

MARINHA DO BRASIL
CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE GRAÇA ARANHA
ESCOLA DE FORMAÇÃO DE OFICIAIS DA MARINHA MERCANTE

HARON SILVA DE SOUZA BRAGA
ÉRICO JEAN OLIVEIRA CORDEIRO

TRATAMENTO DA ÁGUA DE ALIMENTAÇÃO E RISCOS DE EXPLOSÕES
INERENTES ÀS CALDEIRAS

Rio de Janeiro
2016

HARON SILVA DE SOUZA BRAGA
ÉRICO JEAN OLIVEIRA CORDEIRO

**TRATAMENTO DA ÁGUA DE ALIMENTAÇÃO E RISCOS DE
EXPLOSÕES INERENTES ÀS CALDEIRAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como exigência para obtenção do título de Bacharel em Ciências Náuticas do Curso de Formação de Oficiais de Máquinas da Marinha Mercante, ministrado pelo Centro de Instrução Almirante Graça Aranha.

ORIENTADOR: Professor Jose Adilson Reis

**Rio de Janeiro
2016**

HARON SILVA DE SOUZA BRAGA
ÉRICO JEAN OLIVEIRA CORDEIRO

**TRATAMENTO DE ÁGUA DE ALIMENTAÇÃO E RISCOS DE EXPLOSÕES
INERENTES ÀS CALDEIRAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como exigência para obtenção do título de Bacharel em Ciências Náuticas do Curso de Formação de Oficiais de Máquinas da Marinha Mercante, ministrado pelo Centro de Instrução Almirante Graça Aranha.

Data da Aprovação: ____/____/____

Orientador: Professor Jose Adilson Reis

Assinatura do Orientador

NOTA FINAL: _____

Dedicamos este trabalho a
nossas famílias por sempre
acreditarem em nós, ao “quarto
Charlie” por permanecer junto
em meio às dificuldades
enfrentadas durante o curso

RESUMO

O presente trabalho aborda em seu conteúdo um breve estudo sobre caldeiras. Visando, então, mostrar sua definição e os tipos de caldeiras mais comuns existentes a bordo de navios mercantes, o tratamento da água de alimentação, e sua operação. Discorre, também, sobre os riscos de explosões devido a não observação à operação correta deste trocador de calor, explicando as reais causas dessas explosões e apresentando exemplos de tais fatos mostrando quão perigoso é este equipamento.

Palavras-chave: Caldeiras. Tratamento de água. Explosões

ABSTRACT

This paper reports on its contents a brief study of boilers. Aiming then show its definition and the most common types of boilers there are on board merchant ships, the treatment of feed water , and its operation . Talks also about the risks of explosions due to failure to observe the correct operation of this heat exchanger, explaining the real causes of explosions and presenting examples of such facts showing how dangerous this equipment is.

Keywords: Boilers. Water Treatment. Explosions

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Caldeira Flamatubular (vertical) | 14 |
| Figura 2 - Caldeira Escocesa | 15 |
| Figura 3 - Caldeira de tubos retos | 16 |
| Figura 4 - Caldeira de tubos curvos | 17 |
| Figura 5 - Caldeira com circulação forçada | 18 |
| Figura 6 - Caldeira Combinada | 19 |
| Figura 7 - Caldeira elétrica do tipo eletrodo..... | 21 |
| Figura 8 - Caldeiras elétrica do tipo eletrodo..... | 22 |
| Figura 9 - Explosão ocasionada por uma caldeira | 28 |
| Figura 10 - Corrosão em tubos de caldeiras | 30 |
| Figura 11 - Explosão de uma caldeira no SS Norway | 33 |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1 INTRODUÇÃO | 10 |
| 2 CONCEITO | 12 |
| 3 TIPOS DE CALDEIRAS | 13 |
| 3.1 Caldeiras Flammatubulares | 13 |
| 3.1.1 caldeiras escocesas | 15 |
| 3.2 Caldeiras Aquatubulares | 16 |
| 3.2.1 caldeiras de tubos retos | 16 |
| 3.2.2 caldeiras de tubos curvos..... | 17 |
| 3.2.3 caldeiras com circulação forçada | 18 |
| 3.3 Caldeiras combinadas aquatubular e flammatubular | 19 |
| 3.4 Caldeiras Elétricas | 20 |
| 4 TRATAMENTO DE ÁGUA PARA O ABASTECIMENTO DE CALDEIRAS | 23 |
| 4.1 Métodos de tratamento de água | 23 |
| 4.1.1 métodos externos..... | 23 |
| 4.1.1.1 Clarificação | 23 |
| 4.1.1.2 Abrandamento | 23 |
| 4.1.1.3 Desmineralização (troca iônica) | 24 |
| 4.1.1.4 Desgaseificação | 24 |
| 4.1.1.5 Remoção de sílica | 24 |
| 4.1.2 métodos internos..... | 24 |
| 4.1.2.1 Eliminação da dureza | 25 |
| 4.1.2.1.1 <i>Precipitação com fosfatos</i> | 25 |
| 4.1.2.1.2 <i>Tratamento com quelatos</i> | 25 |
| 4.1.2.2 Controle do pH e da alcalinidade | 26 |
| 4.1.2.3 Eliminação do oxigênio dissolvido | 26 |
| 4.1.2.4 Controle do teor de cloreto e de sólidos totais | 26 |
| 5 RISCOS DE EXPLOSÃO | 27 |
| 5.1 Superaquecimento como causa de explosão | 28 |
| 5.2 Choques térmicos | 29 |
| 5.3 Corrosão | 29 |
| 5.3.1 corrosão uniforme e localizada..... | 30 |
| 5.3.2 corrosão por metais dissimilares | 30 |
| 5.3.3 corrosão por tensão ("stress") | 31 |
| 5.3.4 corrosão pela formação de depósitos | 31 |
| 5.3.5 corrosão por ácido carbônico | 31 |

| | |
|---|-----------|
| 5.3.6 métodos de prevenção de corrosões | 32 |
| 5.4 Explosões causadas por aumento de pressão..... | 33 |
| 5.5 Explosão pelo lado dos gases | 34 |
| 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS | 36 |
| REFERÊNCIAS..... | 37 |

1 INTRODUÇÃO

A utilização de caldeiras, ao longo de sua história, é de grande contribuição na geração de energia em navios, entretanto, os cuidados com esses equipamentos devem ser bem rigorosos. Corrosões como o “pitting”, corrosão galvânica, corrosão por tensão, ataque cáustico ou fragilização por hidrogênio e as incrustações podem reduzir a eficiência das caldeiras, fazer maior consumo de combustível e a redução, também, da segurança do equipamento, podendo um acidente com caldeiras invalidar ou levar tripulantes a óbito ou até mesmo o navio a pique.

Em suma, caldeira é um equipamento que sua principal função é produzir vapor e conseqüentemente trabalho (energia térmica), energia esta que é usada em diversas partes do navio, como na movimentação de turbinas ligadas à propulsão, bombas (turbo bombas) ou com equipamentos que gerem energia elétrica (como um turbo gerador); aquecimento de água e também de óleos lubrificantes, óleos pesados como o Bunker ou mais leves como o MDO (Marine Diesel Oil) em navios, dentre diversas outras funções. As caldeiras podem ser classificadas como: Caldeiras Flamatubulares, Caldeiras Aquatubulares, Caldeiras Elétricas; sendo as caldeiras aquatubulares uma das mais perigosas, tendo em vista a sua forma de funcionamento; incrustações podem ocasionar grandes explosões.

Um dos cuidados mais importantes para não haver essas situações de risco, é o tratamento de água. Esta é dividida em dois tipos: Tratamento externo (Clarificação, Filtração, Abrandamento, Desmineralização) e o tratamento interno (Tratamento Químico). O tratamento de água visa obter a água ideal para a alimentação das caldeiras, água esta que não deposita substâncias incrustantes, não corrói o material do equipamento e seus acessórios e não ocasiona arraste ou espuma. O abastecimento com água ideal fará com que a probabilidade de incidência de uma explosão diminua significativamente e, proporcionalmente, aumentará a eficiência do equipamento.

Portanto, este presente trabalho visa principalmente orientar sobre o tratamento de água para o abastecimento de caldeiras, mostrando a sua importância e explicitando os tipos e alertar sobre os riscos do manuseio deste equipamento, visando sempre a manutenção preditiva e a preventiva deste trocador de calor, para que o mesmo tenha alto grau de segurança e eficiência, evitando assim acidentes e

explosões.

2 CONCEITO

Caldeira é um equipamento que produz vapor que tem como principal função produzir trabalho.

Em sua composição, a caldeira compreende três sistemas básicos separados. O sistema vapor, comumente chamado de lado de água da caldeira, o sistema combustível-ar-gás da combustão, chamado de lado de fogo da caldeira e o sistema de água de alimentação.

A entrada do sistema vapor é a que recebe o calor através de uma barreira de metal sólido, onde a água é aquecida, convertida em vapor e deixa o sistema na forma de vapor.

As entradas do sistema combustível-ar-gás da combustão ou lado de fogo da caldeira é onde o combustível e o ar de combustão são completamente misturados, e posteriormente queimados na câmara de combustão. A energia química é convertida, através da combustão, em energia térmica. Esta energia (Calor) é usada para a geração de vapor no sistema.

3 TIPOS DE CALDEIRAS

Geralmente, o vapor que é obtido em caldeiras é proveniente da água, elemento este que é dificilmente considerado puro quando encontrado na natureza contendo certa quantidade de impurezas granulares ou/e moleculares que fazem seu uso inviável para a alimentação de caldeiras.

Para Souza (2013), a água considerada ideal para alimentação de caldeiras é aquela que não deposita substâncias incrustantes, não corrói os metais da caldeira e seus acessórios e não ocasiona arraste ou espuma; evidentemente, água com tais características é difícil de se obter, sem antes proceder a um pré-tratamento que permita reduzir as impurezas a um nível aceitável, de modo a não prejudicar o funcionamento da caldeira.

Os constituintes geralmente encontrados junto com a água são sais dissolvidos inorgânicos e orgânicos, matéria orgânica em suspensão, material coloidal, gases dissolvidos e microorganismos.

As principais grandezas de qualidade da água são a Dureza Total, que é a soma das concentrações de cálcio e magnésio na água; e o pH, que é uma forma de se medir a concentração de ácido ou soda em uma água.

3.1 Caldeiras Flamatubulares

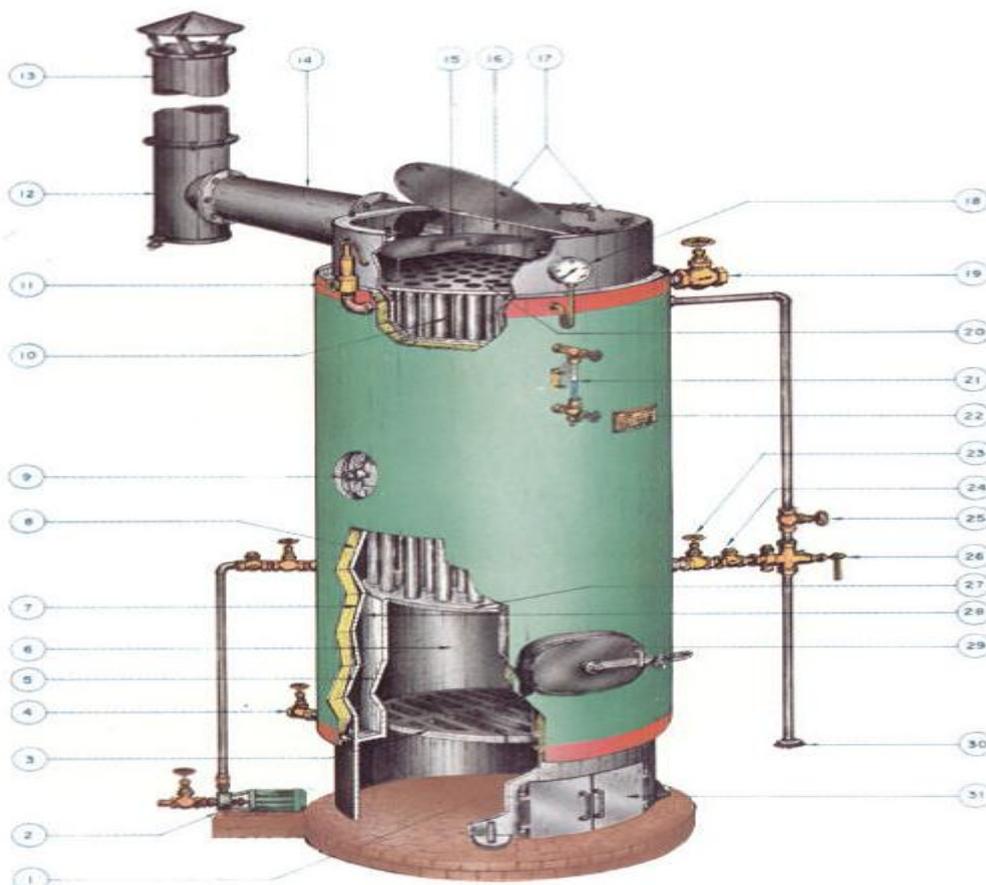
Conforme Martinelli Júnior (2003), também conhecidas como Fogotubulares, Pirotubulares, as caldeiras flamatubulares são aquelas em que os gases provenientes transitam pelo interior dos tubos, ficando por fora a água a ser aquecida ou vaporizada. Para Chd Válvulas (2005), a superfície de aquecimento das caldeiras flamatubulares é muito pequena, conseqüentemente tem também uma baixa vaporização específica (12 a 14 kg de vapor gerado/m²); sendo o espaço ocupado por ela proporcionalmente maior se comparada aos outros tipos de caldeiras, embora já existam modelos de flamatubulares compactos. Paulo Vitor tem a visão que nas caldeiras horizontais, geralmente são construídas para produção máxima de até 10000 kg/h, a uma pressão máxima de vapor de 18 bar, com

vaporização específica de 30 a 40 kg por metro quadrado de superfície de aquecimento.

Quando operadas com combustíveis líquidos ou gasoso, o queimador é instalado na parte frontal da fornalha. Predomina, assim, a troca de calor por radiação luminosa e por radiação gasosa é intensificado nas partes posteriores da caldeira. A fornalha e os tubos ficam circundados de água e são ancorados nos espelhos (discos externos) por solda ou por mandrilagem

Essas caldeiras têm a vantagem do baixo custo de aquisição, de exigir pouca alvenaria e atender aumentos instantâneos de demanda de vapor, entretanto, como desvantagens, este equipamento tem baixo rendimento térmico, partida lenta, limitação de pressão de operação (máx. 15 kgf/cm²), capacidade de produção limitada, baixa taxa de vaporização (kg de vapor/m².hora), e a não facilidade para instalação de superaquecedores, pré-aquecedores e economizador.

Figura 1 - Caldeira Flamatubular (vertical)



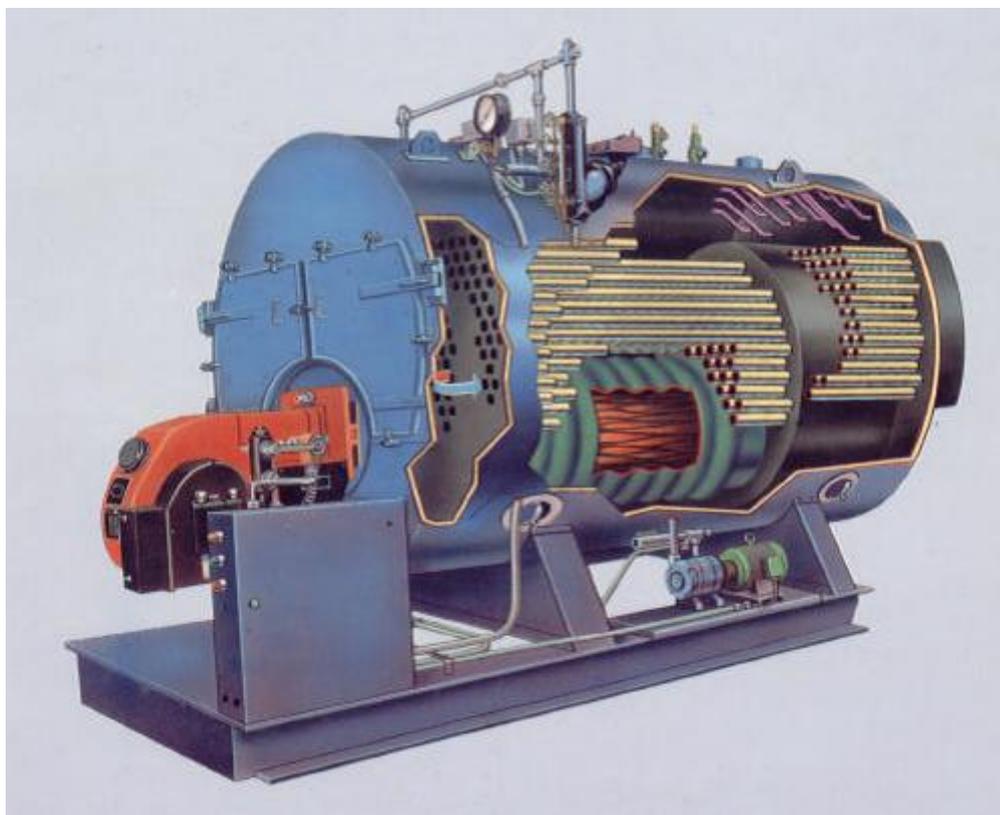
Fonte: Apostila Geradores de Vapor.

3.1.1 caldeiras escocesas

É uma espécie de caldeira flamatubular, sendo este tipo o mais moderno e evoluído. Os gastos com instalações especiais ou colunas de aço ou alvenaria são nulos. Esta caldeira possui um corpo cilíndrico que contém um tubulão sobre o qual existe um conjunto de tubos de pequeno diâmetro. Geralmente contém neste tipo de caldeira uma câmara de combustão de tijolos refratários na parte posterior, a que recebe os gases produtos da combustão, e os conduz para o espelho traseiro. Esses equipamentos operam com óleo ou gás e podem ter o rendimento térmico elevado, chegando a 83% e sua perda por radiação não ultrapassa a 1%.

Para Souza (2013), esse tipo de caldeira foi concebido especialmente para uso marítimo, por ser bastante compacta. São concepções que utilizam tubulação e tubos de menor diâmetro, todos os equipamentos indispensáveis ao seu funcionamento são incorporados a uma única peça, constituindo-se assim, num todo transportável e pronto para operar de imediato.

Figura 2 - Caldeira Escocesa



Fonte: Monografia (APMA) sobre Tratamento de água aplicado às caldeiras .

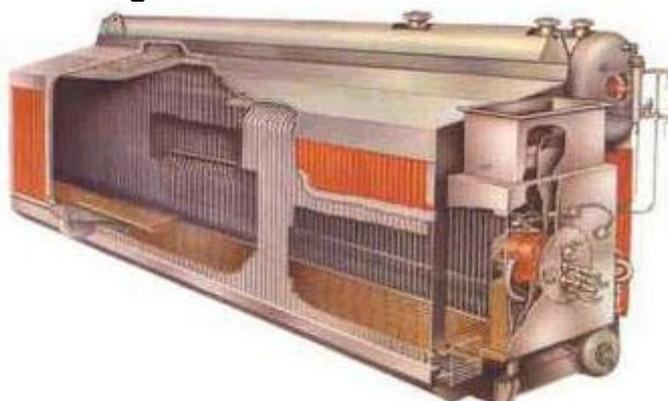
3.2 Caldeiras Aquatubulares

Segundo Altafini (2002), as caldeiras aquatubulares se caracterizam pela circulação externa dos gases de combustão e os tubos conduzem massa de água e vapor. Este tipo de caldeira possui a produção de vapor maior que a das flamatubulares e são de utilização mais ampla, pois possuem vasos pressurizados internamente e de menores dimensões relativas. Isso viabiliza econômica e tecnicamente o emprego de maiores espessuras e, portanto, a operação em pressões mais elevadas. Outra característica importante desse tipo de caldeira é a possibilidade de adaptação de acessórios, como o superaquecedor, que permite o fornecimento de vapor superaquecido, necessário ao funcionamento das turbinas. As caldeiras aquatubulares têm uma subclassificação que as divide em 3 partes: Caldeiras de tubos retos, Caldeiras de tubos curvos e Caldeiras de circulação forçada.

3.2.1 caldeiras de tubos retos

Podendo possuir tambor transversal ou longitudinal, estas caldeiras são ainda bastante utilizadas devido, entre outras coisas, a possuírem para fins de limpeza ou troca, causarem pequena perda de carga, exigirem chaminés pequenas, e porque também todos os tubos principais são iguais necessitando de poucas formas especiais.

Figura 3 - Caldeira de tubos retos



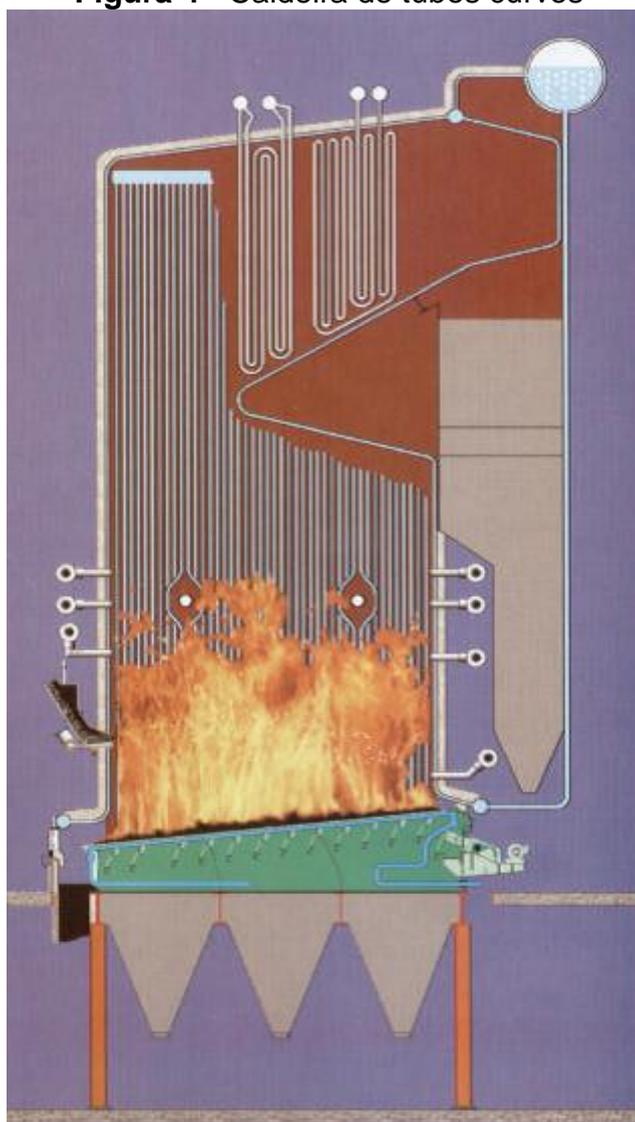
Fonte: Apostila sobre Caldeiras - Universidade de Caxias do Sul .

3.2.2 caldeiras de tubos curvos

Possuem ilimitada capacidade de produzir vapor, e por isso a sua escolha para utilização em centrais térmicas que exigiam geradores de grandes capacidades de produção.

Entre suas vantagens se encontram uma fácil manutenção, tanto para limpeza quanto para reparos, rápida vaporização, sendo este que atinge maior vaporização específica com valores de 28 a 30 kg.v/m² nas instalações normais, podendo atingir até 50 kg.v/m² nas caldeiras de tiragem forçada; entretanto exige um controle especial no tratamento de água de alimentação na operação dessas caldeiras.

Figura 4 - Caldeira de tubos curvos

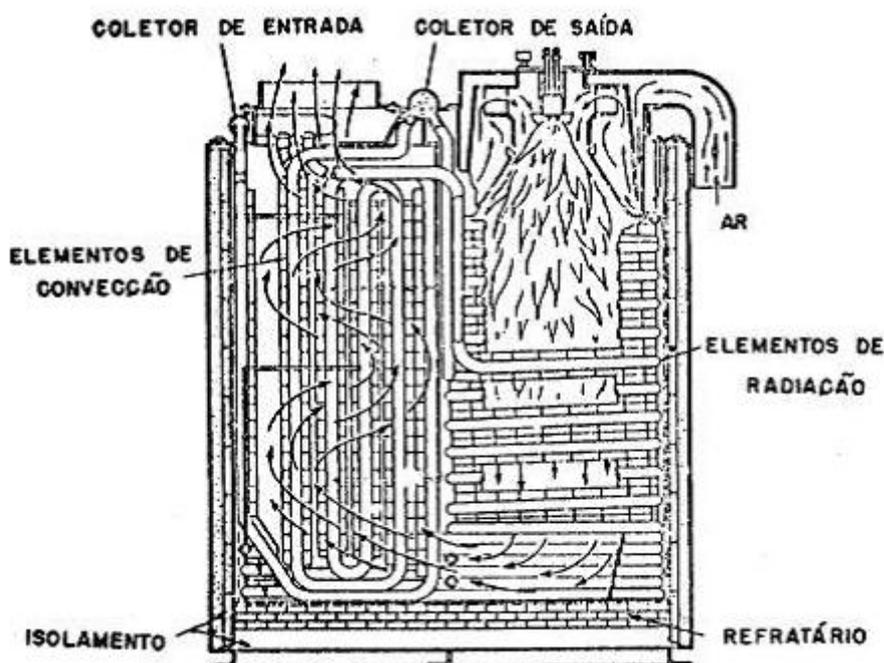


Fonte: Apostila sobre Caldeiras - Universidade de Caxias do Sul.

3.2.3 caldeiras com circulação forçada

Há uma circulação natural no interior dos tubos promovida pela diferença de pesos específicos de água de alimentação fria, com a água aquecida e misturada com bolhas de vapor; mas fatores como incrustações, variações de carga, dentre outras coisas tornam-se obstáculos a esta circulação, logo, por mais que haja vários cuidados, não é possível uma circulação orientada por gravidade. Pensando nisso, substituiu-se a circulação por gravidade pela circulação forçada por uma bomba de alimentação e com isto reduz-se o diâmetro dos tubos, aumenta-se o circuito de tubos e estes podem dispor-se em forma de uma serpentina continua formando o revestimento da fornalha, melhorando-se a transmissão de calor e reduzindo-se o tamanho dos tambores, coletores e tornando mínimo o espaço requerido.

Figura 5 - Caldeira com circulação forçada



Fonte: Geradores de Vapores - Universidade do Rio Grande do Sul.

Para Martinelli Júnior (2003), estes tipos de caldeiras, as aquatubulares, se diferenciam das flamatubulares no fato da água circular no interior dos tubos e os gases quentes se acham em contato com a sua superfície externa, característica

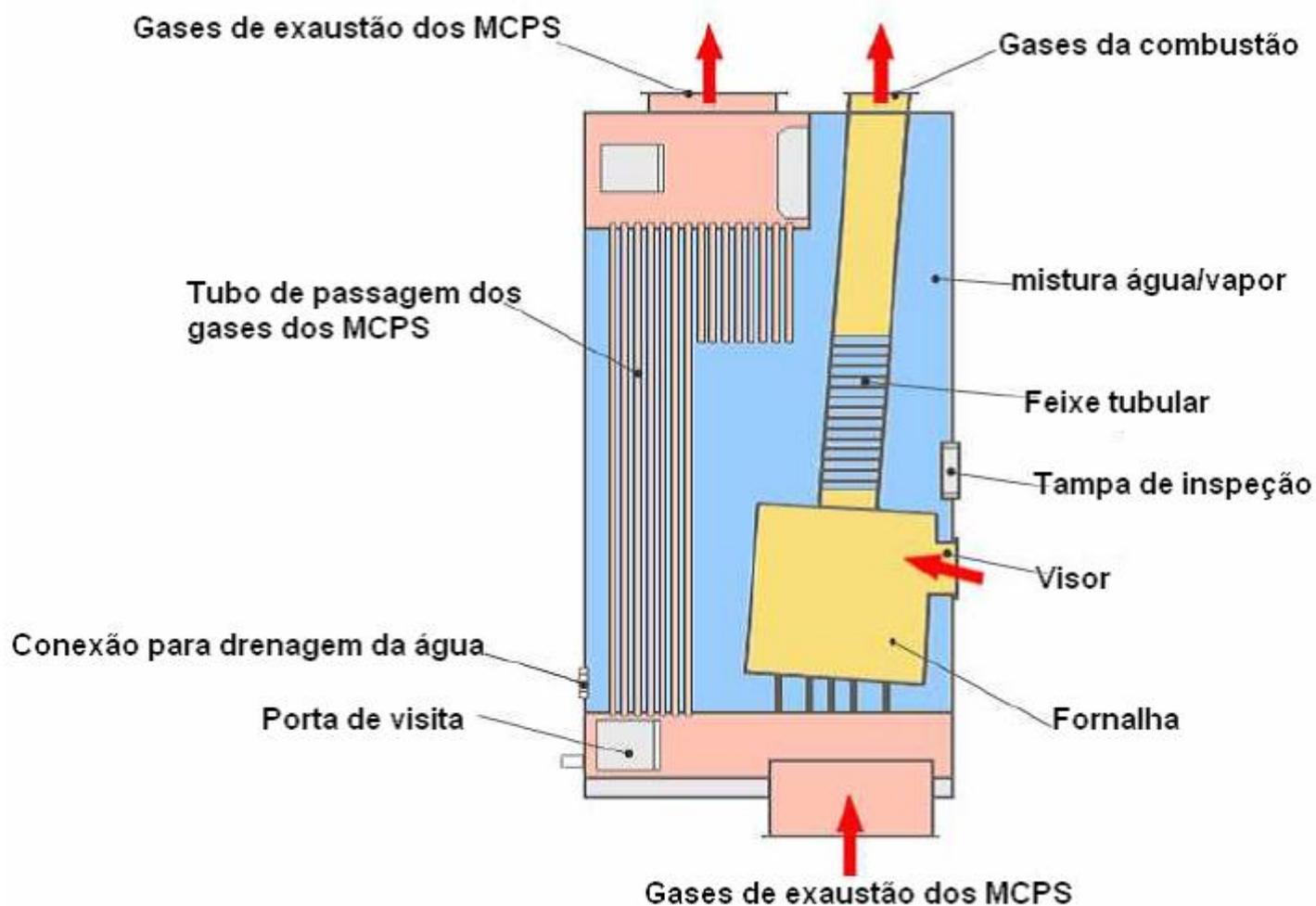
inversa das Pirotubulares.

3.3 Caldeiras combinadas aquatubular e flamatubular para navios mercantes

Segundo Zigmantas (2011), determinados navios mercantes de propulsão a motor, para economia de espaço na praça de máquinas, fazem o uso de caldeiras combinadas para a geração de vapor para as máquinas auxiliares e demais consumidores de vapor do navio.

A figura abaixo ilustra uma caldeira típica combinada (oil fired and exhaust gas boiler) para aplicação de navios mercantes de propulsão a motor.

Figura 6 - Caldeira Combinada



Fonte: Caldeiras (CAD-1).Marinha do Brasil-Diretoria de Portos e Costas.

Quando o navio está em operação no porto, com os MCPS parados, o queimador mantém a combustão na fornalha e os gases produzidos aquecem a água no interior do feixe tubular, onde a mesma evapora e o vapor gerado é comunicado para as auxiliares e os outros demais consumidores de vapor do navio. Com isso, a caldeira está em operação com aquatubular.

Em viagem, o queimador é desligado e os gases oriundos da combustão dos MCPS aquecem a água no interior da câmara de armazenamento (mistura água/vapor) e o vapor que ali for gerado é comunicado para os consumidores do navio.

Mas pela ocorrência dos gases de descarga produzirem a evaporação da água, nesta situação, a caldeira funcionando assim é denominada caldeira de recuperação de gases de descarga ou recuperadora de calor.

3.4 Caldeiras Elétricas

São caldeiras de concepção bem simples, e são basicamente compostas de um vaso de pressão onde a água é aquecida por eletrodos ou resistências elétricas.

Continuando com o pensamento de Zigmantas (2011), nas caldeiras com resistências elétricas, a água é aquecida através de resistências blindadas imersas diretamente no líquido. Já nas caldeiras de eletrodos, o aquecimento do fluido (água) é feito através da passagem de corrente elétrica diretamente na água, que se esquentam por efeito Joule. As caldeiras elétricas, são fáceis de usar e de automatizar, com eficiência da ordem de 95%, e ainda obtêm as vantagens:

- a) ausência de poluição ambiental;
- b) manutenção simples;
- c) não há necessidade de área para estocagem de combustível e
- d) resposta rápida a variações no consumo de vapor.

Mas esses tipos de caldeiras também contam com algumas desvantagens, podemos citar o elevado custo de operação em razão dos custos de energia elétrica, ou seja, é necessário uma corrente elétrica elevada, o que condiz em geradores mais potentes e de maior tamanho para os navios, ocupando maior espaço na praça

de máquinas dos mesmos.

A figura abaixo mostra caldeira elétrica do tipo eletrodo.

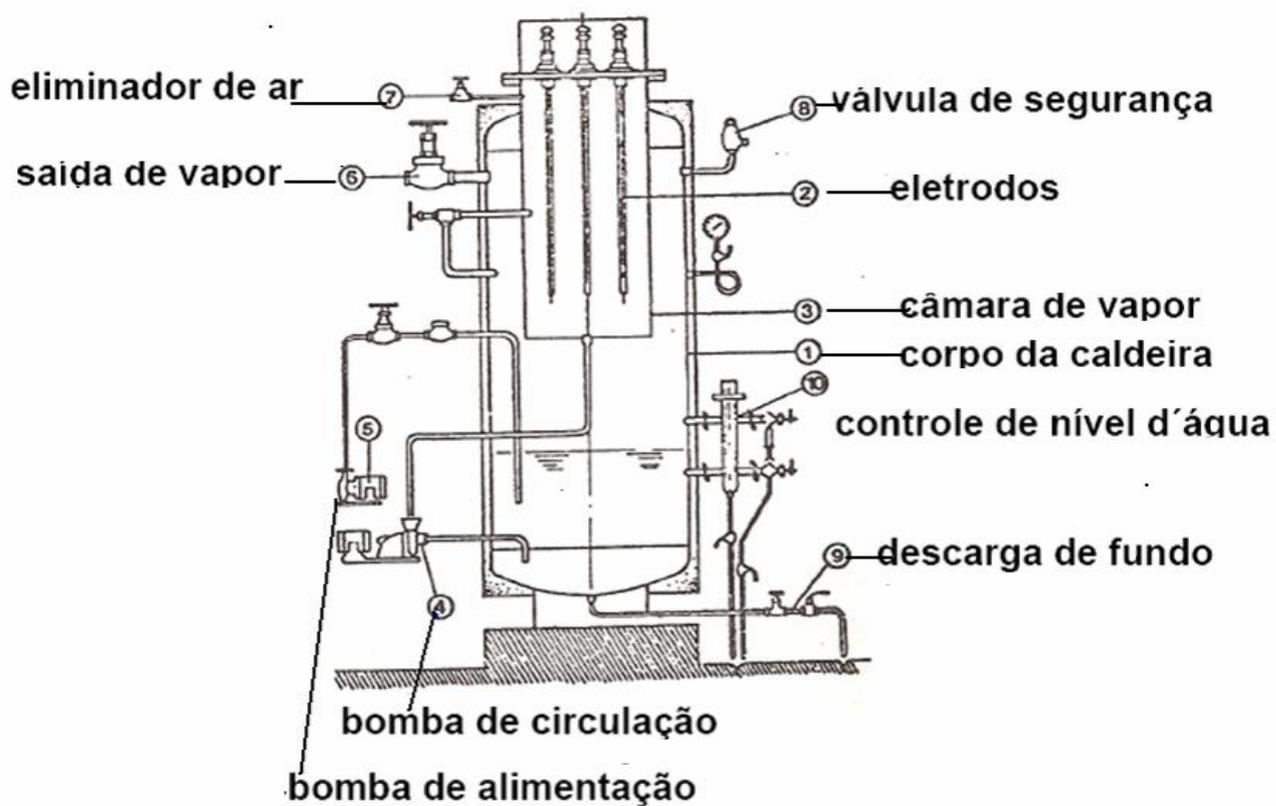
Figura 7 - Caldeira elétrica do tipo eletrodo



Fonte: Caldeiras (CAD-1).Marinha do Brasil-Diretoria de Portos e Costas.

Já a figura da próxima página mostra um esquema simplificado do mesmo tipo de equipamento (caldeira elétrica com eletrodo), evidenciando os eletrodos, a bomba de circulação e a de alimentação, válvula de extração de fundo e etc.

Figura 8 - Caldeiras elétricas do tipo eletrodo



Fonte: Caldeiras (CAD-1).Marinha do Brasil-Diretoria de Portos e Costas.

4 TRATAMENTO DE ÁGUA PARA O ABASTECIMENTO DE CALDEIRAS

4.1 Métodos de tratamento de água

Os métodos de tratamento de água são divididos em dois grandes grupos, os externos e os internos.

Os externos são: Clarificação, Abrandamento, Desmineralização, Desgaseificação e Remoção de sílica.

Os internos são: A base de fosfato, a base de quelatos, Sulfito de sódio, Hidrazina e Soda.

4.1.1 métodos externos

4.1.1.1 Clarificação

Segundo Altafini (2002), a Clarificação é um processo que consiste na prévia floculação, decantação e filtração da água visando reduzir a presença de sólidos em suspensão.

4.1.1.2 Abrandamento

O Abrandamento é a remoção total ou parcial dos sais de cálcio e magnésio que estão na água, em outras palavras, é a diminuição da dureza.

4.1.1.3 Desmineralização (troca iônica)

Para Altafini (2002), a Desmineralização é um processo do qual são usadas algumas substâncias sólidas e insolúveis, que possuem a propriedade de, quando em contato com soluções de íons, trocar esses íons por outros de sua própria estrutura sem que haja alterações de suas características estruturais. Existem dois tipos de trocadores: de cátions e de ânions.

4.1.1.4 Desgaseificação

É o emprego de equipamentos especiais que aquecem a água com o objetivo de eliminar os gases dissolvidos. Este vapor pode ser usado direto para o aquecimento da água a ser desgaseificada.

4.1.1.5 Remoção de sílica

Segundo Altafini (2002), a sílica produz uma incrustação muito dura e muito perigosa. Os tratamentos normalmente empregados no interior da caldeira não eliminam a sílica. Os métodos mais usados para a remoção da sílica são a troca iônica e o tratamento com óxidos de magnésio calcinado.

4.1.2 métodos internos

Este método se constitui na eliminação da dureza, controle do pH e da sua alcalinidade, na eliminação do oxigênio dissolvido, e no controle dos cloretos e no teor total de sólidos.

4.1.2.1 Eliminação da dureza

Conforme Altafini (2002), os sais de cálcio e magnésio precipitam como carbonatos e sulfatos, formando os depósitos duros e isolantes do calor que são as incrustações. Embora exista uma unidade internacional (MEQ) miliequivalente, para exprimir a dureza, diversos países industrializados utilizam-se de medidas diferentes. No Brasil costuma-se exprimir a dureza em ppm (partes por milhão).

Deve-se distinguir:

-a dureza total: que é a medida indicativa da quantidade total de sais de cálcio e magnésio.

-a dureza de não carbonatos ou permanente: atribuída à presença de sais de magnésio, cloretos e sulfatos.

-a dureza temporária: essencialmente devida aos bicarbonatos e carbonatos. A dureza temporária é igual a diferença entre a dureza total e a permanente.

Existem dois métodos de eliminar a dureza:

4.1.2.1.1 Precipitação com fosfatos

Esses reagem com os sais de cálcio e de magnésio formando um produto insolúvel que não adere às partes metálicas da caldeira. O precipitado forma um lodo que se acumula no fundo na caldeira, sendo eliminado regularmente por meio de purgas.

4.1.2.1.2 Tratamento com quelatos

Nesse tratamento não há precipitação de cálcio, nem do magnésio. Forma, porém, produtos solúveis não em forma de lama. Os quelantes mais utilizados são o ETDA e o NTA.

4.1.2.2 Controle do pH e da alcalinidade

Para o controle do pH, são utilizados produtos como a soda a 50% e a soda (hidróxido de sódio) em lentilhas. Em geral, não é necessário adicionar ácidos para regular o pH e a alcalinidade porque, geralmente, as águas de alimentação de caldeiras são bastante ácidas. No entanto, o controle da mesma é importante para se evitar a corrosão do ferro pela água. A medida do pH de uma água permite avaliar qualitativamente o grau de alcalinidade da mesma. O controle adequado do pH da água ou da alcalinidade, evita as incrustações e controla a formação de lama. Por outro lado, uma alcalinidade mais alta provoca formação de espuma e ataca a camada preta protetora de magnetita (Fe_3O_4), podendo provocar corrosão intergranular.

4.1.2.3 Eliminação do oxigênio dissolvido

Este tratamento tem o intuito de evitar os riscos de corrosão. A eliminação é feita pela reação entre alguns agentes redutores e o oxigênio. Os dois produtos mais usados são o sulfito de sódio e a hidrazina.

4.1.2.4 Controle do teor de cloreto e de sólidos totais

Comumente há ocorrências de corrosão quando a concentração de cloretos é muito alta e com o alto teor de sólidos, podem aparecer problemas de arraste. Através de purgas que é feito o tratamento sempre que for necessário nesses casos.

5 RISCOS DE EXPLOSÃO

Para Altafini (2002), o emprego de caldeiras implica na presença de riscos dos mais diversos: explosões, incêndios, choques elétricos, intoxicações, quedas, ferimentos diversos, etc. Os riscos de explosões são, entretanto, os mais importantes pelas seguintes razões:

1) por se encontrar presente durante todo o tempo de funcionamento, sendo imprescindível seu controle de forma contínua.

2) em razão da violência com que as explosões acontecem. Na maioria dos casos suas consequências são catastróficas, em virtude da enorme quantidade de energia liberada instantaneamente.

3) por envolver não só os operadores, mas como também as pessoas que trabalham nas redondezas.

4) porque sua prevenção deve ser considerada em todas as fases: projeto, fabricação, operação, manutenção, inspeção e outras.

Figura 9 - Explosão ocasionada por uma caldeira



Fonte: atstreinamentos.blogspot.com

5.1 Superaquecimento como causa de explosão

Quando o aço da caldeira é submetido à altas temperaturas, sendo elas acima das admissíveis, ocorre a redução da resistência do aço e com isso, proporcionalmente, o risco de explosão também. Contudo, pode haver também danos como empenamentos, abaulamentos e envergamentos. As principais causas do superaquecimento segundo Altafini (2002) são:

- 1) seleção inadequada do aço no projeto da caldeira;
- 2) uso de aços com defeitos;
- 3) prolongamento excessivo dos tubos;
- 4) queimadores mal posicionados;
- 5) incrustações (problema clássico);
- 6) operação em marcha forçada e
- 7) falta de água nas regiões de transmissão de calor

5.2 Choques térmicos

Os choques térmicos acontecem comumente por causa de frequentes paradas e recolocação em marcha de queimadores, lembrando que as incrustações das superfícies favorecem nos efeitos dos choques térmicos.

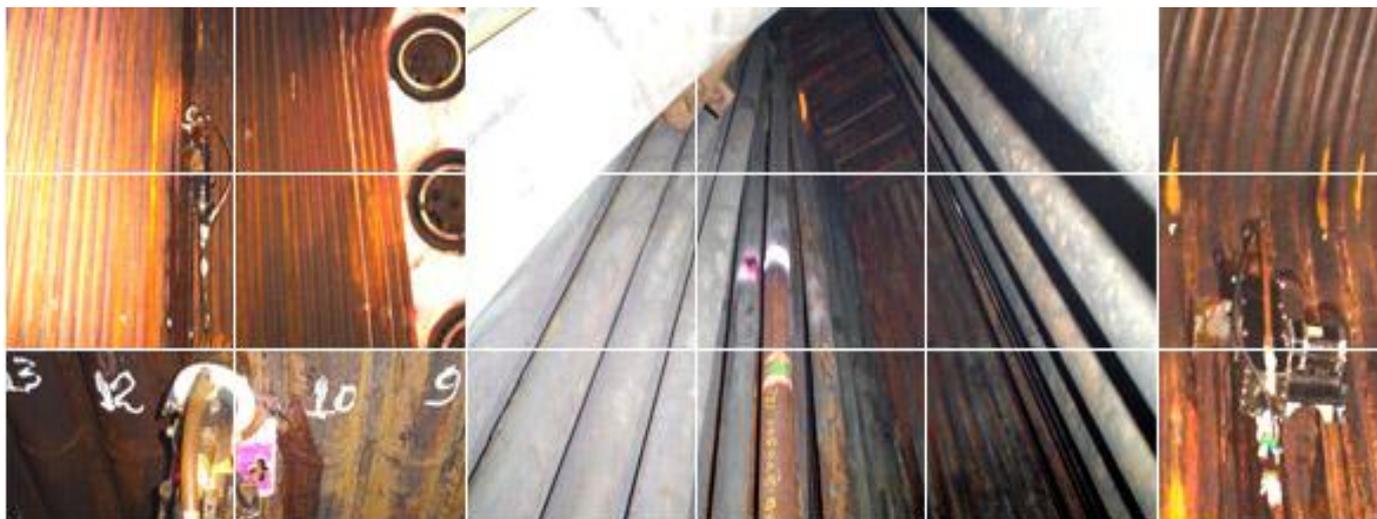
Segundo Altafini (2002), outras situações também colaboram para o choque térmico, uma delas é quando a caldeira é alimentada com água fria (<80°C) ou com entrada com água quente nas regiões frias. Mais uma causa é a falha operacional que pode acontecer após uma redução excessiva do nível d'água, fazendo ficar uma parte da superfície de aquecimento sem refrigeração, o operador faz a injeção de água na tentativa que ela retome o seu nível normal. A medida certa nessa situação é o corte imediato do abastecimento dos combustíveis aos queimadores.

5.3 Corrosão

De acordo com Altafini (2002), a corrosão é um dos principais responsáveis pela degradação das caldeiras e este fator degradante não é sentida pelos instrumentos de operação da caldeira, ou seja, os pressostatos e as válvulas de segurança não detectam sua evolução porque não é acompanhada por elevação de pressão de trabalho. A corrosão avançada das partes da caldeira pode ser causa de explosões até mesmo em pressões inferiores à PMTA – Pressão Máxima de Trabalho Admissível. Portanto, o avanço da corrosão em caldeiras só pode ser detectado por meio de inspeções minuciosas do equipamento (obrigatórias por lei).

Existem variados tipos de corrosão, alguns deles são:

- 1- Corrosão uniforme;
- 2- Corrosão localizada;
- 3- Corrosão por metais dissimilares;
- 4- Corrosão por tensão (“stress”)
- 5- Corrosão por aeração diferencial devido à formação de depósitos;
- 6- Corrosão por ácido carbônico

Figura 10 - Corrosão em tubos de caldeiras

Fonte: www.pasa.com.br.

5.3.1 corrosão uniforme e localizada

Ocorre em qualquer seção de qualquer gerador de vapor. A principal causa de ocorrência deste tipo corrosão deve-se a existência de áreas anódicas e catódicas sob uma diferença de potencial; tais áreas podem se formar nas seguintes condições:

- anomalias na composição granular ou metálica;
- impurezas no metal;
- células de corrosão por aeração diferencial;
- tensão no metal ("stress")

5.3.2 corrosão por metais dissimilares

Ocorre como uma corrosão localizada, devido à diferença de potencial existente entre dois metais diferentes em contato direto numa água contendo sais dissolvidos (eletrólitos), sendo que o metal menos nobre se comporta como um anodo e se corrói. A severidade de tal corrosão pode ser minimizada pelo uso de metais

dissimilares de potenciais de eletrodo próximos e pela separação física destes metais pelo uso de um isolador. Tal fenômeno ocorre mais comumente na seção pós-caldeira de geradores de vapor, operando nas mais variadas pressões.

5.3.3 corrosão por tensão ("stress")

Pode ser devida às falhas no projeto da caldeira e de um tratamento térmico inadequado das chapas e tubos metálicos; por exemplo, pontas de tubos de caldeira, nas quais nenhum cuidado relativo a expansão ou contração dos mesmos tenham sido tomadas, se tornam áreas sob "stress" e se corroem anodicamente; outras áreas suscetíveis à corrosão são regiões de alta transferência de calor em zonas de combustão, tubos soldados, tubos mal laminados e com fendas, extremidade de tubos repuxados, tubos incrustados, etc.

5.3.4 corrosão pela formação de depósitos

Entre as possíveis causas de corrosão pode-se citar a presença de tensões localizadas e concentrações salinas sob depósitos; neste caso, o mecanismo provável de corrosão é devido à formação de células de aeração diferencial, onde a área anódica se situa sob os depósitos.

5.3.5 corrosão por ácido carbônico

A solubilização de gás carbônico do ar, bem como a decomposição pelo calor de carbonato e bicarbonatos e a presença de contaminantes na água de alimentação

da caldeira, libera o dióxido de carbono que é arrastado para a seção pós-caldeira, juntamente com o vapor saturado, baixando em consequência do pH do condensado formado e atacando a camada protetora de óxido de ferro, provocando uma corrosão grave e generalizada nas linhas de vapor e retorno do condensado.

5.3.6 métodos de prevenção de corrosões

Para um controle preventivo da mesma, é indispensável que uma corrosão ligeira ocorra, pois, desta forma, favorece-se a formação de um filme protetor de óxido metálico (Fe_3O_4 ou magnetita).

Entre as medidas usuais, pode-se citar:

- a- Desmineralização da água por meio de resinas catiônicas e aniônicas.
- b- Desaeração mecânica da água por intermédio de desaeradores trabalhando com vapor em contracorrente.
- c- Desaeração química da água usando sulfito de sódio catalisado ou hidrazina.
- d- Correção do pH da água para a faixa alcalina, a fim de evitar corrosão ácida e acelerar a formação do filme óxido de ferro protetor.
- e- Tratamento do vapor condensado para neutralizar ácido carbônico e eliminar ataque ao ferro pelo cobre e níquel.
- f- Resfriamento lento da caldeira, quando a mesma é retirada de operação, a fim de evitar choques térmicos.
- g- Em caldeiras de baixa pressão, com temperaturas inferiores a 200°C , pode-se eliminar a desmineralização e desaeração em muitos casos não dispensando, todavia, o uso de água clarificada.

5.4 Explosões causadas por aumento de pressão

A pressão do vapor dentro da caldeira é diretamente proporcional à quantidade de energia disponível na fornalha que é imediatamente transmitida a água, concluindo, então, que a pressão interna de uma caldeira depende fundamentalmente dos queimadores. Contudo, os queimadores não são os únicos responsáveis pelo aumento de pressão, para Altafini (2002), a bomba de alimentação injeta água com pressão superior aquela de trabalho, e se a vazão com que a bomba alimenta a caldeira for maior que aquela de saída de vapor, o nível de água sobe e a pressão de trabalho aumenta. A pressão é mantida dentro de seus parâmetros de pressão, em seu funcionamento normal, pelos seguintes sistemas:

- 1) sistema de modulação de chama;
- 2) sistema de pressão máxima;
- 3) válvula de segurança e
- 4) sistema manual

Figura 11 - Explosão de uma caldeira no SS Norway



Fonte: <http://www.cruiselawnews.com>

5.5 Explosão pelo lado dos gases

Segundo Altafini (2002), as explosões nos lados dos gases são originadas por uma reação química, ou seja, pelo processo de combustão. Esse processo, além de ocorrer exotermicamente, acontece em um tempo muito pequeno, cuja consequência é o aumento rápido e violento da pressão em um espaço restrito. As explosões dessa natureza acontecem com frequência nas caldeiras que operam com combustíveis líquidos e gasosos. As névoas de líquidos inflamáveis ou de óleos combustíveis aquecidos apresentam comportamento similar às dispersões gasosas inflamáveis. Quando entram em contato com o ar, formam uma mistura que entra em combustão instantânea, se houver uma pequena fonte de calor para a ignição. As caldeiras aquatubulares, em face da complexa disposição do circuito dos gases, favorecem a existência de zonas mortas, onde pode ocorrer acúmulo de gases não queimados.

As explosões no lado dos gases acontecem com frequência na recolocação manual em marcha da caldeira, quando é promovida a ignição com retardo, ou sem purga prévia, condição em que a fornalha se encontra inundada com a mistura combustível-comburente. Ocorre casos também de explosões durante o funcionamento da caldeira: falta de limpeza dos queimadores ou presença de água no combustível ou, ainda, carbonização do óleo no queimador podem levar a interrupção da alimentação do combustível. Essa falha, associada ou não às falhas no sistema de alimentação de ar, pode causar perda momentânea da chama. Com isso, o interior da fornalha ficará enriquecida com a mistura e a explosão ocorrerá, deflagrada pelo sistema de ignição, ou por partes incandescentes da fornalha, ou ainda, por outro queimador, no caso de perda da chama ocorrer em um queimador, enquanto outros funcionam.

Algumas caldeiras flamatubulares possuem válvulas de alívio instaladas nos espelhos dianteiros. Essas válvulas são mantidas fechadas por ação de molas durante o funcionamento normal da caldeira e, se abrem para fora, quando a pressão da fornalha supera a pressão exercida pelas molas, ou seja, no momento de uma explosão. Porém, o alívio da pressão nem sempre é obtida, dada a violência com que as explosões acontecem fazendo voar até os espelhos, nos casos mais extremos. Pode haver também casos de pequenas explosões em que essas válvulas

são lançadas fora e como se localizam próximas à altura da cabeça do operador, podem criar riscos adicionais.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do pressuposto que a praça de máquinas em um navio, seja ela mercante ou militar, é um dos lugares mais perigosos de se trabalhar onde podem ocorrer explosões, incêndios, vazamento de fluídos quentes, riscos em espaços confinados, dentre outros perigos o sistema de caldeiras tem uma grande contribuição nesses aspectos, isso por se tratar de um equipamento que exige bastante conhecimento dos seus operadores e também muita atenção para os sinais que este equipamento “emite” que explicita como anda o seu funcionamento.

A necessidade de manutenções nas caldeiras é contínua, e o tratamento de água que a abastece se torna essencial para o bom funcionamento e para evitar vetores que farão deste equipamento em uma “bomba relógio” a bordo. Este e outros requisitos são previstos em uma Norma Regulamentadora, a NR-13, que foi criada em 1978 e estabeleceu as medidas de segurança dos usuários destes sistemas.

Portanto, o conhecimento do sistema de caldeiras, as manutenções preditivas e preventivas podem evitar graves problemas que podem ocasionar mortes, além de poder aumentar a vida útil de tal sistema, melhorar rendimento e diminuir os custos para o armador em outros tipos de manutenções. O curso da EFOMM permite aos que concluem com aproveitamento o curso superior de Ciências Náuticas na área de máquinas trabalharem com todos os tipos de caldeiras e dando aos seus alunos o conhecimento necessário sobre os seus riscos, entretanto, é necessário ser discutido mais sobre estes equipamentos nos vetores de transporte marítimos por sua alta periculosidade e desenvolver/melhorar os sistemas de produção de energia a bordo de navios.

REFERÊNCIAS

ALTAFINI, Carlos Roberto - **Curso de Engenharia Mecânica Disciplina de máquinas térmicas apostila sobre Caldeiras**. Universidade de Caxias do Sul. Centro de Ciência exatas e Tecnologia, 2010

JUNIOR MARTINELLI, L.C. - **Geradores de Vapor. Universidade do Rio Grande do Sul**. Campus Paracambi, 2003

SOUZA, Carlos Antonio dos Santos - **Monografia (APMA) sobre Tratamento de água aplicado às caldeiras** . Marinha do Brasil - Centro de Instrução Almirante Graça Aranha. Rio de Janeiro, 2013

ZIGMANTAS, Paulo Vitor de Matos - **Caldeiras (CAD-1)**. Marinha do Brasil, Diretoria de Portos e Costas, 2011