e carga de trabalho. Todas as caldeiras Steammaster FOUR, são isoladas com 100 mm de lã de rocha de alta densidade, com proteção em aço inoxidável (toda a caldeira é isenta de amianto).

2.7.5. Componentes da Eficiência:

A eficiência da caldeira, quando calculada pelo método de equilíbrio de calor ASME, inclui perdas na chaminé e radiação e convecções. Mas que fatores têm efeito maior na eficiência de uma caldeira? Em uma primeira discussão, o projeto da caldeira é o maior fator.

São fatores-chaves para entendermos os cálculos de eficiência da caldeira: Temperatura dos gases (Temperatura da chaminé); Especificações do combustível; Ar excesso; Temperatura do ar ambiente; Perdas por radiação e convecção.

2.7.5.1. Temperatura dos gases:

É a temperatura dos gases combustos assim que saem da caldeira.

Um modo em potencial de manipular um valor de eficiência é utilizar uma temperatura dos gases menor do que a real nos cálculos. Quando estiver analisando um cálculo de eficiência, verifique a temperatura dos gases. Ela é real? Ela é próxima ou menor do que a temperatura dos fluidos (água) no interior da caldeira?

Para caldeiras FOUR Steammaster, garantimos temperaturas de gases de chaminé tão baixas quanto 45°C acima da água da caldeira, para 100% da carga. E isto só a Steammaster faz.

Não seja tolo em estimar temperaturas de chaminé. Tenha certeza da prova dela.

2.7.5.2. Especificação do Combustível:

A especificação do combustível pode também ter um efeito dramático sobre a eficiência. No caso de combustíveis gasosos, o maior teor de hidrogênio forma mais vapor de água durante a combustão. Este vapor de água usa energia assim que muda de fase no processo de combustão. (A água que acaba de ser formada na combustão do hidrogênio formando H₂O, se evapora exigindo para isto seu calor de vaporização que é então lançado na chaminé). Esta é a razão porque o óleo combustível queima em um nível de eficiência maior do que o gás natural.

Quando estiver analisando o cálculo ou eficiência garantida, verifique as especificações do combustível, é a representação do combustível que você usará na caldeira? A representação da eficiência da combustão usando baixo teor de hidrogênio poderá não ser uma avaliação apurada do seu consumo de combustível.

2.7.5.3. Excesso de ar:

Excesso de ar é o ar extra provido para o queimador, além do ar requerido para a completa combustão. Ele é fornecido para o queimador porque uma queima sem ar suficiente ou o estritamente necessário (queima estequiométrica) não é possível em queimadores industriais.

Mudanças sazonais na temperatura e pressão barométrica, podem causar excesso de ar em uma caldeira numa média de 5% a 10%, ou provocar a queima num nível de baixo excesso de ar podendo resultar em alto CO e fuligem na caldeira.

O ar é então provido em excesso para o queimador permitindo um fator de segurança, jogando fora porém energia em potencial que poderia ser transferida para água na caldeira. Neste caso, ar em excesso acima do tecnicamente correto, reduz a eficiência da caldeira, aumentando drasticamente as perdas nos gases da chaminé, lembre-se que o ar entra no queimador, a temperatura ambiente sai na chaminé a centenas de graus acima.

Um projeto de queimador de qualidade permitirá queima a um nível máximo de excesso de ar em torno de 15% (3% como 02).

O O₂ representa a porcentagem de oxigênio no gás. Excesso de ar é medido por coleta (amostra) no gás. Para por exemplo 15% de excesso de ar, O₂ 3%.

O fato é que, mesmo com a capacidade teórica do queimador de rodar com nível de excesso de ar menor que 15%, raramente estão disponíveis para isto na prática. O nível de excesso de ar real para uma caldeira em operação é 15%, se um fator de segurança apropriado estiver sendo mantido. Se menos que 15% de excesso de ar estiver sendo usado para calcular a eficiência, isto é pouco provável de se obter, pelo menos não por muito tempo e você estará provavelmente baseando seu uso de combustível numa eficiência maior do que a real no dia-a-dia. Solicite ao vendedor do equipamento para recalcular a eficiência a um valor de excesso real.

2.7.5.4. Temperatura ambiente:

A temperatura ambiente pode ter um efeito dramático na eficiência da caldeira. Uma variação de 5°C na temperatura ambiente pode ter uma consequência na eficiência de 1% ou mais. A maioria das casas de caldeira são relativamente quentes. Logo, a maioria dos cálculos de eficiência são baseados em temperaturas ambientes de 26° C. Quando analisar os cálculos da eficiência garantida, verifique as condições do ar ambiente utilizado. Se um valor maior que 26° C for utilizado, ele não está consistente com a boa prática. E, se a caldeira ficar do lado de fora (da casa), a eficiência será ainda menor, independentemente do projeto da caldeira. Para determinar seu uso atual de combustível, peça para que a eficiência seja calculada nas condições de ambiente reais.

2.7.5.5. Perdas de convecção e radiação:

As perdas de convecção e radiação representam as perdas de calor do vaso de pressão. Caldeiras são isoladas para minimizar estas perdas. No entanto, toda caldeira tem perdas de convecção e radiação.

Às vezes, a eficácia é representada sem as perdas de convecção e radiação. Isto não é um reflexo verdadeiro do uso do combustível da caldeira.

O projeto da caldeira também pode ter um efeito nas perdas de convecção e radiação.

Perdas de radiação e convecção são também uma função da velocidade do ar na casa de caldeiras. Uma típica casa de caldeira não tem velocidades de vento altas. Caldeiras operando do lado de fora no entanto, terão maiores perdas de convecção e radiação.

O termo eficiência da caldeira é freqüentemente substituído por eficiência térmica. E para nós da Steammaster é importante fazer esta distinção, porque se para uma análise/comparação entre momentos diferentes do mesmo equipamento, ou entre equipamentos distintos com a mesma metodologia, a eficiência térmica é aceitável, é bem vinda devido a facilidade em se obter o teor de CO₂ ou O₂, e temperatura; Porém para comprovação na entrega técnica das

caldeiras é preciso definir claramente o que se está e como se está medindo, afim de se evitar aborrecimentos para ambas as partes.

2.7.6. Steammaster four é a caldeira mais eficiente do brasil

Os dados sobre a eficiência, usados para comparação entre caldeiras devem ser baseados em dados comprovados de performance, para dar uma comparação precisa do combustível usado.

Nem todas as caldeiras são igualmente criadas. Algumas diferenças básicas de projeto podem mostrar claramente variações na expectativa do nível de performance de eficiência. A maneira com que afirmam alguns fabricantes de que suas caldeiras apresentam por exemplo 91% de eficiência não tem valor algum, sem a informação clara e inequívoca das condições em que este número é obtido, haja visto que há enorme variação da eficiência perante a alteração por exemplo da pressão de trabalho, da temperatura ambiente e outros. É claro que uma simplificação é bem vinda para uma olhada rápida, porém devemos ter cuidado ao analisar eficiência das caldeiras pois, uma determinada caldeira poderá consumir muitas vezes, o capital inicial a ser gasto, somente com o combustível queimado anualmente.

Conseqüentemente, a diferença de poucos percentuais na eficiência da caldeira, entre diferentes unidades, pode se traduzir em economias substanciais. Assim, o custo inicial (da aquisição e instalação) de uma caldeira é a menor porção do investimento. Custos de combustível e custos de manutenção representam a maior porção, tendo isto em mente a Steammaster prefere esclarecer este assunto de forma clara e como sempre em linguagem a mais acessível possível.

Toda caldeira opera sob os mesmos princípios termodinâmicos fundamentais e imutáveis em todo o planeta. Na Steam Master nós temos construído nossa reputação; produzindo um produto de maior valor e eficiência na indústria. Nós nos orgulhamos em fornecer isto e os fatos dizem que há uma diferença entre caldeiras e fábricas de caldeiras. O valor de uma caldeira Steammaster, pagará a si mesma, todos os dias e todos os anos, durante toda sua vida útil.

A escolha de uma caldeira Steammaster de baixo custo de manutenção e alta eficiência pode realmente fornecer economias e maximizar seu investimento na caldeira. Os dividendos que retornam cada ano, excedem em valor de qualquer economia de custo inicial de um “projeto mais barato”. o importante não é apenas iniciar eficientemente mas continuar a operar eficientemente ano após ano, mesmo após muito tempo e após reparos e consertos. Com relação eficiência vale fazer uma observação, “a eficiência só é útil se for mantida e sustentada por toda a vida da caldeira”.

Escolher a caldeira mais eficiente é mais do que só escolher o fabricante/vendedor que está vencendo quanto à questão de atender ao valor da eficiência dado, ou melhor preço. A tecnologia da caldeira deve prever uma velocidade alta e constante nos gases da combustão sem utilização de artifícios como tubuladores ou tubos aspiralados que causam ao contrário do que se prega, uma maior retenção de fuligens e redução na vida útil dos tubos.

Nós da Steam Master, temos sólidas parcerias com fabricantes dos melhores componentes para as caldeiras. São em sua grande maioria líderes em todo o mundo no ramo em que atuam. Isto é muito melhor do que usar, válvulas, bombas e outros feitos em casa. Nós nos especializamos em caldeiras e queimadores e não abrimos mão, assim como todo técnico não deveria abrir mão de ter os melhores componentes em sua caldeira.

Só o conjunto caldeira/queimador Steammaster, trabalham com baixa perda de carga, válvulas moduladoras com ajuste variável acoplada a *comes*; garantindo a mesma proporção ar/combustível por longos períodos, e baixa pressão no combustível e fluido de atomização. Cuidado com queimadores que trabalham com alta pressão de ar ou combustível, pois estes tendem a não garantir a proporção ar/combustível por longo período.

Quando considerando a substituição de uma caldeira velha, considere os seguintes pontos para ter certeza de que está fazendo a avaliação correta de sua situação:

2.7.6.1. Custos de Manutenção

Verifique seus custos de manutenção cuidadosamente. A caldeira velha está lhe custando dinheiro de várias formas, seja por manutenções emergenciais; tempo parado; maior tempo em manutenção (passado e pendentes); dificuldade em encontrar peças e às vezes caras; tempo do operador em manter a unidade em linha; além de problemas no vaso, queimador e refratários. Muitos destes custos podem estar escondidos em seu orçamento de manutenção geral. Você está pagando o preço por ter desatualizado sua casa de caldeira. Mas o custo precisa ser investigado e totalizado.

2.7.6.2. Performance da Caldeira

As caldeiras Steammaster têm um padrão de performance muito maior do que o de projetos antigos e os ditos “modernos”. Baixo excesso de ar; Operação automática; Projeto de queimador; Controle da combustão eletrônico; Tecnologia de baixa emissão, e Garantia da alta eficiência; Baixa manutenção.

2.7.6.3. Mudança de combustível.

Se sua caldeira antiga utiliza um combustível e você deseja trocar ou precisa avaliar diferentes combustíveis, reveja os custos de conversão e manutenção, avalie a performance e vazão realmente garantida, talvez seja a hora certa para se considerar a compra de uma caldeira nova. Muitas vezes um investimento é feito em uma caldeira velha, onde os custos associados com a próxima maior exigência de manutenção irá justificar a compra da nova unidade. O resultado é perder dinheiro na atualização da unidade antiga.

2.7.6.4. Eficiência Térmica

Seu representante Steam Master pode ajudá-lo a checar a eficiência de sua caldeira antiga com uma simples análise da chaminé. Os dados darão a você uma idéia geral da diferença entre o custo do combustível da caldeira existente e o de uma nova unidade. Baseado nos resultados da avaliação da chaminé, uma avaliação mais completa das necessidades de sua casa de caldeiras seria formada.

A Steammaster disponibiliza a todos um programa de computador desenvolvido por seus técnicos que pode ser usado por qualquer um sem dificuldade, para uma correta avaliação de sua casa de caldeiras.

Espessura do casco, peso, necessidades de *turndown*, necessidades de troca do tipo de combustível, necessidade de controles de emissões, tudo deve ser avaliado. O resultado será uma revisão precisa das economias potenciais em combustíveis, manutenção e eficiência na casa de caldeira, o que poderá significar melhora de custo substancial.

Alta eficiência é o resultado de considerações de projetos reais, incorporados na caldeira. Examinar algumas diferenças de projetos básicos de uma caldeira para outra, pode dar a você uma visão sobre a performance da eficiência esperada.

2.7.7. Diferenças chaves entre caldeiras fogotubulares.

As seguintes questões deverão ser consideradas durante sua avaliação da caldeira:

2.7.7.1. Número de passes da caldeira

O número de passes da caldeira representa o número de vezes que a combustão dos gases quentes passam através da caldeira (existem trocadores de calor com 10 passes dos fluidos ou mais). Uma caldeira com 03 passes fornece 03 oportunidades para os gases quentes transferirem calor para a água na caldeira. Uma unidade de 04 passes, fornece 04 oportunidades. Além disso, a velocidade dos gases permanece alta e uniforme durante todo o trajeto pela caldeira.

Os fatos são claros e incontestáveis. A temperatura da chaminé de uma caldeira 04 passes é mais baixa do que a temperatura da chaminé de uma caldeira similar de 02 ou 03 passes, operando sob as condições similares. A caldeira 04 passes terá sempre eficiência maior e custo menor de combustível. Isto não é uma opinião. Isto é física básica sobre a troca de calor. O projeto da caldeira 04 passes produz incontestavelmente coeficientes de troca de calor mais altos. Não se engane, tubos aspiralados e outros artifícios podem ajudar em um teste de eficiência, mas custará a você em manutenção posteriormente. Na verdade, uma boa caldeira não necessita de manutenção intensiva nos tubos, se a caldeira foi projetada para trabalhar com a velocidade correta dos gases. Cada passe da caldeira possui uma área seccional que garante a velocidade correta do gás e alta taxa de transferência de calor.

2.7.7.2. Superfície de aquecimento

Em termos gerais a superfície de aquecimento em metros quadrado é exatamente a porta por onde o calor gerado na combustão pode ser transmitido para a água, gerando o vapor, de nada adianta um bom queimador e qualquer outro artifício sem área de aquecimento, não se reduz a área de aquecimento sem graves prejuízos para a eficiência da caldeira e até para a produção de vapor. Uma caldeira com pequena área de aquecimento pode produzir o vapor prometido (muitas vezes não o fazem); porém a durabilidade do equipamento será seriamente afetada, e a eficiência alcançada pode durar por apenas algumas semanas. A superfície de aquecimento padrão para uma caldeira fogotubular Steammaster é abaixo de 270cm² x Kg de vapor.

Porque este padrão? Na Steam Master cada detalhe do projeto é calculado com precisão e na área de aquecimento não é diferente. A transferência por radiação/convecção na fornalha, a convecção e radiação gasosa nos tubos, tudo é calculado; o que no caso da área de aquecimento pode resultar em redução da superfície. Porém nossos testes nos mostram e comprovam ano após ano que somente nosso padrão adotado - 270cm²/Kg de vapor garante a produção de vapor e eficiência contínua por toda a vida da caldeira.

2.7.7.3. Queimador/Compatibilidade da Caldeira

Uma caldeira compacta, inclui uma caldeira e um queimador desenvolvidos como uma única unidade, considerando a geometria da fornalha, a radiação e a transferência de calor por convecção, e devem ser testados em conjunto exaustivamente.

Somente com estes requisitos podemos assegurar a performance realmente boa.

O queimador comprado de terceiros irá funcionar na caldeira. Mas, terá capacidade, eficiência, *turndown*(*Capacidade de modular a chama ajustando a queima do combustível a demanda do vapor*), performance de excesso de ar e de Emissões também?

E, quem lhe dará a certeza da performance depois do *start-up* inicial?

Haverá um único fabricante responsável pela performance da unidade na primeira colocação?

Queimadores comprados separadamente podem resultar em um nível de performance menor, um *start-up* maior e exigências de manutenção. Isto pode custar seu dinheiro toda vez que tiver um problema e os técnicos da assistência local não puderem lhe dar o suporte da fábrica.

Quando se trata em escolher a caldeira, insista numa montagem simples e num projeto de queimador acessível para uma verdadeira eficiência e economia real.

2.7.7.4. Projeto do vaso

O projeto do vaso de pressão também tem importância na condução de uma caldeira, uma circulação da água adequada proporciona maior durabilidade e eficiência a caldeira, um bom acesso as partes internas tanto do gás quanto da água, pode facilitar as limpezas e manutenções e inspeções, o projeto e construção do vaso de pressão também é importante com vista a segurança.

A seleção de uma caldeira com projeto de baixo-custo de manutenção e alta eficiência, pode realmente retornar através de economias, seu investimento feito na hora da compra .

Caldeira de alta eficiência é o resultado de critérios específicos de projeto, incluindo:

- Número de passes da caldeira;
- Compatibilidade caldeira/queimador;
- Superfície de aquecimento;
- Projeto do vaso de pressão.

Cálculos de eficiência da caldeira que são precisos e representam de fato o combustível usado, necessita do uso da “prova” e verificação de dados que incluem, como já citado:

- Prova da temperatura da chaminé;
- Especificação precisa do combustível;
- Nível do excesso de ar em operação;
- Temperatura da casa de caldeiras.

Quando for avaliar sua caldeira adquirida, peça ao seu vendedor / fabricante para que através dos cálculos, mostre e prove a eficiência da caldeira. Também verifique o tipo da caldeira e o queimador que está sendo utilizado.

Você pagará pelo combustível na verdade usado, não o combustível estimado, baseado no cálculo de eficiência com dados irreais. Uma vez instalada a caldeira, você não pode voltar atrás e mudar o projeto de eficiência dela.

Tenha certeza que os dados que lhe oferecem serão reais e repetitivos por toda vida do equipamento. A Steammaster é uma das empresa que garantem a performance superior com seus projetos, provando com os cálculos de eficiência e as caldeiras em funcionamento, e podem assim afirmar isto.

3. AGRADECIMENTOS

Agradecemos o Ricardo Suzano do departamento comercial da CBC Indústrias Pesadas S.A pela colaboração e informações para realização deste.

4. REFERÊNCIAS

CBC INDÚSTRIAS PESADAS S.A. <cbc.com@cbcsa.com.br>

Eastop e Mconkey;Applied Thermodynamics for Engineering Technologists, Prentice Hall, 1993

Jorge Martins;Motores de Combustão Interna, Publindústria, 2005

INCROPERA, F. P. *Fundamentos de Transferência de Calor e Massa*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.

Mendes Juanico; Geradores de Vapor, 1995

Mota, Óscar; Apontamentos de Maquinas Térmicas, 1999

MARTINELLI, Luiz Carlos Jr. Geradores de Vapor. Disponível em:

PERA, H. *Geradores de Vapor*. São Paulo: Editora Fama, 1990.



ENGENHEIRO DE SUPRIMENTOS
DISCIPLINA DE FABRICAÇÃO E MONTAGEM DE CALDEIRAS E
TROCADORES DE CALOR
AGOSTO/SETEMBRO DE 2008
Escola Politécnica – Depto. Eng^a. Mecânica

CALDEIRAS DE RECUPERAÇÃO

Thiago Souza de Oliveira, thiagoeng@gmail.com
Wanderley Pedro Rodrigues Soares, wsoares.soares@gmail.com

Prominp, Escola Politécnica – Depto. Eng^a Mecânica

Resumo: *O propósito deste trabalho é apresentar as características e particularidades das caldeiras de recuperação, que é um sistema de coogeração de energia, e tem por finalidade reaproveitar resíduos de processos que seriam descartados reintroduzindo-os no sistema evitando assim os desperdícios.*

Palavras-chave: *caldeiras, recuperação, calor, energia.*

1. INTRODUÇÃO

Desde que o homem dominou os métodos de transformação de energia, o aproveitamento do calor nos meios científicos e tecnológicos vem sendo constante. O melhor aproveitamento da energia e como conseguir o maior rendimento possível é uma questão que pode ser respondida com a utilização das caldeiras de recuperação. Todos os investimentos em relação às áreas de conservação de energia passaram a oferecer respostas positivas quanto às vantagens na diminuição dos custos. O trabalho mostra alguns exemplos de caldeiras de recuperação que são aplicadas em diversas áreas, com diferentes procedimentos, mas com a mesma finalidade de reaproveitar resíduos e transformá-los em energia.

Um enfoque maior na apresentação será atribuído às Caldeiras de Recuperação de Calor e de Produtos Químicos em Fábricas de Celulose devido ao grande volume de informações contidas neste trabalho e também pelo prévio conhecimento adquirido nas aulas.

2. AS CALDEIRAS DE RECUPERAÇÃO

Alguns processos de fabricação geram gases de processo ou de combustão com temperatura alta o suficiente para se recuperar calor. Gases de alto forno ou gases de processos de fabricação de produtos químicos, ou produtos de combustão de incineradores e fornos de alta temperatura. Em alguns destes casos a caldeira pode ser tanto aquotubular como flamatubular, valendo ainda a escolha pela capacidade de produção de vapor.

As unidades de recuperação ocupam hoje uma posição importante na tecnologia do aproveitamento e racionalização da energia.

O funcionamento das caldeiras de recuperação é muito complexo, deste modo, a forma como será apresentada neste trabalho segue a partir da fonte supridora de calor, apontando as aplicações mais expressivas na técnica de aproveitamento dos desperdícios. Estas unidades estão agrupadas como:

- Caldeiras de Recuperação de Calor Sensível;
- Caldeiras de recuperação de Gases Combustíveis Residuais de Processos Industriais;
- Caldeiras de Recuperação de Calor e de Produtos Químicos em Fábricas de Celulose;
- Caldeiras de Recuperação de Calor nos Ciclos Combinados;
- Caldeiras para aproveitamento do Lixo Urbano.

O calor gerado por um processo primário pode ser recuperado numa fase secundária mediante a introdução de uma caldeira. O aproveitamento deste calor pode representar uma economia de combustível.

O retorno do custo de investimento verifica-se em prazos bastante curtos e a redução dos custos de produção chega a resultados muito favoráveis.

O equipamento de recuperação, visando à maior utilização possível de energia, deve atender as seguintes condições:

- Ser dimensionado para reduzir a temperatura de saída dos gases a valores menores possíveis sob o ponto de vista técnico e econômico;

- Ser projetado para promover a troca de calor em processo de circulação de fluidos em contra corrente;
- Ser projetado no sentido de minimizar as resistências oferecidas ao escoamento de calor entre as placas metálicas a fim de possibilitar diferenças de temperaturas bem baixas;
- Possuir um isolamento cuidadosamente projetado e elaborado para reduzir as perdas de irradiação a valores inexpressivos;
- Ser projetado de forma a permitir amplo acesso as partes internas para assegurar inspeções e limpezas regulares nas superfícies de troca de calor.

2.1. Caldeiras de Recuperação de Calor Sensível

Representa uma das técnicas da utilização do calor disponível nos gases rejeitados de diferentes processos industriais.

As primeiras aplicações destas caldeiras provêm da metade do século XIX formuladas com projetos de baixo rendimento, na maioria dos casos limitados ao suprimento do vapor necessário aos processos contando com gases de escape de temperaturas elevadas em torno de 1200°C.

Após a segunda guerra mundial, a tecnologia de aproveitamento de energia liberada pelos processos passou a merecer atenção de engenheiros voltados para a utilização de gases residuais com temperaturas de até 400°C.

Portanto, esta posição da tecnologia resultou no desenvolvimento de caldeiras bem diferentes das características básicas de caldeiras a combustível, por que:

- Operando-se com gases de baixa temperatura, se altera consideravelmente o conceito de troca de calor nas superfícies metálicas. A caldeira passa a ser dimensionada praticamente mediante a utilização do processo de troca de calor por convecção.
- A relação entre o peso dos gases disponíveis e a evaporação é maior quando comparada com a obtida nas caldeiras convencionais a combustível, devido à baixa temperatura envolvendo o processo.
- A velocidade dos gases através das passagens da caldeira deve ser altas para proporcionar fluxos turbulentos altamente favoráveis a obtenção de coeficientes de transferência de calor compatíveis como projeto.
- As caldeiras de recuperação são sempre introduzidas no caminho dos gases, existente entre o processo e a chaminé. Por essa razão operam sempre com pressão negativa do lado gás e, por conseguinte sobrepõe uma carga adicional na tiragem que deve ser vencida pelo exaustor do sistema.

As caldeiras de calor sensível podem ser tanto aquotubulares quanto flamotubulares. Analisados sob vários pontos de vista a seguir seguem uma comparação entre os dois tipos.

- Quanto à eficiência na transferência de calor: Ambas as concepções alcançam eficiência equivalente, é apenas uma questão de projeto.
- Quanto à participação de refratários: A menor participação de refratários e isolamentos favorece indiscutivelmente a caldeira flamotubular. O revestimento metálico neste tipo é mais compacto.
- Quanto à infiltração de ar: A caldeira flamotubular permite uma hermeticidade mais perfeita.
- Quanto às perdas por irradiação: Novamente a flamotubular é a favorecida.
- Quanto à energia paralela necessária a operação: As caldeiras flamotubulares exigem uma perda de carga superior às aquotubulares. A necessidade de aumentar o coeficiente de convecção geralmente determina velocidades de escoamento nas flamotubulares maiores do que nas aquotubulares. Já na região do regime turbulento.
- Quanto ao custo: É definitivamente o fator mais a favor da caldeira flamotubular.
- Quanto a pressões: A inclinação natural das caldeiras aquotubulares de recuperação é a alta pressão do vapor.

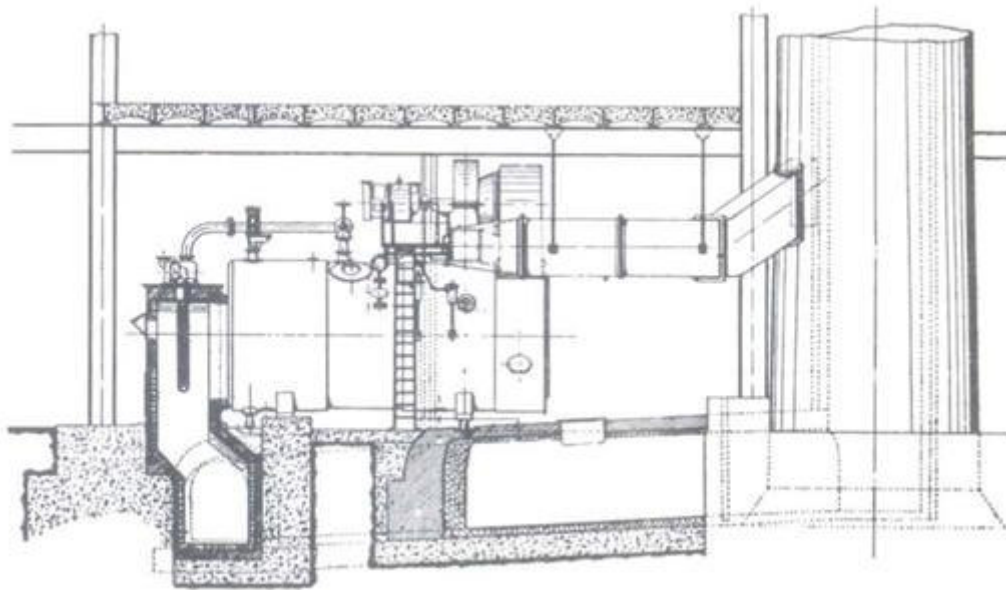


Figura 1. Caldeira Flamotubular para Recuperação de Calor Sensível.

2.2. Caldeiras de Recuperação de Gases Combustíveis Residuais

Nesta categoria se incluem todas as unidades que queimam gases combustíveis proveniente de misturas gasosas despreendidas de processos industriais.

Como exemplos notáveis pela importância da recuperação de calor, se encontra no processo de Cracking do petróleo e na industrialização do ferro gusa. Ambos liberam uma mistura contendo como combustível básico, o CO. Mas há outros processos de regeneração que liberam misturas ricas em hidrogênio, também aproveitadas na combustão.

A quantidade de vapor necessário ao processo, parte é produzido com o próprio gás residual, complementada por outro combustível auxiliar, geralmente óleo, que desempenha importante papel na sustentação da queima deste gás combustível tão pobre, porém de importância energética numa refinaria.

A queima do CO se verifica ao ser atingida sua temperatura de ignição da ordem de 785°C. Os projetos existentes estabelecem a temperatura de 980°C para assegurar a estabilidade da chama, o que evidentemente se obtém com a queima simultânea do combustível suplementar. O controle de excesso de ar é igualmente básico, para a segurança da combustão. É indicado manter o teor de oxigênio na mistura dos gases de escape da chaminé, em torno de 2%.

A unidade de recuperação, portanto, no início de operação, deve atingir as condições de trabalho apenas com a queima de óleo, sendo o gás residual, encaminhado a um circuito de “by-passagem” para a chaminé. Atingida a temperatura de operação segura, o CO é introduzido para a queima simultânea passando a representar de 65 a 75% das necessidades energéticas do sistema.

Ao saírem dos fornos, estes gases além de possuírem uma temperatura elevada, da ordem de 300 a 600°C, arrastam consigo, apreciável quantidade de particulados, indesejáveis ao processo de recuperação de calor e danoso ao meio ambiente. Portanto, estes fluidos obrigatoriamente devem ser submetidos a uma lavagem ou a um captador eletrostático.

Entretanto, o atual estágio de conhecimentos sobre estes processos, permitiu o desenvolvimento de unidades de recuperação que admitem os gases combustíveis tal qual são extraídos dos fornos com o benefício de serem acompanhados do calor sensível resultante das suas elevadas temperaturas. Neste caso, esta parcela de calor deve ser somada ao calor gerado pela queima.

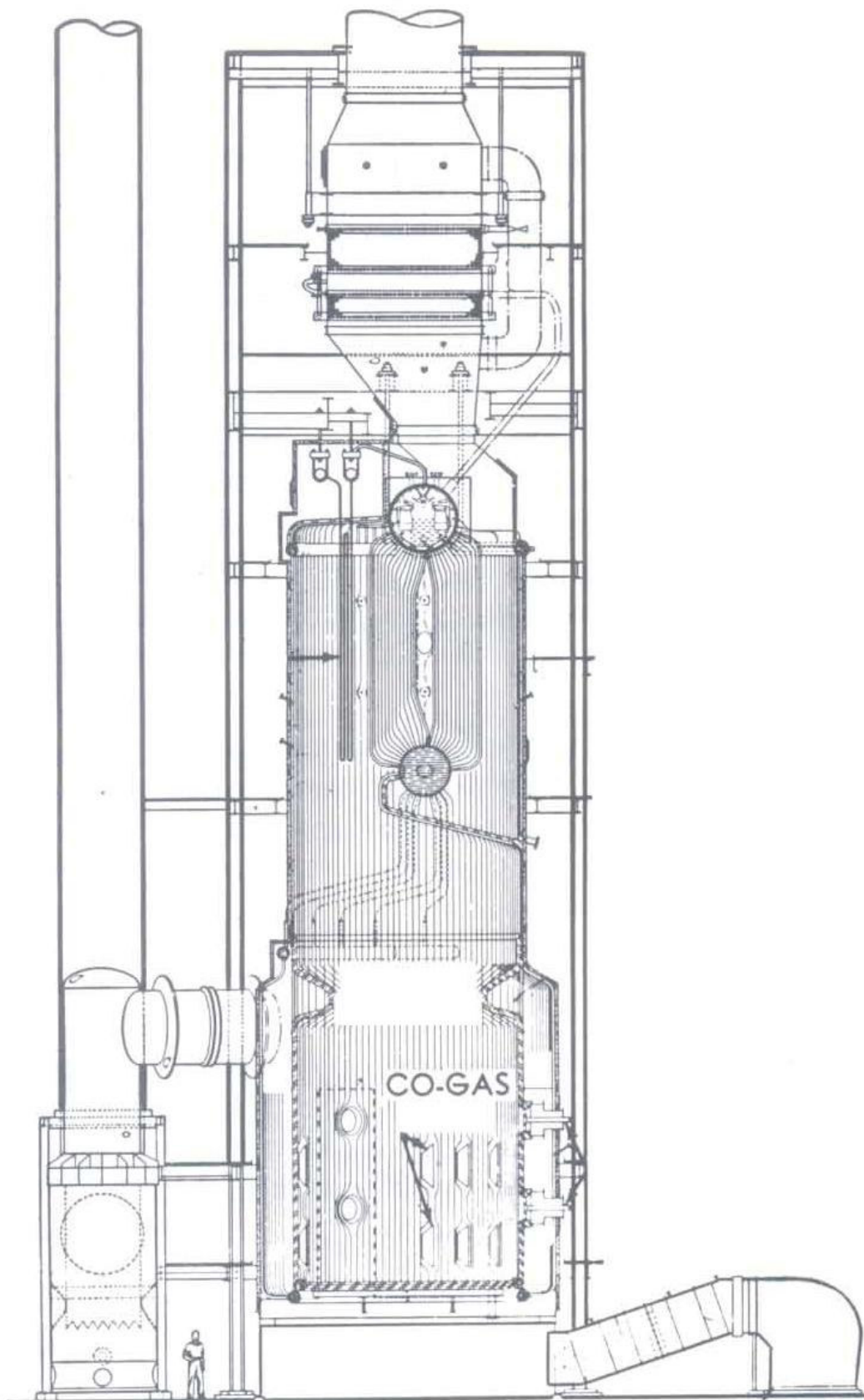


Figura 2. Caldeira de Projeto Especial para a Queima de Gás de Refinaria Contendo Queimadores para o Próprio Gás e Queimadores Auxiliares a Óleo e Gás Combustível.

2.3. Caldeira de Recuperação de Calor e Produtos Químicos em Fábrica de Celulose

A tecnologia de aproveitamento da energia térmica e dos produtos químicos contidos nos rejeitos de extração da celulose contida em determinadas espécies vegetais constitui o exemplo mais notável de caldeiras de recuperação.

O processo tem a particularidade de gerar vapor para atender as necessidades da própria instalação e extração da celulose, como ainda de reciclar até 90% dos insumos de produtos químicos exigidos no cozimento da madeira. A participação destes insumos na fabricação da celulose é tão representativa que sua recuperação promove expressiva redução no custo de produção.

Uma instalação completa compreende inicialmente uma evaporação, para concentrar o líquido residual que sobra da fabricação da celulose. Este licor negro, como normalmente se denomina, com teor de sólidos totais de 13 a 17%, bastante fluido, portanto, concentra-se até 60- 63%, com aspecto de um líquido negro viscoso que apresenta características de um combustível.

A figura 3 reproduz um esquema de um evaporador múltiplo efeito, com caixas evaporadoras de tubos longos, operando a pressões inferiores a atmosférica. O aparelho aproveita o próprio vapor gerado com a queima do licor negro. Associado a evaporadores de circulação forçada permite obter fluido com a concentração de sólidos capaz de ser queimado diretamente na caldeira.

Esta concentração atingindo 63% de sólidos totais contém ainda 37% de água, sendo as partes sólidas, representadas por substâncias de natureza orgânica e inorgânica. Estas últimas fazem parte dos componentes químicos que atuam nos cozimentos de madeira para liberar a celulose e dissolver as ligninas.

Este licor negro concentrado, injetado na caldeira, sustenta uma combustão, graças ao seu teor de matérias orgânicas, gerando calor numa quantidade tal que funde a parte mineral da sua constituição e ainda produz importante quantidade de vapor, suficiente para dar autonomia energética ao próprio processo de fabricação de celulose.

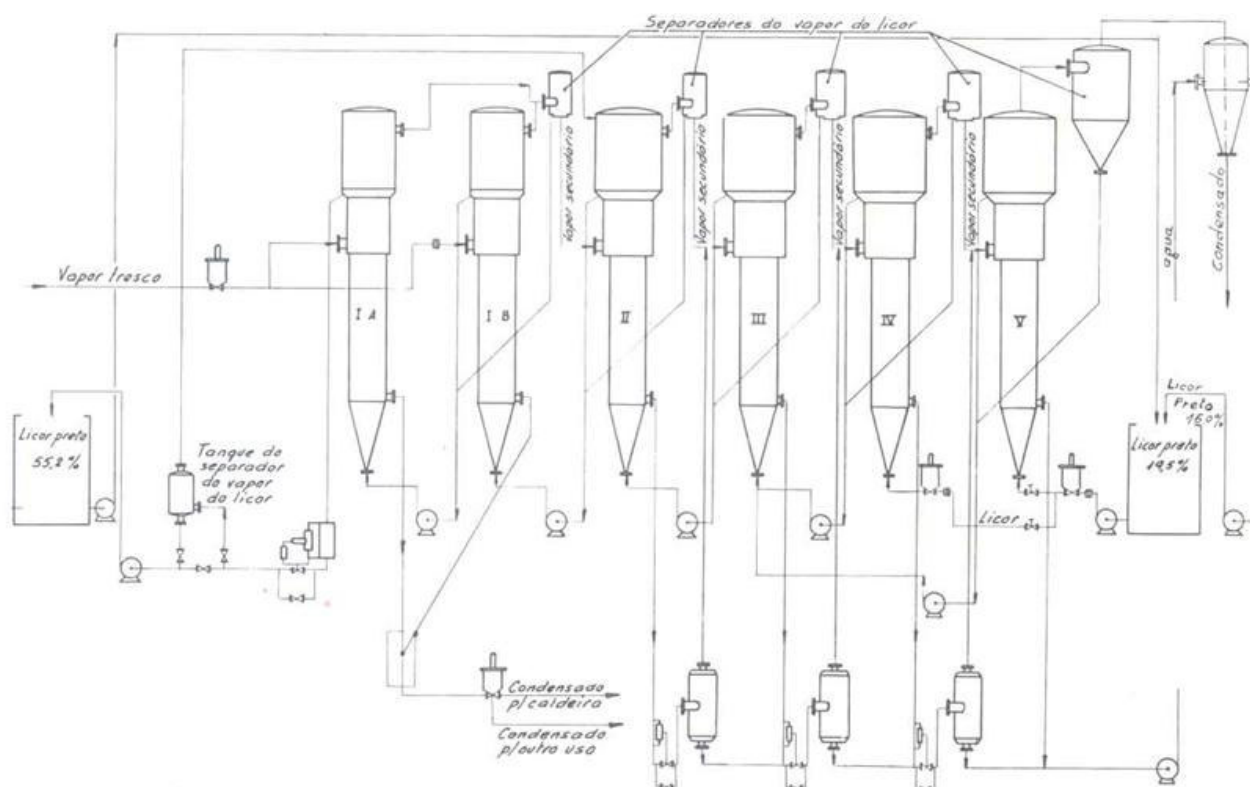


Figura 3. Evaporador de cinco Efeitos para a Concentração de Licor Negro tendo Concentração Inicial de 15 a 19% e final de 45 a 55%.

O principal objetivo de caldeiras de recuperação química é recuperar os inorgânicos do licor. As outras funções são de gerar o vapor, ao aproveitar o calor dos gases de combustão do licor, e reduzir o nível de emissões. Parte da energia do vapor produzido na caldeira abastece as diferentes etapas do processo de celulose e a maior parte é utilizada para gerar energia elétrica, via turbo gerador. A recuperação dos inorgânicos é por meio de bicas, pela parte inferior do equipamento. Os componentes inorgânicos no fundido são basicamente sulfeto de sódio (Na_2S) e carbonato de sódio (Na_2CO_3). Este ciclo se encerra com a obtenção a partir do licor residual do subproduto das

operações de obtenção e lavagem da polpa celulósica, e também dos agentes químicos para a etapa de cozimento dos cavacos de madeira.

O equipamento da caldeira de recuperação é dividido em duas partes: a fornalha e os equipamentos para troca térmica entre os gases de combustão e água líquida e vapor, como mostra a figura 4. A primeira localizada na parte inferior da caldeira é responsável pela combustão da matéria orgânica contida no licor e, a segunda pela produção de vapor superaquecido. O nariz da caldeira é a demarcação entre essas duas partes. Esse nariz serve para proteger o superaquecedor das radiações incidentes da parte inferior e reduzir as taxas de corrosão desse equipamento. Após a caldeira de recuperação, têm-se o precipitador eletrostático e a chaminé. A parte inferior da caldeira consiste em uma fornalha vertical, completamente resfriada à água por um arranjo de tubos, no fundo e nas paredes, ligados ao sistema de circulação de água, onde o licor negro é queimado como combustível.

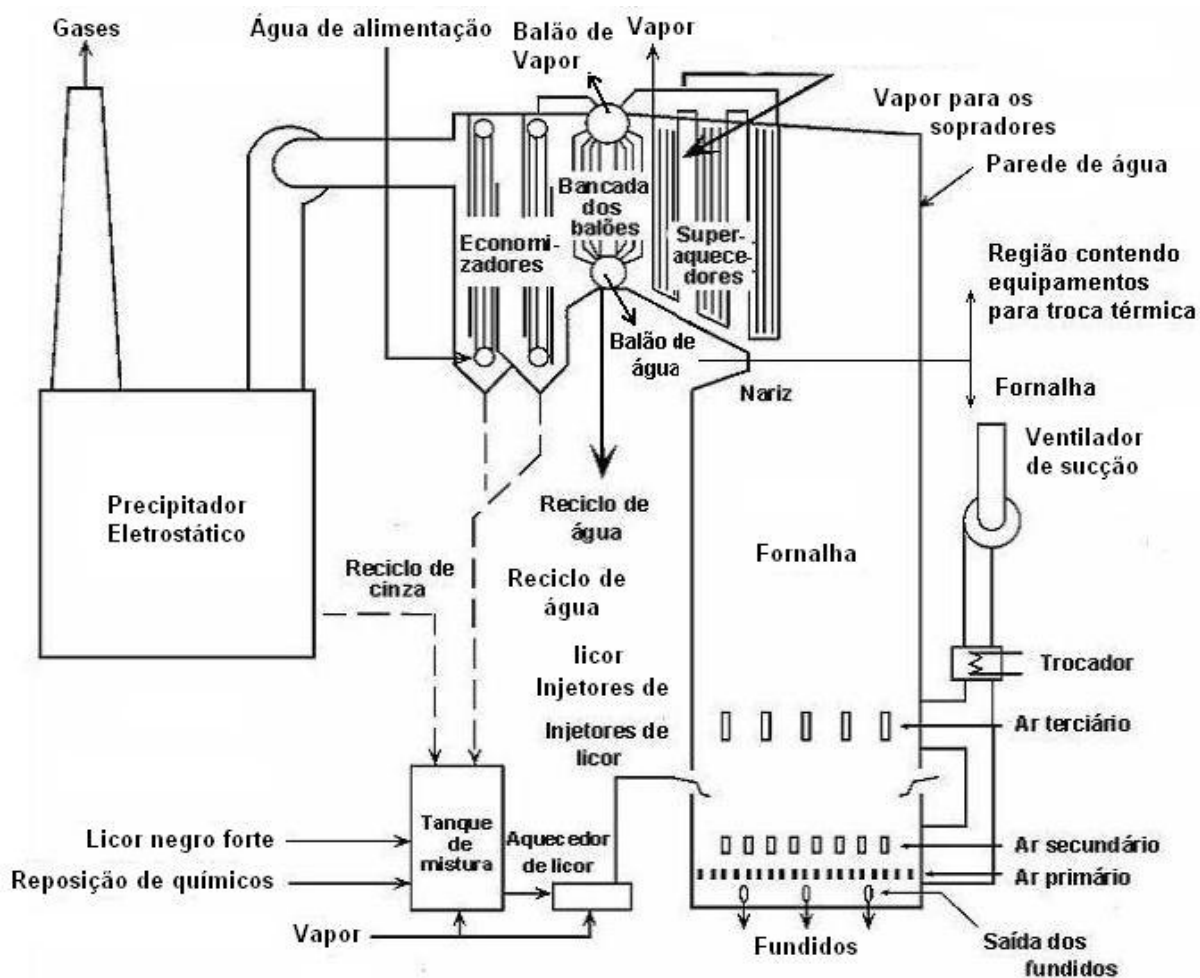


Figura 4. Representação Esquemática da Caldeira de Recuperação.

2.4. Caldeiras de Recuperação de Calor nos Ciclos Combinados

A unidade geradora de vapor, nestes ciclos, opera como verdadeira caldeira de recuperação do calor sensível que escapa de uma turbina a gás, produzindo vapor para acionar uma turbina a vapor.

O esquema da figura 5 representa uma das composições mais clássicas, onde a caldeira é uma espécie de trocador de calor.

O combustível queima na camada (2) cujos gases resultantes são dirigidos a um superaquecedor (5) para serem resfriados até uma temperatura próxima de 700°C. Seguindo seu curso, os gases atravessam a turbina (3) e a caldeira (4) desprendendo-se na atmosfera. O vapor gerado na caldeira se superaquece (5) e alimenta a turbina (6).

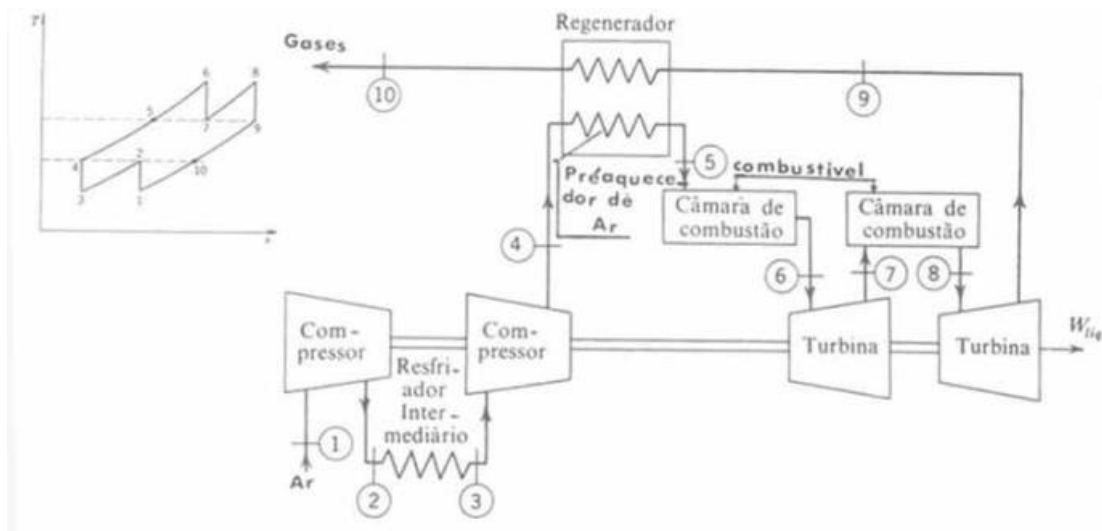


Figura 5. Diagrama do ciclo binário ideal.

2.5. Caldeiras de Incineração de Resíduos Urbanos

A extinção dos resíduos urbanos passou a preocupar as autoridades das grandes cidades européias, a partir do fim da segunda guerra mundial.

O método adotado foi à implantação de grandes complexos receptores de lixos, equipados com fornos incineradores dotados de grelhas acionadas a exaustão dos gases de combustão para a atmosfera, através de chaminés suficientemente elevadas para atenuar os efeitos da poluição.

O aproveitamento do calor sensível dos produtos da queima, só foram cogitados em meados da década de cinquenta.

A figura 6 mostra a primeira caldeira para gerar vapor de calefação.

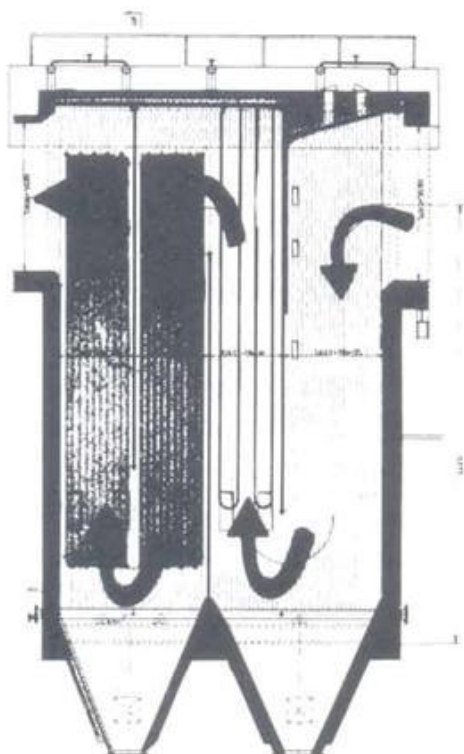


Figura 6. Caldeira de Recuperação de Forno de incineração de Resíduos Urbanos.

Como princípio de operação, este projeto se comporta como verdadeira caldeira de recuperação de calor sensível desenvolvida para há algum tempo, impedir o entupimento das superfícies de troca de calor e ainda facilitar a limpeza do feixe de convecção.

Portanto, para um bom funcionamento do sistema, foi implantada a racionalização da coleta, de forma a obter lixos de características mais favoráveis a geração de energia elétrica. A grande variação da composição do lixo urbano reflete na forte oscilação de produção de vapor da caldeira.

3. EQUIPAMENTOS ESSENCIAIS DAS CALDEIRAS

Os equipamentos que serão apresentados possuem uma vital importância no processo de recuperação, são que efetuam troca de calor e que realiza o controle de partículas, são chamados de superaquecedores, economizadores e precipitadores eletrostáticos.

3.1. Superaquecedores

No interior dos tambores das caldeiras o vapor formado permanece em equilíbrio com a fase líquida à temperatura de vaporização constituindo o chamado vapor saturado. Este vapor é extraído da caldeira, geralmente úmido, contendo 0,1 a 5% de água arrastada, dependendo da eficiência de separação dos dispositivos internos do tambor.

Se a este vapor adiciona-se mais calor, mantendo-o à mesma pressão, elevamos a sua temperatura acima da temperatura de vaporização, tornando-o superaquecido.

Os aparelhos que permitem esta elevação de temperatura são denominados Superaquecedores, os quais operam sempre à mesma pressão da caldeira, respondendo pela elevação da temperatura do vapor saturado, aproveitando o calor sensível dos gases de combustão.

3.2. Economizadores

Economizadores são aparelhos destinados a elevar a temperatura da água de alimentação, antes de introduzi-las no interior da caldeira, aproveitando o calor sensível ainda disponível nos gases de combustão, após sua passagem pelas últimas partes da própria caldeira.

O aumento da temperatura da água de alimentação é benéfico ao processo e oferece algumas vantagens. A introdução de água fria, em torno de 25°C, tende a provocar uma queda da pressão interna da caldeira principalmente quando o processo de recuperação do nível se faz internamente. Devem estar localizados após a última superfície de convecção do gerador de vapor.

3.3. Precipitador Eletrostático

A precipitação eletrostática de partículas ocorre através de um eletrodo de descarga carregado negativamente, situado perto de outro positivo ligado a terra, chamado eletrodo coletor, de forma esférica ou de placa plana. Entre os dois eletrodos, por onde passam os gases arrastando partículas, aspirados por ventilador, está aplicada uma diferença de potencial de 50000 a 100000 volts.

Os gases de combustão arrastam as cinzas dos diferentes compostos químicos, formados no processo de queima do licor, que aderem nas superfícies de aquecimento da caldeira.

4. REFERÊNCIAS

NETO, F. T.; TURCIO, W. H. L. Caldeira de Recuperação. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Depto. De Engenharia Mecânica. São Paulo, 1996.

PERA, Hildo. Geradores de Vapor – um compêndio sobre conversão de energia com vistas à preservação da ecologia. Editora Fama.

SOSA, I. R. H. Sistema Multi Agente para Controle Inteligente da Caldeira de Recuperação. Tese de Mestrado da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007

5. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso e autorizam o uso do seu conteúdo pela coordenação do curso e ministrante da disciplina.



ENGENHEIRO DE SUPRIMENTOS
DISCIPLINA DE FABRICAÇÃO E MONTAGEM DE CALDEIRAS E
TROCADORES DE CALOR
AGOSTO/SETEMBRO DE 2008
Escola Politécnica – Depto. Enga. Mecânica

INSPEÇÃO DE CALDEIRAS

Kleber Monteiro Assunção , kleber@inpacom.com.br
Márcia Mendes Ribeiro, mmendespa@hotmail.com

¹ Escola Politécnica- Depto. de Engenharia Mecânica da EPUSP-PROMINP, kleber@inpacom.com.br

² Escola Politécnica- Depto. de Engenharia Mecânica da EPUSP-PROMINP, mmendespa@hotmail.com

Resumo: *O propósito deste artigo é indicar o que é necessário para se fazer e inspeção de caldeiras, de acordo com as normas existentes, além dos cuidados que devem ser tomados ao se fazer a inspeção. São apresentados vários métodos de ensaios utilizados e os procedimentos que devem ser tomados em caso de emergência.*

A inspeção deve ser feita sempre com muito critério, pois é grande o número de acidentes que ocorrem em caldeiras. As condições de pressão e temperatura, além dos riscos de corrosão e fluência são fatores que devem ser levados em conta nas questões referentes à segurança.

Palavras-chave: *profissional habilitado, pressão máxima de trabalho admitida, registro de segurança*

1. INTRODUÇÃO

Caldeira para serviço estacionário, é um vaso de pressão no qual é gerado vapor de água para uso externo, mediante a aplicação de calor resultante da queima de combustível sólido, líquido ou gasoso, ou pela ação de calor recuperado de gases de combustão, segundo a norma brasileira (NB 227).

Todos os aspectos referentes à segurança em vasos de pressão têm definição no momento da concepção dos mesmos, quer sejam eles unidades para atender a um trabalho específico ou como elementos de um parque industrial.

Ao projetar um vaso de pressão, tudo o que for possível para evitar lesão ou perda de vida do ser humano, e dano ao meio, que tenham começo em situação perigosa ou acidente, deve ser realizado pelo projetista e pelo proprietário do equipamento.

Não é difícil notarmos a existência de dois grandes fatores físicos reinantes no interior de vasos de pressão sujeitos à ação de chama, que são: pressão e temperatura. Como fatores complementares, em caldeiras, teríamos de acrescentar corrosão e fluência, para os casos de temperaturas elevadas.

A NR-13 é uma norma regulamentadora do MTE (Ministério do Trabalho e Emprego) que determina os parâmetros de segurança para caldeiras e vasos de pressão.

Para efeito da NR-13, considera-se "Profissional Habilitado" aquele que tem competência legal para o exercício da profissão de engenheiro nas atividades referentes a projeto de construção, acompanhamento da operação e manutenção, inspeção e supervisão de inspeção de caldeiras e vasos de pressão, em conformidade com a regulamentação profissional vigente no País.

Pressão Máxima de Trabalho Permitida - PMTP ou Pressão Máxima de Trabalho Admissível - PMTA é o maior valor de pressão compatível com o código de projeto, à resistência dos materiais utilizados, às dimensões do equipamento e seus parâmetros operacionais.

O "Registro de Segurança" deve ser constituído de livro próprio, com páginas numeradas, ou outro sistema equivalente onde serão registradas: todas as ocorrências importantes capazes de influir nas condições de segurança da caldeira; as ocorrências de inspeções de segurança periódicas e extraordinárias, devendo constar o nome legível e assinatura de "Profissional Habilitado". Nas caldeiras de categorias A e B, a critério do "Profissional Habilitado", podem ser utilizadas tecnologia de cálculo ou procedimentos mais avançados, em substituição aos previstos pelos códigos de projeto.

Projetos de Alteração ou Reparo devem ser concebidos previamente nas seguintes situações:

- a) sempre que as condições de projeto forem modificadas;
- b) sempre que forem realizados reparos que possam comprometer a segurança.
- c) ser concebido ou aprovado por "Profissional Habilitado",
- d) determinar materiais, procedimentos de execução, controle e qualificação de pessoal.



ENGENHEIRO DE SUPRIMENTOS
DISCIPLINA DE FABRICAÇÃO E MONTAGEM DE CALDEIRAS E
TROCADORES DE CALOR
AGOSTO/SETEMBRO DE 2008
Escola Politécnica – Depto. Enga. Mecânica

Todas as intervenções que exijam mandrilamento ou soldagem em partes que operem sob pressão devem ser seguidas de teste hidrostático, com características definidas pelo "Profissional Habilitado". Os sistemas de controle e segurança da caldeira devem ser submetidos à manutenção preventiva ou preditiva.

As caldeiras e vasos de pressão devem ser submetidas à inspeções de segurança inicial, periódica e extraordinária, sendo considerado condição de risco grave e iminente o não-atendimento aos prazos estabelecidos na NR-13. A inspeção de segurança inicial deve ser feita em caldeiras novas, antes da entrada em funcionamento, no local de operação, devendo compreender exames interno e externo, teste hidrostáticos.

2. CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE INSPEÇÃO DE CALDEIRA

O primeiro passo para entender como funciona e os cuidados que devem ser tomados em uma inspeção de caldeira, é conhecer a NR-13 (Caldeiras e Vasos de Pressão(113.000-5)).

Como o objetivo deste artigo está relacionado à inspeção de segurança de caldeira, estaremos enfatizando os tópicos de 13.5 à 13.5.14. Onde podemos observar:

NR-13

13.5 Inspeção de segurança de caldeiras.

13.5.1 As caldeiras devem ser submetidas a inspeções de segurança inicial, periódica e extraordinária, sendo considerado condição de risco grave e iminente o não - atendimento aos prazos estabelecidos nesta NR. (113.078-1)

13.5.2 A inspeção de segurança inicial deve ser feita em caldeiras novas, antes da entrada em funcionamento, no local de operação, devendo compreender exames interno e externo, teste hidrostático e de acumulação.

13.5.3 A inspeção de segurança periódica, constituída por exames interno e externo, deve ser executada nos seguintes prazos máximos:

- a) 12 (doze) meses para caldeiras das categorias A, B e C;
- b) 12 (doze) meses para caldeiras de recuperação de álcalis de qualquer categoria;
- c) 24 (vinte e quatro) meses para caldeiras da categoria A, desde que aos 12 (doze) meses sejam testadas as pressões de abertura das válvulas de segurança;
- d) 40 (quarenta) meses para caldeiras especiais conforme definido no item 13.5.5.

13.5.4 Estabelecimentos que possuam "Serviço Próprio de Inspeção de Equipamentos", conforme estabelecido no Anexo II, podem estender os períodos entre inspeções de segurança, respeitando os seguintes prazos máximos:

- a) 18 (dezoito) meses para caldeiras das categorias B e C;
- b) 30 (trinta) meses para caldeiras da categoria A.

13.5.5 As caldeiras que operam de forma contínua e que utilizam gases ou resíduos das unidades de processo, como combustível principal para aproveitamento de calor ou para fins de controle ambiental podem ser consideradas especiais quando todas as condições seguintes forem satisfeitas:

- a) estiverem instaladas em estabelecimentos que possuam "Serviço Próprio de Inspeção de Equipamentos" citado no Anexo II;
- b) tenham testados a cada 12 (doze) meses o sistema de intertravamento e a pressão de abertura de cada válvula de segurança;
- c) não apresentem variações inesperadas na temperatura de saída dos gases e do vapor durante a operação;
- d) exista análise e controle periódico da qualidade da água;
- e) exista controle de deterioração dos materiais que compõem as principais partes da caldeira;
- f) seja homologada como classe especial mediante:
 - acordo entre a representação sindical da categoria profissional predominante no estabelecimento e o empregador;
 - intermediação do órgão regional do MTb, solicitada por qualquer uma das partes quando não houver acordo;
 - decisão do órgão regional do MTb quando persistir o impasse.

13.5.6 Ao completar 25 (vinte e cinco) anos de uso, na sua inspeção subsequente, as caldeiras devem ser submetidas a rigorosa avaliação de integridade para determinar a sua vida remanescente e novos prazos máximos para inspeção, caso ainda estejam em condições de uso. (113.027-7 / I4)

13.5.6.1 Nos estabelecimentos que possuam "Serviço Próprio de Inspeção de Equipamentos", citado no Anexo II, o limite de 25 (vinte e cinco) anos pode ser alterado em função do acompanhamento das condições da caldeira, efetuado pelo referido órgão.

13.5.7 As válvulas de segurança instaladas em caldeiras devem ser inspecionadas periodicamente conforme segue: (113.028-5 / I4)

- a) pelo menos 1 (uma) vez por mês, mediante acionamento manual da alavanca, em operação, para caldeiras das categorias B e C;
- b) desmontando, inspecionando e testando em bancada as válvulas flangeadas e, no campo, as válvulas soldadas, recalibrando-as numa frequência compatível com a experiência operacional da mesma, porém respeitando-se como limite máximo o período de inspeção estabelecido no subitem 13.5.3 ou 13.5.4, se aplicável para caldeiras de categorias A e B.

13.5.8 Adicionalmente aos testes prescritos no subitem 13.5.7, as válvulas de segurança instaladas em caldeiras deverão ser submetidas a testes de acumulação, nas seguintes oportunidades: (113.029-3 / I4)

- a) na inspeção inicial da caldeira;
- b) quando forem modificadas ou tiverem sofrido reformas significativas;
- c) quando houver modificação nos parâmetros operacionais da caldeira ou variação na PMTA;
- d) quando houver modificação na sua tubulação de admissão ou descarga.

13.5.9 A inspeção de segurança extraordinária deve ser feita nas seguintes oportunidades:

- a) sempre que a caldeira for danificada por acidente ou outra ocorrência capaz de comprometer sua segurança;
- b) quando a caldeira for submetida à alteração ou reparo importante capaz de alterar suas condições de segurança;
- c) antes de a caldeira ser recolocada em funcionamento, quando permanecer inativa por mais de 6 (seis) meses;
- d) quando houver mudança de local de instalação da caldeira.

13.5.10 A inspeção de segurança deve ser realizada por "Profissional Habilitado", citado no subitem 13.1.2, ou por "Serviço Próprio de Inspeção de Equipamentos".

13.5.11 Inspeccionada a caldeira, deve ser emitido "Relatório de Inspeção", que passa a fazer parte da sua documentação. (113.030-7 / I4)

13.5.12 Uma cópia do "Relatório de Inspeção" deve ser encaminhada pelo "Profissional Habilitado", citado no subitem 13.1.2, num prazo máximo de 30 (trinta) dias, a contar do término da inspeção, à representação sindical da categoria profissional predominante no estabelecimento.

13.5.13 O "Relatório de Inspeção", mencionado no subitem 13.5.11, deve conter no mínimo:

- a) dados constantes na placa de identificação da caldeira;
- b) categoria da caldeira;
- c) tipo da caldeira;
- d) tipo de inspeção executada;
- e) data de início e término da inspeção;
- f) descrição das inspeções e testes executados;
- g) resultado das inspeções e providências;
- h) relação dos itens desta NR ou de outras exigências legais que não estão sendo atendidas;
- i) conclusões;
- j) recomendações e providências necessárias;
- k) data prevista para a nova inspeção da caldeira;
- l) nome legível, assinatura e número do registro no conselho profissional do "Profissional Habilitado", citado no subitem 13.1.2 e nome legível e assinatura de técnicos que participaram da inspeção.

13.5.14 Sempre que os resultados da inspeção determinarem alterações dos dados da placa de identificação, a mesma deve ser atualizada. (113.031-5 / I1).

Para facilitar o entendimento, iremos detalhar um manual que deve ser seguido na prática de uma inspeção. Onde está descrito de forma simples, deveres, obrigações e cuidados que devem ser tomado pelo operador da caldeira, inspetor e equipe de inspeção.

Medidas fundamentais para obtenção de um resultado confiável em uma inspeção de caldeira.

3. PRINCÍPIOS E ORIENTAÇÕES GERAIS PARA A INSPEÇÃO

1. Deve ser elaborado e mantido pelo proprietário da caldeira um programa de inspeção documentado, detalhado e individual para cada caldeira, levando-se em conta diferenças de concepção, idade, condições de operação e outras particularidades. Este programa deve ser continuamente revisado e atualizado, levando em consideração novas observações e experiências. Prioritariamente o programa deve observar a conformidade aos requisitos legais.
2. Registros históricos de cada inspeção devem ser mantidos documentados para futura referência.
3. As inspeções devem ser executadas por agente qualificado e habilitado, podendo ser pessoal próprio ou contratado.
4. Por ocasião das inspeções, quaisquer anomalias já conhecidas pelo proprietário da caldeira devem ser reportadas ao inspetor comissionado para os trabalhos.
5. Todas as especificações, critérios e padrões gerais de aceitação que possam vir a ser necessários (ex.: descrição dos materiais de construção utilizados na caldeira, espessura mínima de tubos, valores de ajuste de válvulas de segurança, parâmetros do teste hidrostático, etc.), devem estar prontamente disponíveis nestas ocasiões, evitando dúvidas e equívocos.
6. As inspeções devem ser constituídas de exame interno, exame externo e testes complementares. Cada uma destas etapas é descrita neste documento de forma sucinta, como orientação apenas. Cabe ao inspetor utilizar sua experiência e conhecimento para determinar a extensão, abrangência e detalhamento das verificações e ensaios a serem aplicados. É necessário que sejam gerados relatórios escritos conclusivos sobre os exames realizados e recomendações deles resultantes.
7. O inspetor deverá certificar-se de que todos os reparos e modificações advindas das inspeções sejam executados em conformidade com as normas e códigos de projeto e construção da caldeira, conforme estabelecido pela legislação vigente. Exceção a este requisito é aceitável em se tratando de novas tecnologias, já consagradas e ainda não previstas à época do código utilizado no projeto e construção da caldeira.
8. Deve-se assegurar que medidas adequadas de controle e garantia da qualidade para os trabalhos a serem executados na parada tenham sido implementados no tempo devido. Por exemplo, qualificação de soldadores, certificados de materiais e especificações de procedimentos de soldagem (EPSs) devem estar disponíveis no campo por ocasião do início da parada.

3.1. Preparativos

1. Procedimentos de segurança ocupacional prévios à inspeção, especialmente bloqueio e sinalização dos itens cujo acionamento acidental possa ser perigoso, devem ser rigorosamente providenciados, com suficiente antecedência.
2. Recomenda-se que se proceda a uma verificação interna preliminar à limpeza da caldeira, de forma a observar as possíveis incrustações, obstruções e depósitos excessivos, sua natureza e localização, arranjo do fundido remanescente, etc. Entretanto esta verificação deve ser cercada das precauções de segurança exigíveis, especialmente quanto à possível queda de blocos de sulfato.
3. As cinzas remanescentes devem ser removidas por lavagem a alta pressão com água quente. A lavagem deve ser estendida, inundando-se a fornalha com água através dos sopradores de fuligem e queimadores de licor (bocais spray têm que ser removidos). A qualidade da limpeza resultante deve ser cuidadosamente avaliada antes do encerramento definitivo da lavagem, e antes que se iniciem quaisquer atividades de manutenção na caldeira. Especial atenção deve ser dada à remoção de formações de sulfato que eventualmente ficam presas ao teto, paredes e painéis após a lavagem, evitando acidentes com sua queda durante os trabalhos internos.
4. Todas as portas de visitas e outras aberturas da caldeira precisam ser abertas. Após a abertura das portas dos balões, ar frio deve ser insuflado em seu interior para promover um resfriamento mais rápido.
5. Iluminação geral interna de baixa voltagem deve ser providenciada, bem como luminárias manuais para todas as partes a serem localmente examinadas.
6. O teto de segurança precisa obrigatoriamente ser montado antes que qualquer trabalho seja iniciado na fornalha baixa. Deve ser observada a perfeita vedação entre as partes do teto de segurança e as paredes da caldeira, garantindo que não haja aberturas que possam permitir a queda de materiais na fornalha. É essencial proceder-se a uma cuidadosa

inspeção das vigas e demais elementos que compõem o teto de segurança, antes de cada montagem e utilização do mesmo.

7. Um andaime rígido e seguro deve ser erguido para possibilitar a inspeção em toda a altura da fornalha, bem como em todas as linhas de sopragem nos superaquecedores, até o teto. É importante que o andaime proporcione, quando possível, fácil acesso entre os diferentes níveis dos superaquecedores, e nunca obstrua bocas de visita. Plataformas devem ser montadas nos funis de cinzas sob a bancada e economizador. O acesso a outros sítios de interesse além dos citados, se solicitado pelo inspetor comissionado, deve ser providenciado sem restrições.

8. A limpeza mecânica e preparação das superfícies para inspeção e ensaios devem ser feitas pelos meios adequados e com máximo cuidado, a fim de se evitar a abrasão excessiva dos tubos e conseqüentes perdas de espessura. Precauções especiais se aplicam ao uso de jato de areia, pelas razões expostas.

9. É recomendável, especialmente se houver qualquer suspeita de vazamento na caldeira, a execução de um teste de estanqueidade na mesma (com não mais que a pressão de operação) no início da parada, antecedendo as inspeções propriamente ditas. Esta providência permite evidenciar os possíveis vazamentos em tempo hábil para sua correção, evitando a sua constatação apenas no teste hidrostático final.

3.2. Exame Interno

O exame visual interno em uma caldeira deve ser extensivo e detalhado, sendo recomendável que seja executado anualmente. Abaixo são descritos os procedimentos gerais para este exame.

3.2.1. Lado de Gases

3.2.1.1. Exame visual

1. Os tubos da caldeira devem ser examinados visualmente com foco em corrosão, erosão, abrasão, desalinhamentos, deformações, amassamento, empolamento, inchamento, porosidade, trincas, rupturas, descoloração, alterações da textura do material, etc. Devem-se verificar os tubos também quanto a danos mecânicos decorrentes de possível interferência física indevida entre componentes da própria caldeira, limpeza da caldeira com instrumentos pontiagudos, colisões com sopradores de fuligem, queda de objetos pesados, etc.. Tubos de cortina e do fundo da fornalha são particularmente sujeitos a danos por queda de grandes formações de sulfato, que se desprendem das partes altas da caldeira.

2. Aletas, membranas, chapas de vedação tipo *crotch-plate*, grampos, espaçadores, suportes e outros elementos soldados devem ser atentamente examinados quanto a possíveis trincas, que podem se propagar para os tubos. Este problema assume maior criticidade quando ocorrido em locais passíveis de contato água-fundido. As aberturas das bicas de fundido e bocais de ar primário são portanto locais em que se recomenda máxima atenção.

3. Caldeiras de um balão que possuam convector do tipo *long-flow*, assim como certos tipos de economizadores longitudinais, apresentam às vezes suscetibilidade a vibrações, e deve-se verificar a existência de trincas nos seus coletores, soldas e suportes.

4. Tubos compostos são sujeitos à ocorrência de trincas e erosão, devendo ser examinados com este foco.

5. A pinagem protetora, quando existente, deve ser inspecionada, controlando-se o comprimento e diâmetro remanescente dos pinos, uma vez que estes se desgastam por ação de corrosão e erosão. Outros elementos da caldeira sujeitos a mecanismos similares de desgaste são bocais de ar de combustão e queimadores.

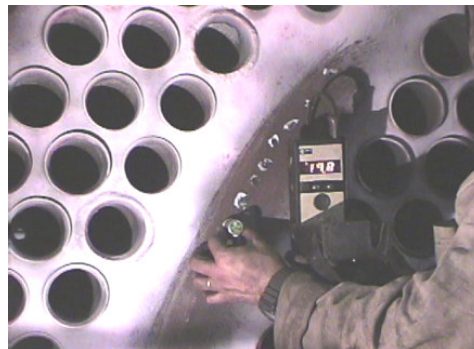
6. Recomenda-se uma verificação amostral das condições dos tubos do fundo da caldeira a cada cinco anos em caldeiras de fundo plano. Para tanto podem ser abertas uma ou mais janelas pequenas (1 x 1 m, por exemplo) no refratário do piso, de forma a permitir uma verificação visual dos tubos que compõem o fundo, e a sua medição de espessura conforme descrito no item 3.2.1.2. Para unidades com fundo inclinado a inspeção nesta região deve ser anual. Dada a diversidade de materiais, tipos de tubos e formas construtivas de fundos de caldeiras de recuperação, esta recomendação, aqui dada de forma genérica, deve ser cuidadosamente adaptada pelo engenheiro inspetor às condições particulares da caldeira em questão. Atenção especial deve ser dada aos tubos do fundo, nos cantos, em caldeiras que tenham sofrido redimensionamentos importantes de capacidade, devido a possíveis alterações de circulação (estas, verificáveis por tubos Pitot). Atenção especial deve ser dispensada a pisos em tubos compostos, que têm apresentado susceptibilidade ao surgimento de trincas na camada austenítica. Neste tipo de material recomenda-se a realização de inspeção por líquidos penetrantes, integral ou por amostragem, dependendo do histórico da caldeira. Nota: extremo cuidado deve ser exercido na remoção do refratário do piso, para evitar danos mecânicos aos tubos.

7. Suportes, tirantes, chicanas e grampos anti-vibração devem ser examinados quanto à sua fixação, partes faltantes ou soltas, atritos e interferências indevidas.
8. Refratários de um modo geral devem ser avaliados quanto ao seu possível desgaste, fragmentação, deterioração, situação da ancoragem e até mesmo se ainda permanecem nos locais originais.
9. Recomenda-se fortemente que as bicas de fundido sejam substituídas a cada campanha anual. Se isto não ocorrer por alguma razão, é imperioso submetê-las a inspeção criteriosa incluindo ensaios não-destrutivos para determinar sua espessura remanescente, e eventual degradação (corrosão, erosão e trincas), especialmente micro-trincas no material do leito. Nota: bicas substituídas devem ser inutilizadas imediatamente para evitar sua reutilização, inclusive por terceiros, de forma inadvertida ou mal-intencionada. As bicas usadas devem, contudo, ser objeto de avaliação com vistas a informações de interesse para o histórico da caldeira (por exemplo, verificar se está havendo trincas ou não).
10. O *penthouse* e o porão devem ser examinados visualmente, com foco no estado de elementos estruturais ali alojados, corrosão em geral, invólucros, isolamentos, possíveis infiltrações e acúmulos de sulfato, estado de refratários e selos, estado de termopares e conexões de tubos *Pitot*. Especialmente deve ser verificada a condição de coletores, distribuidores e tubos, e as conexões entre eles. Em alguns tipos de caldeiras, é necessário inspecionar o sistema de suportação dos superaquecedores, quanto a trincas. Possíveis vazamentos de fundido devem ser pesquisados no porão.
11. Inspe o similar   descrita no item anterior, no que for aplicável, deve ser executada na câmara fria do nariz.

3.2.1.2. Ensaios não-destrutivos

Medi es de espessura:

Medi es ultra-s nicas de espessura periódicas são essenciais para controlar a vida útil dos tubos, detectar desgastes anormais e confirmar a Pressão Máxima de Trabalho Admissível (PMTA) da unidade. Abaixo são recomendadas linhas gerais para um plano de prospec o ultra-s nica para medi o de espessura.



Ressalta-se aqui, uma vez mais, que o plano deve ser individualizado para cada caldeira, levando-se em conta sua concep o, idade, histórico de corrosão, etc. As medi es de espessura devem ser sempre complementadas com uma cuidadosa inspe o visual quanto a perdas de material dos tubos, por exemplo, com o uso de uma lanterna em  ngulo. As medi es são feitas em um arranjo lógico de localiza es (exemplo: a cada 6 metros, de 5 em 5 tubos), resultando em uma densidade de medi es adequada a cada caso, e para cada parte da caldeira. Vários milhares de pontos podem ser necessários em uma inspe o, para proporcionar uma adequada avalia o da unidade. O arranjo de medi es

também deve ser tal que permita boa repetibilidade dos ensaios em inspeções subseqüentes. Tipicamente as medições de espessura são feitas a cada ano. Este período, bem como a densidade de pontos, pode ser ajustado dependendo dos resultados. Abaixo são recomendadas práticas para prospecção de cada parte da caldeira.

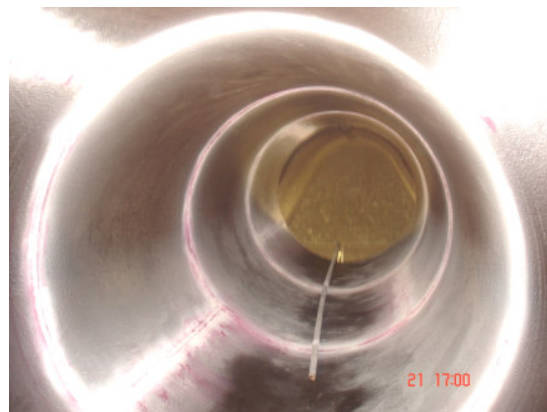
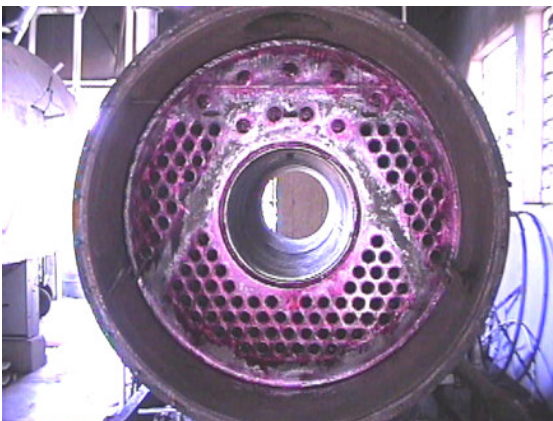
- Os tubos de fornalha são medidos entre 3 e 6 níveis ou elevações, dependendo do tipo de proteção contra corrosão existente. Prioritariamente são medidos os níveis de ar de combustão e queimadores, e os tubos curvados ao redor das diversas aberturas da fornalha. Em áreas críticas é recomendado que a medição seja feita em três pontos da semicircunferência do tubo exposta aos gases, ao invés de uma única medição central. Partes como o nariz, que sabidamente experimentam maior desgaste, também deve receber atenção especial nas medições. As regiões altas da fornalha e teto, em contrapartida, geralmente apresentam baixas taxas de corrosão e podem ser examinadas com menor frequência ou amostralmente.
- Os tubos de superaquecedores são medidos prioritariamente em partes curvas, e nos trechos retos, nas linhas de centro dos sopradores de fuligem.
- Os tubos de economizadores devem ser medidos com prioridade para as partes inferiores, mais frias, e nas linhas de sopragem. Cuidado especial deve ser tomado para verificar a chamada corrosão do lado frio, próxima ao invólucro, estendendo-se as medições ultra-sônicas a estes locais se necessário. Isto se aplica de forma especial quando o invólucro estiver corroído nas regiões próximas às entradas de sopradores de fuligem.
- Os tubos de cortina (*screen*) são medidos em 2 a 5 níveis (este número pode ser maior dependendo das características da cortina). As partes próximas às penetrações das paredes, tubos curvados e trechos retos nas regiões de sopragem são os focos de interesse principal.
- Os tubos de bancada devem ser medidos próximo aos balões, se for o caso, em partes curvadas e nas linhas de sopragem.
- Tubos com sinais visuais evidentes de desgaste ou corrosão anormais devem ser medidos independentemente da sua localização.

É essencial verificar frequentemente a calibração do aparelho, durante os trabalhos de medição de espessura.

3.2.1.3. Outros Ensaios Não-Destrutivos Recomendáveis:

Ensaios não-destrutivos clássicos são usados para evidenciar descontinuidades em partes pressurizadas e estruturais. Abaixo são dadas algumas recomendações específicas do emprego destes ensaios, típicas nas inspeções periódicas da caldeira de recuperação:

a. Líquido Penetrante:

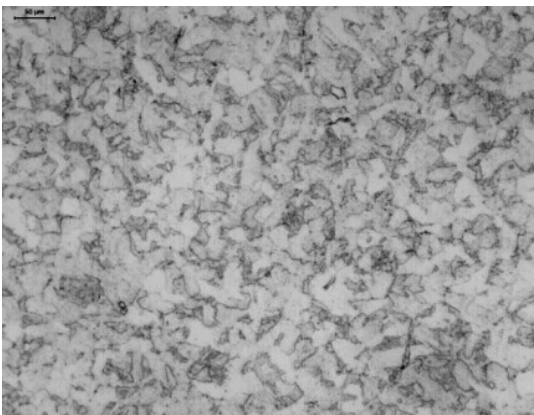


- Líquidos penetrantes ao redor das aberturas das bicas de smelt.
- Nas fornalhas de tubos compostos, onde a experiência tenha mostrado uma incidência apreciável de trincas, além da recomendação acima, estender o ensaio também às portas de ar de combustão e demais aberturas da fornalha baixa. Dependendo das circunstâncias (tipo do tubo composto, projeto, carga da caldeira, composição do *smelt*), tubos compostos podem sofrer trincas, tanto de corrosão sob tensão fraturante (SCC) como de fadiga térmica. É portanto importante executar o ensaio por líquidos penetrantes em todos os locais de maior concentração de tensões e regiões em contato direto com o fluxo de smelt.

- Líquidos penetrantes em espaçadores ou soldas de painéis de *screen*, quando o painel em questão tiver sido deformado por queda de blocos de sulfato.
- Líquidos penetrantes em *clips* e espaçadores dos superaquecedores.
- Radiografia para controle da qualidade de eventuais soldas de manutenção em partes pressurizadas. É necessário radiografar 100% das soldas executadas em tubos de água na região da fornalha, assim como em quaisquer outras localizações que teoricamente possam originar vazamentos para a fornalha.

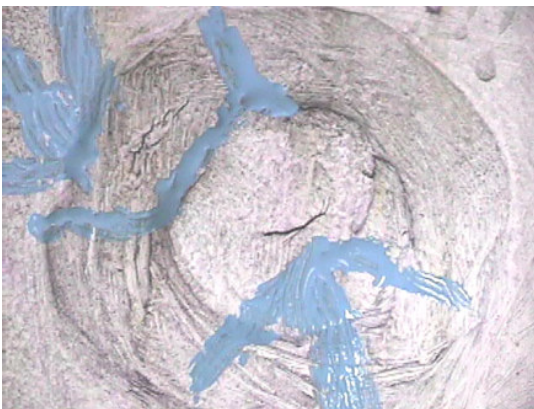
b. Réplica Metalográfica

A réplica metalográfica é um ensaio não destrutivo que tem por objetivo a avaliação da estrutura metalúrgica do material. A avaliação da estrutura do material pode ser feita da maneira tradicional, ou seja, através da retirada de um corpo de prova do equipamento para posterior preparação do mesmo em laboratório, ou através de uma cópia da estrutura metalográfica dos componentes da caldeira sem, no entanto, danificar a região avaliada. Posteriormente, essa cópia é levada para análise em um Microscópio Eletrônico de Varredura ou mesmo num microscópio ótico. As réplicas metalográficas têm a grande vantagem da não necessidade de se retirar um corpo de prova do equipamento.



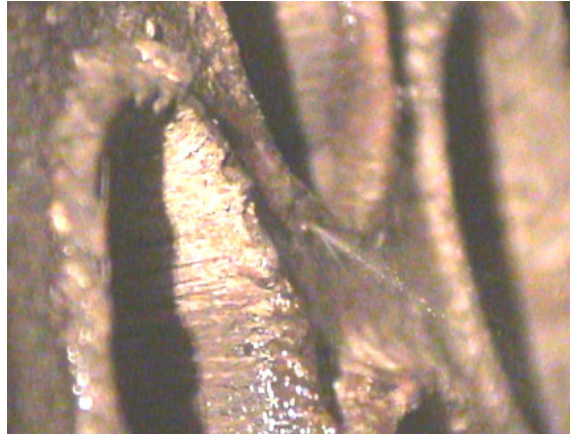
C. Partículas Magnéticas:

O ensaio com partículas magnéticas é um ensaio não destrutivo (END) que tem por objetivo a detecção de defeitos ou discontinuidades superficiais e subsuperficiais em materiais ferromagnéticos. Basicamente, o ensaio por partículas magnéticas consiste na aplicação de um campo magnético no interior do local analisado e, este campo, quando na presença de discontinuidades sofrem desvios e saem para a superfície de peça gerando campos de fuga.



d. Teste Hidrostático

O ensaio hidrostático visa detectar, a frio e em curto prazo, vazamentos e insuficiência de resistência dos componentes sujeitos à pressão, conforme determina o item 13.4.4. da NR-13 que diz: “Todas as intervenções que exijam mandrilamento ou soldagem em partes que operem sob pressão devem ser seguidas de teste hidrostático, com características definidas pelo Profissional Habilitado”.



E. Teste de Abertura das Válvulas de Segurança:

O teste de abertura das válvulas de segurança é realizado com a caldeira, a plena carga para verificação de sua suficiência.



- Outros ensaios não-destrutivos, ou os ensaios acima em localizações diferentes das citadas, devem ser aplicados segundo necessidades específicas e/ou suspeitas levantadas nos exames visuais. Métodos especializados de ultra-som como B-Scan e o próprio IRIS, por exemplo, são indicados para exame de grandes áreas ou locais com limitação de acesso.

3.2.2. Lado de Água e Vapor

1. Por ocasião da inspeção periódica, a qualidade da água de alimentação (incluindo água de alimentação principal, de reposição, e condensados que retornam à caldeira) é aferida. Uma inspeção interna nos balões e coletores torna isto possível. No caso dos coletores, devem ser removidos *caps* para possibilitar esta visualização, e também ser feita a retirada de amostras dos depósitos internos e possíveis detritos, que serão analisadas por agente competente. Falhas ou deficiências da camada de óxido protetor, depósitos excessivos, corrosão, *pitting*, erosão, e outras irregularidades associáveis à qualidade da água são portanto evidenciadas neste exame dos balões e coletores. Também podem ser cortados trechos de tubos para permitir análise dos depósitos internos. A inspeção do desaerador e tanque de água de alimentação, conforme item 3.3.2 abaixo, completam esta investigação.

2. Os internos do balão de vapor, nomeadamente defletores, telas separadoras de umidade, tubulações de alimentação de água e de dosagem de produtos químicos, devem ser verificados quanto à sua adequada instalação e fixação, e ao seu estado geral. Observar nesta ocasião a linha d'água no balão, o que fornecerá indícios acerca do controle de nível no mesmo.

3. A inspeção nos balões, além dos fatores acima, deve incluir o exame quanto a trincas e rupturas. Atenção especial deve ser dada às extremidades expandidas de tubos mandrilados e respectivas soldas de selagem (se existentes), recorrendo-se a ensaios não-destrutivos se necessário. Isto se aplica especialmente após eventual lavagem química.

4. É recomendável que sejam periodicamente inspecionados (por exemplo, com intervalo de três a cinco anos, dependendo da idade da caldeira) os bocais “spray” dos dessuperaquecedores, usando um endoscópio, e que seja aplicado teste hidrostático ao condensador Dolezal, se existente. Observar que atemperadores defeituosos ou com vazamento podem causar sérios danos aos superaquecedores.

5. Investigação com foco em corrosão e erosão nas partes em contato com a água, é feita, por exemplo, por meio de radiografia se houver indícios apontando para isto.

6. Recomenda-se, quando da inspeção do balão de água, a instalação de tampas nas aberturas dos *downcomers*, presas com correntes no lado externo do balão, evitando-se que objetos caiam acidentalmente nestes locais.

3.3. Exame Externo

O exame visual externo em uma caldeira também deve ser extensivo e detalhado. Embora tenha menor abrangência e profundidade que o exame interno, pode ainda assim proporcionar informações de grande relevância ao inspetor. Abaixo são dadas linhas gerais para o exame externo, subdividindo-o em: parte exterior da caldeira, e acessórios e órgãos periféricos.

3.3.1. Parte Exterior da Caldeira

Deve ser feita inspeção cuidadosa na estrutura, *buckstays*, tirantes de sustentação, isolamento térmico, invólucros, portas, visores, instrumentos, caixas de ar, funis de cinzas, suportes de tubulações, escadas e corrimãos, plataformas, pisos, vias de evacuação em emergência, sinalização, etc. Recomenda-se periodicidade semestral para esta inspeção, que pode ser conduzida com a unidade em operação.

3.3.2. Acessórios e Órgãos Periféricos à Caldeira

Muitos destes itens requerem a parada da unidade para serem inspecionados. A periodicidade recomendada é, portanto, anual, juntamente com o exame interno. Os principais estão destacados abaixo:

- Tanque de dissolução - Antes da limpeza, verificar quanto a acúmulos irregulares de fundido, que indicam deficiência da agitação. O estado do costado deve ser avaliado externa e internamente. Se for construído em aço carbono revestido em aço inoxidável, eventuais falhas deste revestimento, expondo o substrato de aço carbono ao produto corrosivo, devem ser pesquisadas, uma vez que darão origem a pontos de severa corrosão localizada. Devem ser examinados os agitadores com foco em seus suportes de fixação (que podem ter trincas), estado das telas de proteção e desgaste dos rotores. Inspeccionar o estado e possíveis obstruções das linhas de licor verde, fragmentadores de licor verde a vapor, chuveiros de recirculação e outros internos do tanque.

- Sopradores de fuligem - Inspeccionar quanto ao alinhamento e possível existência de trincas, corrosão e erosão nas lanças, estas últimas ocasionadas geralmente por inadequada purga de condensado. Deve-se adotar como procedimento a inspeção por gamagrafia nas soldas de lanças novas e reparos executados, conferindo-lhes maior segurança contra defeitos que poderiam causar o rompimento do tubo e sua projeção para o interior da caldeira. Deve ser examinada por END com especial atenção a solda de união entre as ponteiras e as lanças. Observar o estado das caixas de selagem dos sopradores, montadas junto às penetrações nas paredes da caldeira. Proceder também a uma verificação da estanqueidade das válvulas do sistema. Confiabilidade adicional quanto à segurança dos sopradores de fuligem pode ser alcançada executando-se testes funcionais e dinâmicos com os mesmos. O teste, conduzido “a seco” durante a parada da unidade, é feito inserindo-se completamente a lança de cada soprador, enquanto um inspetor observa os seguintes aspectos: (a) curso da lança, certificando-se que a mesma não se aproxima demasiadamente, ou mesmo colide, com a parede oposta; (b) as condições e funcionamento das chaves-limite e batentes mecânicos de fim-de-curso, devendo a fixação deste último ser verificada por líquidos penetrantes; (c) o empeno ou descentralização da lança ao longo do percurso, com possíveis atritos laterais com painéis de tubos adjacentes; (d) condições de desgaste e desalinhamento, bem como ruídos anormais, dos roletes de apoio da lança; (e) funcionamento adequado do sistema de indexação, se existente.

- Tanque de água de alimentação e desaerador - Devem ser examinados com foco na qualidade da água conforme descrito em 3.2.2. (1), atentando-se para depósitos e a presença de materiais estranhos em seu interior. Verificam-se também o estado dos internos do desaerador, especialmente fixação das bandejas e bicos spray. De forma geral estes vasos devem receber o mesmo tratamento de inspeção e END aplicável a vasos de pressão em geral, inclusive com atendimento aos requisitos legais.

- Linha de água de alimentação – Está sujeita à perda de espessura causada por *corrosão acelerada por fluxo*, podendo resultar em rupturas de conseqüências catastróficas. Toda a tubulação deve, portanto ser inspecionada com este foco, dando-se atenção especial às curvas, partes adjacentes ou à jusante de válvulas, derivações, pontos de dosagem de

químicos ou onde quer que a geometria da linha favoreça o aumento de turbulência e o impingimento do fluido contra as paredes dos tubos. A medição ultra-sônica de espessura é o recurso indicado. Como a corrosão pode ocorrer de forma localizada, é importante que se meça, a intervalos criteriosamente definidos, ao redor de toda a circunferência do tubo, e que seja feito um *grid* adequado de pontos de medição nas áreas suspeitas. Se necessário, inspecionar internamente com um endoscópio: a aparência rugosa típica da superfície interna das regiões corroídas será facilmente identificada com este instrumento.

- Linha de vapor principal – Está sujeita principalmente à acumulação de danos de longo prazo (objeto de outro documento do CSCRB), mas ainda assim deve receber certa atenção também nas inspeções anuais. Nestas ocasiões, devem ser verificadas principalmente as condições gerais de suportação (estado visual e funcionamento dos suportes elásticos, exame por END nos olhais e outros dispositivos de suspensão soldados à tubulação). De modo particular em caldeiras onde parte da linha de vapor esteja sujeita a intempéries, atenção deve ser dada à possibilidade de corrosão externa sob o isolamento térmico da tubulação --uma forma clássica de corrosão!

Outros órgãos externos e periféricos da caldeira a serem inspecionados encontram-se apenas relacionados de forma genérica abaixo, como referência adicional ao inspetor:

- Válvulas de segurança
- Bombas de alimentação de água e de circulação
- Lavadores de gases
- Preaquecedores de ar
- Tanque de mistura
- Sistemas de limpeza das portas de ar primário
- Tanques de descarga contínua e de fundo
- Tanque de água de resfriamento das bicas
- Ventiladores e exaustores de tiragem
- Precipitadores eletrostáticos
- Transportadores de cinzas
- Válvulas rotativas
- Dutos de ar e gases
- Manômetros e indicadores de nível
- Instrumentação e alarmes em geral. Dispositivos de segurança como sistema de drenagem rápida, medição on-line de sólidos, instrumentos com ação de *trip* na caldeira.
- Etc.

3.4. TESTES COMPLEMENTARES

Além dos exames visuais e ensaios, a aplicação dos testes complementares citados abaixo, de natureza mais funcional, contribuirá para aferir a segurança da unidade. Estes testes devem ser testemunhados pelo profissional comissionado para executar a inspeção da caldeira.

3.4.1. TESTE HIDROSTÁTICO

A aplicação de prova de pressão hidrostática (com valor normalizado de sobre-pressão, e seguindo procedimentos de teste também padronizados no código de projeto da caldeira) permite verificar a existência de vazamentos e/ou insuficiência de resistência da unidade. Embora somente exigível, pelas normas genéricas para caldeiras, na inspeção inicial e após execução de reparos e/ou vazamentos em partes pressurizadas, o teste hidrostático é imprescindível por ocasião das inspeções periódicas, no caso de caldeiras de recuperação.

Abaixo é mostrado o diagrama de pressão de um teste hidrostático típico, bem como as operações associadas a cada um de seus segmentos, de-A até F: _____

SEGMENTO	OPERAÇÃO/ATIVIDADE	RAZÃO DE PRESSURIZAÇÃO OU DESPRESSURIZAÇÃO
A	Pressurização até a PMTA	2 a 3 kgf/cm ² por minuto. Pode ser conduzida em patamares intermediários
B	Elevação até a pressão de teste, P _{TH}	1 kgf/cm ² por minuto
C	Estabilização na pressão de teste por 30 minutos	Zero
D	Redução da pressão até a PMTA	2 a 3 kgf/cm ² por minuto
E	Ingresso dos interessados na caldeira e execução das inspeções	Zero
F	Despressurização	2 a 3 kgf/cm ² por minuto

Recomendações gerais para teste hidrostático:

- Travar as válvulas de segurança
- Pressurizar por meio das bombas de alimentação (BFPs)
- Utilizar água desmineralizada, fria (15 a 40°C)
- Utilizar manômetro-padrão aferido, instalado no balão de vapor .
- Inspeccionar todas as partes pressurizadas acessíveis da caldeira
- Surgimento de gotículas em tubos mandrilados não deve motivar reprovação

3.4.2. Teste das Válvulas de Segurança

Válvulas de segurança são dispositivos de proteção sujeitos a falhas latentes, isto é, falhas que só serão percebidas quando a atuação da válvula se fizer necessária. Assim, mesmo assumindo-se que tenham recebido adequada manutenção, e sejam suficientes em termos de vazão, as válvulas de segurança devem ainda ser testadas anualmente, com foco na calibração e funcionamento adequado. A pressão de abertura e o diferencial de alívio devem estar em estrita conformidade com as especificações do fabricante, com o código de projeto da caldeira e com a legislação vigente. A abertura das válvulas deve ser em disparo único, em “pop”, sem apresentar batimento ou trepidação. As PSVs devem também estar isentas de vazamentos perceptíveis quando da operação normal da caldeira.

Nota: o teste das válvulas de segurança, bem como sua desmontagem e revisão anuais são mandatórios pela legislação vigente.

Recomendações gerais para teste convencional de válvulas de segurança:

- Iniciar o teste pela PSV de ajuste mais alto;
- A cada válvula testada, as demais deverão estar travadas;
- Caso sejam requeridos ajustes, disparar a válvula em questão no máximo 5 vezes seguidas; Ocorrendo esta situação, somente após 6 horas poderá ser feita nova tentativa.
 - Quando uma PSV abrir, o operador deverá apagar um queimador e liberar vapor pela válvula de alívio *blowoff*.
 - Utilizar manômetros-padrão aferidos.
 - Uma tolerância de ± 1 kgf/cm² no valor de abertura da PSV, é usualmente aceita.
 - Testes de acumulação não devem ser executados em caldeiras providas de superaquecedores.

Opcionalmente ao teste convencional de válvulas de segurança, é aceita a utilização de dispositivos atuadores hidráulicos, geralmente associados a uma instrumentação especial, constituindo o chamado teste *on-line*, sem a necessidade do disparo em “pop” e abertura total das válvulas de segurança.

Em seu atual estágio de desenvolvimento, os testes *on-line* ainda não permitem uma verificação do funcionamento correto da válvula (abertura em “pop”, ausência de possíveis vibrações, martelamento, vazamentos, etc.). Alguns modelos de equipamento de teste também não permitem a verificação do valor de *blow-down*. Por estas razões recomenda-se que, a cada inspeção da caldeira, pelo menos uma das válvulas de segurança seja testada de forma convencional, com vapor.

4. PROCEDIMENTOS EM SITUAÇÕES DE EMERGÊNCIA (CALDEIRAS COM COMBUSTÍVEL À GÁS)

Neste item, mencionaremos alguns procedimentos que o operador de caldeira deverá executar em situações de emergência; salienta-se que os mesmos estão baseados em recomendações de vários fabricantes e também em observações práticas.

4.1. Vazamento de Água ou Vapor

Causas:

- Tubo furado
- Superaquecimento seguido de resfriamento rápido, soltando os tubos dos espelhos.

Como Evitar:

- Inspecionar periodicamente as válvulas e fazer manutenção
- Jamais deixar faltar água na caldeira
- Manter um tratamento de água adequado à caldeira
- Inspecionar periodicamente o feixe tubular

Como Proceder:

- Se o vazamento for nos tubos ou espelhos, fazer procedimento de parada da caldeira, imediata.
- Se for em válvulas, flange ou tampa, avaliar a intensidade e decidir por uma parada imediata ou parada programada.

4.2. Retrocesso

Este fato ocorre quando a pressão interna da fornalha da caldeira é maior que a pressão ambiente.

Causas:

- Vazamento do sistema de alimentação de gás
- Bloqueamento da chaminé
- Falhas de ignição
- Falhas ou paradas repentinas do ventilador
- Falha do operador de caldeira quanto à operação de início de acendimento da caldeira
- Tentativa de reacender o queimador, normalmente

Como Evitar:

- Não se deve permitir o acúmulo de gás na fornalha (as válvulas devem estar vedando bem)
- Nunca tente reacender o queimador manualmente
- Seguir corretamente as indicações contidas no manual de operação do queimador

Como Proceder:

- Desligue imediatamente o queimador
- Interrompa o suprimento de combustível
- Verifique se a caldeira sofreu algum dano, chame o departamento de manutenção.
- Procure determinar a causa da explosão
- Se você tiver certeza de que a caldeira não foi danificada, promova então a ventilação da fornalha (aprox. 10 minutos), a fim de que os gases sejam expelidos para fora.
- Tente reacender a caldeira
- Se o queimador desligar em segurança e você não conseguir acendê-lo após a terceira tentativa, interrompa esta operação, procure determinar o defeito; caso não encontre chame um técnico especializado em combustão.

4.3. Nível de Água Abaixo do Limite Mínimo

Causas:

- Defeito(s) no sistema de controle automático de nível
- Válvula de retenção do sistema de alimentação de água está com defeito
- Falta de água no reservatório (caixa de água ou tanque de condensado)
- Descuido do operador
- Defeito elétrico e/ou mecânico na bomba de alimentação
- Filtro da linha de sucção da bomba entupido
- Aquecimento excessivo da água de alimentação, prejudicando o funcionamento da bomba

Como Evitar:

- Drenar (purgar) o visor de nível e a garrafa que contém os eletrodos (ou bóia) pelo menos uma vez por dia
- Verificar constantemente o reservatório de água (caixa d'água e/ou tanque de condensado)
- Maior atenção do operador no controle visual do nível d'água, permanentemente.

- Realização de manutenção preventiva e/ou corretiva do sistema de alimentação de água
- Quando você for realizar a descarga de fundo, jamais deixe a água desaparecer do visor de nível.
- Manutenção preventiva e/ou corretiva do sistema elétrico

Como Proceder:

- Coloque a chave do queimador na posição desligado
- Feche imediatamente a válvula de saída de vapor da caldeira (evitando-se assim que o vapor saia e diminua ainda mais o nível de água)
- Se a água é ainda visível no nível de vidro (visor), acione o controle manual da bomba fazendo com que se restabeleça o nível normal; se a bomba não funcionar utilize a bomba de reserva ou o injetor.
- Se a água não é visível no nível de vidro (visor), não reponha água, alivie a pressão usando a válvula de segurança; deixe a caldeira esfriar, pois do contrário a água pode causar sérios danos à caldeira (choque térmico, explosões)
- No caso anterior e após o resfriamento da caldeira, deve-se realizar uma inspeção minuciosa a fim de que se possam identificar os danos causados. O motivo que ocasionou a falta de água deverá ser identificado e corrigido antes de voltar a completar o nível da água;
- Verificar o sistema de instrumentação elétrica

4.4. Nível de Água Acima do Limite Máximo

Causas:

- Defeito(s) no sistema de controle automático de nível
- Descuido do operador, bomba no manual, ligada.
- Defeito elétrico na bomba de alimentação

Como Evitar:

- Drenar (purgar) o sistema de controle de nível pelo menos uma vez por dia
- Maior atenção do operador
- Manutenção preventiva e/ou corretiva freqüente do sistema elétrico da bomba

Como Proceder:

- Desligar (ou interromper) imediatamente a alimentação de água
- Certificar-se de que o nível está alto, muitas caldeiras foram perdidas devido a esse engano.
- Efetuar a descarga de fundo, até que o nível normal seja restabelecido.
- Informar imediatamente ao departamento de manutenção o fato ocorrido

4.5. A Pressão do Vapor Sobe, Mas a Válvula de Segurança Não Abre (> P.M.T.A.)

Causas:

- Sede e haste da válvula de segurança emperrada
- Válvula de segurança incorretamente regulada
- Entupimento na conexão de fixação da válvula

Como Evitar:

- Nunca mexa na regulagem da válvula, sem prévia autorização do responsável por esta área
- Semanalmente testar a válvula, puxando a alavanca, manualmente, na pressão de operação

Como Proceder:

- Desligar o queimador e retirar a pressão da caldeira
- Providenciar a retirada da válvula imediatamente, para revisão e calibração
- Inspeccionar a conexão de fixação da válvula

4.6. A Válvula de Segurança Abre, Mas a Pressão do Vapor Continua a Subir.

Causas:

- Sede e haste da válvula de segurança semi-emperrada
- Válvula de segurança é insuficiente (erro de projeto)
- Válvula de segurança montada incorretamente após a revisão e calibração

Como Evitar:

- Semanalmente testar a válvula, puxando a alavanca manualmente.

Como Proceder:

- Desligar o queimador
- Providenciar a abertura da válvula imediatamente

4.7. Falta de Energia Elétrica

Causas:

- Queda (interrupção de fornecimento de energia elétrica)

Como Proceder:

- Fechar imediatamente a válvula principal de saída de vapor. Observar a pressão indicada no manômetro da caldeira, verificando se as válvulas de segurança abrem na pressão máxima de trabalho admissível ou abaixo.
- Toda a caldeira deve ter iluminação de emergência.

Nota: É aconselhável todo operador de caldeira possuir, na casa de caldeira uma lanterna com as pilhas em bom estado.

- Enquanto a caldeira estiver parada, não se deve realizar a descarga de fundo.
- Se a caldeira possuir dispositivos tais como injetor, a mesma poderá ser alimentada manualmente (não esqueça de observar o nível d'água).

4.8. Incêndios

Causas:

- Ignição de gás acumulado na fornalha
- Pulverizadores entupidos
- Vazamentos ocasionados por válvulas, conexões, etc...
- Vazamentos na tubulação de gás
- Saturação do ambiente da casa de caldeira por gases combustíveis
- Curto-circuito em geral

Nota: A casa de caldeira deve ter sensores de gás.

Como Evitar:

- Evite vazamentos de gás tomando o cuidado de conservar o local de trabalho limpo
- Solicite imediatamente os serviços de manutenção quando for verificado qualquer tipo de vazamento
- Não use lâmpadas desprotegidas e nem equipamentos que possam centelhar (emitir faíscas) dentro da casa de caldeira
- Ter extintores de incêndio na casa de caldeira
- Ter treinamento em prevenção e combate a incêndios

Como Proceder:

- Chamar ajuda antes de iniciar o combate ao incêndio
- O fogo deverá ser imediatamente abafado, usando-se extintores de CO₂ ou espuma química.
- Resfrie cuidadosamente as partes em contato com o gás para impedir reignição

4.9. Inspeções

Após uma emergência em que a caldeira sofreu danos, deve ser submetida a uma inspeção extraordinária.

- Sempre que for feita a manutenção com soldagem nas partes que sofrem pressão deve ser feito novo teste hidrostático
- Todas as inspeções devem ser registradas no livro de registro de segurança, assinadas pelo Engenheiro Inspetor e pelo operador de acompanha a inspeção.

5. REFERÊNCIAS

- Bazzo E., 1992, “Geração de Vapor”, Editora da UFSC, Florianópolis, pp. 216
- Incropera F.P. and De Witt, D.P., 1990, “Fundamentals of Heat and Mass Transfer”, John Wiley & Sons, New York, 3ª ed., Pp. 970
- Garcia, R., 2002, “Combustão e Combustíveis”, Editora Interciência, Rio de Janeiro, pp. 202
- Kern, D. Q., 1950, “Process Heat Transfer”, McGraw-Hill Kogakusha, Tóquio, , pp. 871
- Lens, W. e Liedtke G., 1979, “Instalações para a Produção de Vapor”, In: Dubbel: Manual do Engenheiro Mecânico, Ed. Hemus, São Paulo
- Nadруп, I. e Novaes, M. S. de, 1981, “Operação de Caldeiras de Vapor”, CNI, Rio de Janeiro, pp. 88
- Pankratov, G., 1987, “Problemas de Termotecnia”, Editorial Mir, Moscou, pp. 236.
- Pêra, H., 1966, “Geradores de Vapor de Água”, Grêmio Politécnico da USP, São Paulo, pp. 288
- Torreira, R. P., 1995, “Geradores de Vapor”, Companhia Melhoramentos, ISBN 900126, São Paulo, pp. 710
- IBP, 1976, “Inspeção em Permutadores de Calor”, Instituto Brasileiro de Petróleo, Guia n.4, Rio de Janeiro, pp. 24
- IBP , 1974, “Causas Gerais e de Deterioração e Avaria dos Equipamentos “,Inspeção de equipamentos. Guia nº 6, Rio de Janeiro, pp. 46
- IBP, 1976, “Inspeção de Caldeiras”, Instituto Brasileiro de Petróleo, Inspeção de Equipamentos. Guia nº 5, Rio de Janeiro, pp. 23
- Ministério do Trabalho - Secretaria de Segurança e Saúde no Trabalho, 1995, “Norma Regulamentadora nº 13. Caldeiras e Vasos de Pressão, D.O.U , Brasília
- Dantas, E., 1988, “Geração de Vapor e Água de Refrigeração-Falhas-Tratamentos”, Ed. Interciência, Porto Alegre, pp. 305
- American Society of Mechanical Engineers, 1980, “Power Boilers”, ASME Boiler and Pressure Vessel Code – Section I, New York, pp. 300
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1990, “Caldeira Estacionária Aquotubular e Flamotubular a Vapor: NBR 11096”, Rio de Janeiro
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1976, “Amostragem de águas em caldeiras: NB00584”, Rio de Janeiro
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1989, “Caldeira Auxiliar a Óleo para Uso Naval: NBR 10794”, Rio de Janeiro
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1989, “Caldeira Auxiliar a Óleo para Uso Naval – Ensaios: NBR 10795”, Rio de Janeiro
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1992, “Inspeção de Segurança de Caldeiras Estacionárias Aquotubular e Flamotubular a Vapor: NBR 12177”, Rio de Janeiro
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1994, “Inspeção de Segurança de Caldeiras Estacionárias Elétricas a Vapor: NBR 13203”, Rio de Janeiro
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1987, “Radiografia – Inspeção de Soldas de Topo em Vasos de Pressão e Tanques em Armazenamento – Critérios de Aceitação: NBR 10150”, Rio de Janeiro.

6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso e autorizam o uso do seu conteúdo pela coordenação do curso e ministrante da disciplina.



ENGENHEIRO DE SUPRIMENTOS
DISCIPLINA DE FABRICAÇÃO E MONTAGEM DE CALDEIRAS E
TROCADORES DE CALOR
AGOSTO/SETEMBRO DE 2008
Escola Politécnica – Depto. Enga. Mecânica

Tratamento e sistemas de tratamento de água industrial

Márcio Bozzo Nalepa (Prominp) marcio.bozzo@uol.com

Paulo Gabriel Cayres (Prominp) paulo.cayres@ig.com.br

Resumo

O presente artigo é uma pesquisa descritiva que tem por objetivo descrever os processos e sistemas de tratamento de água industrial, os tipos de ataque gerado pela água de processo que prejudicam a estrutura e a eficiência dos geradores de vapor e trocadores de calor e os principais métodos de controle que visam aumentar a vida útil e a segurança operacional destes equipamentos bem com apresentar os materiais mais usados para a construção de fábricas.

Palavra chave: gerador de vapor, trocador de calor, corrosão.

1. INTRODUÇÃO A AGUAS E SUAS IMPUREZAS

À medida que a água percorre seu ciclo, absorve impurezas que refletem a composição da atmosfera ou crosta terrestre.

Antes de atingir o solo a água da chuva pode absorver gases e absorver matéria solúvel e insolúvel contida na atmosfera: saturada de oxigênio e dióxido de carbono e óxidos de enxofre. A água pluvial pode ainda conter matéria orgânica, originada da contaminação industrial da atmosfera ou desprendida pela vegetação.

Composição de Variação de águas (águas superficiais e águas subterrâneas)

Composto	Poço São Bernardo do Campo (Piraporinha)	Rio doce (Gov. Valadares)	Água do Mar
Sílica SiO ₂	45	11	10
Ferro Fe	20,1	5,1	
Manganês Mn	0	0,03	0,01
Cálcio Ca	18,4	4,0	400
Magnésio Mg	2,16	0,48	1252
Sódio Na	14,1	0,87	10561
Potássio K	2,7	0,94	380
Carbonato CO ₃	0	0	0
Bicarbonato HCO ₃	134,2	29,3	140
Sulfato SO ₄	9,0	0	2650
Cloreto Cl	2,8	0,7	18980
Fluoreto F	0	0	1,4
Nitrato NO ₃	0	1,6	1,5
Sódio total dissolvidos	150	25,5	34450
Dureza total CaCO ₃	55	12,0	6250
Dureza não-carbonica CaCO ₃	0	0	6126
Cor	25	5	Clara
Turbidez ppm SiO ₂	5,5	33	0
PH (em unidades de pH)	7,5	6,8	7,5 a 8,4
Dióxido de carbono livre	8,0	7,2	0

Fonte: Rice, James K., 1979

PROBLEMAS DE ÁGUAS INDUSTRIAIS

Problemas operacionais decorrentes pela formação de depósitos, corrosão de metais, espuma em sistemas geradores de vapor e lodo microbiológico e deterioração de madeira em sistemas de refrigeração de água.

Problemas gerais Causados por impurezas na água

Descrição	A	B	C	D	E	F	G	H
Corrosão uniforme	X	X	X	X	X	X	X	-
Corrosão localizada	X	X	X	X	X	X	X	X
Corrosão por stress	-	-	-	-	X	X	-	-
Dezincificação do latão	X	-	X	X	-	-	X	X
Ataque do latão por amônia	-	-	X	X	-	-	-	-
Corrosão de metais dissimilares	X	X	X	X	-	-	X	X
Ataque de aço inoxidável por cloretos	X	-	X	-	-	-	X	-
Ataque caustico	-	-	-	-	-	X	-	-
Ataque por hidrogênio	-	-	-	-	-	X	-	-
Formação de depósitos inorgânicos	X	X	X	X	X	X	X	X
Lodo microbiológico	X	-	X	X	-	-	X	-
Deterioração da madeira de torres de refrigeração	-	-	X	-	-	-	-	-
Arraste	-	-	-	-	X	X	-	-

Legenda

- A – sistemas aberto de refrigeração
- B – Sistemas fechado refrigeração
- C – Sistemas de refrigeração abertos de recirculação
- D – Sistemas de ar condicionado
- E – Sistemas geradores de vapor de baixa pressão
- F – sistemas geradores de vapor de alta pressão
- G – Água de processo
- H – Água potável

Fonte: Rice, James K., 1979

2. PROCESSOS EXTERNO DE TRATAMENTO DE ÁGUA

Clarificação:

Processo aplicado em águas superficiais para remoção de sólidos em suspensão, sólidos finos que se apresentam como turbidez e cor e outros materiais coloidais. Engloba a coagulação (adição de um produto químico que faz com que as cargas coloidais precipitem (flocos) como partículas (*pint point*) para remoção subsequente – decantação, floculação e sedimentação em forma de lodo).



Figura 2.0: Processo de clarificação da água

Abrandamento a Cal:

A temperatura ambiente é considerada uma etapa além da clarificação, por produz benefícios adicionais de uma redução nos sólidos dissolvidos totais. Na figura a seguir é apresentados um sistema de abrandamento a cal e um equipamento para utilizado neste processo. A figura 2.1 ilustra um sistema de abrandamento da água a cal.

A adição de cal reduz a quantidade de bicarbonato de cálcio, pela precipitação de carbonato de cálcio ocorrendo também a clarificação.

A adição de calcário também pode reduzir a alcalinidade magnesiana, pela formação de hidróxido de magnésio e carbonato de cálcio.

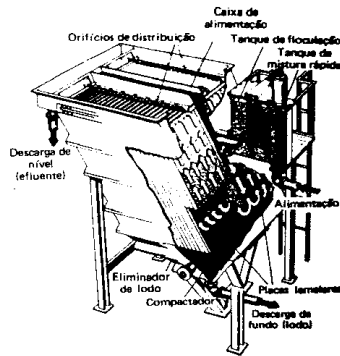


Figura 2.1: Sistemas de abrandamento a cal

O abrandamento a cal de barrilia é aplicado a águas que apresentam dureza não-carbonatada quando a dureza total excede a alcalinidade total. Este processo é muito aplicado em águas de processo. Quando a água for destinada à reposição de gerador de vapor, são utilizados de preferência abrandadores de troca iônica, para produzir água branda, método menos caro para remoção de dureza não-carbonatada. Em casos especiais a soda caustica pode ser utilizada para o abrandamento, porém é necessário obedecer a proporção correta de carbonato de cálcio e de magnésio, para dureza não-carbonatada.

Abrandamento com Cal a Quente:

O abrandamento a temperaturas elevadas (100 C) é um processo reservado exclusivamente para água de reposição de geradores de vapor. A água tratada sai a uma temperatura elevada e sob pressão. Diminuindo a viscosidade, causada pela temperatura da água, aumentando consideravelmente a vazão. Além disso, o cálcio e o magnésio precipitados possuem solubilidade. Não é necessariamente usar coagulante. O dióxido de carbono é expulso para a atmosfera e não consome cal. Pode-se alcançar redução significativa da sílica.

O aquecimento de unidades de processo a quente é feito por contato com vapor direto. O vapor condensado (10 a 20%) dilui a água bruta. O processo de abrandamento com cal a quente da água esta representado na figura 2.2.

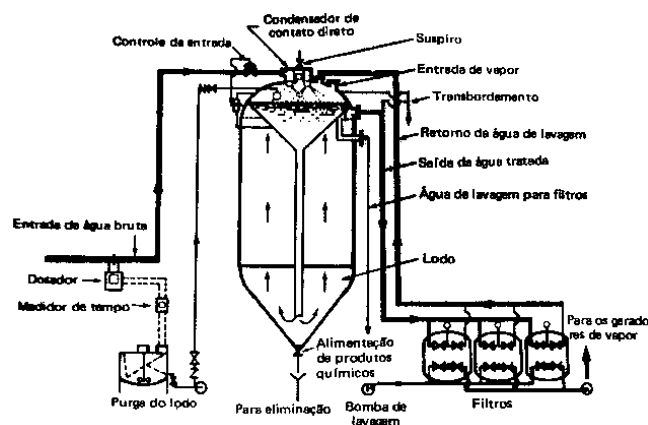


Figura 2.2: Abrandador de cal a quente

Filtração:

No contexto do tratamento da água um filtro é um leito de material granular que remove fisicamente (côa) material em suspensão da água que passa através dele. É mais comum a ocorrência de problemas de natureza operacional nos filtros do que nos classificadores. As maiorias dos filtros operam em um período limitado de tempo.

Quando a que de pressão atinge um dado nível o filtro é obstruído e requer limpeza contra lavagem. Partículas pequenas podem passar pelo filtro, daí ser importante a preparação da água antes da filtragem.

Deve-se considerar que no transbordamento do clarificaste ou água flocada não devem ser bombeados. Um processo de filtração da água esta representada pela figura 2.3.

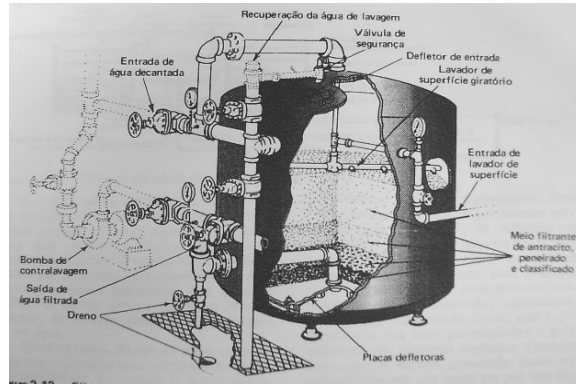


Figura 2.3: Processo de filtração da água

Filtração com carvão:

Utiliza-se ocasionalmente carvão ativado como meio filtrante, pois geralmente os leitos de carvão são procedimentos de areia e serem como proteção para os leitos de troca iônica. O carvão ativo absorve traços de cloro ou oxidantes que podem prejudicar a resina catiônica e produtos orgânicos que obstruem fortemente resinas aniônicas básicas. O carvão ativo também pode ser utilizado para remover sabores, odores e outras impurezas.

Para remoção do cloro: capacidade infinita, não precisa de processo regenerador do carvão. Para remoção de material orgânico dissolvido: capacidade finita.

Troca iônica:

Geralmente o método mais fácil e flexível de tratamento de água para geradores de alta pressão e outros processos. O processo substitui os íons menos desejável pelos íons mais desejáveis, é um processo contínuo, com reações reversíveis.

Existem dois tipos fundamentais de resinas de troca iônica: resina catódica, que remove parte de todos os cátions da água (cálcio, magnésio, sódio, etc.); e resinas anódinas, que removem parte de todos os anions da água (dióxidos de carbono, alcalinidades de bicarbonatos e carbonatos, cloretos, sílicas, etc.).

Vários sistemas de troca iônica são mostrados na tabela a seguir.

Tipo	Cátion			Anion		
	Fraco	Forte		Fraco	Forte	
Ciclo Remove	Hidrogênio Cálcio Manganês (1)	Hidrogênio Cálcio Magnésio Sódio	Sódio Cálcio Magnésio (2)	Hidroxila Cloreto Sulfato (3)	Hidroxila Dióxido de carbono Bicarbonato Carbonato Cloreto Sulfato Sílica (3)	Cloreto Bicarbonato Sulfato (4)

Fonte: Rice, James K., 1979

A forma mais comum de troca iônica é o abrandamento de água, em que a dureza dissolvida é removida pela troca de íons cálcio e magnésio por íons sódio.

A desmineralização completa ou desionização catiônico de ácido de forte ciclo de hidrogênio (ácido) remove todos os cátions e os substitui por íons hidrogênio. A água ácida passa então através de um trocador aniônico de base forte no ciclo hidroxila (caustico), que remove todos os anions, inclusive sílica, e os substitui por íons hidroxila.

A seguir é apresentado um tipo de trocador de íons que realiza desmineralização ou desionização completa da água.

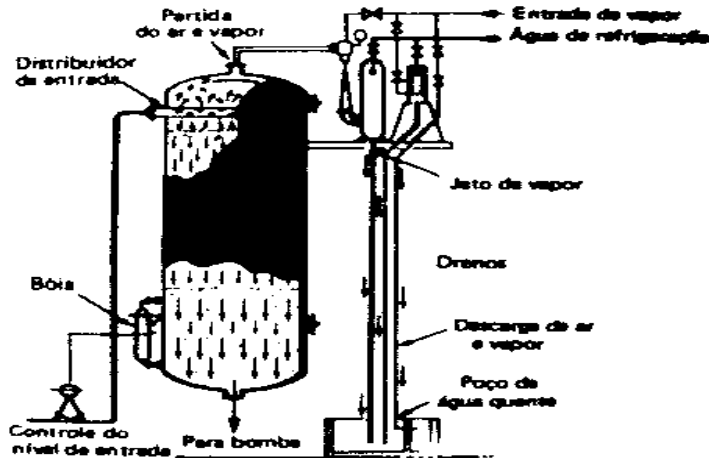


Figura 2.4: Trocadores de íons da água

Remoção de Ferro

- **Troca iônica:** O ferro solúvel é removido eficientemente da água por troca de cátions hidrogênio ou sódio;
- **Cal ou Cal/Barrilia:** Água com alto teor de ferro solúvel devem ser pré-tratadas por oxidação. Em processos a quente, a temperatura elevada e o pH tornam desnecessários o p're-tratamento mesmo com altos teores de ferro;
- **Oxidação:** O ferro precipitado pode ser removido diretamente com filtros ou a etapa de oxidação pode ser utilizada para pré-tratar a alimentação para os abrandadores de cal fria ou clarificadores. Os óxidos químicos incluem cloro, dióxido de cloro, permanganato e outros. O mais comum é cloro gasoso ou hipocloreto;
- **Zeolito de Manganês:** o método zeolito de manganês utilizada glauconita especialmente tratadas para oxidar o ferro. (fig. 2-30). O permanganato adicionado na água oxida o ferro da água bruta, que é então removido por filtração. O excesso de permanganato porventura adicionado será absorvido pelo zeolito (efeito tampão);
- **Remoção do manganês:** Muitas vezes o ferro e o manganês estão simultaneamente presentes. Os processo que removem ferro vão agir no manganês, porem com menos eficiência.

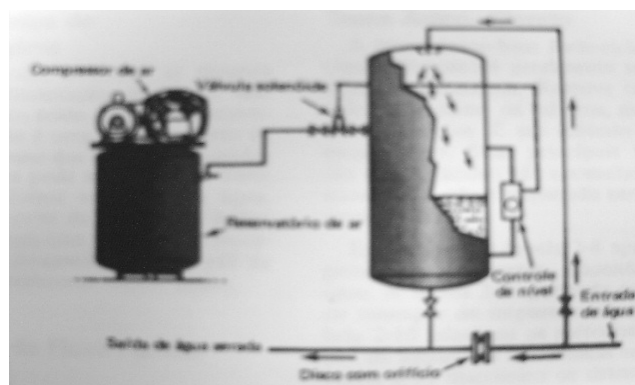


Figura 2.5: Sistema de remoção do ferro de águas subterrâneas

Redução de Alcalinidade

Tanto o sistema de cal quente ou cal frio reduzem a alcalinidade, assim como a desmineralização completa. Vários outros sistemas merecem menção e são descritos a seguir.

- **Alimentação de ácido:** o ácido vai reagir com a alcalinidade formando o dióxido de carbono. O ácido é injetado e o CO₂ resultante é removido por um desgaseificador de circulação forçada;
- **Troca Iônica:** Neste método, ocorrem as mesmas reações da alimentação de ácido, mas aqui a fonte do ácido é a resina catiônica. O resultado é uma redução tanto da alcalinidade como dos sólidos dissolvidos totais. A resina pode ser ácido forte ou fraco conforme exigido pela água;
- **Tratamento de Fluxo Partido:** o tratamento de fluxo partido utiliza trocadores de cátions fortes do ciclo sódio e do hidrogênio, cada um tratando uma porção do fluxo total. Os dois fluxos são misturados, após o que os gases são liberados e removidos. Este sistema produz água branda com um nível controlado de alcalinidade;
- **Troca Anion-Cloreto:** A troca anion-base forte-ciclo cloreto é geralmente aplicado a água pré-abrandada. Remove tanto a alcalinidade como os sulfatos, mas substitui os cloretos. É um tratamento caro. Suas principais vantagens são que os ácidos não necessitam ser manuseados e não é requerido nenhum desgaseificador.

3. CONTROLE DE CORROSÃO EM ÁGUAS INDUSTRIAIS

Um programa de tratamento de água eficaz e bem projetado pode reduzir muito problemas de corrosão.

A corrosão é um processo eletroquímico no qual estabelece uma diferença de potencial elétrico entre dois metais ou entre diferentes partes de um mesmo metal.

Esta diferença permite a passagem de corrente através do metal causando reações anódicas e catódicas. Estas áreas constituem a célula de corrosão. A figura 3.0 a seguir representa uma célula de corrosão simples.

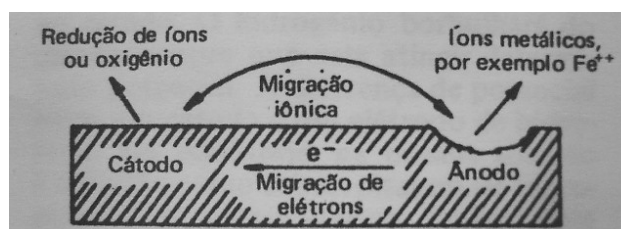


Figura 3.0: Célula de corrosão simples

Fatores químicos

- **composição da água** (matéria suspensa e dissolvida e pH);
- **sais dissolvidos** (íons de grande penetrabilidade aumento da condutividade elétrica);
- **gases dissolvidos** - dióxido de carbono (formação de H₂CO₃), oxigênio - despolarizador catódico, amônia - agentes oxidante (corroe o cobre), sulfeto de hidrogênio - corrosão ativa por ácido e pro sulfeto de ferro que é catódico com relação ao ferro (corrosão galvânica);
- **matérias suspensas:** lama, areia, aluvião, argila, poeira e outras - formação de células de aeração diferencial nos poros da sedimentação destes materiais;
- **microorganismos:** as bactéria anaeróbicas formam células de aeração diferencial e aceleram o ataque localizado (algumas espécies produzem compostos ácidos).

Fatores Físicos:

- **áreas metálicas relativas:** metais diferentes produzem diferença de potencial (+/- ânodo e +/- cátodo - corrente de corrosão);

- **temperatura:** a medida que a temperatura aumenta a difusão diminui tanto a sobretensão quanto a viscosidade) - > temperatura > o grau de corrosão;
- **temperatura transferência de calor - “efeito de parede quente”:** o oxigênio é liberado na solução na superfície quente do metal e promove a formação de uma célula de aeração diferencial.
- **velocidade:** regime laminar e turbulento - quanto maior a turbulência, mais fina será a camada laminar. O oxigênio desprende-se rapidamente da mistura turbulenta onde o oxigênio alcança a superfície metálica.;
- **metais diferentes:** em uma solução condutora pode causar uma diferença de potencial gerando uma célula galvânica ativa;
- **metalurgia:** os metais têm descontinuidades superficiais, arranhões, trincas, etc. que aumentam o potencial de perda de elétrons e a formação de íons metálicos. Essa área torna-se anódica em relação ao resto do metal.

Inibidores de corrosão

São classificados como anódicos, catódicos ou mistos. A molécula do inibidor é absorvida sobre a superfície metálica, pelo processo quimissorção, formando uma película protetora fina. A escolha do inibidor adequada é determinada pelos parâmetros do projeto dos sistemas trocador de calor e de geração de vapor e pela composição da água – pH, sais, conteúdo de oxigênio dissolvido, matérias suspensas - utilizada na alimentação destes. A seguir são apresentados alguns inibidores utilizados em tratamento de água sistemas de geração de vapor e trocadores de calor.

- **polifosfatos:** inibidor catódico que forma uma película polarizante durável na superfície;
- **cromatos:** é o inibidor individual anódico mais eficiente disponível;
- **zinco:** inibidor catódico em forma de sais usados em sistemas de refrigeração;
- **nitritos:** passivantes metálicos;
- **silicatos:** usados para evitar corrosão em sistemas de água potável. Hidrolizam-se em água para formar partículas coloidais carregados negativamente;
- **benzatos:** formam uma película anódica;
- **cal:** empregado para o ajuste da alcalinidade;
- **taninos e ligninas:** evitam a despolarização catódica pelo oxigênio dissolvido;
- **nitratos:** usados para proteger a solda e alumínio;
- **quelantes de superfície:** forma uma película monomolecular ao longo da superfície metálica;
- **fosfonatos:** compostos orgânicos que complexa os íons metálicos por seqüestro;
- **molibdatos:** é um inibidor anódico que forma uma película complexa e passivante no ânodo de ferro constituído de óxidos de ferro;
- **ortofosfatos:** são inibidores anódicos raramente usados sozinhos devido ao perigo da formação de lodos de cálcio;
- **azóis aromáticos:** específico para cobre e ligas;
- **óleos solúveis:** são inibidores anódicos que oferecem boa proteção para o alumínio e aço;

- **fosfato de trietanolamina:** usado principalmente em sistemas fechados, com ou sem anticoagulantes glicólicos - aço e cobre;
- **cromogluconatos:** são usados em sistemas de refrigeração em temperaturas elevadas (80 a 90° C); outros.

4. GERADORES DE VAPOR

Os principais objetivos de um tratamento de água de gerador de vapor são:

- impedir a formação de depósitos;
- reduzir a corrosão de metais;
- impedir o arraste da água do gerador de vapor.

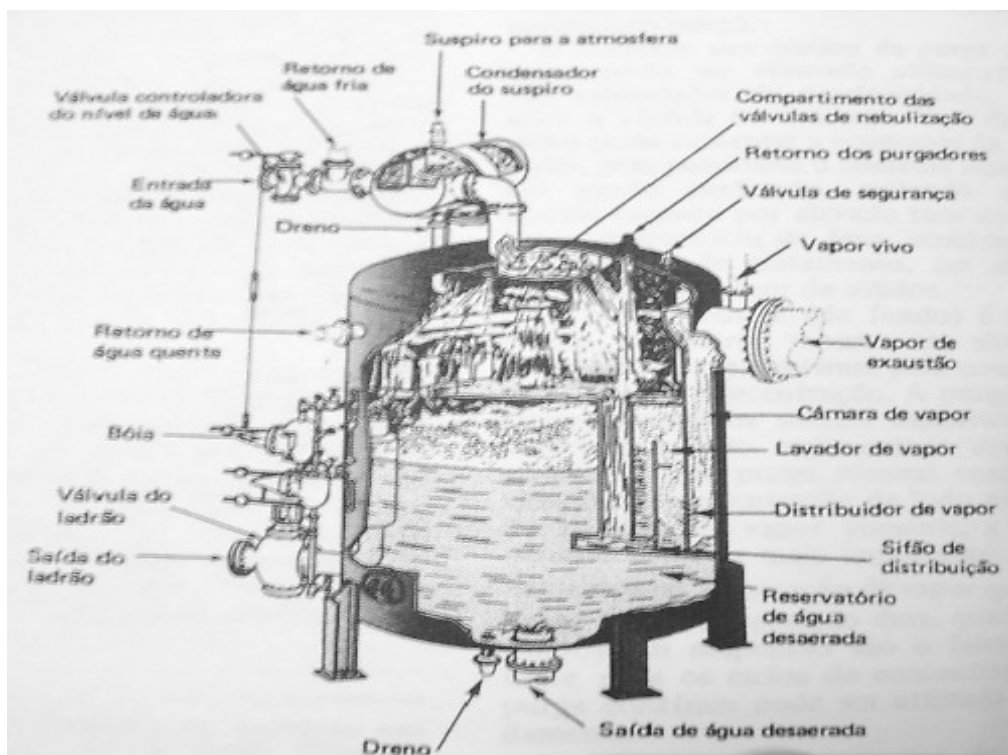


Figura 4.0: Des aerador do tipo nebulizador usado em sistemas de geração de vapor

5. REFERÊNCIAS

Amorim, Roberto da Silva, 2005, “Abastecimento de água de uma refinaria de petróleo: caso Replan”.

Collares, Stonesmogene, 2004 “Avaliação de uso de recursos hídricos em refinaria de petróleo: Estudo de caso na Petrobrás”.

Schor, André Rotstein, 2006 “Riscos e alternativas para o abastecimento de água em uma refinaria de petróleo: Estudo de caso refinaria Duque de Caxias Reduc”.

Rice, James K., 1979 “Princípios de Tratamento de água Industrial”.



ENGENHEIRO DE SUPRIMENTOS
DISCIPLINA DE FABRICAÇÃO E MONTAGEM DE CALDEIRAS E
TROCADORES DE CALOR
AGOSTO/SETEMBRO DE 2008
Escola Politécnica – Depto. Enga. Mecânica

TIPOS DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E APLICAÇÃO EM CALDEIRAS

Fabiana Monteiro Cuppari, fabiana@cuppari.com.br¹

Michelle Mike Nose, michellenose@yahoo.com²

¹Empresa Brasileira de Aeronáutica S/A

²Empresa Brasileira de Aeronáutica S/A

Resumo: *Este artigo tem por objetivo apresentar cinco tipos de ensaios não destrutivos: Radiografia Industrial, Testes Hidrostáticos, Ensaio com correntes parasitas, Líquido Penetrante e Ultra-som e ainda descrever o funcionamento de cada uma delas e suas principais características.*

Palavras-chave: *Ensaio não destrutivo, Caldeiras, NR-13*

1. INTRODUÇÃO

Para atendimento de requisitos de norma e visando melhor eficiência e confiabilidade de suas caldeiras, as empresas utilizam de várias formas de inspeções e ensaios não-destrutivos de forma a verificar a integridade da estrutura de seus equipamentos.

Considerando o ponto de vista econômico e de segurança, tem-se que, segundo a norma NR-13 (13.5.1) toda caldeira deve ser submetida a inspeção inicial, periódica e extraordinária, sendo considerado condição de risco grave e iminente o não atendimento aos prazos estabelecidos.

No caso das inspeções iniciais, elas devem ocorrer assim que a caldeira é construída, antes da entrada em funcionamento, no local de operação, devendo compreender exames internos e externos, teste hidrostático e de acumulação (NR-13, 13.5.2).

Com relação as inspeções periódicas, elas devem acontecer segundo a NR-13 (13.5.3), que cita os seguintes períodos:

- a) 12 meses para caldeiras das categorias A, B e C;
- b) 12 meses para caldeiras de recuperação de álcalis de qualquer categoria;
- c) 24 meses para caldeiras da categoria A, desde que aos 12 meses sejam testadas as pressões de abertura das válvulas de segurança;
- d) 40 meses para caldeiras especiais (caldeiras que operam de forma contínua e que utilizam gases ou resíduos das unidades de processo, como combustível principal para aproveitamento de calor ou para fins de controle ambiental).

A escolha destes ensaios e inspeções de manutenção possui vários fatores, como o mecanismo de deterioração atuante no equipamento, dimensões da parte do equipamento que se deseja inspecionar, tipo de descontinuidade mais provável atribuída ao mecanismo de deterioração, características superficiais do local a ser inspecionado e as propriedades metalúrgicas do material.

A Tabela (1) abaixo mostra uma breve classificação dos ensaios de acordo com os fatores acima citados:

Tabela 1: Fatores de escolha do ensaio mais apropriado (Fonte:
<http://inspecaoequipamentos.wordpress.com/category/ensaios-nao-destrutivos/>)

Mecanismo de deterioração	Tipo de descontinuidade	Locais mais prováveis	Ensaio mais indicado
Fadiga	Microtrincas superficiais	Pontos de concentração de tensões (ex. soldas, ZTA de solda, canto reto de bocais, solda de suportes, etc.).	Partículas Magnéticas ou Líquidos Penetrantes.
Fluência	Trincas superficiais e deformações	Regiões de altas temperaturas com carregamento de tensões	Partículas Magnéticas ou Líquidos Penetrantes, Dimensional e Medição de Espessura.
Choque Térmico	Trincas superficiais e deformações	Locais sujeitos a grandes variações de temperaturas	Partículas Magnéticas ou Líquidos Penetrantes.
Corrosão Sob Tensão	Trincas superficiais	Pontos de concentração de tensões e meio propício (geralmente locais com altas concentrações de cloretos)	Medição de Espessura ou Radiografia / Gamagrafia.
Corrosão	Perda de material	Frestas, sob depósitos, regiões com tensões diferenciais, bocais de pequenos diâmetros, locais com deficiência na proteção superficial.	Partículas Magnéticas ou Líquidos Penetrantes e Medição de espessura.
Deterioração pelo Hidrogênio	Trincas superficiais e internas	Chapas com segregações, tensões diferenciais e dupla laminação.	Medição de espessura ou Radiografia / Gamagrafia.
Erosão	Perda de material	Regiões de mudança de fluxo, região com turbulência, bocais de pequeno diâmetro, e equipamentos que trabalhem com fluidos abrasivos.	Partículas magnéticas ou Líquidos Penetrantes, Ultrassom, Matalografia e Dureza.
Alterações Metalúrgicas	Trincas superficiais e internas e alterações micro estruturais	Pontos de concentração de tensão e ou regiões quentes	Partículas Magnéticas ou Líquidos Penetrantes, Ultrassom, Réplica metalográfica e Dureza.
Sobre Pressão	Trincas superficiais e internas	Pontos de concentração de tensões	Partículas Magnéticas ou Líquidos Penetrantes e Ultrassom.

Em resumo, nenhum ensaio não destrutivo deve ser considerado o mais sensível ou o mais completo sem uma análise global dos fatores que podem influenciar na decisão, pois as limitações e as vantagens fazem com que aplicação de cada ensaio seja objeto de análise e estudo da viabilidade de sua utilização, em conjunto com os Códigos e Normas de fabricação.

2. ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS - TIPOS

2.1. Radiografia Industrial

“A radiografia industrial é usada para detectar variação de uma região de um determinado material que apresenta uma diferença em espessura ou densidade comparada com uma região vizinha, em outras palavras, a radiografia é um método capaz de detectar com boas sensibilidade defeitos volumétricos. Isto quer dizer que a capacidade do processo de detectar defeitos com pequenas espessuras em planos perpendiculares ao feixe, como trinca dependerá da técnica de ensaio realizado. Defeitos volumétricos como vazios e inclusões que apresentam uma espessura variável em todas as direções, serão facilmente detectadas desde que não sejam muito pequenos em relação à espessura da peça.” (Andreucci, 2008, p.7)

As Figuras (1) e (2), abaixo, mostram de maneira geral como funciona o Ensaio Radiográfico na indústria:

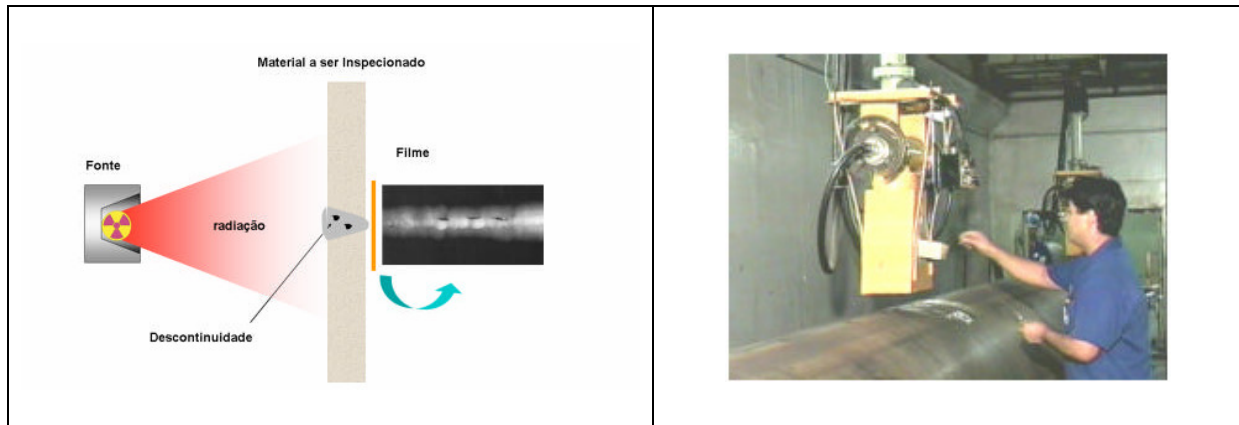


Figura 1. Técnica Geral de Ensaio Radiográfico na Indústria e Inspeção Radiográfica de Soldas em Tubos (Andreucci, 2008)



Figura 2. Fotos de um acelerador linear LINAC – Mitsubishi usado para uma radiografia industrial de peças com espessura de 20 a 300 mm de aço. (Andreucci, 2008)

A radiografia industrial é utilizada para se verificar descontinuidades nos equipamentos decorrentes de vários fatores, como o processo de fabricação, montagem ou durante o uso do mesmo. Segue abaixo uma breve lista das principais descontinuidades encontradas por este tipo de inspeção:

- Poros decorrentes de uma má regulagem do arco de solda;
- Inclusão de escória;
- Inclusão de escória em linha;
- Falta de penetração do material da solda;
- Trincas causadas por diversos fatores, como por exemplo acúmulo de tensões produzidas no processo de soldagem;
- Falta de fusão entre o metal depositado e o metal base no processo de soldagem.

A vantagem neste método de inspeção é a análise detalhada de possibilidades de descontinuidades mesmo em locais de difícil acesso visual do inspetor. Por outro lado, sua utilização fica limitada pela localização do equipamento, alto custo do sistema de radiação e a necessidade de se ter mão-de-obra especializada para realizar e interpretar os testes.

2.2. Teste Hidrostático

Testes hidrostáticos (TH's) ou testes de pressão são aplicados em caldeiras, vasos de pressão e outros equipamentos industriais pressurizados como tanques ou tubulações, com o objetivo de aferir se haverá ocorrência de vazamentos ou se haverá ruptura. São realizados com os equipamentos fora de serviço, através de sua pressurização com água (teste hidrostático), ar comprimido (teste pneumático) ou outro fluido disponível, em pressões superiores às pressões operacionais ou de projeto, normalmente na ordem de 1,5 vezes a PMTA (Pressão Máxima de Trabalho Admissível). Simula-se então uma condição operacional mais rigorosa, objetivando a garantia de que em serviço normal (a pressões mais baixas) não ocorrerão falhas ou vazamentos. (PEREIRA, 2004)

No Brasil, a utilização dos testes hidrostáticos é prevista pela NR-13 a não ser que seja comprovada a possibilidade de se haver propagação de defeitos (descontinuidades) com a realização do ensaio. Dessa forma, cabe a empresa responsável propor outras formas de inspeção de maneira a garantir a integridade do seu equipamento.

Existem três momentos em que o teste hidrostático é previsto: um na fabricação do equipamento, no reparo e em inspeção periódica. Nos dois primeiros casos, a finalidade básica é a garantia de ausência de vazamentos e da integridade (resistência) global do conjunto. Entretanto, efeitos indesejáveis podem resultar do teste inicial, como por

exemplo uma fratura frágil. No caso da inspeção periódica, a finalidade básica é a aferição da estanqueidade e a garantia da integridade, partindo do princípio de que se for realizada uma prova de carga, com aumento das solicitações mecânicas, haverá uma garantia de continuidade operacional durante um determinado tempo.

Se por um lado tem-se como requisito o emprego deste tipo de teste, por outro a sua utilização pode acarretar danos irreversíveis na estrutura do equipamento (que na sua maioria já encontravam-se presentes), as vantagens e desvantagens de se usar o teste hidrostático podem ser considerados abaixo, de acordo com Pereira (2004):

- a) Vantagens:
 - Importante ferramenta para confirmar a ausência de vazamentos;
 - Confirmação do estado de integridade e capacidade de resistir às condições operacionais normais, no momento de sua realização;
 - Alívio de tensões residuais de soldagem de modo que a estrutura testada funcione mais “relaxada”.
- b) Desvantagens:
 - Possibilidade de crescimento crítico de descontinuidade e destruição do equipamento, seja na fabricação ou após ter sido colocado em serviço;
 - Possibilidade de crescimento subcrítico de descontinuidades pela sujeição de regiões danificadas por mecanismos de danos a solicitações mecânicas muito superiores às operacionais normais, e com isso a redução das margens de segurança do equipamento, sem que isto seja percebido.
 - Elevada relação custo/benefício da sua aplicação, pois o TH apenas informa se houve vazamento ou não, não sendo uma ferramenta de inspeção.

2.3. Correntes Parasitas

O Ensaio por Correntes Parasitas baseia-se fundamentalmente na Lei de Indução de Faraday, onde o campo magnético, gerado por uma bobina quando alimentada por uma corrente elétrica alternada, induz, na peça a ser ensaiada, correntes elétricas, também denominadas correntes parasitas. Estas correntes elétricas, por sua vez, afetam a impedância da bobina que as gerou. Assim, quaisquer variações no fluxo das correntes parasitas geradas na peça ensaiada implicarão em variações da impedância da bobina. Este fato leva a uma das maiores aplicações deste método de ensaio que é o de detectar a presença de possíveis descontinuidades existentes nessa peça, que venham a interferir no fluxo das correntes parasitas, através das variações ocorridas na impedância da bobina de ensaio.(COMPOENDE)

O método de ensaio por correntes parasitas pode ser utilizado para todas as aplicações em que possa ser correlacionado com as variações geométricas, elétricas ou magnéticas. Fazendo-se a devida adaptação a cada necessidade, sobretudo quanto ao tipo e tamanho de sonda, o ensaio pode ser realizado para:

- Detectar falta de homogeneidade no material tais como trincas, deformações, inclusões, variações de espessura, corrosão, etc.;
- Medir espessura ou variação de espessura de camada não condutora aplicada em material condutor ou camada condutora aplicada em material de condutividade diferente;
- Detectar variações associadas à condutividade do material, falta de homogeneidade em ligas, superaquecimento local, erros de tratamento térmico, etc.;
- Detectar variações associadas à permeabilidade magnética através de medição das intensidades dos campos magnéticos.

Além de uma vasta área de aplicações, o ensaio por correntes parasitas ainda oferece uma série de vantagens tais como: alta sensibilidade, alta confiabilidade, rapidez de execução, facilidades para automação, não exige contato direto entre a sonda e a superfície inspecionada, limpeza, etc.

As técnicas em que se desdobra este método de ensaio, dependem do material a ser ensaiado. Se o ensaio a ser efetuado é manual ou automático e, sobretudo, do tipo e da localização das descontinuidades que se deseja detectar.

Desta maneira, temos as seguintes técnicas de ensaio:

- Técnica de Magnetização DC, para inspeção principalmente de tubos, barras ou arames de material ferromagnético;
- Técnica de Campo Remoto, para inspeção de tubos, barras ou arames de material ferromagnético e não ferromagnéticos;
- Técnica de Multifrequência com Mistura de Sinais, destinada a detectar e avaliar descontinuidades localizadas próximas ou sob placas suportes ou chicanas;
- Inspeção por controle remoto, em geradores de vapor de centrais nucleares;
- Inspeção com a utilização de sondas rotativas e/ou do tipo “pancake” para detectar e avaliar descontinuidades em tubos, soldados em espelhos de caldeiras e trocadores de calor., conforme Fig.(4).
- Inspeção com a utilização de sonda rotativa para detectar descontinuidades em furos sede de arrebites e parafusos, na área aeronáutica.



Figura 3. Fotos de uma inspeção de caldeira utilizando uma sonda.

As limitações deste ensaio seguem abaixo:

- Somente materiais eletricamente condutores podem ser inspecionados;
- a profundidade de penetração das correntes parasitas pode ser reduzida a fração de milímetro, em materiais de condutividade maior, como é o caso do cobre, ligas de alumínio, etc.;
- materiais ferromagnéticos apresentam maior dificuldade na detecção e avaliação de discontinuidades devido à variação de permeabilidade magnética.

Outra limitação diz respeito ao profundo conhecimento que o operador deve possuir sobre este método de ensaio, assim como a necessidade de padrões conhecidos para calibração do aparelho.

2.4. Líquido Penetrante

O ensaio por líquido penetrante foi desenvolvido com o objetivo de detectar discontinuidades superficiais em materiais no caso em que estas sejam abertas na superfície. Dentre estas discontinuidades, podem se destacar as trincas, poros, dobras, etc. Esse tipo de ensaio pode também ser aplicado em todos os materiais sólidos que não sejam porosos ou com superfície muito grosseira. Sua utilização é bem abrangente, variando desde os materiais não magnéticos como alumínio, magnésio, aços inoxidáveis austeníticos, ligas de titânio e zircônio, até os materiais magnéticos; além da cerâmica vitrificada, vidro e plásticos.

Este ensaio consiste na penetração de um líquido na abertura da discontinuidade. Após a limpeza do excesso de líquido aplicado à superfície, através de um revelador, a imagem da discontinuidade fica desenhada sobre a superfície. As seguintes etapas, exemplificadas pela Fig. (4) descrevem o método: limpeza da superfície, aplicação do líquido penetrante, remoção do excesso do penetrante, aplicação do revelador, avaliação e inspeção e limpeza após o ensaio.



Figura 4. Etapas do método de ensaio por líquido penetrante (ANDREUCCI, 2008).

Na etapa de preparação da superfície, deverá ser observado se a mesma está isenta de resíduos, sujeiras, óleo, graxa ou qualquer outro contaminante que possa obstruir as aberturas a serem detectadas. Para as superfícies excessivamente rugosas há a necessidade de uma preparação prévia mais eficaz, pois as irregularidades superficiais prejudicam aplicação do penetrante de forma adequada, remoção do excesso e, conseqüentemente o resultado final. Para o ensaio ter um melhor resultado, devem ser consideradas superfícies nem muito rugosas nem porosas.

A limpeza da superfície na qual o penetrante será aplicado é fundamental já que o sucesso do método depende dos defeitos estarem abertos à superfície (necessidade da penetração na discontinuidade). Isso implica em não haver material estranho nesta. Ou seja, toda forma de corrosão, escória, pinturas, óleo, graxa, etc. deve ser removida.

No que diz respeito ao penetrante, deve ser observada a faixa de temperatura adequada de acordo com o fabricante dos produtos. Superfícies muito frias (abaixo de 5°C) ou muito quentes (acima de 52°C) não são recomendáveis ao ensaio. O penetrante pode ser aplicado em *spray*, por pincelamento, rolo de pintura ou mergulhando-se as peças em tanques (neste último caso, aplicável à peças pequenas). O processo de aplicação do penetrante deve ser escolhido de forma condizente às dimensões das peças e ao meio ambiente em que será aplicado o ensaio.

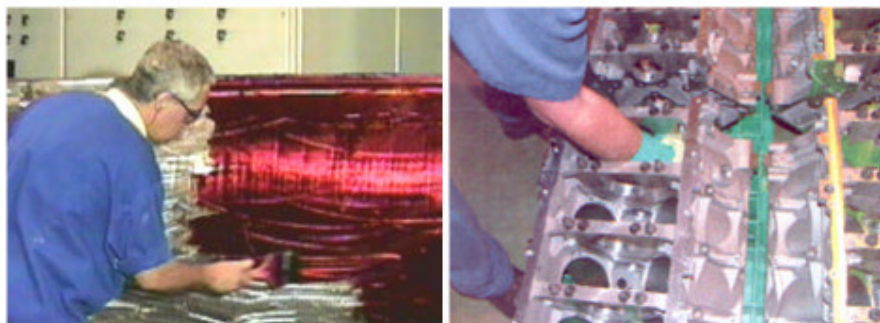


Figura 5. Exemplos de aplicação líquido penetrante colorido à esquerda e fluorescente à direita

O tempo de penetração pode variar em função do tipo de material a ser ensaiado, forma, tipo de descontinuidade, tipo do penetrante, temperatura além de necessitar estar de acordo com a norma de inspeção aplicável ao produto a ser ensaiado. Abaixo, conforme exemplificado na Tab. (2), encontram-se as recomendações da ASME e ASTM.

Tabela 2. Tempos mínimos de penetração e revelação recomendados pela ASME Sec. V Art. 6 - Tabela 672 e ASTM E-165

Material	Forma	Tipo de Descontinuidade	Tempo de Espera ^A min.	
			Penetrante	Revelador
Alumínio, Magnésio, aço, bronze, titânio, altas ligas	Fundidos e Soldas	porosidade, trincas, (todas as formas) falta de fusão, gota fria	5	10
Plásticos	todas as formas	trincas	5	10
Vidros	todas as formas	trincas	5	10
Cerâmicas	todas as formas	trincas, porosidade	5	10

A - Para temperaturas de 10 a 52 °C. Para temperaturas de 5 a 10 °C, o tempo de penetração mínimo deverá ser o dobro do tempo indicado na tabela acima.

Após aplicação do penetrante, deve-se remover seu excesso de forma a deixar a superfície completamente livre de penetrante evitando mascaramento dos resultados. Essa é a fonte mais comum de indicações falsas, gerando resultados não confiáveis, ou até mesmo impossibilitando qualquer avaliação. Geralmente uma limpeza grosseira com pano e papel levemente embebido em solvente seguido da limpeza com pano ou papel seco ou com pouco de solvente é satisfatória.

Para a etapa de revelação, deve se considerar uma camada fina e uniforme do revelador. Esta pode ser aplicada com spray, no caso de inspeção manual. A norma ASTM-165 permite a aplicação do revelador através de várias formas, por outro lado a norma Petrobras N-1596 não admite o uso de escovas, pincéis e similares para a aplicação do revelador.

A Tabela (2) mostra que assim como para a penetração, o tempo de revelação também é variável de acordo com o tipo da peça, tipo de defeito a ser detectado e temperatura ambiente. As descontinuidades finas e rasas, demoram mais tempo para serem observadas. Já as maiores mancham o revelador rapidamente.

Como todos os exames de inspeção dependem de avaliação visual do operador, o grau de iluminação utilizada é extremamente importante para a confiabilidade dos resultados.



Figura 6. Exemplo de resultado de ensaio por líquido penetrante de uma peça fundida

Após finalizada a inspeção é necessária a limpeza final na peça, já que os resíduos de teste podem prejudicar o desempenho das peças. Uma limpeza final com solvente geralmente é satisfatória. Para peças pequenas a imersão das peças em banho de detergente solventes, ou agentes químicos geralmente é suficiente.

Como pode se perceber, o ensaio por líquido penetrante trata-se de um ensaio de simples realização e interpretação dos resultados. Esse método pode revelar descontinuidades (trincas) extremamente finas (da ordem de 0,001 mm de abertura). Sua grande vantagem é a possibilidade de aplicação às mais variadas formas, tamanhos e tipos de material dos itens a serem ensaiados.

Para os casos de caldeiras, os principais defeitos detectados pelo ensaio de líquido penetrante podem ser: trincas ou micro trincas de solidificação (rechupes), trincas superficiais, porosidade, inclusão de areia, bolhas de gás ou falta de penetração do material de solda.

2.5. Ultra-som

O princípio de funcionamento desse ensaio é o mesmo princípio identificado na reflexão de uma onda sonora ao incidir num anteparo qualquer. A vibração ou onda ultra-sônica ao percorrer um meio elástico refletirá da mesma forma ao incidir numa descontinuidade ou falha interna ao meio considerado. Por meio de aparelhos especiais, o ensaio por ultra-som possibilita a detecção de reflexões provenientes do interior da peça examinada, localizando e interpretando suas descontinuidades. Abaixo, conforme apresentado na Fig. (7), está esquematizado esse princípio.

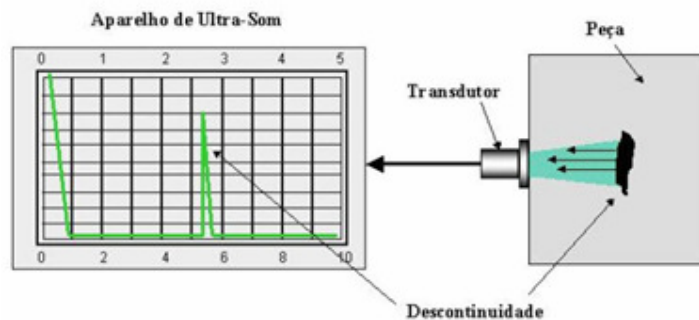


Figura 7. Princípio básico da inspeção de materiais por ultra-som

Esse tipo de ensaio possibilita a detecção de defeitos ou descontinuidades internas, presentes nos mais variados tipos ou forma de materiais. Por esse motivo tornou-se uma ferramenta indispensável na inspeção de caldeiras por conseguir garantir a qualidade de peças de grandes espessuras, geometrias complexas de juntas soldadas e chapas.

Dentre as vantagens identificadas por este ensaio, podem ser destacadas: sua alta sensibilidade na detecção de pequenas descontinuidades internas como trincas ou fissuras devido a tratamento térmico (difíceis de serem detectadas por ensaios de radiação penetrante), agilidade na inspeção e obtenção dos resultados por dispensar processos intermediários, não requer planos especiais de segurança ou quaisquer outros acessórios para sua aplicação e ainda, a localização, avaliação do tamanho e interpretação das descontinuidades encontradas são fatores intrínsecos ao exame ultra-sônico, enquanto que outros tipos de ensaios não definem todos esses fatores.

Apesar de apresentar grandes vantagens em relação a outros tipos de ensaios, existem também algumas desvantagens a serem consideradas: necessidade de grande conhecimento técnico e prática do inspetor (o que implica em custos na qualificação desse profissional), faixas de espessuras muito finas dificultam sua aplicação, o registro permanente do método não é facilmente obtido e há a necessidade de preparo da superfície .



Figura 8. Inspeção por ultra-som da chapa de um tubo

No caso desse ensaio aplicado às peças fundidas, como seriam os casos das caldeiras, uma das normas mais utilizadas é a ASTM E-609. Essa norma foi elaborada para ensaio por ultra-som em aços fundidos em carbono, baixa liga e martensíticos com tratamento térmico usando transdutores normais.

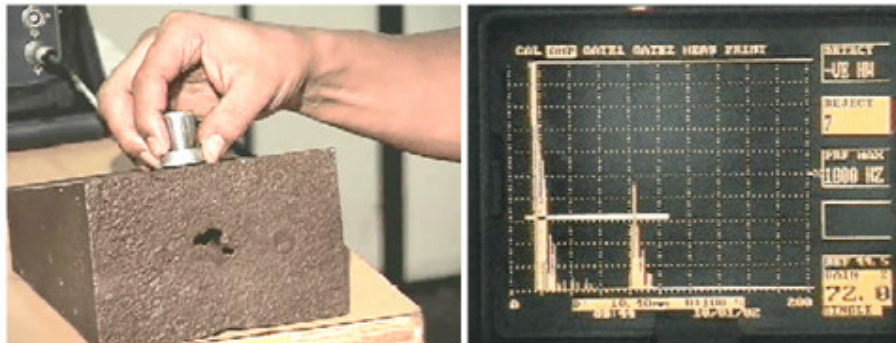


Figura 9. Inspeção de uma peça fundida contendo um defeito interno.

Quando da detecção de uma descontinuidade, sua avaliação deve ser feita de acordo com o procedimento escrito, norma aplicável, especificação do cliente ou outro documento de qualidade aplicável. Em geral, as descontinuidades são julgadas pelo seu comprimento e amplitude do eco de reflexão as quais são quantidades mensuráveis pelo inspetor de ultra-som. Entretanto, algumas normas estabelecem que o tipo da descontinuidade encontrada também deve ser avaliada e decisiva na aceitação ou rejeição da junta soldada.

3. REFERÊNCIAS

Andreucci, Ricardo., 2008, “A Radiologia Industrial”. Disponível em: <http://www.abende.org.br/biblioteca_apostila.php?w=1280&h=768>. Acesso em 08 de setembro de 2008.

Andreucci, Ricardo., 2008, “Líquidos Penetrantes”. Disponível em: <http://www.abende.org.br/biblioteca_apostila.php?w=1280&h=768>. Acesso em 08 de setembro de 2008

Andreucci, Ricardo., 2008, “Ensaio por Ultra-Som”. Disponível em: <http://www.abende.org.br/biblioteca_apostila.php?w=1280&h=768>. Acesso em 08 de setembro de 2008

COMPOENDE, 2008. “Correntes Parasitas”. Disponível em: < www.compoende.com.br/correntes.doc> Acesso em 08 de setembro de 2008.

Norma Regulamentadora. NR-13: Caldeiras e Vasos de Pressão (113.000-5). Disponível em: < www.mte.gov.br/legislacao/normas_regulamentadoras/nr_13.pdf> Acesso em 09 de setembro de 2008.

Pereira Filho, Jorge dos Santos., 2004, “Análise de Efeitos de Teste Hidrostático em Vaso de Pressão”. Disponível em: < www.tede.ufsc.br/teses/PEMC0839.pdf> . Acesso em 08 de setembro de 2008.

4. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso e autorizam o uso do seu conteúdo pela coordenação do curso e ministrante da disciplina.



ENGENHEIRO DE SUPRIMENTOS
DISCIPLINA DE FABRICAÇÃO E MONTAGEM DE CALDEIRAS E
TROCADORES DE CALOR
AGOSTO/SETEMBRO DE 2008
Escola Politécnica – Depto. Enga. Mecânica

NORMAS TÉCNICAS DE TROCADORES DE CALOR

Alexandre Pinheiro Balthasar da Silveira, alexandre.silveira@utc.com.br

Mauro Simantob Rosenberg, maurosroemberg@estadao.com.br

¹Prominp – CM – Engenheiro de Suprimento

Resumo: *O objetivo deste trabalho é a apresentação dos tipos de normas técnicas relacionadas aos trocadores de calor, com ênfase nas normas utilizadas na indústria do petróleo e das instituições que originaram tais normas.*

Palavras-chave: *norma técnica, permutador, trocador de calor, equipamento mecânico.*

1. INTRODUÇÃO

A especificação de um equipamento mecânico envolve muitas atividades e todas elas precisam ser devidamente normatizadas, além disto, existem diversas instituições que geram normas técnicas diferentes para uma mesma finalidade. Conseqüentemente, existem muitas normas referentes à completa especificação de um equipamento mecânico. No caso dos trocadores de calor, esta situação é ampliada pelo fato de que o trocador de calor ser enquadrado também como vaso de pressão, herdando as normas referentes a este tipo de equipamento.

Neste trabalho daremos maior destaque às entidades e normas referentes à indústria de Petróleo, e dentre as normas as específicas de trocadores de calor (normas de projeto e/ou fabricação). E dentre os tipos de trocadores de calor destacamos os trocadores de casco-tubo, por ser o tipo predominante na indústria de Petróleo.

Visamos com este trabalho servir de referência para a consulta das normas pertinentes aos trocadores de calor, comentando sobre as instituições geradoras de normas, apresentando as principais normas, seguindo as prioridades mencionadas acima.

2. NORMAS DE TROCADORES DE CALOR

2.1. Instituições Emissoras de Normas Técnicas

Há diversas instituições geradoras de normas, destacamos abaixo algumas delas, com ênfase maior nas instituições ligadas à indústria de petróleo nacional.

2.1.1. Petrobras

Fundada em 1953 a Petrobras detém o monopólio da exploração e produção de Petróleo e derivados no Brasil. É detentora de um enorme parque industrial que está em crescimento, razão da recém-atingida auto-suficiência nacional na produção de petróleo.

Por ser uma instituição pioneira na preocupação com a área da qualidade no Brasil, tem preocupação com a normatização dos equipamentos utilizados em seu parque industrial. Para tanto, além das normas internacionais, utiliza-se de sistema próprio de normas, conciliando a experiência internacional com as necessidades locais e específicas da indústria de Petróleo.

Como é uma empresa voltada à produção de Petróleo, o interesse de suas normas é disciplinar e regulamentar os equipamentos adquiridos para uso em seu parque industrial.

Conforme apêndice I “*Relação de Normas da Petrobras*”, a Petrobras tem como política a não comercialização de normas, as quais, conseqüentemente ficam praticamente indisponíveis, exceto para a própria empresa e seus fornecedores qualificados, salvo raras exceções como a norma N-2033, publicada pela Petrobras em seu site “<http://www2.petrobras.com.br/CanalFornecedor/portugues/pdf/2033.pdf>”, a qual referencia, por exemplo, a norma de projeto de trocadores de calor N-466.

Devido à restrição gerada pela política da Petrobras em relação às suas normas, deixaremos de apresentá-las detalhadamente neste trabalho, excetuando os dados publicados como, por exemplo, a relação de normas técnicas da Petrobras, relação esta publicada pela própria Petrobras em seu site “http://www2.petrobras.com.br/CanalFornecedor/portugues/pdf/catalogo_julho08.pdf”.

Há normas técnicas da Petrobras para relativas a trocadores de calor quanto normas diversas que não são específicas para estes equipamentos, mas são aplicadas a atividades executadas nos mesmos, como ensaios não destrutivos, documentação técnica, processos construtivos (soldagem, etc...) e pintura.

2.1.2. ABNT

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) é uma sociedade privada sem fins lucrativos, criada em 1940. É a principal instituição geradora de normas do Brasil, sendo fundadora e/ou única e exclusiva representante de importantes organismos internacionais normativos como ISO (International Organization for Standardization), IEC (International Electrotechnical Commission); e das entidades de normalização regional COPANT (Comissão Panamericana de Normas Técnicas) e a AMN (Associação Mercosul de Normalização).

De forma análoga à Petrobras, a ABNT também dispõe de normas específicas para trocadores de calor e de normas relacionadas a diversas atividades ligadas a tais equipamentos.

2.1.3. TEMA

A Tubular Exchanger Manufacturers Association, Inc. (TEMA) é uma associação dos fabricantes de trocadores de calor do tipo casco-tubo, fundada há mais de 60 anos nos estados Unidos. Pioneira na pesquisa e desenvolvimento de trocadores de calor caso-tubo, a TEMA, comercializa uma norma específica que leva o nome da instituição (TEMA) e programa de computador para cálculo deste equipamento.

A TEMA é uma instituição muito importante, pois congrega os fabricantes do tipo mais importante de trocador de calor na indústria de Petróleo (casco-tubo) do país mais de maior economia (Estados Unidos). É a principal codificação deste tipo de equipamentos e serve de referência para diversas normas no Brasil.

2.1.4. ASME

A American Society of Mechanical Engineers (ASME), fundada em 1880, é uma associação americana de engenheiros mecânicos, é responsável pela publicação de diversas normas, particularmente para vasos de pressão. Por sua importância e utilização na especificação deste tipo de equipamento e pelo fato do trocador de calor sob certo aspecto ser também um vaso de pressão (complementado pelos feixes tubulares de troca de calor, por exemplo), a norma ASME seção VIII é bastante utilizada também em trocadores de calor.

2.1.5. API

A American Petroleum Institute (API), criada em 1911, ou seja, durante a primeira guerra mundial, é uma associação americana que engloba todos os aspectos da indústria do petróleo. Tem a missão de desenvolver a indústria de petróleo americana (inicialmente para suprir as necessidades da guerra). Ela é emissora de diversas normas muito utilizadas na indústria de petróleo para diversas finalidades, como normas de testes, normas de cálculos técnicos diversos, normas materiais e normas de equipamentos como as de trocadores de calor.

2.1.6. ASTM

A American Society for Testing and Materials (ASTM), hoje conhecida como ASTM international, foi criada em 1898, impulsionada pela necessidade de normatização gerada pela revolução industrial, particularmente para melhorar a qualidade da indústria ferroviária americana, cuja confiabilidade na época era menor do que a indústria inglesa. A ASTM é uma norma muito utilizada na especificação de materiais, particularmente no caso dos trocadores de calor casco-tubo, a especificação de chapas para o casco e tubos para os feixes.

2.1.7. ANSI

O American National Standards Institute (ANSI), criada em 1918 com nome de American Engineering Standards Committee (AESC), teve como objetivo a união de esforços das instituições normativas americanas privadas como American Institute of Electrical Engineers (hoje IEEE), American Society of Mechanical Engineers (ASME), American Society of Civil Engineers (ASCE), American Institute of Mining and Metallurgical Engineers (AIMME), American Society for Testing Materials (ASTM), junto com instituições públicas americanas como os departamentos americanos de guerra, marinha e comércio. Sua maior preocupação é a organização das normas, evitando duplicidade, confusões e contradições. Não tem norma específica para trocador de calor (é ligado, por exemplo, à ASME, que tem normas de equipamentos), mas compõem as normas dimensionais de acessórios de tubulação utilizados nos bocais dos trocadores de calor por exemplo.

2.1.8. Ministério do Trabalho e Emprego (do Brasil)

Embora não seja uma instituição técnica, o ministério do trabalho criou uma série de normas técnicas, visando à operação segura de equipamentos potencialmente perigosos como caldeiras e vasos de pressão, são as normas regulamentares (NR).

2.2. Normas Técnicas de Trocadores de Calor

2.2.1. Normas Petrobrás

As normas Petrobrás têm restrição de divulgação (conforme apêndice I). Principais normas relativas a trocadores de calor são:

2.2.2. N-466 - Projeto de Trocador de Calor Casco e Tubo.

Objetivos e conteúdos não divulgáveis.

2.2.3. N-1492 Permutador de calor – Folha de dados

Objetivos e conteúdos não divulgáveis

2.2.4. N-1557 Permutador de calor – Requisição de material

Objetivos e conteúdos não divulgáveis

2.2.5. N-1734 Projeto de Trocador de Calor para Água Salgada.

Objetivos e conteúdos não divulgáveis

2.2.6. N-2159 Acessório de Trocador de Calor

Objetivos e conteúdos não divulgáveis

2.2.7. N-2511 Inspeção em Serviço de Trocador de Calor

Objetivos e conteúdos não divulgáveis

2.3. Normas ABNT

As normas da ABNT podem ser obtidas pelo site da ABNT (<http://www.abntnet.com.br/>).

2.3.1. NBR10252 Tubos de aço-liga ferríticos e austeníticos, sem costura, para caldeiras, superaquecedores e permutadores de calor.

Objetivos: Fixa condições exigíveis para encomenda, fabricação e fornecimento de tubos de aço-liga ferríticos e austeníticos, sem costura, de espessura de parede mínima, para caldeiras, superaquecedores e permutadores de calor

2.3.2. NBR10796 Trocador de calor para uso naval.

Objetivos: Fixa condições e requisitos exigíveis para aceitação e/ou recebimento de trocadores de calor para uso naval.

2.3.3. NBR10797 Trocador de calor para uso naval.

Objetivos: Prescreve método de ensaio de trocadores de calor para uso naval.

2.3.4. NBR11696 Trocadores de calor.

Objetivos: Classifica, quanto à utilização e a forma construtiva, os trocadores de calor utilizados nas indústrias de petróleo, petroquímica, química, farmacêutica, alimentícia, de geração de energia e naval.

2.3.5. NBR12555 Trocadores de calor.

Objetivos: Define termos e parâmetros empregados em trocadores de calor dos tipos: casco e tubo, duplo tubo, placas e resfriador a ar.

2.3.6. NBR15193 Ensaios não destrutivos - Correntes parasitas em tubos não ferromagnéticos instalados em trocadores de calor.

Objetivos: Estabelece os requisitos mínimos para a execução do método de ensaio por correntes parasitas e os requisitos de equipamentos, quando aplicáveis aos tubos não ferromagnéticos instalados em trocadores de calor, empregados em sistemas de geração de vapor.

2.3.7. NBR15246 Ensaios não destrutivos - Ensaio por campo remoto em tubos ferromagnéticos instalados em trocadores de calor.

Objetivos: Estabelece os requisitos mínimos a serem seguidos durante o ensaio por campo remoto em tubos ferromagnéticos instalados em trocadores de calor empregados em instalações industriais. Destina-se ao uso em tubos ferromagnéticos com diâmetro externo de 12 mm a 51 mm, com espessura de parede entre 0,7 mm e 3,4 mm.

2.3.8. NBR5029 Tubo de cobre e suas ligas, sem costura, para condensadores, evaporadores e trocadores de calor

Objetivos: Fixa condições exigíveis que devem satisfazer os tubos sem costura de cobre e suas ligas, para condensadores, evaporadores e trocadores de calor.

2.3.9. NBR5583 Tubo de aço de baixo carbono, sem costura, trefilado a frio, para permutadores de calor

Objetivos: Fixa condições exigíveis a tubos de aço de baixo carbono, sem costura, trefilados a frio para permutadores de calor e aparelhos similares de transferência de calor.

2.3.10. NBR5584 Tubo de aço-cromo-molibdênio e cromo-molibdênio-silício, sem costura, trefilado a frio, para permutadores de calor.

Objetivos: Fixa condições exigíveis para encomenda, fabricação e fornecimento de tubos de aço-cromo-molibdênio e cromo-molibdênio-silício, sem costura trefilados a frio, para permutadores de calor e aparelhos semelhantes de transferência de calor, cujo diâmetro externo seja igual ou maior que 3,2 mm e menor ou igual a 76,2 mm.

2.4. Norma TEMA

Pode ser obtida pelo site da TEMA (<http://orders.tema.org/order/order.asp/>). Por ser o mais importante código de trocadores de calor tipo casco-tubo, que por sua vez é o mais importante tipo utilizado na indústria do petróleo, destacamos no apêndice II o conteúdo desta norma, publicado pela própria TEMA em seu site.

2.4.1. TEMA 9ª edição

Objetivos: Norma completa para fabricação de trocadores de calor casco-tubo. Codificação principal dos trocadores de calor da indústria do petróleo.

2.5. Normas ASME

Pode ser obtidas pelo site (<http://catalog.asme.org/home.cfm?CATEGORY=CS&TaxonomyItemID=2968>) da ASME

2.5.1. ASME seção VIII

Objetivos: Requisitos aplicáveis ao projeto, fabricação, inspeção e certificação de vasos de pressão.

2.6. Norma API

Podem ser obtidas pelo site da API (<http://global.ihc.com/?RID=API1>)

2.6.1. API STD 660

Objetivos: Especificação de requisitos e recomendações para projeto mecânico, seleção de material, fabricação, inspeção, teste e preparação para embarque de trocadores de calor casco-tubo para as indústria de petróleo e petroquímica.

2.6.2. API STD 661

Objetivos: Requisitos e recomendações para projeto, material, fabricação, inspeção, teste e preparação para embarque de trocadores de calor a ar (air-cooler).

2.6.3. API STD 662

Objetivos: norma de trocadores de calor de placa.

2.7. Norma ASTM

Existem diversas normas da ASTM com objetivo de especificar os materiais para uso em trocadores de calor, as quais podem ser obtidas pelo site da ASTM (<http://www.astm.org/STORE/standardsearch.shtml>). Normas associadas a trocadores de calor:

- A178/A178M-02(2007) Standard Specification for Electric-Resistance-Welded Carbon Steel and Carbon-Manganese Steel Boiler and Superheater Tubes
- A213/A213M-08 Standard Specification for Seamless Ferritic and Austenitic Alloy-Steel Boiler, Superheater, and Heat-Exchanger Tubes
- A214/A214M-96(2005) Standard Specification for Electric-Resistance-Welded Carbon Steel Heat-Exchanger and Condenser Tubes
- A249/A249M-08 Standard Specification for Welded Austenitic Steel Boiler, Superheater, Heat-Exchanger, and Condenser Tubes
- A498-06 Standard Specification for Seamless and Welded Carbon Steel Heat-Exchanger Tubes with Integral Fins
- A1012-02(2007) Standard Specification for Seamless and Welded Ferritic, Austenitic and Duplex Alloy Steel Condenser and Heat Exchanger Tubes With Integral Fins
- A1020/A1020M-02(2007) Standard Specification for Steel Tubes, Carbon and Carbon Manganese, Fusion Welded, for Boiler, Superheater, Heat Exchanger and Condenser Applications
- B163-08 Standard Specification for Seamless Nickel and Nickel Alloy Condenser and Heat-Exchanger Tubes
- B171/B171M-04e1 Standard Specification for Copper-Alloy Plate and Sheet for Pressure Vessels, Condensers, and Heat Exchangers
- B234-04 Standard Specification for Aluminum and Aluminum-Alloy Drawn Seamless Tubes for Condensers and Heat Exchangers
- B234M-04 Standard Specification for Aluminum and Aluminum-Alloy Drawn Seamless Tubes for Condensers and Heat Exchangers [Metric]
- B338-08a Standard Specification for Seamless and Welded Titanium and Titanium Alloy Tubes for Condensers and Heat Exchangers
- B359/B359M-02(2006) Standard Specification for Copper and Copper-Alloy Seamless Condenser and Heat Exchanger Tubes With Integral Fins
- B395/B395M-08 Standard Specification for U-Bend Seamless Copper and Copper Alloy Heat Exchanger and Condenser Tubes
- B543-07e1 Standard Specification for Welded Copper and Copper-Alloy Heat Exchanger Tube
- B569-04 Standard Specification for Brass Strip in Narrow Widths and Light Gage for Heat-Exchanger Tubing
- B891-98(2004) Standard Specification for Seamless and Welded Titanium and Titanium Alloy Condenser and Heat Exchanger Tubes With Integral Fins
- B903-00(2005) Standard Specification for Seamless Copper Heat Exchanger Tubes With Internal Enhancement
- B919-01(2006) Standard Specification for Welded Copper Heat Exchanger Tubes With Internal Enhancement
- B924-02(2006) Standard Specification for Seamless and Welded Nickel Alloy Condenser and Heat Exchanger Tubes With Integral Fins

- B944-06 Standard Specification for Copper-Beryllium Welded Heat Exchanger and Condenser Tube (UNS No. C17510)
- B956-07e1 Standard Specification for Welded Copper and Copper-Alloy Condenser and Heat Exchanger Tubes with Integral Fins
- E690-98(2004)e1 Standard Practice for In Situ Electromagnetic (Eddy-Current) Examination of Nonmagnetic Heat Exchanger Tubes
- E2096-05 Standard Practice for In Situ Examination of Ferromagnetic Heat-Exchanger Tubes Using Remote Field Testing

2.8. Norma do ministério do trabalho

As normas regulamentares do ministério do trabalho têm força de lei e por isto são fornecidas gratuitamente, ou melhor, publicadas em diversos meios. Estas normas podem ser obtidas no site do Ministério do Trabalho e Emprego do Brasil http://www.mte.gov.br/legislacao/normas_regulamentadoras/default.asp.

2.8.1. NR-13

Objetivos: Assegurar aos trabalhadores menores riscos de acidentes relacionados às caldeiras e vasos de pressão (inclusive trocadores de calor).

3. REFERÊNCIAS

Site da Petrobras http://www2.petrobras.com.br/portugues/ads/ads_Petrobras.html, acessado em 01 de setembro de 2008.

Site da Petrobrás <http://www2.petrobras.com.br/CanalFornecedor/portugues/pdf/2033.pdf>, acessado em 09 de setembro de 2008

Site do Prominp http://www.prominp.com.br/objects/files/2007-05/1706_Relat%C3%B3rio%20Final%20ABAST-18.pdf, acessado em 09 de setembro de 2008.

Site da Petrobras http://www2.petrobras.com.br/CanalFornecedor/portugues/pdf/catalogo_julho08.pdf, acessado em 09 de setembro de 2008.

Site da ABNT <http://www.abnt.org.br/default.asp?resolucao=1280X1024>, acessado em 01 de setembro de 2008.

Site da ABNT <http://www.abntnet.com.br/fidetail.aspx?FonteID=40021>, acessado em 01 de setembro de 2008.

Site da ABNT <http://www.abntnet.com.br/fidetail.aspx?FonteID=33146>, acessado em 01 de setembro de 2008.

Site da ABNT <http://www.abntnet.com.br/fidetail.aspx?FonteID=5945>, acessado em 01 de setembro de 2008.

Site da ABNT <http://www.abntnet.com.br/fidetail.aspx?FonteID=5498>, acessado em 01 de setembro de 2008.

Site da ABNT <http://www.abntnet.com.br/fidetail.aspx?FonteID=13475>, acessado em 01 de setembro de 2008.

Site da ABNT <http://www.abntnet.com.br/fidetail.aspx?FonteID=28597>, acessado em 01 de setembro de 2008.

Site da ABNT <http://www.abntnet.com.br/fidetail.aspx?FonteID=22366>, acessado em 01 de setembro de 2008.

Site da ABNT <http://www.abntnet.com.br/fidetail.aspx?FonteID=13534>, acessado em 01 de setembro de 2008.

Site da ABNT <http://www.abntnet.com.br/fidetail.aspx?FonteID=32255>, acessado em 01 de setembro de 2008.

Site da ABNT <http://www.abntnet.com.br/fidetail.aspx?FonteID=31548>, acessado em 01 de setembro de 2008.

Site da TEMA <http://www.tema.org/>, acessado em 09 de setembro de 2008.

Site da TEMA <http://www.tema.org/TEMA9thEditionTableOfContents.pdf>, acessado em 09 de setembro de 2008.

Site da ASME <http://www.asme.org/>, acessado em 08 de setembro de 2008.

Site da API <http://www.api.org/aboutapi/history/index.cfm>, acessado em 08 de setembro de 2008.

Sites da API acessado em 10 de setembro de 2008, endereço:

http://global.ihs.com/doc_detail.cfm?currency_code=USD&customer_id=21254E2A500A&shopping_cart_id=28245833244A40484F5A4D58250A&rid=API1&country_code=US&lang_code=ENGL&item_s_key=00010665&item_key_date=920431&input_doc_number=&input_doc_title=exchanger, acessado em 08 de setembro de 2008.

http://global.ihs.com/doc_detail.cfm?currency_code=USD&customer_id=21254E2A500A&shopping_cart_id=28245833244A40484F5A4D58250A&rid=API1&country_code=US&lang_code=ENGL&item_s_key=00010666&item_key_date=931031&input_doc_number=&input_doc_title=exchanger

http://global.ihs.com/doc_detail.cfm?currency_code=USD&customer_id=21254E2A500A&shopping_cart_id=28245833244A40484F5A4D58250A&rid=API1&country_code=US&lang_code=ENGL&item_s_key=00363044&item_key_date=040031&input_doc_number=&input_doc_title=exchanger

Site da ASTM <http://www.astm.org/HISTORY/index.html>, acessado em 10 de setembro de 2008.

Site da ASTM <http://www.astm.org/DATABASE.CART/A.htm>, acessado em 10 de setembro de 2008.

Site da ASTM <http://www.astm.org/DATABASE.CART/B.htm>, acessado em 10 de setembro de 2008.

Site da ANSI http://www.ansi.org/about_ansi/introduction/history.aspx?menuid=1, acessado em 10 de setembro de 2008.

Site http://www.mte.gov.br/legislacao/normas_regulamentadoras/default.asp do Ministério do Trabalho e Emprego do Brasil.

4. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso e autorizam o uso do seu conteúdo pela coordenação do curso e ministrante da disciplina.

Apêndice I - Normas Técnicas Petrobras (NTPs) - Orientações para adquirir Normas Técnicas Petrobrás

1. A PETROBRAS não comercializa suas NTPs;
2. As NTPs são de propriedade exclusiva da PETROBRAS e, portanto, sujeitas às leis de direito que regem o assunto;
3. As NTPs são para uso interno da PETROBRAS, por pessoal próprio capacitado para essa utilização ou por pessoal por ela treinado para tal;
4. A utilização das NTPs cedidas pela PETROBRAS a um fornecedor de bens ou serviços é supervisionada por pessoal próprio da Companhia capacitado, por pessoal por ela treinado ou por pessoal que tenha reconhecida capacitação para usá-las;
5. Em caso de empresa constante de "vendor-list" da PETROBRAS, a unidade de contato (Materiais, Engenharia, unidade operacional etc.) decide se deve ou não fornecer a norma ou se só fornece quando houver contrato, considerando se o fornecimento é freqüente ou não, dentre outros;
6. A PETROBRAS pode ceder suas NTPs a entidade ou empresa não constante de "vendor-list", em circunstâncias especiais, a critério de cada unidade da Companhia, não envolvendo sua cessão qualquer responsabilidade quanto ao seu uso;
7. O pedido de cessão de NTPs a uma unidade da PETROBRAS deve ser formalizado pelo titular da entidade ou empresa receptora que as vai utilizar ou guardar;
8. A entidade ou empresa receptora de NTPs cedidas pela PETROBRAS só pode disponibilizá-las para outro em casos perfeitamente justificáveis, com autorização prévia da unidade da Companhia cedente, estando o novo receptor sujeito às mesmas regras aqui estabelecidas;
9. A PETROBRAS revisa suas NTPs sem prévio aviso;
10. A PETROBRAS não se compromete a manter um receptor de NTPs atualizado por novas emissões, a menos que tal obrigação conste de documento assinado por uma unidade da Companhia, ficando a atualização nos demais casos a critério da unidade da PETROBRAS cedente;
11. Qualquer cópia de uma NTP deve mostrar claramente que se trata de uma NTP copiada;
12. A modificação de qualquer item de uma NTP descaracteriza o documento como uma NTP.

Apêndice II – Conteúdo da norma TEMA Nona edição;

MEMBERSHIP LIST	
TECHNICAL COMMITTEE	
PREFACE	
NOTES TO USERS	
1 N NOMENCLATURE	
1 Size Numbering and Type Designation—Recommended Practice	
2 Nomenclature of Heat Exchanger Components	
2 F FABRICATION TOLERANCES	
1 External Dimensions, Nozzle and Support Locations	
2 Recommended Fabrication Tolerances	
3 Tubesheets, Partitions, Covers, and Flanges	
4 Flange Face Imperfections	
3 G GENERAL FABRICATION AND PERFORMANCE INFORMATION	
1 Shop Operation	
2 Inspection	
3 Nameplates	
4 Drawings and ASME Code Data Reports	
5 Guarantees	
6 Preparation of Heat Exchangers for Shipment	
7 General Construction Features of TEMA Standard Heat Exchangers	
4 E INSTALLATION, OPERATION, AND MAINTENANCE	
1 Performance of Heat Exchangers	
2 Installation of Heat Exchangers	
3 Operation of Heat Exchangers	
4 Maintenance of Heat Exchangers	
5 RCB MECHANICAL STANDARD TEMA CLASS RCB HEAT EXCHANGERS	
1 Scope and General Requirements	
2 Tubes	
3 Shells and Shell Covers	
4 Baffles and Support Plates	
5 Floating End Construction	
6 Gaskets	
7 Tubesheets	
8 Flexible Shell Elements	
9 Channels, Covers, and Bonnets	
10 Nozzles	
11 End Flanges and Bolting	
6 V FLOW INDUCED VIBRATION	
1 Scope and General	
2 Vibration Damage Patterns	
3 Failure Regions	
4 Dimensionless Numbers	
5 Natural Frequency	
6 Axial Tube Stress	
7 Effective Tube Mass	
8 Damping	
v ii	
CONTENTS	
Symbol &	
Section Paragraph	
6 V FLOW INDUCED VIBRATION (continued)	
9 Shell Side Velocity Distribution	
10 Estimate of Critical Flow Velocity	
11 Vibration Amplitude	
12 Acoustic Vibration	
13 Design Considerations	
14 Selected References	
7 T THERMAL RELATIONS	
1 Scope and Basic Relations	
2 Fouling	

3	Fluid Temperature Relations
4	Mean Metal Temperatures of Shell and Tubes
8	P PHYSICAL PROPERTIES OF FLUIDS
1	Fluid Density
2	Specific Heat
3	Heat Content
4	Thermal Conductivity
5	Viscosity
6	Critical Properties
7	Properties of Gas and Vapor Mixtures
8	Selected References
9	D GENERAL INFORMATION
	(See detailed Table of Contents)
10	RGP RECOMMENDED GOOD PRACTICE
	G-7.11 Horizontal Vessel Supports
	G-7.12 Vertical Vessel Supports
	G-7.2 Lifting Lugs
	G-7.3 Wind and Seismic Design
	RCB-2 Plugging Tubes in Tube Bundles
	RCB-4 Entrance and Exit Areas
	RCB-7 Tubesheets
	RCB-10 Nozzles
	RCB-11 End Flanges and Bolting
	RCB-12 Finite Element Analysis Guidelines
	T-2 Fouling
	Appendix A – Tubesheets
	INDEX



ENGENHEIRO DE SUPRIMENTOS
DISCIPLINA DE FABRICAÇÃO E MONTAGEM DE CALDEIRAS E
TROCADORES DE CALOR
AGOSTO/SETEMBRO DE 2008
Escola Politécnica – Depto. Enga. Mecânica

ECONOMIZADORES E SUPERAQUECEDORES DE CALDEIRAS.

Cláudio Chiarantano, chiarantano@uol.com.br
Fernanda de Fátima Santana, eng_fernanda05@yahoo.com.br

USP – Escola Politécnica – Departamento de Engenharia Mecânica, jrsimoes@usp.br

Resumo: Nos últimos anos a indústria petroquímica vem com grande força impulsionando a economia brasileira. Desta forma a demanda por mão de obra e profissionais qualificados, tem aumentado significativamente. Diante disso o Governo Federal em parceria com as indústrias e órgãos do setor de petróleo e gás, visam um grande projeto de qualificação profissional chamado de PROMINP que visa capacitar, gratuitamente, milhares de profissionais em diversas categorias consideradas críticas para o setor. O trabalho visa informar detalhadamente sobre a aplicação e funcionamento de economizadores e superaquecedores de caldeiras, para que um futuro engenheiro de suprimentos possa analisar adequadamente os fabricantes e fornecedores deste tipo de suprimento importantíssimo no processo petroquímico.

Palavra-chave: economizadores, superaquecedores, caldeira.

1. INTRODUÇÃO

As caldeiras ou geradores de vapor, são equipamentos destinados a transformar água em vapor.

O vapor é a água no estado gasoso. Esta mudança de estado é proporcionada pelo efeito direto do calor e inverso da pressão. Quanto maior for a pressão, mais elevada será a temperatura de vaporização da água e mais energia o vapor transportará pelas moléculas de água que o constitui. Ao se condensar, a mesma energia que as moléculas absorveram para passar para fase vapor é liberada para o meio, resultando aí na transferência de energia na forma de calor.

Existem basicamente dois tipos de vapor:

Vapor saturado: É um vapor “úmido”, contendo pequenas gotículas de água, sendo obtido da vaporização direta da mesma. Quando este tipo de vapor se condensa, cede calor latente. É usado para aquecimento direto ou indireto.

Vapor superaquecido: É obtido através do aquecimento conveniente do vapor saturado, resultando em um vapor seco. É usado para transferência de energia cinética, ou seja, para geração de trabalho mecânico (turbinas).

A energia necessária à operação, isto é, o fornecimento de calor sensível à água até alcançar a temperatura de ebulição, mais o calor latente a fim de vaporizar a água e mais o calor de superaquecimento para transformá-la em vapor superaquecido, é dada pela queima de um combustível.

A procura para obter maiores economias nas usinas geradoras de vapor foi no sentido de aperfeiçoar os ciclos regenerativos, e não de obter elevadas temperaturas de vapor.

Alguns processos na tecnologia metalúrgica tornaram aceitáveis, pouco depois, temperaturas de 370°C e até 480°C. Esta foi a época quando o reaquecimento foi introduzido como um outro meio de aumentar a eficiência total. Isto significa, que o vapor de descarga da turbina de alta pressão retorna à caldeira, onde é reaquecido até perto da temperatura inicial de superaquecimento antes de entrar na turbina de baixa pressão, com uma entalpia substancialmente maior.

Fonte: Martinelli Júnior (1998)

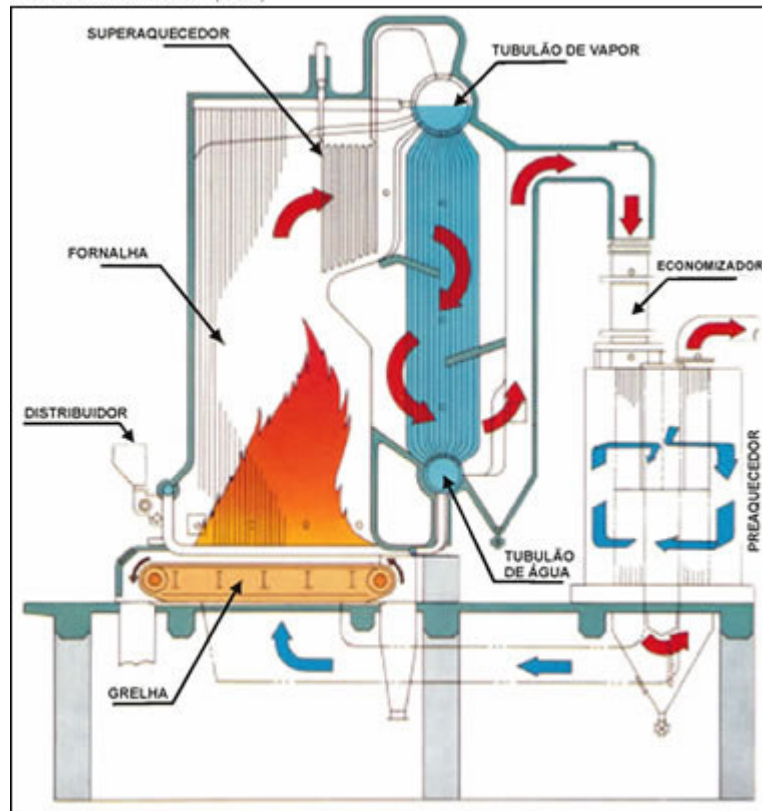


Figura 2 - Caldeira Flamotubular Escocesa

Figura 1. Caldeira Flamotubular Escocesa com Superaquecedor e Economizador.

2. SUPERAQUECIMENTO E REAQUECIMENTO

Superaquecedores e reaquecedores são superfícies de absorção de calor que tem como finalidade aumentar a temperatura do vapor acima do seu ponto de saturação. Existem vários motivos para fazê-lo. Primeiro por constituir um evidente ganho termodinâmico na eficiência. A segunda vantagem é que o superaquecimento seca o vapor necessário para um processo industrial ou para ser admitido em uma turbina nessa condição, eliminando a possibilidade de um elevado teor de umidade nos últimos estágios, e consequente erosão das palhetas.

O ganho total na taxa de rendimento de uma usina geradora atribuída à prática de superaquecimento do vapor, varia com a pressão, podendo no entanto ser considerado de 3% para cada 37% de superaquecimento.

2.1 Superaquecedores

São superfícies de troca de calor usualmente constituídas de circuitos de tubos paralelos, recebem vapor do coletor elevando a sua temperatura.

Como outra definição temos feixes tubulares determinados a elevar a temperatura do vapor proveniente do tambor da caldeira e são localizados de modo a melhor aproveitar o calor disponível nos gases de combustão (temperaturas mais altas => mais próximas da câmara de combustão).

O calor absorvido da fornalha por radiação ou proveniente da combustão dos gases, evapora primeiro a umidade transportada pelo vapor e posteriormente o superaquece até um nível determinado.

Os superaquecedores possuem vários circuitos de tubos dispostos em paralelo, com um ou mais curvas duplas, conectadas entre coletores.

Os tubos curvados podem ser de raio pequeno ou grande, executados a partir de tubos retos, ou forjados e soldados às extremidades dos tubos. As extremidades dos tubos são laminadas ou soldadas aos coletores ou terminando em uma junta removível.

Os tubos deverão possuir elevada resistência às altas temperaturas, à deformação e à oxidação. Aços-liga especiais adaptam-se a estas exigências.

Os aço-carbono encontram-se limitados de operar até 510°C devido à oxidação causada pela elevada temperatura do vapor. Podem ser usadas até 650°C algumas ligas de cromomolibdeno.

Os superaquecedores são classificados nos tipos: por convecção, radiação ou combinado.

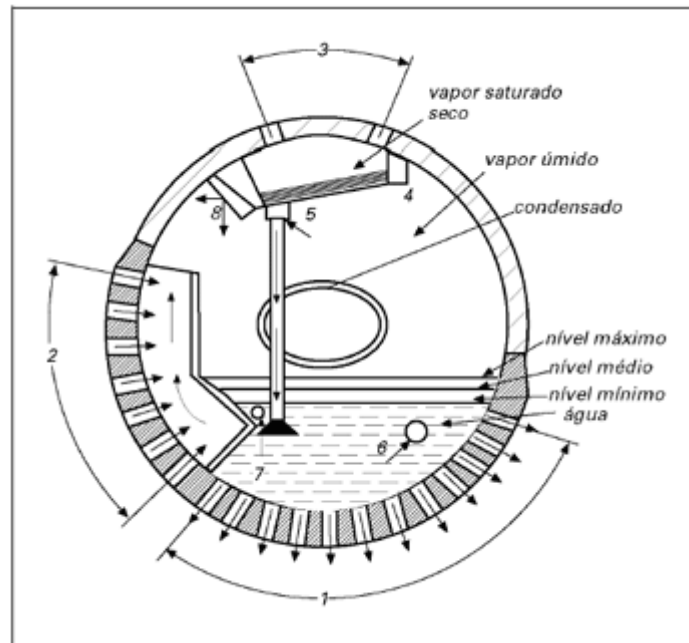


Figura 2. Área do tubo do superaquecedor.

2.1.1 Superaquecedores por Convecção

Os superaquecedores, bem como os reaquecedores podem ser do tipo horizontal ou suspenso. Nestes a temperatura do vapor eleva-se quando a carga aumenta devido a que o fluxo de gases no lado da superfície que fica em contato com o fogo aumenta mais rapidamente que o fluxo de vapor no interior dos tubos.

Superaquecedores e reaquecedores drenáveis são necessários na secção de convecção devido a probabilidade de condensação.

Válvulas operadas por piloto são usadas nos superaquecedores suspensos para liberar umidade e partículas após parada da unidade.

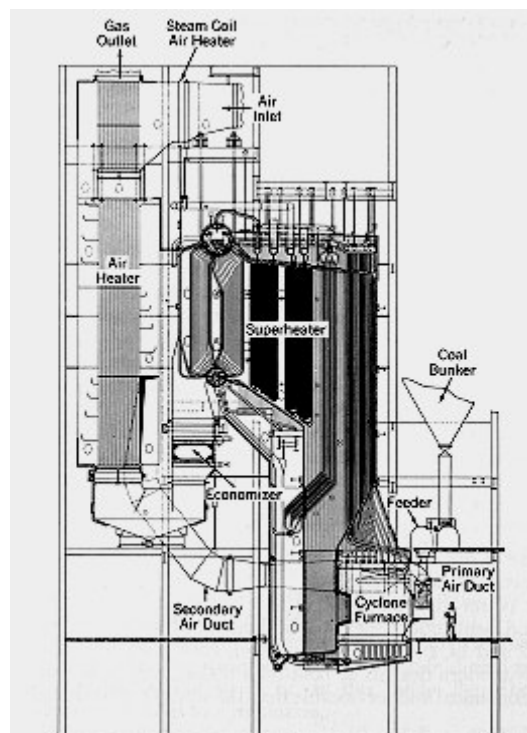


Figura 3. Superaquecedor Convectivo.

2.1.2 Superaquecedores por Radiação

Localizado na fornalha e recebendo calor por radiação direta, sua temperatura de vapor diminuirá quando a carga aumenta, devido a elevada taxa de absorção de calor das paredes da fornalha.

O calor disponível para o superaquecedor não aumenta na mesma proporção que o fluxo da massa de vapor no interior dos tubos, diminuindo consequentemente a temperatura do vapor.

Para manter temperaturas razoavelmente uniformes à medida que a carga modifica, os superaquecedores ou reauecedores são divididos em secções denominadas: primária, secundária e as vezes terminais, no caso de grandes geradores, algumas secções estão dispostas na fornalha e outras mais afastadas na zona de convecção.

A montagem de superaquecedores externamente à caldeira realiza-se quando não é praticamente possível incorporá-los ao gerador, como no caso de um vapor gerado em um trocador de calor ou evaporador, em um processo de recuperação química de calor ou em um reator nuclear. Os superaquecedores externos poderão incluir uma secção de reauecimento.

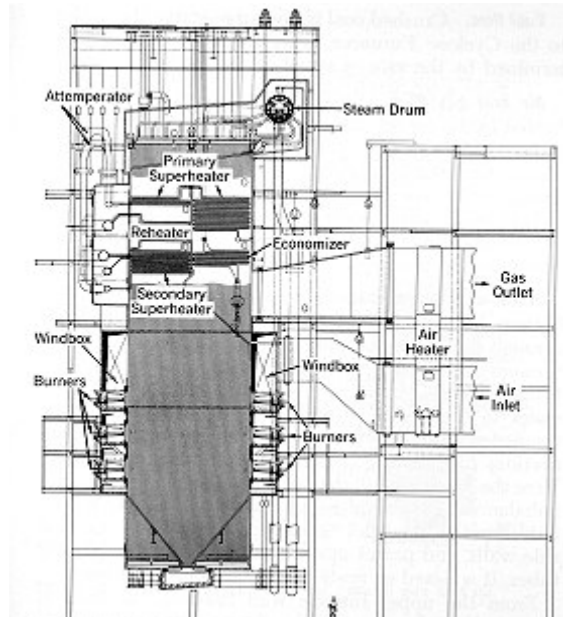


Figura 4. Superaquecedor Radiante.

3. LOCALIZAÇÃO DE SUPERAQUECEDORES

Os superaquecedores podem também ser classificados conforme seu posicionamento, podendo ser localizados como já dito, na zona de convecção da caldeira, expostos a elevada temperatura da área de radiação ou dividido entre ambas.

A seguir algumas disposições adotadas nos projetos de caldeiras a vapor.

A disposição dos tubos do superaquecedor, ocupando toda a área de secção de passagem dos gases, assegura uma absorção uniforme e combinada do calor trocado por convecção e por radiação, produzindo vapor com mínimas variações de temperatura, através de uma larga faixa de operação da caldeira.

Os coletores de vapor de diâmetro relativamente grande, localizados em uma região sem contato com os gases quentes, asseguram uma distribuição perfeita e uniforme do vapor nos tubos do superaquecedor, mantendo assim um fluxo constante.

Os pontos de superaquecimento são eliminados, mantendo-se, portanto, a temperatura do metal abaixo do limite máximo permissível do material, e resultando no aumento da durabilidade dos tubos.

Além disso, a troca de calor combinado por radiação e convecção, produz vapor com mínimas variações de temperatura, através de uma larga faixa de operação de caldeira.

4. CONTROLE DA TEMPERATURA DE SUPERAQUECIMENTO

A correta regulação da temperatura do vapor superaquecido é fundamental para a operação eficiente de uma instalação térmica. A temperatura do vapor está sujeita a flutuações como resultado de determinadas condições de operação, tais como mudanças no excesso de ar, na temperatura da água de alimentação, no tipo de combustível, bem como do estado de limpeza das superfícies de troca de calor.

O excesso de ar afeta indiferentemente os superaquecedores de convecção ou radiação.

No primeiro, um aumento no excesso de ar elevará a temperatura do superaquecedor devido a ser maior o fluxo de gases sobre a superfície de troca de calor.

Nos superaquecedores por radiação e nos reaquecedores, um aumento no excesso de ar reduz simplesmente a temperatura do vapor, porque a temperatura da fornalha também é reduzida.

Esta variação no excesso de ar às vezes é usada para obter o controle da temperatura do vapor, não sendo recomendável este artifício porque o rendimento unitário é adversamente afetado pela elevada quantidade de ar.

Oxigênio dissolvido corrói o aço, sendo que essa taxa é proporcional à temperatura. O material corroído é carregado pela tubulação e pode danificar os superaquecedores e turbinas.

A temperatura da água de alimentação pode ser aumentada para obter a diminuição da temperatura do vapor. Dado que é necessário menos combustível devido a elevada entalpia da água de alimentação, o peso e temperatura do gás diminui e o superaquecedor recebe menos calor e vice-versa.

4.1 Métodos de Controle da Temperatura de Superaquecimento

Um controle eficiente da temperatura do vapor evita não somente esforços excessivos nos tubos do superaquecedor, como colabora no aumento da eficiência total do ciclo térmico.

O uso das superfícies dos superaquecedores, seja por radiação ou convecção mantém a temperatura praticamente constante.

Isto pode ser feito situando o superaquecedor no primeiro bloco de tubos da caldeira ou colocando uma parte do superaquecedor na parede da fornalha e outra parte na área de convecção.

Vários são os métodos usados para o controle preciso da temperatura do vapor, atuando alguns sobre a zona de fogo da caldeira e outros sobre a parte de vapor. Os artifícios usados são:

1. Derivação dos gases da fornalha

Mediante a seleção de um superaquecedor por convecção para se obter uma temperatura estabelecida com 70% da carga torna possível manter constante a temperatura sob cargas elevadas permitindo que parte do gás seja derivado através de uma passagem paralela.

2. Inclinação dos queimadores na fornalha

Com a inclinação dos queimadores no sentido do piso da fornalha, parte do calor será absorvido pelas paredes de água, motivo que determinará um relativo resfriamento dos gases que entram no superaquecedor. Se a inclinação for realizada no sentido vertical o calor absorvido pelas paredes de água será menor, maior será a temperatura dos gases e consequentemente produzir-se-á uma elevação do superaquecimento. Os queimadores podem sofrer inclinações de 30° acima e abaixo da horizontal.

3. Emprego de queimadores auxiliares

Trocando a posição dos queimadores, colocando-as em locais mais elevado que os do bloco principal e funcionando alternadamente, poderá ser controlada a temperatura do superaquecedor, obtendo-se praticamente o mesmo efeito que com o método de inclinação já descrito.

4. Esfriamento por aspersão

A temperatura do vapor pode também ser controlada mediante injeção de jatos de água, seja antes do superaquecedor ou entre as secções deste.

5. Controle da precondensação

Este método usa um trocador-condensador, resfriado por água de alimentação, através de uma derivação colocada na linha que fornece água no economizador.

6. Recirculação dos gases da combustão

A recirculação forçada dos gases da combustão desde a saída do economizador até a base da fornalha atua na mesma forma que o excesso de ar.

Isto reduz o calor transmitido às paredes de água, aumentando o calor absorvido pelo superaquecedor.

O ponto onde os gases da combustão são insuflados na fornalha determina seu efeito sobre esta e a temperatura de saída dos gases, e como resultado final sobre a temperatura do vapor.

7. Fornalhas separadas

Variando a taxa de fogo entre as fornalhas controla-se a temperatura de superaquecimento. Todos estes controles podem ser combinados conforme as necessidades.

5. ECONOMIZADOR E AQUECEDOR DE AR

Quando os gases da combustão deixam a secção de absorção de calor da caldeira, estes contém ainda uma considerável quantidade de energia calorífica. Uma parte substancial desse calor pode ser recuperado pelo uso de economizadores e aquecedores de ar.

O economizador tem a função de aquecer a água de alimentação da caldeira. Para cada 3° a 4°C de aumento da temperatura da água de alimentação a eficiência de um gerador de vapor aumenta em cerca de 1%. No aquecedor de ar, a última parcela de calor dos gases da combustão é transferida para o ar que penetra na caldeira para promover a combustão. Para combustíveis comuns, (carvão, óleo, gás), considerando condições idênticas na fornalha, a

eficiência de um gerador de vapor aumenta cerca de 2,5% para cada 37°C de queda de temperatura dos gases saindo da chaminé.

Do ponto de vista do ar, isto significa um ganho de 2% para cada 37°C de aumento da temperatura deste.

5.1 Economizadores

Os gases da combustão que deixam a superfície de convecção da caldeira possuem uma considerável energia calorífica, com uma temperatura maior que a do vapor saturado. Parte desta energia pode ser recuperada por um economizador.

Os gases passando sobre a superfície dos tubos de um economizador aquecem a água de alimentação da caldeira que flui pelo interior dos tubos, antes desta entrar no coletor da caldeira.

A justificativa de uso de um economizador depende do ganho total na eficiência. Isto necessariamente depende das temperaturas dos gases na saída da caldeira e da temperatura da água de alimentação. A água de alimentação deve entrar no economizador a uma temperatura suficiente para não provocar condensação e corrosão ácida na face do tubo em contato com o gás.

O método mais antigo usado para recuperar calor dos gases da combustão, consistia na passagem de gases através de um trocador de ferro fundido para preaquecer a água de alimentação. Os economizadores de ferro fundido são usados ainda atualmente quando a temperatura dos gases da combustão é baixa podendo eventualmente existir condensação ácida.

Nos projetos atuais são normalmente usados tubos de aço que tem menor espessura, menor espaçamento, maior superfície de aquecimento por metro cúbico, menor peso e maior economia. Devido às relativamente baixas temperaturas de operação é necessária uma grande superfície de exposição, motivo pelo qual são às vezes usadas superfícies aletadas para aumentar o contato gás-metal (Elementos de troca de calor; coletores; sopradores mecânicos de fuligem).

Para evitar problemas de corrosão interna a água para os economizadores é geralmente submetida a desaeração. Considera-se uma boa medida manter o pH entre 8,0 e 10,0. A temperatura da água de alimentação na entrada do economizador deverá ser mantida numa temperatura de aproximadamente 80°C para evitar o resfriamento dos gases da caldeira até a temperatura de ponto de orvalho, evitando assim sérios problemas de corrosão. O tratamento correto da água de alimentação evita corrosão interna.

Quando desejada uma elevada resistência à corrosão alguns projetistas usam externamente e internamente uma combinação de aço-ferro fundido.

A localização dos economizadores pode ser efetuada mediante um projeto “integral”, semelhante a um feixe de tubos de caldeira possuindo seu coletor próprio. Pode ser montado na caldeira como parte da superfície de convecção. Às vezes é usado somente um coletor estando o economizador ligado diretamente ao coletor da caldeira.

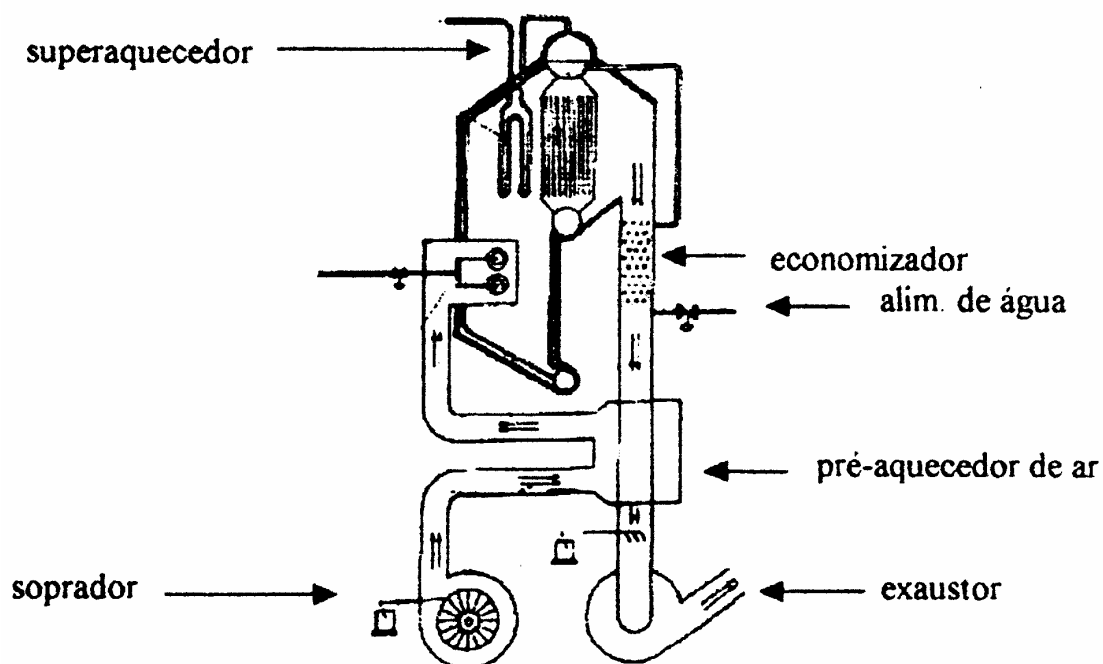


Figura 5. Sistema de uma Caldeira.

O arranjo ou projeto de localização denominado “independente” constitui-se de uma série de tubos situados no fluxo dos gases da combustão, geralmente antes do aquecedor de ar. Este é o arranjo mais usado. Os métodos atualmente utilizados para a limpeza interna dos elementos de caldeiras tem minimizado a necessidade de fácil acesso aos tubos do economizador.

Os economizadores “externos” são usados quando há limitações de espaço interno da caldeira que não permitem sua montagem ou quando adicionados a uma instalação existente.

5.2 Aquecedor de Ar

A recuperação final de calor dos gases da combustão é realizada por um aquecedor de ar. A temperatura dos gases é diminuída próxima da temperatura do ponto de orvalho, temperatura à qual a umidade começa a condensar. Este ponto constitui a temperatura limite máxima de operação. Temperaturas menores propiciarão corrosão, agravada esta pelo ácido sulfúrico formado a partir do enxofre contido nos gases de combustão.

Os aquecedores de ar podem ser classificados em: tubulares, regenerativos ou rotativos e de placa.

O projeto tubular é fabricado em ferro fundido ou aço. Consiste de um feixe tubular encerrado em um invólucro de aço reforçado. Entre a superfície externa dos tubos e a interna do invólucro circula o ar destinado à combustão, circulando os gases quentes pelo interior dos tubos. É formado por: saída de gás, entrada de ar frio, gicanas, tubos, entrada de gás, depósitos de cinzas, saída de ar quente.

Neste tipo de aquecedor é necessário um depósito de cinzas situado na parte inferior do aparelho, cuja limpeza deverá ser periodicamente realizada para evitar entupimento dos condutos de gás.

O aquecedor de ar regenerativo, consiste de um rotor, girando a 2 ou 3 rpm, com uma série de elementos corrugados de metal, que permitem uma grande superfície de contato para a transmissão de calor e pequena resistência ao fluxo de ar ou gás.

Pelo fato de existir uma enorme superfície formada pelos elementos do rotor, este projeto pode ser considerado como um trocador de calor compacto. Diafragmas e vedações dividem diametralmente a unidade, fluindo o gás em uma parte ou zona e na outra o ar. A superfície corrugada de aquecimento é feita em secções que podem ser facilmente retiradas para manutenção.

O aquecedor de placas possui passagens estreitas e alternadas para gás e ar, como também diafragmas cuja função é de dirigir o ar para obter um melhor aproveitamento da superfície de transmissão de calor.

A corrosão constitui um grave problema para os aquecedores de ar, sobretudo na zona de baixa temperatura dos gases, e maior ainda quando queimados óleos residuais devido ao conteúdo de enxofre, sódio e vanádio nas cinzas.

Como proteção contra a corrosão pode ser pulverizada uma mistura de dolomita ou óxido de magnésio com ou sem aditivo. Esta mistura pode ser aspergida pelos sopradores mecânicos de fuligem. Os resultados são significantes, especialmente em caldeiras que queimam óleos com conteúdo dos elementos acima mencionados. Quando a proteção é desejada também na secção quente do gerador, pode ser realizada a pulverização incluindo a aspersão de pó metálico de magnésio, diretamente na fornalha sobre ou perto dos queimadores. Deve ser considerado de grande importância a manutenção dos economizadores e aquecedores de ar limpos e isentos de incrustações.

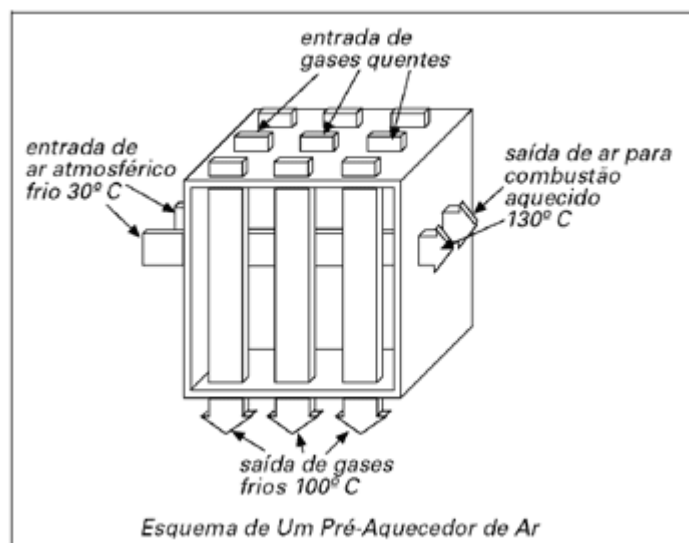


Figura 6. Esquema de um Pré-Aquecedor de ar.

6. SOPRADORES DE FULIGEM

Os sopradores de fuligem são elementos instalados nas caldeiras, seja aquatubulares como flamotubulares, em caráter permanente, para efetuar a remoção, durante o funcionamento, dos resíduos da combustão depositados sobre os tubos vaporizadores, superaquecedores e economizadores.

A presença de depósitos de fuligem, cinzas, etc. sobre o metal, diminui a transmissão do calor do combustível para a água da caldeira e consequentemente sua eficiência térmica.

Os modernos sopradores podem seguir, quanto ao seu funcionamento uma sequência pré-determinada ou programada conforme as necessidades específicas dos vários elementos do gerador de vapor.

A sopragem automática dos elementos da caldeira na maior parte das instalações, reduz a temperatura média dos gases de combustão. A sopragem automática deverá portanto começar quando a temperatura do gás exceder um determinado valor. Constantes melhoras efetuadas permitem estabelecer que uma operação programada atende eficientemente as necessidades de cada unidade em particular. O controle automático permite uma grande economia do combustível, vapor e tempo.

A frequência da limpeza depende do tipo de operação e do combustível utilizado. É importante manter o gerador produzindo vapor a uma taxa razoável durante a operação dos sopradores. Isto evitará a possibilidade de ignição espontânea ou explosão em algumas partes onde uma circulação não eficiente permita a acumulação de combustível não queimado ou gás rico. Também deve ser aumentada levemente a tiragem durante a operação de sopragem.

A sopragem pode ser efetuada com vapor ou ar, sendo o vapor o sistema mais popular, com cerca de 60% contra 40% das efetuadas por ar. Em grandes instalações é usado o ar para evitar o custo devido a perda da água tratada.

São usados vários tipos de sopradores entre os quais os do tipo estacionário, que emprega difusores retos para efetuar a injeção a vapor; outro tipo é o retrátil que opera automaticamente e mediante controle remoto, usado para extração do acúmulo de incrustações nos tubos da caldeira, parede da fornalha ou do superaquecedor e economizador, ou seja na parte de alta temperatura dos gases. Pode às vezes ser obtida uma economia de 25% em tempo e meio de sopragem usando motores elétricos como elemento de acionamento a sopradores deste tipo. Pode ser do tipo combinado, isto é, retrátil e rotativo acionado por dois motores, atravessando a caldeira a uma determinada velocidade e retraindo-se ao dobro da mesma, ou simplesmente do tipo rotativo, usando normalmente para as superfícies de convecção nas zonas de baixa temperatura do gás, abaixo de 800°C.

Como dissemos a água pode ser outro elemento usado para a sopragem de tubos, devendo neste caso o sistema ser usado quando o gerador se encontra fora de serviço ou operando sob cargas muito baixas, resultando num meio prático para as partes de baixa temperatura da caldeira ou para a totalidade da área exposta ao fogo. Lanças operadas manualmente podem ser usadas para este serviço. Água quente com um valor elevado do pH em quantidades cuidadosamente calculadas pode ser meio geralmente seguro.

Superaquecedores construídos em aço liga não devem ser soprados com água para evitar a possibilidade de choque térmico.

Uma classificação dos sistemas básicos de sopradores explanando os sistemas de controle, acionamento e meios de sopragem.

Sistema de controle: controle programável, sequencial, controle remoto sequencial automático constante e controle remoto simples ou seletivo.

Sistema de acionamento: motor elétrico, motor pneumático e operação manual.

Meio de sopragem: ar, água e vapor.

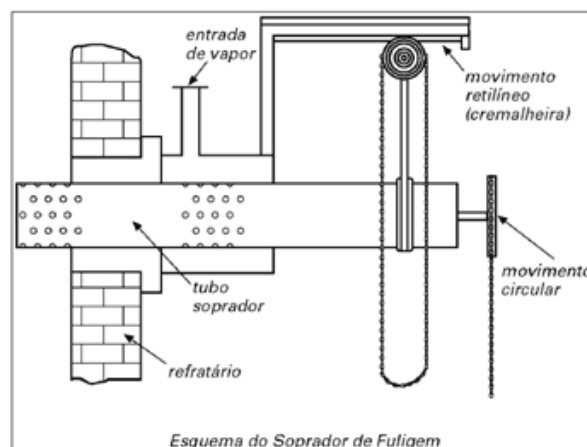


Figura 7. Esquema do Soprador de Fuligem

Por fim, apresentamos uma tabela afim de exemplificar a instalação de equipamentos como o Superaquecedor e o Economizador.

Tabela 1. Formas de economizar custos de operação das Caldeiras Industriais.

Item	Sem investimento	Ação	Economia em %
1	Reduzir excesso de ar.	Regulagem da combustão.	5 a 10%.
2	Reduzir temperatura de saída dos gases.	Regulagem da combustão. Limpeza da caldeira.	1% a cada 5°C.
3	Reduzir pressão de trabalho.	Verificar necessidade real de pressão.	1% a cada 5 Bar.
4	Otimizar temperatura do combustível.	Verificar com frequência a viscosidade do combustível.	Até 5%.
5	Otimizar pressão de atomização do combustível.	Seguir indicações do fabricante do queimador.	Até 1%.
6	Reduzir descarga de fundo.	Conforme análise de água da caldeira.	Até 1%.
7	Otimizar seqüência de queima.	Ajuste da modulação.	5 a 10%.
8	Otimizar seqüência de queima de vários queimadores.	Ajuste da modulação.	2 a 7%.
9	Eliminar vazamentos de vapor.	Inspecção das instalações.	Até 10%.
10	Eliminar defeitos em purgadores.	Inspecionar todos.	Até 5%.
	Com investimento	Ação	Economia em %
1	Reduzir depósitos no queimador.	Regulagem de queima. Adicionar aditivos	1 a 5%.
2	Reduzir depósitos na fornalha.	Regulagem de queima. Adicionar aditivos.	1 a 3%.
3	Reduzir depósitos no lado de água.	Conforme análise de água da caldeira.	1 a 2%.
4	Reduzir depósitos de fuligem nos tubos.	Regulagem de queima. Adicionar aditivos.	1 a 4%.
5	Aumentar temperatura de ar de combustão.	Instalar préaquecedor de ar.	2 a 5%.
6	Aumentar temperatura da água de alimentação	Instalar economizador.	Até 3%.
7	Recuperar calor através de descarga de fundo.	Instalar “flash tank”.	Até 1%.
	Com investimento	Ação	Economia em %
8	Recuperar perda de calor na instalação.	Otimizar isolamento.	Até 8%.
9	Regulagem contínua do nível de água.	Instalar controle de “loop”.	Até 1%.
10	Recuperar condensado	Instalar tanque de condensado.	Dependendo da instalação.
	Economia de energia elétrica	Ação	Economia em %
1	Instalar inversor de frequência	Incl. Melhor ambiente sonoro	
2	Verificar necessidade de potência dos motores.	Eventuais superdimensionamentos.	
3	Aquecedores de combustível.	Usar somente vapor.	

7. AGRADECIMENTO

Agradecemos á oportunidade de melhorar nossos conhecimentos ao PROMINP.

8. REFERÊNCIAS

TORREIRA, R. P. **Geradores de Vapor**, São Paulo: Companhia Melhoramentos, 1995, 263p.

FIGURAS. Disponível em
http://www.chdvalvulas.com.br/artigos_tecnicos/caldeiras/img/018.gif. Acesso em: 10 de set. 2008.

FIGURAS. Disponível em
<http://www.meiofiltrante.com.br/imagens/n24/imagens/processos02.jpg>. Acesso em: 10 de set. 2008.

ARTIGO TÉCNICO. Disponível em
http://www.chdvalvulas.com.br/artigos_tecnicos/caldeiras/aquatubulares.html. Acesso em: 08 de set. 2008.

YANAGIHARA Itizo Jurandir. Máquinas Térmicas Geradores de Vapor. Disponível em
http://www.lete.poli.usp.br/teaching/pme2479-maquinas-termicas/MaqTermicas_Geradores_Vapor.pdf. Acesso em: 08 de set. 2008.

TABELA; Formas de economizar custos de operação das Caldeiras Industriais. Disponível em:
<http://www.inmar.com.br>. Acesso em: 11 de set. 2008.

9. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso e autorizam o uso do seu conteúdo pela coordenação do Curso e ministrante da disciplina.



ENGENHEIRO DE SUPRIMENTOS
DISCIPLINA DE FABRICAÇÃO E MONTAGEM DE CALDEIRAS E
TROCADORES DE CALOR
AGOSTO/SETEMBRO DE 2008
Escola Politécnica – Depto. Eng^a. Mecânica

COMBUSTÍVEIS E QUEIMADORES EM CALDEIRAS

Bruno Carbonaro Franco Silva, bruno_carbonaro@yahoo.com.br
Valdir da Silva, vlsi@ig.com.br

Prominp, Escola Politécnica – Depto. Eng^a Mecânica

Resumo: *O trabalho tem como intuito explorar a questão dos combustíveis disponíveis para aplicação industrial em caldeiras, assim como os processos de obtenção dos produtos e as características necessárias upara utilização dos mesmos de forma adequada. Também é feita a análise dos tipo dos princípios de combustão nas caldeiras e os queimadores e equipamentos utilizados na queima dos combustíveis.*

Palavras-chave: *combustíveis, queimadores, caldeiras, petróleo*

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos séculos os seres humanos têm experimentado um gigantesco avanço tecnológico que proporciona desenvolver novas possibilidades para maximizar o conforto, gerar uma maior produtividade nas tarefas e um emprego cada vez menor de recursos para obter um melhor resultado, sempre buscando empregar a energia da forma mais racional e em menor quantidade. Com isso desenvolveram-se os combustíveis buscando dar forma as transformações requeridas, gerando cada vez mais energia com uma menor quantidade empregada e buscando sempre um aproveitamento máximo das fontes de combustíveis, refinando mais e melhor e obtendo os resíduos do refino mais nobres do que o elemento original. A utilização dos combustíveis nas caldeiras busca sempre obter a maior eficiência em relação ao trabalho a ser executado, e para obter a eficiência requerida tem-se que adotar sistemas de queima eficientes que façam do conjunto combustível e queimador o mais equilibrado possível. Serão apresentados então os combustíveis, seus tipos, características e os tipos de combustores necessários para queima dentro de uma caldeira.

2. COMBUSTÍVEIS

Por definição podemos falar que combustíveis são todas as substâncias naturais e artificiais que nos três estados da matéria podem reagir com o oxigênio, mediante contato centelha ou tocha simples, liberando energia na forma calorífica e luminosa. E para que haja combustão temos que ter uma combinação de três fatores: combustível, ar e calor. Como fator de viabilidade na utilização industrial e no dia a dia o combustível tem de ser abundante na natureza e ainda liberar quantidade razoável de calor a um custo equivalente ao propósito de sua utilização.

Podemos classificar os combustíveis em dois importantes grupos da seguinte maneira, além da divisão em relação ao estado físico (sólido, líquido e gasoso):

- Combustíveis fósseis
- Bio-combustíveis

Consideramos os combustíveis fósseis aqueles que estão presentes na crosta terrestre, disponíveis a céu aberto ou em camadas profundas resultantes das transformações ocorridas há muitos anos. Podemos citar nessa classe de combustíveis o petróleo, gás natural e carvão mineral como os mais utilizados e difundidos.

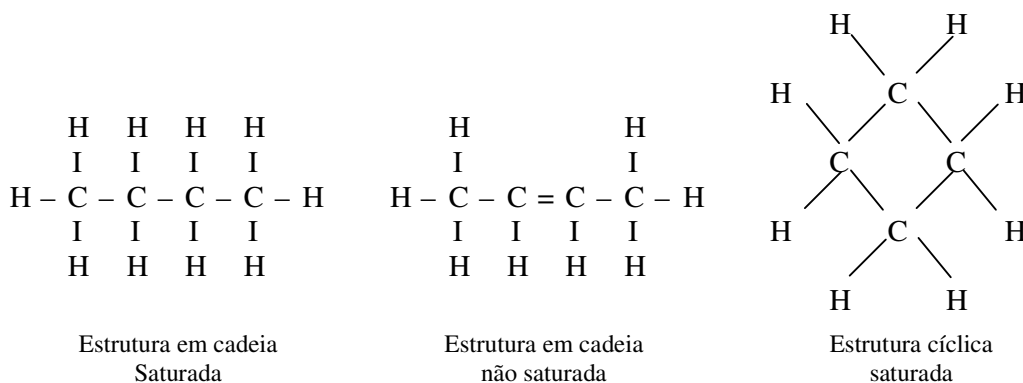
Já os Bio-combustíveis são combustíveis resultantes da biomassa ou matéria orgânica capaz de ser utilizada como fonte de energia e geralmente é resultante de plantas, resíduos naturais ou beneficiamentos, resíduos animais e despejos urbanos. Na classe dos bio-combustíveis temos a lenha, bagaço de cana, carvão vegetal e álcool.

Os combustíveis são basicamente constituídos por Carbono (C), Hidrogênio (H) e em alguns casos, o Enxofre (S). Podemos verificar que para os combustíveis industriais podemos classificar basicamente em três grupos: carvão mineral, hidrocarbonetos líquidos e gasosos. A maioria dos combustíveis, constituídos por hidrocarbonetos líquidos ou gasosos, são uma mistura de muitos hidrocarbonetos diferentes. Por exemplo, a gasolina é constituída, fundamentalmente, por uma mistura de cerca de 40 hidrocarbonetos diferentes, com muitos outros presentes em quantidades mínimas.

Os hidrocarbonetos possuem três características importantes, que valem a pena ser citadas:

- Estrutura Molecular - Os tipos importantes são os de estrutura cíclica e os de estrutura em cadeia.
- Hidrocarboneto Saturado ou Não Saturado - Um hidrocarboneto não saturado possui dois ou mais átomos de carbono não adjacentes, unidos por uma valência dupla ou tripla, enquanto que os hidrocarbonetos saturados apresentam todos os átomos de carbonos unidos por uma valência única.
- Isomeria - Dois hidrocarbonetos são chamados isômeros quando possuem o mesmo número de Carbono e Hidrogênio e estruturas diferentes.

Tabela 1. Estruturas de Cadeia dos Hidrocarbonetos



A maior parte dos combustíveis líquidos constituídos por hidrocarbonetos são misturas que provêm de destilação do petróleo, através de processos de destilação ou de destilação fracionada.

Assim, de um determinado petróleo, inúmeros combustíveis diferentes podem ser produzidos, alguns dos mais comuns sendo a gasolina, o querosene, o óleo diesel e o óleo combustível.

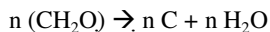
Dentro de cada uma destas classificações, existe uma grande variedade de categorias, e cada uma é composta de um grande número de diferentes hidrocarbonetos.

2.1. Carvão Mineral

O carvão mineral é uma substância sólida, de cor escura, constituída principalmente de carbono. Junto com o carvão mineral também são encontrados alguns líquidos como águas amoniacais e alcatrão, assim como a presença de gases. O seu principal uso é como combustível e também na redução do minério de ferro na obtenção do aço. Teve grande valor no início da era industrial e provocou guerras entre os povos pela posse de suas jazidas.

A pureza do carvão decorre do processamento das misturas dos materiais celulósicos com as substâncias minerais por ocasião das modificações verificadas na crosta terrestre.

O carvão foi formado a partir de restos de vegetais e florestas, há centenas de milhões de anos. À medida que elas morriam eram cobertos por sedimentos (lama ou areia trazidas pelo vento). Nas profundezas da crosta terrestre, sob pressão, calor e na ausência de oxigênio, a madeira foi decompondo-se, perdendo a água da celulose, restando o carvão (carbono). Um pouco da resina das plantas ficou retida, dando origem ao alcatrão. A composição do carvão varia conforme a idade geológica da jazida, podendo ser encontrado em vários estágios. A composição da celulose é baseada em muitos radicais do tipo $(\text{CH}_2\text{O})_n$, que perde água sobrando o carbono, conforme reação abaixo:



O carvão mineral é considerado um recurso natural não renovável por serem necessários milhões de anos para sua formação.

As suas águas amoniacais têm grande importância na produção de adubos químicos, enquanto o alcatrão destina-se à indústria química. Dele são extraídos compostos importantes como o benzeno, o antraceno, o naftaleno, o tolueno, o fenol, etc, dos quais podem ser feitos os solventes, plásticos, corantes, medicamentos, inseticidas, explosivos, essências artificiais de sabor e odor para perfumaria e alimentos.

A separação da fase sólida da líquida é feita por destilação. O carvão é fechado em um recipiente (retorta) e aquecido. Os gases e o alcatrão vaporizam-se e a fase líquida é recondensada em recipientes separados. O resíduo sólido que sobra na retorta é chamado carvão coque, usado principalmente na siderurgia devido a sua pureza. O gás produzido, uma mistura de hidrogênio, monóxido de carbono e metano, é utilizado como gás combustível (gás de rua).

2.2. Petróleo

O petróleo é uma substância líquida fóssil natural de origem orgânica formada no subsolo ao longo dos anos pela ação da temperatura e pressão.

O petróleo é formado basicamente por hidrocarbonetos saturados de cadeia não cíclica, porém podemos encontrar também alguns contendo hidrocarbonetos cíclicos. Também são substâncias presentes no petróleo os compostos oxidados como os naftenicos, ácidos orgânicos, fenóis, aldeídos e substâncias asfálticas.

O petróleo quando extraído do sub-solo não pode ser utilizado diretamente, tendo que ser submetido a um processo de destilação fracionada de onde são extraídos os produtos conhecidos como óleos residuais.

A "destilação fracionada" é feita em uma grande torre metálica, conforme Fig. (1), onde o petróleo é vaporizado em uma fornalha e entra por baixo de uma coluna. A mistura de hidrocarbonetos gasosos esfria à medida que sobem pela coluna.

Conforme a temperatura baixa, aqueles que possuem o maior ponto de ebulição tornam-se líquido (condensam) antes, separando-se dos demais, sendo retirados da coluna.

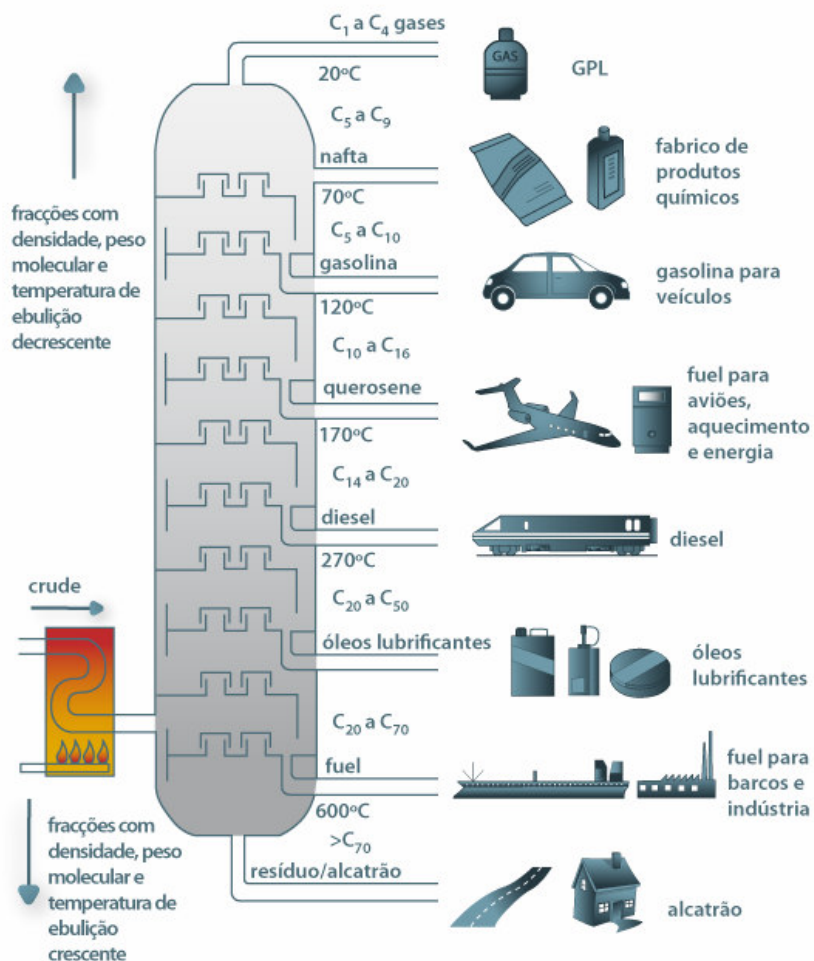


Figura 1. Torre de Destilação Fracionada de Petróleo

2.3. Características dos Combustíveis

Normalmente, os combustíveis em uso na indústria são definidos em termos de:

2.3.1. Poder Calorífico

É a quantidade de calor liberado pela unidade de massa (ou de volume para combustíveis gasosos) de um combustível quando queimado completamente.

É expresso em kcal/kg (para sólidos e líquidos) e em kcal/m³ (para gases). Fisicamente, existem dois poderes caloríficos o superior (PCS) e o inferior (PCI).

O superior supera o inferior em uma quantidade de kcal, equivalente para vaporizar a água formada com a combustão do Hidrogênio do combustível.

O poder calorífico pode ser determinado experimentalmente através de calorímetros ou por cálculo, se a composição do combustível for conhecida. Temos algumas medidas na Tabela 2.

Tabela 2. Poder Calorífico Superior e Inferior de alguns Combustíveis

COMBUSTÍVEL	PCS	PCI
Carvão	8.065 kcal/kg	7.750 kcal/kg
Querosene	11.100 kcal/kg	10.390 kcal/kg
Óleo Diesel	10.960 kcal/kg	10.280 kcal/kg
Óleo Combustível	10.200 kcal/kg	9.600 kcal/kg
Coque Metalúrgico	6.640 kcal/kg	6.500 kcal/kg
Alcatrão e Óleo de Alcatrão	10.000 kcal/kg	8.200 kcal/kg
Gás Natural	10.048 kcal/Nm ³	9.056 kcal/Nm ³
Butano	28.700 kcal/Nm ³	26.395 kcal/Nm ³
Propano	26.395 kcal/Nm ³	21.100 kcal/Nm ³
Gás de Coqueria	4.600 kcal/Nm ³	4.080 kcal/Nm ³
Gás de Alto Forno (Operando com Coque)	1.000 kcal/Nm ³	850 kcal/Nm ³
Gás Liquefeito de Petróleo (GLP)	00000 kcal/Nm ³	25.000 kcal/Nm ³

2.3.2. Ponto de Fulgor ou “Flash Point”

É a temperatura na qual um líquido inflamável, num ambiente fechado, liberta suficiente vapor para criar uma mistura explosiva no espaço de ar acima dele, mistura esta que dará um lampejo se exposta em contato com uma chama ou faísca.

O ponto de fulgor é então uma medida para avaliar a segurança em armazenamento, transporte e algumas vezes no manuseio do combustível.

2.3.4. Viscosidade

É a força necessária para efetuar o movimento do fluido sob condições padrão, em outras palavras, é a força necessária para vencer a resistência ao escoamento do fluido, causado pelo atrito.

A grandeza da viscosidade pode ser definida como sendo a força expressa em “dins”, agindo em uma área de 1cm², necessária para produzir uma diferença de velocidade de 1cm/seg entre duas camadas de fluido paralelas distantes em 1 cm.

Para os óleos combustíveis, é obrigatório o conhecimento de uma tabela ou curva, de onde podemos extrair a viscosidade em função da temperatura.

A importância da viscosidade se faz em função de conhecermos as faixas de temperatura para obtermos uma bombeabilidade econômica ou o grau de pré-aquecimento que o óleo deve ter, para obtermos a temperatura que nos dê uma boa atomização e, conseqüentemente, uma combustão eficiente.

Problemas que podem ocorrer quando o óleo estiver com a viscosidade elevada:

- Dificuldades no Sistema de Bombeamento - Aumenta a perda de carga na tubulação e a potência requerida na bomba, diminuindo a vazão de óleo que vai para o queimador.

- Atomização Deficiente - Ocorre se o óleo não estiver pré-aquecido devidamente (quanto maior a viscosidade, menor o grau de pré-aquecimento).
- Dificuldades em Acender o Queimador - Com o aumento da viscosidade, aumenta também a sua temperatura de ignição.
- Estabilidade da Chama Irregular - Não se consegue estabilizar a chama, o queimador funciona em golfadas.
- Entupimento do Bico - Um óleo viscoso tem resíduo de carvão elevado, o que pode causar entupimento no bico do queimador, devido à carbonização, e aumenta o depósito de resíduos de Carbono na câmara de combustão.
- Combustão Incompleta - Um óleo pouco viscoso pode causar combustão incompleta, porque uma quantidade excessiva de óleo (acima da calculada) é bombeada para o queimador.

3. COMBUSTORES

3.1. Princípios Básicos da Queima de Combustíveis

Existem diversos aspectos que devem ser levados em consideração dentro de um sistema de queima de combustível líquido ou gasoso, entre estes aspectos deve-se ter em mente três princípios fundamentais que devem ser respeitados dentro de um processo de combustão:

O ar necessário para a combustão deve ser fornecido na quantidade correta, respeitando a estequiometria da reação e dentro do possível o mais intimamente em contato com o combustível dentro da fornalha.

O queimador deve fornecer o combustível de um modo prontamente inflamável. Todo o combustível deve ser queimado dentro de um volume predeterminado, sendo este determinado pela dimensão da fornalha.



Figura 2. Sistema de Combustão com Alta Eficiência e Queima Estagiada

3.2. Combustível Líquido

De forma a permitir sua rápida mistura com o ar, os combustíveis líquidos devem ser atomizados em muitas e pequenas gotículas dispersas no ar de combustão, permitindo uma rápida mistura com o mesmo. A atomização normalmente se obtém através dos seguintes meios:

- Óleo sob pressão ou atomizadores mecânicos
- Atomizadores por ar e baixa pressão
- Atomizadores por copo rotativo
- Atomizadores a vapor ou ar comprimido

3.3. Combustível Gasoso

Este tipo de combustível não requer atomização devido as suas propriedades físicas e alta difusibilidade, no entanto devido as suas velocidades relativamente altas, em comparação com as de combustíveis líquidos, deve-se tomar um grande cuidado para evitar o acúmulo de combustível dentro dos sistemas de queima (fornalhas, caldeiras), além do que o tamanho e posicionamento dos atomizadores tem importância relevante.

3.4. Ventilador – Ar de Combustão

O projeto da caixa de ar, na qual o queimador é construído, é de considerável importância para se obter uma combustão eficiente; em adição a eficiência global de combustão, o circuito de ar do queimador deve proporcionar uma chama estável e de propagação própria capaz de se manter mesmo com a variação de carga do queimador e pressão/vazão de ar. Qualquer alteração na capacidade do queimador deve ser acompanhada por um ajuste correspondente no damper de ar (forçado ou induzido) ou do queimador para fornecer somente ar suficiente que permita a queima completa do combustível.

Com sistemas de controle automático, a pressão/vazão do ar de combustão é determinada por um damper, que é aberto ou fechado por um controlador automático, o qual funciona em conjunto com o controlador de pressão/vazão do combustível. Em grandes câmaras de combustão, freqüentemente são requeridos vários queimadores. Nestes casos, cada queimador é provido de um registro tipo cilindro deslizante, que pode ser fechado para evitar vazão de ar através do mesmo quando o queimador não estiver em operação. Estes cilindros devem estar completamente abertos quando o queimador estiver em operação, e fechado quando o queimador estiver fora de operação. Estes cilindros de bloqueio podem ser operados manualmente ou através de um pistão pneumático, para possibilitar seu controle pelo painel de comando.

4. O EQUIPAMENTO DE COMBUSTÃO

4.1. Queimadores

Os queimadores consistem de uma carcaça de ar (registro de ar), para controle de vazão de ar de combustão; e injetores de combustível, para controle da vazão de combustíveis gasosos ou líquidos. O queimador deve permitir o conhecimento da vazão (obtem-se pelo conhecimento da pressão), ao mesmo tempo que produz as características aerodinâmicas necessárias para o perfil e a estabilidade de chama, em conjunto com a distribuição espacial. O óleo combustível é finamente atomizado, para alcançar a eficiência de queima especificada.

O ar combustão é dividido em duas correntes básicas de vazão, a primária e a secundária. A vazão de ar primária passa pelo tubo central, sendo introduzidas através de um estabilizador de ar axial. O ar secundário passa através de uma seção anular, formada pela parede externa da seção primária e a parede interna do corpo do registro, e então através de aletas fixadas com ângulo pré-determinado, para ser introduzido em uma garganta convergente / divergente.

O conceito do projeto é de que a seção primária se mantenha em uma condição fixa, enquanto que a garganta secundária e o turbulador possam variar, para produzir o perfil de chama e a performance requeridos. A perda de carga no registro (*Register Draught Loss – R.D.L*) é a mínima possível, de forma a proporcionar a performance de combustão especificada.

O combustível é introduzido normalmente à corrente de ar por :

- Lança central com atomizador para Óleo combustível ou outros combustíveis líquidos.
- Lança de gás – Central ou periféricas situadas ao redor do turbulador de ar primário, ou uma combinação dos dois.

O queimador pode funcionar queimando unicamente um destes combustíveis ou, como alternativa, pode ser projetado como uma unidade dual, capaz de queimar ambos os combustíveis independentemente ou em combinação.

4.2. Refratário

O refratário primário é normalmente preparado em mulita fundida ou pré queimada, montado no queimador durante a fabricação. Como alternativa, pode ser utilizado aço inox laminado em aplicações para um único queimador.

O refratário do bocal secundário, algumas vezes denominado de bloco refratário, pode ser fabricado em chapas de aço inoxidável. Porém, normalmente são utilizadas seções de concreto refratário pré-moldado, como também refratário moldado no próprio local, com o uso de um molde específico. O material refratário é normalmente utilizado onde as condições de temperatura possam reduzir a vida do bocal metálico.

4.3. Atomizador de Vapor

O projeto do atomizador a vapor é mostrado na figura nr.2. O conjunto do atomizador pode ser visto como consistindo de um disco de atomização (atomizador propriamente dito) posicionado e ajustado contra a extremidade da

lança, por meio de uma porca de fixação. O princípio de funcionamento é tal que o orifício de passagem de óleo combustível intersecciona tangencialmente o fluxo de vapor de atomização. O vapor e o óleo combustível se misturam nesta câmara por pressão. A expansão desta mistura, quando é injetada em uma zona de baixa pressão, resulta na quebra de partículas de óleo combustível transformando-o em um spray finamente atomizado.

O projeto do atomizador que utiliza este princípio consiste de múltiplos orifícios de vapor/óleo, posicionados sobre uma circunferência primitiva. O ângulo de spray do atomizador é determinado pelo ângulo em que os orifícios estiverem usinados. A fim de produzir uma atomização ótima do óleo combustível, intensivas pesquisas foram feitas visando aperfeiçoar a geometria do atomizador. Em vista disso, os vários diâmetros de orifício e as razões de comprimento são minuciosamente calculados, objetivando a máxima eficiência do queimador.

O atomizador é montado de forma que, quando mantido contra a extremidade do *sprayer* (que consiste de dois tubos concêntricos), os orifícios de vapor se alinhem com o tubo central e os orifícios de óleo combustível com espaço anular. Em consequência disto, a alimentação é feita de modo que o vapor passe pelo tubo central e o óleo combustível através do espaço anular.

Entretanto, enquanto que para todos os tamanhos de atomizador o vapor de atomização é requerido no atomizador situado no centro do mesmo, algumas lanças de *sprayer*, particularmente as menores, tem o óleo sendo alimentado através do tubo central, sendo esta mudança de circuito feita na extremidade da lança, para serem mantidas as exigências do atomizador.

Este procedimento foi adotado, a fim de que o tempo de enchimento da lança do *sprayer* fosse compatível com as normas determinadas para períodos de ignição estipulados para os sistemas de acendimento automático.

Para a operação correta, é importante que o vapor e o óleo combustível não se encontrem antes do ponto de interseção projetado. É, portanto, essencial, que não haja qualquer vazamento entre a superfície de contato formada pelo atomizador e pela extremidade do *sprayer*. O bom contato depende das duas superfícies estarem planas, limpas e satisfatoriamente presas uma à outra, uma vez que tal contato é metal com metal.

4. REFERÊNCIAS

PERA, Hildo. Geradores de Vapor – um compêndio sobre conversão de energia com vistas à preservação da ecologia. Editora Fama.

LORA, E. E. S. ; ARRIETA, F. R.P. ; BESSA, F.C. ; ARADAS, M.E.C. .“Caldeiras a vapor Convencionais e de recuperação”. In: Electo Eduardo Silva Lora; Marco Antônio Rosa Nascimento. (Org.), Geração Termelétrica: Planejamento, Projeto e Operação, 1ª edição, Rio de Janeiro, 2004, v. 1, p. 171-248.

WYLEN, Gordon J. Van; SONNTAG, Richard E.; BORGNAKKE, Claus. Fundamentos da Termodinâmica Clássica. Euryale de Jesus Zerbini (Trad.). 4 ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1995. 585 p.

KEI-TEC Equipamentos Industriais Ltda. Web: [http:// www.kei-tec.com](http://www.kei-tec.com)

5. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso e autorizam o uso do seu conteúdo pela coordenação do curso e ministrante da disciplina.



ENGENHEIRO DE SUPRIMENTOS
DISCIPLINA DE FABRICAÇÃO E MONTAGEM DE CALDEIRAS E
TROCADORES DE CALOR
AGOSTO/SETEMBRO DE 2008
Escola Politécnica – Depto. Enga. Mecânica

PROJETO TERMOHIDRÁULICO DE TROCADORES DE CALOR

Flávio Patrício Aviles, e-mail: flavioaviles@yahoo.com.br

Marcos Duarte Miranda, e-mail: marcosduartemir@uol.com.br

Escola Politécnica – Depto. Enga. Mecânica, e-mail: jrsimoes@usp.br

Resumo: *Este trabalho apresenta os critérios, especificações e metodologia de cálculo para o projeto termohidráulico de trocadores de calor. São abordadas as normas para o projeto mecânico, fatores de incrustação, aspectos para seleção das características dos fluidos na passagem casco-tubo e velocidades de escoamento. Referente a metodologia de cálculo mostraremos os cálculos termodinâmicos envolvidos no processo, fator de fuligem (incrustação), metodologia para o monitoramento térmico diário da performance de trocadores baseada na avaliação do número de unidades de transferência e na efetividade e fatores de perda de carga.*

Palavras-chave: *trocadores de calor, projeto termohidráulico, perda de carga*

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda global por energia tem obrigado cada vez mais a unidade industriais a adotarem medidas que possibilitem recuperar energia dos seus processos ou disponibilizá-la para outras áreas do sistema e conseqüentemente reduzir o consumo das suas plantas. Os trocadores de calor são freqüentemente empregados com esse objetivo, portanto seu projeto termohidráulico é de fundamental importância para o sucesso operacional e econômico da unidade.

Neste trabalho são apresentados os parâmetros fundamentais para a realização desse projeto, possibilitando aos engenheiros de suprimentos avaliar a capacidade térmica e performance dos trocadores e também contribuir no esclarecimento de possíveis dúvidas geradas na rotina dos trabalhadores da área de suprimentos.

2. CRITÉRIOS DE PROJETO PARA TROCADORES DE CALOR

A seleção de um trocador de calor para executar um determinado serviço é um tópico controvertido e nebuloso dentro de um projeto. Cada projetista tem seus critérios particulares para seleção de um tipo de equipamento baseados em sua experiência acumulada, principalmente.

Um critério muito utilizado é o da existência e disponibilidade de métodos de cálculo confiáveis para o projeto de um tipo de trocador específico. É o que ocorre com os trocadores tipo cascos e tubo, ou duplo tubo. Já os trocadores tipo placa possuem métodos de cálculo que são em geral propriedade de companhias que fabricam esses equipamentos, estando, inclusive de posse de métodos que otimizam o equipamento para um determinado serviço.

Para os critérios mecânicos de fabricação de um projeto para trocadores de calor, devem estar de acordo com as normas abaixo:

ASMES

SEÇÃO I – CALDEIRAS;

SEÇÃO VIII – VASOS DE PRESSÃO;

Tubular Exchanger Manufacturer Association (TEMA)

API Std 660 – Heat exchanger for general refinery services.

NORMAS ABNT

TB-401 – Terminologia

2.1. Etapas Para Realização do Projeto.

Algumas etapas devem ser seguidas para a realização do projeto e em cada uma delas determinar certas condições de trabalho e análise das mesmas. Normalmente é preenchida uma folha de dados (anexo 1) que juntamente com os desenhos e manuais do fabricante fará parte da documentação do equipamento. As etapas estão relacionadas a seguir:

Determinação das condições de processo, composição, vazões, temperaturas e pressões das correntes envolvidas.

Determinação das propriedades físicas necessárias: densidade, calor específico, viscosidade, e condutividade térmica em geral;

Escolha do tipo do trocador;

Estimativa preliminar da área e, em consequência, das dimensões e arranjos;

Avaliação térmica do modelo escolhido, conduzindo a elaboração de modificações no modelo proposto ou sua rejeição.

2.2. Desempenho Operacional.

O trocador deve suportar diversas condições operacionais tais como corrosão, depósitos, tensões e esforços mecânicos. Problemas de corrosão são considerados na fase de seleção dos materiais de construção, porém, deve ser dada importante atenção a velocidade dos bocais e mudanças de direção. A seleção deve levar em conta a possibilidade de ocorrência de depósitos e o tipo de problema que isso possa acarretar. Do ponto de vista mecânicos devem ser analisados os problemas decorrentes de tensões e esforços originados pôr dilatações, vibrações e etc. Segue abaixo alguns fatores que se considerados ajudam na melhora do desempenho de trabalho de um trocador de calor:

a) O fluido mais corrosivo, mais causador de depósitos ou de maior pressão deve ser o dos tubos.

b) O fluido mais viscoso ou gases devem passar pelo casco.

c) Para uma dada perda de carga, o escoamento do lado do casco proporciona melhores coeficientes de troca térmica.

d) A necessidade de materiais especiais é usualmente mais econômica quando aplicada aos tubos.

e) A condensação de fluidos é usualmente feita do lado do casco, por apresentar maior facilidade de remoção do condensado. Quando o condensado for corrosivo este deve ficar no interior dos tubos.

2.3. Manutenção e Restrição do Tamanho

Os equipamentos devem permitir acessos para limpeza mecânica e limpeza química e áreas que são susceptíveis de depósitos. Deve também permitir a substituição de componentes danificados por corrosão ou eventual reparo. Frequentemente há restrições quanto ao comprimento, altura, largura, volume ou peso de um trocador. As limitações podem se referir ao trocador propriamente dito, envolvendo muitas vezes questões de uniformização com outros trocadores já existentes, mas, também, previsões para manutenção. Pode ocorrer, por exemplo, que o trocador

seja instalado de modo que o feixe possa ser removido pela simples abertura do trocador, e haja espaço disponível para a operação. Outras operações devem ocorrer no sentido de facilitar a drenagem, remoção vertical do feixe e etc.

2.4. Fatores de Incrustação

O depósito de materiais indesejáveis na superfície de um trocador de calor aumenta a resistência à transferência de energia, diminuindo a eficiência de troca térmica e pode obstruir a passagem do fluido, aumentando a sua perda de carga.

Um dos modos adotados na prática para saber o grau de depósito num trocador de calor em operação é acompanhar, ao longo do tempo de uso, as temperaturas e as pressões terminais do trocador. À medida que o depósito aumenta, a eficiência de troca térmica cai (observado através das temperaturas) e a diferença de pressões cresce.

O processo de formação do depósito é em geral complexo. Pode ser devido à sedimentação, à polimerização, à cristalização, ao coqueamento, à corrosão, ou a causas de natureza orgânica (como algas). Esses mecanismos podem ocorrer independente ou paralelamente.

A taxa de depósito é afetada pelas condições de processo do trocador tais como a natureza dos fluidos, a velocidade de escoamento, as temperaturas dos fluidos, a temperatura na parede, o material de construção do equipamento, o grau de acabamento da superfície como a rugosidade ou tipo de revestimento interno.

Para facilitar a quantificação desse efeito que conforme visto é complicado, costuma-se usar um parâmetro definido como fator de incrustação ou fator de sujeira ("fouling factor"). Dimensionalmente é o inverso do coeficiente de transporte de energia por convecção. Logo, quanto maior o fator de incrustação, maior o depósito, maior a resistência à troca térmica.

Faixas de valores típicos desse fator podem ser encontrados na literatura para diversos casos de operação comuns.

Esses valores são interessantes e úteis porque servem de orientação geral. Mas como o depósito é um processo complexo, depende de uma série de variáveis e, portanto difícil de ser previsto, os valores típicos da literatura devem ser usados com muita reserva e cuidado, pois nunca vão refletir a realidade específica de um processo. Os valores mais confiáveis são os obtidos experimentalmente para um dado caso particular.

O fator de incrustação deve ser considerado a priori num projeto de trocador de calor, pois a área de troca térmica calculada deve ser suficiente para as necessidades do processo quando o trocador está novo (limpo) e quando está em operação há algum tempo (já com sujeira). Como o valor desse fator é difícil de ser previsto, essa deficiência constituirá uma das causas principais da imprecisão no projeto de um trocador de calor. A experiência profissional nesse aspecto será fundamental.

2.5. Localização dos Fluidos

Para um trocador de calor do tipo casco-tubos, uma das decisões importantes a ser tomada no início do projeto é definir qual dos fluidos deve circular pelo lado interno (feixe tubular) e qual pelo lado externo (casco). Uma localização mal feita implica num projeto não otimizado e numa operação com problemas frequentes.

Os aspectos básicos levados em consideração referem-se à limpeza do equipamento, à manutenção, a problemas decorrentes de vazamento e à eficiência de troca térmica.

Muitos dos fatores que influem nesses aspectos já foram abordados anteriormente. Para decidir a localização dos fluidos, deve-se considerar:

2.5.1. Fluido com maior tendência de incrustação

A velocidade de escoamento pelo lado dos tubos (escoamento em trecho reto ou em U) é mais uniforme e mais fácil de ser controlada.

Por outro lado no casco, devido aos desvios, a velocidade não é regular em todo o trajeto; pode haver regiões no casco com velocidades bem pequenas ou até zonas mortas.

Como a velocidade de escoamento influi no depósito, conforme visto, recomenda-se circular o fluido mais sujo (com maior fator de incrustação) no lado dos tubos.

Além disso, a limpeza mecânica e química é bem mais fácil pelos tubos. No casco, a limpeza mecânica às vezes é impraticável e a limpeza química pode ser não tão eficiente pela existência de zonas de baixa turbulência.

Vale lembrar que a água de resfriamento é um dos fluidos industriais com alto fator de sujeira e, portanto, de modo geral, circula preferencialmente pelos tubos. Mesmo para a água de resfriamento tratada, cujo fator de sujeira já não é tão elevado, recomenda-se em geral a sua circulação pelos tubos.

2.5.2. Fluido corrosivo

É melhor circular o fluido corrosivo no lado dos tubos. Pois, assim, "só se corrói" o tubo, que pode ser protegido com uso de material de construção mais resistente ou até ser revestido internamente, se for o caso. O material de construção e o grau de acabamento do casco poderão então ser diferentes e mais brandos.

2.5.3. Fluido com temperatura ou pressão muito elevadas

Para serviços de alta temperatura ou alta pressão, os cuidados com o material de construção e vedação têm que ser maiores. Portanto, pelo mesmo motivo anterior, é preferível circular o fluido nessas condições no lado dos tubos.

Vale ressaltar que o critério exposto não implica em que o fluido com maior temperatura ou maior pressão do que o outro necessariamente deve ser locado nos tubos. Mas se o valor da temperatura ou da pressão for significativamente apreciável, requerendo material de construção especial ou outros cuidados especiais, então esse fluido merece uma preferência de circular pelos tubos.

2.5.4. Fluido com menor velocidade de escoamento

Uma velocidade baixa de escoamento prejudica a troca térmica.

Devido à possibilidade de colocação conveniente de chicanas transversais, é mais fácil provocar uma turbulência intensa no casco do que no lado dos tubos. Logo, mesmo que a vazão de escoamento seja baixa, há um recurso construtivo (chicana) para incrementar a troca térmica no lado do casco.

Então, quando a diferença entre as vazões é significativa, em geral é mais econômico circular o fluido de menor vazão no lado do casco e o de maior vazão no lado dos tubos.

2.5.5. Fluido mais viscoso

Um fluido com alta viscosidade também dificulta a troca térmica. Assim pelo mesmo motivo do item anterior, circula-se o fluido mais viscoso no lado do casco onde é mais fácil intensificar a turbulência. Mas se a diferença de viscosidade entre os dois fluidos for pequena, nesse caso, torna-se indiferente a sua locação quanto ao critério de viscosidade.

2.5.6. Fluidos letais e tóxicos:

Para operação desses fluidos, por motivos de segurança, a vedação é fundamental.

A estanqueidade é mais simples de ser garantida no lado dos tubos, usando um espelho (chapa onde estão consolidados os tubos) duplo, por exemplo. Então os fluidos perigosos devem circular preferencialmente pelo lado dos tubos.

2.5.7. Fluido com diferença entre as temperaturas terminais muito elevada

Se a diferença entre as temperaturas de entrada e saída for muito alta (maior que 150°C) e se houver mais de uma passagem pelo lado dos tubos, recomenda-se circular esse fluido pelo casco. Esse procedimento minimiza problemas construtivos causados pela expansão térmica.

Em muitos casos, podem ocorrer situações conflitantes, de acordo com as recomendações prescritas acima. Por exemplo, um dos fluidos é muito incrustante e o outro escoar sob temperatura muito elevada; segundo os critérios mencionados, os dois fluidos deveriam circular pelo lado dos tubos.

Uma prioridade que serve de orientação é dada pela seguinte relação onde o fluido de posição anterior é em geral alocado nos tubos:

- Água de resfriamento;
- Fluido corrosivo ou fluido com alta tendência de incrustação;
- Fluido menos viscoso;
- Fluido de temperatura e pressão elevadas;
- Fluido de maior vazão.

2.6. Velocidade de Escoamento

A velocidade de escoamento influi em quatro aspectos fundamentais: a eficiência de troca térmica, a perda de carga, a erosão e o depósito de sujeira.

Quanto maior a velocidade de escoamento num trocador de calor, maior a intensidade de turbulência criada e melhor deve ser o coeficiente de transporte de energia. Conseqüentemente, a área do trocador necessária para uma dada carga térmica será menor. Nesse aspecto, é desejável que a velocidade de escoamento seja alta.

Mas essa turbulência intensa também implica num atrito maior e uma perda de carga maior, podendo até ultrapassar valores máximos admissíveis. Nesse aspecto, não é desejável uma velocidade de escoamento exagerada.

Então, há um compromisso entre melhorar a eficiência de troca térmica sem acarretar uma perda de carga excessiva. A busca desse compromisso constitui um dos principais objetivos no projeto de um trocador de calor.

Além desses dois pontos, a velocidade de escoamento está ligada à erosão e ao depósito de sólidos. Uma velocidade muito pequena pode favorecer o depósito de sujeira e a dificuldade da sua remoção. Por outro lado, uma velocidade exageradamente alta pode acarretar uma erosão intensa; se o fluido é corrosivo ou contém sólidos em suspensão, o efeito será mais danoso ainda. Então, de novo, a velocidade de escoamento não pode ser nem muito alta nem muito baixa.

2.7. Perda de Carga Admissível

A queda de pressão (ou mais precisamente a variação de energia expressa em altura manométrica) entre a entrada e a saída é conhecida como a perda de carga num trocador de calor. Para cada fluido num dado processo, é estipulado um valor de perda de carga máxima ou perda de carga admissível, por várias razões.

Uma perda de carga excessiva representa um consumo operacional de energia elevado, devendo, portanto ser evitada. Além disso, não se deve esquecer que o trocador de calor é sempre um equipamento componente de uma unidade de processo. O fluido que sai dele, em muitas vezes, vai ainda passar por tubulações e outros equipamentos a jusante, com suas respectivas perdas de carga; portanto na saída do trocador de calor, o fluido precisa ter ainda uma pressão suficiente para vencer as perdas subseqüentes.

2.8. Custos

Freqüentemente o custo inicial, ou seja, o investimento, condiciona a seleção do trocador de calor. Considerações de custo devem incluir não só o investimento, mas também o custo operacional, que se levado em conta, em geral se torna o critério principal da escolha.

3. MÉTODOS DE CÁLCULOS

Existem vários métodos para o dimensionamento de trocadores de calor, alguns disponíveis através da literatura técnica moderna e outros, mais aperfeiçoados, geralmente acoplados a programas de computador, que podem ser obtidas através de contratos com entidades privadas, envolvendo pagamentos.

3.1. Média Logarítmica das Diferenças de Temperaturas

Um fluido dá um passe quando percorre uma vez o comprimento do trocador. Aumentando o número de passes, para a mesma área transversal do trocador, aumenta a velocidade do fluido e, portanto o coeficiente de película, com o conseqüente aumento da troca de calor. Porém, isto dificulta a construção e limpeza e encarece o trocador. A notação utilizada para designar os números de passes de cada fluido é exemplificada na Fig (1).

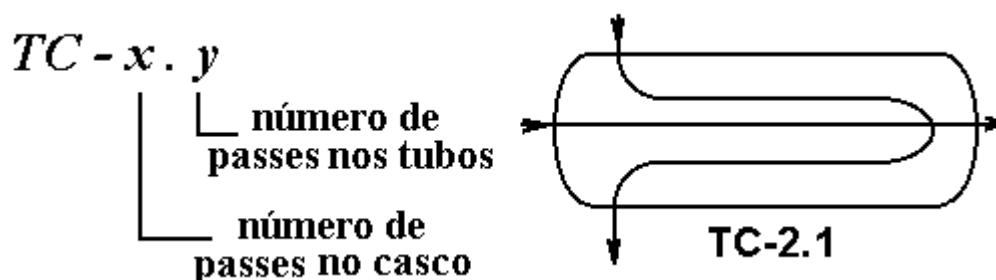


Figura 1. Notação para designar os números de passe de cada fluido.

Com relação ao tipo de escoamento relativo dos fluidos do casco e dos tubos, ilustrados na Fig. (2), podemos ter escoamento em *correntes paralelas* (fluidos escoam no mesmo sentido) e *correntes opostas* (fluidos escoam em sentidos opostos).

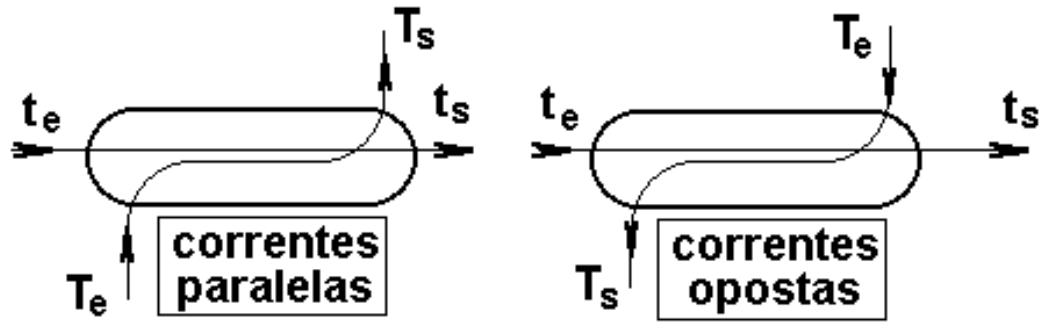


Figura 2. Demonstrativo de escoamentos para correntes paralelas e opostas.

Para cada um destes casos de escoamento relativo a variação da temperatura de cada um dos fluidos ao longo do comprimento do trocador pode ser representada em gráfico, como mostra a Fig. (3).

As diferenças de temperatura entre os fluidos nas extremidades do trocador, para o caso de *correntes paralelas*, são : $(t_e - T_e)$ que é sempre máxima ($DT_{\max}$) e $(t_s - T_s)$ que é sempre mínima ($DT_{\min}$). No caso de *correntes opostas*, as diferenças de temperatura nas extremidades $(t_e - T_s)$ e $(t_s - T_e)$ podem ser máxima ($DT_{\max}$) ou mínima ($DT_{\min}$) dependendo das condições específicas de cada caso.

O fluxo de calor transferido entre os fluidos em um trocador é diretamente proporcional à diferença de temperatura média entre os fluidos. No trocador de calor de correntes opostas a diferença de temperatura entre os fluidos não varia tanto, o que acarreta em uma diferença média maior. Como consequência, mantidas as mesmas condições, o trocador de calor trabalhando em correntes opostas é mais eficiente.

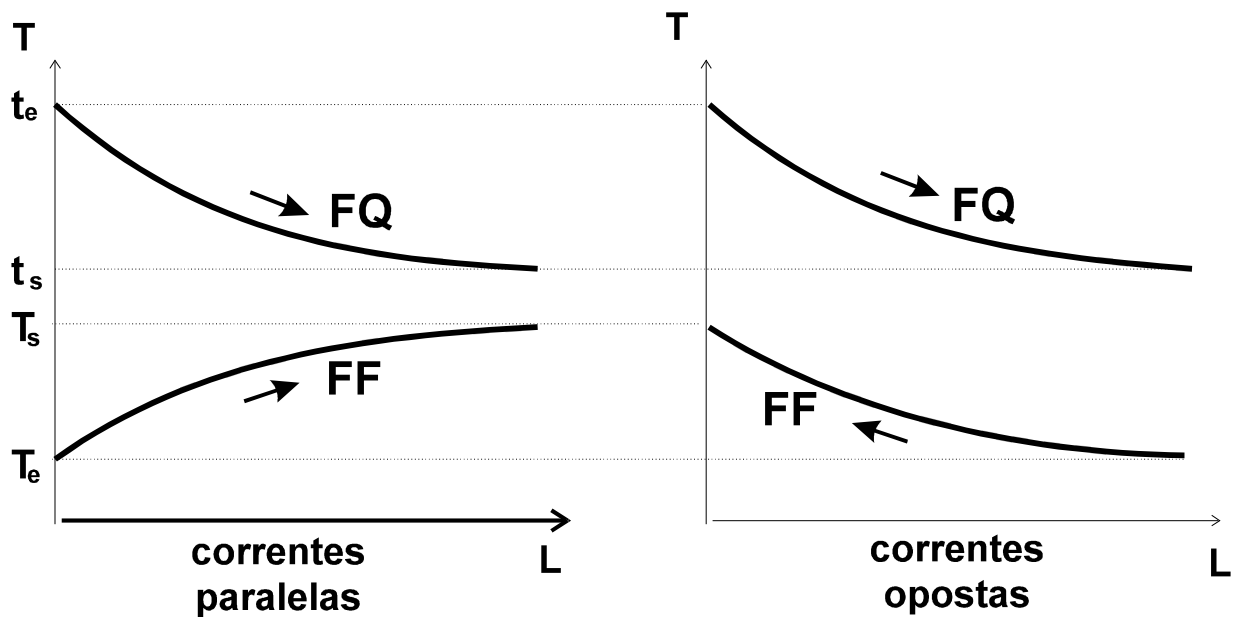


Figura 3. Gráfico de variação de temperatura ao longo do comprimento do trocador.

Como a variação de temperatura ao longo do trocador não é linear, para retratar a diferença média de temperatura entre os fluidos é usada então a Média Logarítmica das Diferenças de Temperatura (MLDT), mostrada na Eq. (1).

$$MLDT = \frac{\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}}{\ln \frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\min}}} \quad (1)$$

A utilização da média aritmética para situações onde a relação $(\Delta T_{\max} / \Delta T_{\min})$ é menor que 1,5 corresponde a um erro de apenas 1%.

4. QUANTIDADE DE CALOR TROCADO

A quantidade de calor trocada entre os fluidos quente e frio é dada por:

$$\dot{q} = U \cdot A \cdot \Delta t_{ml} \quad (2)$$

onde:

- $\dot{q}$: quantidade de calor trocado (W)
- U : coeficiente global de transferência de calor (W/m².°C ou W/m².K)
- A : área de troca de calor (m²)
- Δt_{ml} : diferença média logarítmica de temperatura entre os fluidos (°C ou K)

5. COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Coeficiente global de transferência de calor é definido por:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i \cdot r_i} + \frac{1}{k} \cdot \ln \frac{r_e}{r_i} + \frac{1}{h_e \cdot r_e}} \quad (3)$$

onde:

$\frac{1}{h_i \cdot r_i}$: resistência térmica da película do fluido interna (convecção interna)

$\frac{1}{k} \cdot \ln \frac{r_e}{r_i}$: resistência térmica da parede do tubo (condução)

$\frac{1}{h_e \cdot r_e}$: resistência térmica da película do fluido externo (convecção externa).

h_e, h_i : respectivamente os coeficientes de película ou convecção dos fluidos externo e interno (W/m².°C ou W/m².K)

k : coeficiente de condutividade térmica (W/m.°C ou W/m.K)

r_e, r_i : respectivamente os raios externo e interno do tubo (m)

Como o objetivo do trocador de calor é facilitar a troca de calor entre fluidos, é evidente que sempre serão usados tubos de paredes finas, ou seja, de resistência térmica desprezível. E como para tubos de paredes finas $r_i \cong r_e$ pode-se fazer outra simplificação $r_i / r_e \cong 1$. Assim a Eq. (3) se reduz a:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e}} \quad (4)$$

6. FATOR DE CORREÇÃO

Em trocadores tipo TC-1.1 é fácil identificar a diferença de temperatura entre fluidos nos terminais. No entanto, não é possível determinar estes valores em trocadores com mais de um passe nos tubos e/ou casco.

Neste caso as temperaturas das extremidades nos passes intermediários são desconhecidas. Em casos assim, o MLDT deve ser calculada como se fosse para um TC 1-1, trabalhando em correntes opostas, e corrigida por um fator de correção (F_T).

Assim, a Eq. (2) se altera para:

$$\dot{q} = U \cdot A \cdot \Delta t_{ml} \cdot F_T \quad (5)$$

O valor do fator F_T é obtido em ábacos em função das razões adimensionais P e R.

$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - T_2} \quad (6)$$

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} \quad (7)$$

onde:

t_1, t_2 : respectivamente as temperaturas de entrada e saída do fluido frio

T_1, T_2 : respectivamente as temperatura de entrada e saída do fluido quente

Para cada valor calculado de P (abscissa) e cada curva R (interpolada ou não), obtém-se um valor para F_T (em ordenadas). A Figura (4) mostra o fator de correção para trocador com um passe na carcaça e dois, quatro ou outros múltiplos de passes no tubo.

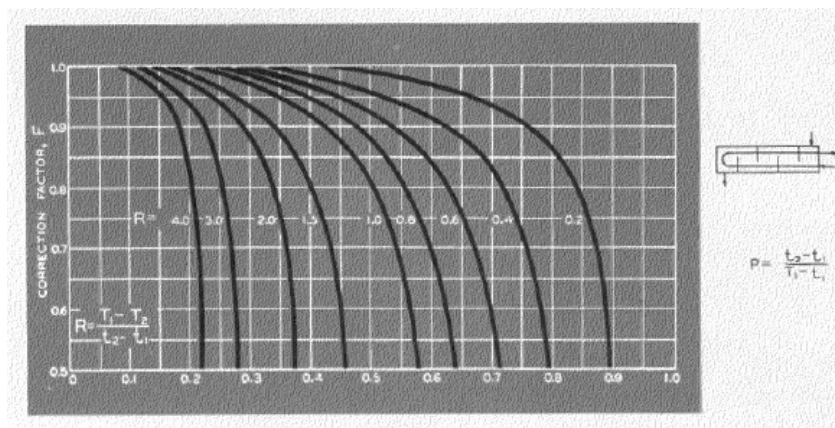


Figura 4. Fator de correção para trocador com um passe na carcaça e dois, quatro ou outros múltiplos de passes no tubo.

7. BALANÇO TÉRMICO

Calor recebido pelo fluido frio = calor cedido pelo fluido quente. Através do balanço térmico podemos determinar a vazão mássica desconhecida de um dos fluidos.

$$\dot{m} \cdot c_f \cdot \Delta t = \dot{M} \cdot c_Q \cdot \Delta T \quad (8)$$

onde:

$\dot{m}, \dot{M}$: são respectivamente as vazões em massa dos fluidos frio e quente (kg/s)

c_f, c_Q : são respectivamente os calores específicos dos fluidos frio e quente (J/kg.°C ou J/kg.K)

Δ_t, Δ_T : são respectivamente as variações de temperatura dos fluidos frio e quente

A Equação (5) pode ser completada por:

$$\dot{q} = U \cdot A \cdot \Delta t_{ml} \cdot F_T = \dot{m} \cdot c_f \cdot \Delta t = \dot{M} \cdot c_Q \cdot \Delta T \quad (9)$$

8. FATOR DE FULIGEM (INCRUSTAÇÃO)

Com o tempo, vão se formando incrustações nas superfícies de troca de calor por dentro e por fora dos tubos. Estas incrustações (sujeira ou corrosão) vão significar uma resistência térmica adicional à troca de calor. Esta resistência térmica adicional deve aparecer no denominador da Eq. (4) e é denominada fator fuligem (simbolizada por R_d).

$$U_D = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + R_d} \quad (10)$$

onde:

U_D : coeficiente global de transferência de calor, levando em conta o acúmulo de fuligem, ou seja "sujo".

R_d : fator de fuligem (h.m².°C/Kcal no Sistema Métrico e m².°C/W no Sistema Internacional)

$$R_d = R_{di} + R_{de} \quad \text{e} \quad R_d = \text{fator fuligem} \begin{cases} R_{di} = \text{fator fuligem interno} \\ R_{de} = \text{fator fuligem externo} \end{cases}$$

Portanto, a Eq. (5) considerando o coeficiente global "sujo" U_D é dada pela seguinte expressão :

$$\dot{q} = U_D \cdot A \cdot \Delta t_{ml} \cdot F_T \quad (11)$$

9. MÉTODO DE ANÁLISE DA EFETIVIDADE – NUT

Analisar o trocador de calor a partir da diferença logarítmica é simples quando as temperaturas de entrada dos fluidos são conhecidas e as temperaturas de saída são especificadas ou quando podem ser facilmente determinadas pelo Balanço Térmico. Mas quando se conhecem somente as temperaturas de entrada este método exige um processo iterativo. Diante disso, Jerónimo et al. (1997), propuseram uma metodologia para o monitoramento térmico diário da performance de trocadores de calor, baseada na efetividade ($\mathcal{E}$) e no número de unidades de transferência da calor (NUT), onde as variações nas condições operacionais, principalmente nas vazões dos fluidos são levadas em consideração. A efetividade de um trocador de calor é definida como a razão entre a troca de calor efetivamente conseguida e a máxima troca de calor possível.

9.1. Efetividade ($\mathcal{E}$)

$$\mathcal{E} = \frac{\dot{q}}{\dot{q}_{\max}} \cdot 100 \quad (\%) \quad (12)$$

A máxima troca de calor possível é definida por:

$$\dot{q}_{\max} = (\dot{m} \cdot c)_{\min} \cdot \Delta t_{\max} \quad (13)$$

onde:

$(\dot{m} \cdot c)_{\min}$ é o menor valor do produto da vazão mássica por calor específico entre as duas correntes de fluidos e $\Delta T_{\max}$ é a máxima diferença de temperatura no trocador de calor, ou seja, $(T_1 - t_1)$. No cálculo do $\dot{q}$ podemos usar o

produto da vazão, calor específico e variação de temperatura de qualquer um dos fluidos. Portanto a Eq. (12) toma as seguintes formas:

$$\varepsilon = \frac{(\dot{m}.c_Q)(T_1 - T_2)}{(\dot{m}.c)_{\min}(T_1 - t_1)} \quad \varepsilon = \frac{(\dot{m}.c_f)(t_2 - t_1)}{(\dot{m}.c)_{\min}(T_1 - t_1)} \quad (14)$$

9.2. Número de Unidades de Transferência de Calor – NUT

É definido como:

$$NUT = \frac{U.A}{(\dot{m}.c)_{\min}} \quad (15)$$

9.3. Relação ε x NUT

9.3.1. Correntes Paralelas

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NUT.(1 + Z)]}{1 + Z} \quad (16)$$

9.3.2. Correntes Opostas

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp[NTU.(1 - Z)]}{Z - \exp[NTU.(1 - Z)]} \quad (17)$$

onde o fator Z é a razão das capacidades térmicas dada por:

$$Z = \frac{(\dot{m}.c)_{\min}}{(\dot{m}.c)_{\max}} \quad (18)$$

9.4. Representação gráfica ε x NUT

As Figuras (5) e (6) apresentam gráficos que relacionam diretamente efetividade e NUT respectivamente em correntes paralelas e opostas, mas apresentam uma pequena variação na precisão dos cálculos.

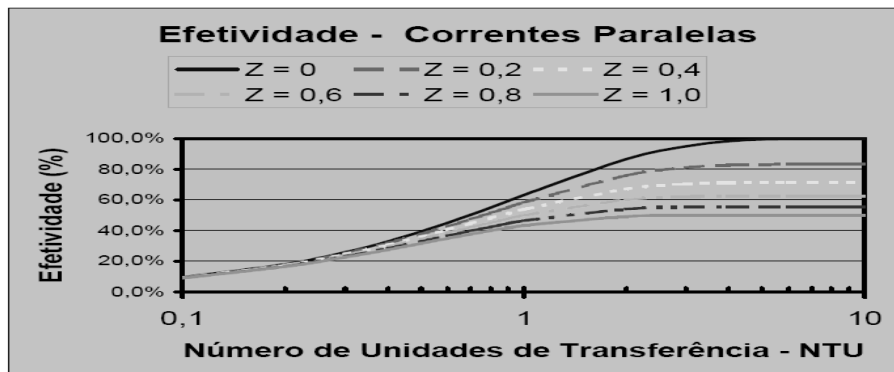


Figura 5. Efetividade em correntes paralelas.

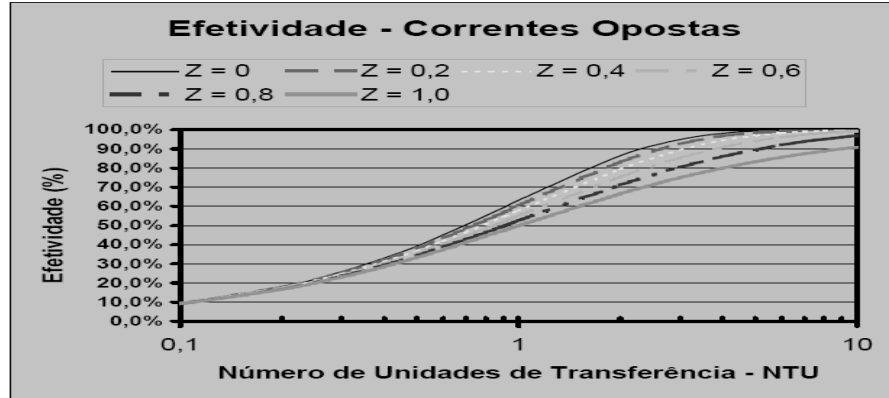


Figura 6. Efetividade em correntes opostas.

10. NÚMERO DE TUBOS

$$N_t = \frac{A}{A_{\text{tubo}}} = \frac{\text{área de troca de calor necessária}}{\text{área de troca de calor de um tubo}} \quad (19)$$

11. PERDA DE CARGA

11.1. Perda de Carga no Casco

$$\Delta P_c = \frac{f \cdot G_c^2 \cdot D_{ic} \cdot N_B}{2 \cdot g \cdot \rho \cdot D_e \cdot \Phi_c} \quad (\text{N/m}^2) \quad (20)$$

onde:

f : fator de atrito

G_c : vazão mássica por área (kg/h.m^2)

D_{ic} : diâmetro interno do casco (m)

N_B : número de intersecções

g : aceleração da gravidade

ρ : densidade específica (kg/m^3)

D_e : diâmetro equivalente (m)

Φ_c : fator de correção dos efeitos da viscosidade com a temperatura, μ a temperatura do fluido e μ_p a temperatura da parede.

11.1.1. Vazão Mássica por Área

$$G_c = \frac{\dot{M}}{a_c} \quad (21)$$

onde:

$$a_c = \text{área de escoamento} = \frac{DI \cdot C \cdot B}{P_T} \quad (22)$$

onde:

DI : distancia através dos feixes (m)

C : espaço vazio entre os tubos (m)

B : espaçamento das chicanas = $D_{ic} > B > \frac{1}{5} D_i$ (m)

P_T : passo dos tubos (m)

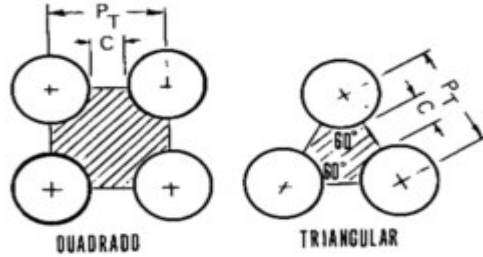


Figura 7. Disposições comuns para tubos de trocadores.

11.1.2. Número de Intersecções

$$N_B = N + 1 = \frac{L}{B} \quad (23)$$

onde:

N : número de chicanas

L : comprimento dos tubos (m)

11.1.3. Diâmetro Equivalente Lado da Carcaça

$$D_e = \frac{4 \cdot \text{área de escoamento}}{\text{perímetro molhado}} \quad (24)$$

Perímetro molhado: perímetro da seção do conduto que está em contato com o fluido.

Para passo quadrado:

$$D_e = \frac{4 \cdot \left(P_T^2 - \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} \right)}{\pi \cdot d_0} \quad (25)$$

para passo triangular:

$$D_e = \frac{4 \cdot \left(\frac{1}{2} P_T \cdot 0,86 P_T - \frac{1}{2} \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} \right)}{\frac{1}{2} \pi \cdot d_0} \quad (26)$$

d_0 : diâmetro externo do tubo

$$\Phi_c = \left(\frac{\mu}{\mu_p} \right)^{0,14} \quad (27)$$

$\Phi_c = 1,0$ quando a temperatura da parede não difere apreciavelmente da temperatura calórica do fluido.

11.1.4. Determinação do Coeficiente de Atrito (f)

11.1.4.1. Cálculo do Número de Reynolds (R_{ec})

$$R_{ec} = \frac{D_e \cdot G_c}{\mu} \quad (28)$$

μ : viscosidade (N.s/m²)

Com o número de Reynolds obtenho f através da Fig. (8) que representa os fatores de atrito do lado da carcaça.

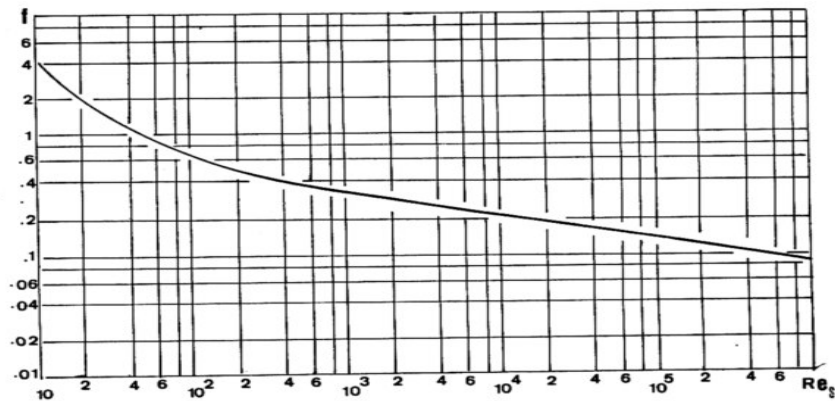


Figura 8. Fatores de atrito do lado da carcaça.

11.2. Perda de Carga nos Bocais do Casco

$$\Delta P_{bocal} = \rho_c \cdot g \cdot Z \quad (\text{N/m}^2) \quad (29)$$

onde:

Z = fator de perda de carga nos bocais do casco dado por:

$$Z = C \cdot V_{bc}^n \quad (30)$$

onde:

onde V_{bc} é a velocidade no bocal, calculada por:

$$V_{bc} = \frac{\dot{m}_c}{\rho_c \cdot \frac{\pi \cdot D_{bc}^2}{4}} \quad (31)$$

onde:

D_{bc} = diâmetro interno do bocal do casco.

As variáveis C e n são calculadas de acordo com a Tab. (1) abaixo, onde:

$$M = \frac{\mu_c}{\rho_c \cdot D_{bc}} \quad (32)$$

Tabela 1. Variáveis C e n para determinação da perda de carga nos bocais do casco.

$M \leq 0,1$	$C = 0,030938$ $n = 1,99505$
$0,1 \leq M < 1$ $V < 2 \frac{m}{s}$	$C = 0,0275669 + 0,12767M - 0,0344139M^2$ $n = 1,61077 - 1,0775M + 0,770999M^2$
$0,1 \leq M < 1$ $V > 2 \frac{m}{s}$	$C = 0,0332126 + 0,0115125M - 0,0487575M^2$ $n = 1,989924 - 0,1666M - 0,0872508M^2$
$M > 1$ $V < 10 \frac{m}{s}$	$C = 0,0554813 + 0,102512M + 0,00015182M^2$ $n = 1,45118 - 0,152593M + 0,0223365M^2 - 0,00110093M^3$
$M > 1$ $V > 10 \frac{m}{s}$	$C = 0,0276667 + 0,0186532M + 0,000714327M^2$ $n = 1,97235 - 0,068384M + 0,00279737M^2$

11.3. Perda de Carga nos Tubos

$$\Delta_{pt} = \frac{f \cdot G_t^2 \cdot L \cdot n}{2 \cdot g \cdot \rho \cdot d_i \cdot \Phi_t} \quad (\text{N/m}^2) \quad (33)$$

onde:

f : coeficiente de atrito

G_t : vazão mássica por área (kg/h.m²)

L : comprimento do tubo (m)

n : número de passes

d_i : diâmetro interno do tubo (m)

$$\Phi_t = \text{fator de correção dos efeitos da viscosidade com a temperatura} \Rightarrow \Phi_t = \left(\frac{\mu}{\mu_p} \right)^{0,14} = 1,0 \quad (34)$$

11.3.1. Vazão Mássica por Área

$$G_t = \frac{\dot{m}}{a_t} \quad (35)$$

onde:

$$a_t = \text{área de escoamento dos tubos} = \frac{a'_t \cdot N_t}{n} \quad (36)$$

onde:

a_t' : área de escoamento por tubo (m^2)

11.3.2. Determinação do Coeficiente de Atrito (f)

11.3.2.1. Cálculo do Número de Reynolds (R_{et})

$$R_{et} = \frac{d_i \cdot G_t}{\mu} \quad (37)$$

Com o número de Reynolds obtenho f através da Fig. (9) que representa os fatores de atrito para o interior do tubo.

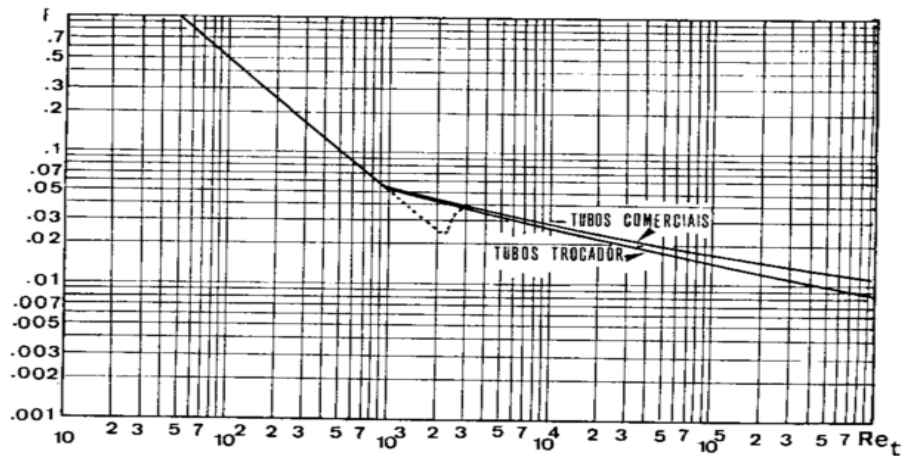


Figura 9. Fatores de atrito para o interior do tubo.

11.4. Perda de Carga no Retorno dos Tubos

$$\Delta_{pr} = \frac{4 \cdot n \cdot V^2}{s \cdot 2g} \quad (N/m^2) \quad (38)$$

onde:

V : velocidade (m/s)
 s : densidade relativa

11.5. Perda de Carga Total nos Tubos

$$\Delta_{pT} = \Delta_{pt} + \Delta_{pr} \quad (39)$$

12. REFERÊNCIAS

Baracat, Démetrio Elie. Um método para o Dimensionamento Térmico de Trocadores de Calor , Dissertação de Tese para Doutorado em Engenharia Mecânica . Politécnica . São Paulo ,1988.

Braga, W; Millon, J. Trocadores de Calor. Universidade de Caxias do Sul. Disponível em: <<http://www.ucs.br/ccet/demc/craltafi/TrocadoresdeCalor.pdf>>. Acesso em: 17 de agosto de 2008.

Jr., Durval Piza de Oliveira; Carvalho, Paulo Sérgio Germano de; Terrassovich, Roberto Lage; Afonso, Roberto Marcos. Transmissão de Calor Básica. 2. ed., 1986.

Kern, Donald Q. Processos de transmissão de Calor. 1. ed., Rio de Janeiro, 1980.

Song, Tah Wun .São Paulo : Condições de processo num Trocador de Calor, 2007. Disponível em: <<http://members.tripod.com/~collatio/regeq/condies.htm> > Acesso em : 09 set. 2008 , 22:15:30.

Tonin, Paulo César; Negrão, Cezar Otaviano Ribeiro. Monitoramento da Performance Térmica de Trocadores de Calor. 2º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo & Gás, Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.portalabpg.org.br/PDPetro/2/4042.pdf>>. Acesso em: 29 de agosto de 2008.

Tonin, Paulo César. Metodologia para Monitoramento do Desempenho Térmico de Redes de Trocadores de Calor. Programa De Pós Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais do Centro de Educação Tecnológica Do Paraná, 1983. Disponível em: http://www.ppgem.ct.utfpr.edu.br/ppgem/dissertacoes/TONIN_Paulo_Cesar.pdf>. Acesso em: 20 de agosto de 2008.

13. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso e autorizam o uso do seu conteúdo pela coordenação do curso e ministrante da disciplina.

Anexo 1 – Folha de Preenchimento de Dados para Projetos em Trocadores de Calor

FOLHA DE DADOS – TROCADOR DE CALOR			
CLIENTE:		OPERAÇÃO	Nº DO DOCUMENTO
UNIDADE:		FOLHA _____	DE _____
LOCAL:		AUT. _____	DATA _____
1	SERVIÇO	ITEM Nº	QUANT. _____
2	DIMENSÃO	TIPO	LIGADOS EM
3	SUPERF./UNIDADE	CASCO/UNIDADE	SUPERF./CASCO
CARACTERÍSTICAS DE UMA UNIDADE			
5		LADO DO CASCO	LADO DOS TUBOS
6	FLUIDO EM CIRCULAÇÃO	Gasolina	Água de resfriamento
7	QUANTIDADE TOTAL FLUIDO ENT (kg/h)	22 695	97 545
8	VAPOR (kg/h)		
9	LÍQUIDO (kg/h)		
10	VAPOR DE ÁGUA (kg/h)		
11	NÃO CONDENSÁVEIS (kg/h)		
12	FLUIDO VAPORIZ. OU CONDENS. (kg/h)		
13	VAPOR CONDENSADO (kg/h)		
14	DENSIDADE DO LÍQUIDO	0,720 / 0,781	0,996 / 0,998
15	VISCOSIDADE ENT. E SAÍDA (cp)	0,25 / 0,50	0,80 / 0,60
16	PESO MOLECULAR DO VAPOR		
17	CALOR ESPECÍFICO DO LÍQUIDO (kJ/kg.°C)	2,17	4,17
18	CALOR LATENTE (kJ/kg)		
19	CONDUTIVIDADE TÉRMICA (W/m.°C)	0,12 / 0,13	0,58
20	TEMPERATURA ENTRADA (°C)	104	30
21	TEMPERATURA SAÍDA (°C)	38	38
22	PRESSÃO DE OPERAÇÃO (bar man.)	6,0	4,0
23	Nº DE PASSES POR CASCO		
24	VELOCIDADE DE CIRCULAÇÃO (m/s)		
25	QUEDA DE PRESSÃO (bar)	CALC: PERM: 0,5	CALC: PERM: 0,7
26	FATOR INCRUSTAÇÃO (m ² .°C/ W)		
27	CALOR TROCADO (kW)	2 004	MLDT (CORRIGIDA) (°C)
28	RENDIMENTO – SERVIÇO ()	LIMPO	

**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE MECATRÔNICA E SISTEMAS MECÂNICOS**

NORMAS TÉCNICAS APLICÁVEIS ÀS CALDEIRAS

Módulo II – Fabricação e Montagem de Caldeiras e Trocadores de Calor

Anderson Xavier de Paiva Mello

Andrigo Demetrio da Silva

**Escola Politécnica - USP
São Paulo, Setembro de 2008.**

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	3
2. CALDEIRAS	3
3. NR-13	3
3.1. Disposições Gerais	4
3.2. Instalação de Caldeiras	7
3.3. Segurança na Operação de Caldeiras	7
3.4. Segurança na Manutenção de Caldeiras	8
3.5. Inspeção de Segurança de Caldeiras	9
4. ASME – <i>BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE</i>	10
4.1. Disposições Gerais	11
4.2. Materiais	11
4.3. Projeto	12
5. CONCLUSÃO	13
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	13

1. INTRODUÇÃO

Por definição, caldeira é um recipiente metálico cuja função é a produção de vapor através do aquecimento da água. São empregadas em processos industriais, na alimentação de máquinas térmicas, autoclaves para esterilização de materiais diversos, cozimento de alimentos pelo vapor, calefação ambiental, entre outras.

Portanto qualquer problema que elas apresentem não significa apenas uma parada para a manutenção, mas uma paralisação na produção e grande risco à segurança.

No Brasil, desde 1943, a CLT contempla a preocupação com a segurança de caldeiras, porém somente a partir de 1978 foi criada a Norma Regulamentadora sobre Caldeiras e Recipientes de Pressão, a NR-13, que estabeleceu medidas de segurança para usuários destes sistemas. No final de 1994, a Secretaria de Segurança e Saúde no Trabalho publicou no Diário Oficial da União o novo texto da NR-13 elaborado por uma comissão dos representantes de empresas, governo e trabalhadores, que define normas de instalação, segurança na operação e manutenção, e inspeção das caldeiras e vasos de pressão.

2. CALDEIRAS

Neste trabalho o objetivo é discorrer sobre as disposições gerais relativas às caldeiras a vapor presentes na NR-13, na Norma Técnica ASME e outras normas relacionadas às Caldeiras, pois são informações importantes para Engenheiros de Suprimentos que estejam envolvidos em processos de negociação, aquisição, preservação, instalação, operação e manutenção destes equipamentos.

3. NR-13

A NR-13 é uma norma do Ministério do Trabalho e Emprego do Brasil, e tem como objetivo condicionar a operação de vasos de pressão e caldeiras. Foi criada em 8 de junho de 1978, sofrendo revisão em 8 de maio de 1984.

Um Manual Técnico sobre a NR-13 foi elaborado pelo Grupo Técnico Tripartite, em 1996, composto por técnicos, a convite da Secretaria de Segurança e Saúde no Trabalho (SSST), do Ministério do Trabalho (MTb). Este manual é um instrumento estratégico de informação e esclarecimento para ser utilizado por

profissionais de inspeção, manutenção, operação, projeto, segurança e saúde, treinamento, cipeiros, sindicalistas, auditores fiscais do trabalho, dentre outros, que laboram para a prevenção de acidentes e para a melhoria das condições de trabalho.

3.1. Disposições Gerais

3.1.1 Caldeiras a vapor são equipamentos destinados a produzir e acumular vapor sob pressão superior à atmosférica, usando qualquer fonte de energia, excetuando-se os refratedores e equipamentos similares utilizados em unidades de processo;

3.1.2 Para efeito da NR-13, o Profissional Habilitado (PH) é aquele que tem competência legal para o exercício da profissão nas atividades referentes a projeto de construção, acompanhamento de operação e manutenção, inspeção e supervisão de inspeção de caldeiras e vasos de pressão, em conformidade com a regulamentação profissional vigente no País;

3.1.3 Pressão Máxima de Trabalho Permitida (PMTP), ou Pressão Máxima de Trabalho Admissível (PMTA), é a maior pressão compatível com projeto, resistência dos materiais usados, dimensões do equipamento e parâmetros operacionais.

3.1.4 Deve-se garantir a existência de todos os itens descritos a seguir:

- a) Válvula de segurança com pressão de abertura igual ou inferior à PMTA.
- b) Instrumento que indique a pressão do vapor acumulado.
- c) Injetor independentemente do sistema principal.
- d) Sistema de drenagem rápida de água, em caldeiras de recuperação.
- e) Sistema de indicação para controle do nível de água ou outro sistema que evite o superaquecimento por alimentação deficiente.

3.1.5 Toda caldeira deve ter afixado em seu corpo, em local visível e de fácil acesso, a placa de identificação indelével com as seguintes informações:

- a) Fabricante.
- b) Número de ordem dado pelo fabricante da caldeira.
- c) Ano de fabricação.
- d) PMTA e Pressão de teste hidrostático.

- f) Capacidade de produção de vapor.
- g) Área da superfície de aquecimento.
- h) Código de projeto e ano de edição.

Além da placa de identificação, deve constar, em local visível, a categoria da caldeira e seu número ou código de identificação.

3.1.6 Toda Caldeira deve possuir, no estabelecimento onde estiver instalada, a seguinte documentação, devidamente atualizada:

- a) Prontuário da Caldeira, que contenha as seguintes informações:
 - código de projeto e ano de edição;
 - especificação dos materiais;
 - procedimentos utilizados na fabricação, montagem, inspeção final e determinação da PMTA;
 - desenhos necessários ao monitoramento da vida útil da caldeira;
 - características funcionais;
 - dados dos dispositivos de segurança;
 - ano de fabricação;
 - categoria da caldeira.
- b) Registro de Segurança.
- c) Projeto de Instalação.
- d) Projetos de Alteração ou Reparo.
- e) Relatórios de Inspeção.

Quando inexistente ou extraviado, o Prontuário da Caldeira deve ser reconstituído pelo proprietário, com responsabilidade técnica do fabricante ou PH, sendo imprescindível à reconstituição das características funcionais, dos dados dos dispositivos de segurança e dos procedimentos para determinação da PMTA.

Se a caldeira for transferida, os documentos devem acompanhá-la.

O proprietário da caldeira deverá apresentar, quando exigido pela autoridade competente, a documentação mencionada no subitem 3.1.6.

3.1.7 O Registro de Segurança deve ser constituído de livro próprio, com páginas numeradas, ou outro sistema equivalente onde serão registradas todas as ocorrências importantes capazes de influir nas condições de segurança da caldeira, e as ocorrências de inspeções de segurança periódicas e extraordinárias.

Caso a caldeira venha a ser considerada inadequada para uso, o Registro de Segurança deve conter tal informação e receber encerramento formal.

3.1.8 A documentação referida no subitem 3.1.6 deve estar sempre à disposição para consulta dos operadores, do pessoal de manutenção, de inspeção e das representações dos trabalhadores e do empregador na CIPA.

3.1.9 Para os propósitos da NR-13, as caldeiras são classificadas em três categorias conforme segue (ver figura 1):

- a) Caldeiras da categoria “A” são aquelas cuja pressão de operação é igual ou superior a 1960 kPa (19,98 kgf/cm²).
- b) Caldeiras categoria “C” são aquelas cuja pressão de operação é igual ou inferior a 588 kPa (5,99 kgf/cm²) e o volume é igual ou inferior a 100 litros.
- c) Caldeiras categoria “B” são todas aquelas que não se enquadram nas categorias anteriores.

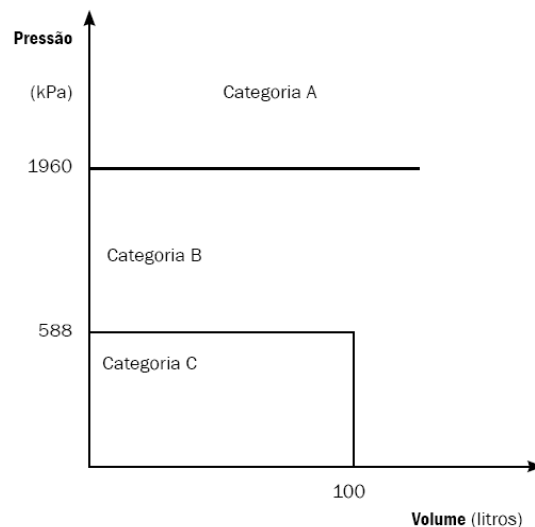


Figura 1. Campos das categorias de caldeiras.

3.2. Instalação de Caldeiras

3.2.1. A autoria do "Projeto de Instalação" de caldeiras a vapor é de responsabilidade de PH e deve obedecer aos aspectos de segurança, saúde e meio ambiente previstos nas NRs, convenções e disposições legais aplicáveis.

3.2.2. As caldeiras de qualquer estabelecimento devem ser instaladas em local específico para tal fim, denominado "Área de Caldeiras".

3.2.3. Em ambiente aberto, a "Área de Caldeiras" deve:

- a) estar afastada de, no mínimo, três metros de outras instalações do estabelecimento, de depósitos de combustíveis, do limite de propriedade de terceiros, do limite com as vias públicas;
- b) dispor de pelo menos duas saídas amplas, permanentemente desobstruídas e dispostas em direções distintas;
- c) dispor de acesso fácil e seguro, necessário à operação e à manutenção da caldeira, sendo que, para guarda-corpos vazados, os vãos devem ter dimensões que impeçam a queda de pessoas;
- d) ter sistema de captação e lançamento dos gases e material particulado, provenientes da combustão, para fora da área de operação atendendo às normas ambientais vigentes;
- e) dispor de iluminação conforme normas oficiais vigentes, e ter sistema de iluminação de emergência caso operar à noite.

3.2.4. Em ambiente confinado, a "Casa de Caldeiras" deve, além do já citado:

- a) constituir prédio separado, construído de material resistente ao fogo, podendo ter apenas uma parede adjacente a outras instalações do estabelecimento;
- c) dispor de ventilação permanente com entradas de ar desbloqueadas;
- d) dispor detector de vazamento quando for caldeira a combustível gasoso.
- e) não ser utilizada para qualquer outra finalidade;

3.3. Segurança na Operação de Caldeiras

3.3.1. Toda caldeira deve possuir "Manual de Operação" atualizado, em língua portuguesa, em local de fácil acesso aos operadores, contendo os procedimentos:

de partidas e paradas; operacionais de rotina; para situações de emergência; e de segurança, saúde e de preservação do meio ambiente.

3.3.2. Os instrumentos e controles de caldeiras devem ser mantidos calibrados e em boas condições operacionais.

3.3.3. A qualidade da água deve ser controlada e tratamentos devem ser implementados, quando necessários para compatibilizar suas propriedades físico-químicas com os parâmetros de operação da caldeira.

3.3.4. Toda caldeira será operada e controlada por operador de caldeira.

3.3.5. O atestado de conclusão do primeiro grau (atual ensino fundamental) é pré-requisito mínimo para participação como aluno no "Treinamento de Segurança na Operação de Caldeiras". Este requisito é importante, à medida que é necessária uma capacidade básica de leitura para comunicação de falhas, acidentes ou emergências nas áreas onde estão os equipamentos.

3.4. Segurança na Manutenção de Caldeiras

3.4.1. Todos os reparos ou alterações em caldeiras devem respeitar o projeto de construção e prescrições do fabricante quanto aos materiais, procedimentos de execução, de controle de qualidade, qualificação e certificação de pessoal.

3.4.2. "Projetos de Alteração ou Reparo" devem ser concebidos previamente sempre que as condições de projeto forem modificadas e sempre que forem realizados reparos que possam comprometer a segurança.

3.4.4. Todas as intervenções que exijam mandrilamento ou soldagem em partes que operem sob pressão devem ser seguidas de teste hidrostático, com características definidas pelo PH".

3.4.5. Os sistemas de controle e segurança da caldeira devem ser submetidos à manutenção preventiva ou preditiva.

3.5. Inspeção de Segurança de Caldeiras

3.5.1. As caldeiras devem ser submetidas a inspeções de segurança inicial, periódica e extraordinária conforme prazos estabelecidos na NR-13.

3.5.2. Inspeção de segurança inicial: deve ser feita em caldeiras novas, antes da entrada em funcionamento, no local de operação, devendo compreender exames interno e externo, teste hidrostático e de acumulação.

3.5.3. Inspeção de segurança periódica: constituída por exame interno e externo, deve ser executada nos prazos máximos apresentados na NR-13 (12 meses para caldeiras das categorias A, B e C, e para caldeiras de recuperação de álcalis de qualquer categoria; 24 meses para caldeiras da categoria A, desde que aos 12 meses sejam testadas as pressões de abertura das válvulas de segurança; 40 meses para caldeiras especiais).

3.5.4. Estabelecimentos, que possuam "Serviço Próprio de Inspeção de Equipamentos", podem estender os períodos entre inspeções de segurança, respeitando os seguintes prazos máximos: 18 meses para caldeiras das categorias B e C; 30 meses para caldeiras da categoria A.

3.5.5. Ao completar 25 anos de uso, na inspeção subsequente, as caldeiras devem ser submetidas à rigorosa avaliação de integridade para determinar a sua vida remanescente e novos prazos para inspeção, caso ainda tenham condições de uso.

3.5.6. As válvulas de segurança devem ser inspecionadas conforme segue:

- a) pelo menos uma vez por mês, mediante acionamento manual da alavanca, em operação, para caldeiras das categorias B e C;
- b) desmontando, inspecionando e testando em bancada as válvulas flangeadas e, no campo, as válvulas soldadas, recalibrando-as numa frequência compatível com a experiência operacional da mesma, respeitando os limites descritos na NR-13.

3.5.7. Inspeção de segurança extraordinária: deve ser feita:

- a) sempre que a caldeira passar por ocorrência que comprometa sua segurança;
- b) quando houver alteração/reparo capaz de alterar as condições de segurança;

- c) antes de ser reativada, quando permanecer inativa por mais de seis meses;
- d) quando houver mudança de local de instalação da caldeira.

3.5.8. Inspeccionada a caldeira, deve ser emitido "Relatório de Inspeção", que passa a fazer parte da sua documentação.

3.5.8.1. O "Relatório de Inspeção" deve conter no mínimo: dados constantes na placa de identificação da caldeira, categoria da caldeira, tipo da caldeira, tipo de inspeção executada, data de início e término da inspeção, descrição das inspeções e testes executados, resultado das inspeções e providências, itens da NR-13 ou de outras exigências legais que não estão sendo atendidas, conclusões, recomendações e providências necessárias, data prevista para a nova inspeção da caldeira, nome legível, assinatura e número do registro no conselho profissional do PH e nome legível e assinatura de técnicos que participaram da inspeção.

4. ASME – BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE

A norma da American Society of Mechanical Engineers (ASME) sobre caldeiras e vasos de pressão existe desde 1914, e estabelece parâmetros de projeto, fabricação e inspeção dos equipamentos citados. Atualmente ela é atualizada com frequência anual, por um comitê de mais de 950 engenheiros voluntários, e está em sua edição 2007 - Boiler and Pressure Vessel Code – 2007 Edition.

Em relação às caldeiras, são aplicáveis as seguintes seções desta norma:

- Seção I – Caldeiras;
- Seção IIA – Especificações de Materiais Ferrosos;
- Seção IIB – Especificações de Materiais Não-ferrosos;
- Seção IIC – Especificações de Materiais para Soldas;
- Seção IID – Especificações de Materiais Usuais;
- Seção V – Ensaios Não-destrutivos;
- Seção VII – Orientações Recomendadas para a Preservação de Caldeiras;
- Seção IX – Qualificações para Soldagem;
- Seção Etiqueta – Etiqueta de identificação.

A seguir, são apresentados alguns aspectos relevantes desta publicação que norteia os projetos destes equipamentos industriais.

4.1. Disposições Gerais

4.1.1 As recomendações da Seção I são aplicáveis às caldeiras nas quais o vapor é gerado com uma pressão maior que a atmosférica e caldeiras destinadas a operar com pressões superiores a 11 atm e/ou temperaturas acima de 121°C.

4.1.2 Para os casos nos quais os parâmetros são inferiores aos especificados no item 4.1.1, pode ser aplicada a Seção IV desde que sejam atendidos seus requisitos.

4.2. Materiais

4.2.1 Os materiais submetidos à pressão devem obedecer a uma das especificações apresentadas na Seção II e se limitar aos materiais das tabelas desta mesma seção, exceto os apresentados nos itens 8.2, 8.3, 10 e 11 da Seção I.

4.2.2 Os materiais, além de atender às especificações da Seção I, não devem trabalhar em temperaturas acima daquelas especificadas nas tabelas da Seção II.

4.2.3 Chapas: A chapa de aço que fazem parte das caldeiras sujeita à pressão, expostas ou não ao fogo ou produtos de combustão, devem satisfazer às especificações para chapas de vasos de pressão (SA-202 Aço Liga Cromo-Manganês-Silício, SA-203 Aço Liga Níquel, SA-285 Aço Carbono, etc.).

4.2.4 Forjados: Tambores forjados sem costura conforme SA-266 para Aço Carbono e SA-336 para Aço Liga podem ser usados em qualquer parte de uma caldeira, desde que atendidas as especificações conforme o item 4.2.3.

4.2.5 Fundidos: Os materiais fundidos devem ser usados na construção de vasos e partes de vasos conforme as especificações para cada parte apresentadas no item 4.2.6. Os valores de tensão admissíveis serão multiplicados por um fator que depende do tipo/qualidade da fundição (na norma estes valores estão no item 25 da Seção I). No caso do ferro fundido usado em partes sob pressão normal, este deve

atender a uma das seguintes normas: ASME B16.1 Cast Iron Pipe Flanges and Flanged Fittings, ASME B16.4 Cast Iron Threaded Fittings e ASTM A126.

4.2.6 Tubos e partes que contêm pressão: Esses elementos devem atender às especificações do item 9 da norma (não listadas aqui devido à quantidade de especificações no documento original) e às tabelas da Seção II, parte D.

4.3. Projeto

4.3.1 O proprietário deverá apresentar projeto com o diagrama do sistema de pressão da caldeira, certificado por um PH, e com as seguintes informações (Uma cópia deste diagrama deve ser anexada ao *Data Book* do equipamento):

- A localização das várias partes sob pressão, com o caminho do fluxo de vapor;
- Uma linha mostrando as máximas pressões suportadas, indicando a variação de pressão esperada ao longo do fluxo do vapor;
- As máximas pressões de trabalho admissíveis para as diversas partes;
- A localização e pressão dos dispositivos de proteção contra sobrepressão.

Com relação aos parâmetros de projeto, a norma apresenta alguns limites quanto à espessura mínima das chapas (1/4" ou 6mm) e quanto à variação na espessura (não deve ser mais do que 0,3mm menor que a espessura calculada).

No caso de tubos não há tolerância para a variação na espessura e esta deve atender ao valor considerado no cálculo.

A norma ASME ainda apresenta diretrizes para o cálculo ou especificações dos diversos elementos que constituem o sistema da caldeira.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foram analisadas, de forma simplificada, as principais normas que regem os procedimentos de projeto, operação, manutenção e inspeção de caldeiras.

A NR 13 é de fácil acesso a quem possa interessar, pois é uma norma regulamentadora, elaborada e disponibilizada pelo ministério do Trabalho. Em oposição, a norma ASME não é disponibilizada ao público em geral e são encontrados poucos, e desatualizados, exemplares nas bibliotecas públicas. Há ainda menos documentos quando falamos em textos traduzidos, o que restringe mais o conhecimento, uso e aplicação das normas ASME no Brasil.

É de grande importância que os profissionais envolvidos com aquisição, preservação, projeto, inspeção, manutenção, tenham conhecimento das normas tratadas neste trabalho e outras normas, técnicas ou regulamentadoras, nacionais ou internacionais, elaboradas por instituições e comitês ou pelo próprio cliente, para que tenhamos equipamentos com a especificação correta, aplicados adequadamente e com tempo de vida prolongado.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALTAFINI, C. R. Curso de Engenharia Mecânica. Disciplina de Máquinas Térmicas – Apostila sobre Caldeiras. Universidade de Caxias do Sul – Departamento de Engenharia Mecânica.

American Society of Mechanical Engineers - Boiler and Pressure Vessel Code – 2007 Edition <[http://www.asme.org/Codes/International Boiler Pressure.cfm](http://www.asme.org/Codes/International_Boiler_Pressure.cfm)> acesso em 11/09/2008.

NR-13: Manual técnico de caldeiras e vasos de pressão. – Edição comemorativa 10 anos da NR-13. – 1. Reimpressão. – Brasília: MTE, SIT, DSST, 2006.