

CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE GRAÇA ARANHA
CIAGA
DEPARTAMENTO DE ENSINO DE MÁQUINAS
CURSO DE APERFEIÇOAMENTO PARA OFICIAL DE MÁQUINAS (APMA)



CALDEIRAS E GERADORES DE VAPOR

Edemir Gonçalves dos Santos

Orientador: Professor Hermann Regazzi

Rio de Janeiro
Março, 2012

CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE GRAÇA ARANHA
CIAGA
DEPARTAMENTO DE ENSINO DE MÁQUINAS
CURSO DE APERFEIÇOAMENTO PARA OFICIAL DE MÁQUINAS (APMA)



CALDEIRAS E GERADORES DE VAPOR

Monografia apresentada ao Centro de Instrução Almirante Graça Aranha, como requisito parcial para obtenção de certificação STCW III/2 do curso de Aperfeiçoamento para Oficial de Máquinas.

Por: Edemir Gonçalves dos Santos

Orientador: Prof. Hermann Regazzi

Rio de Janeiro

Maço, 2012

EDEMIR GONÇALVES DOS SANTOS

CALDEIRAS E GERADORES DE VAPOR

Monografia apresentada ao Centro de Instrução Almirante Graça Aranha, como requisito parcial para obtenção de certificação STCW III / 2 do curso de Aperfeiçoamento para Oficial de Máquinas.

Orientador: Prof. Hermann Regazzi

Aprovada pela Banca Examinadora em _____ de março de 2012.

BANCA EXAMINADORA

Professor

Professor

Professor

Professor

A todos que direta ou indiretamente
participaram da construção de mais uma
conquista.

AGRADECIMENTO

Primeiramente a Deus por ser minha fonte de vida para todo sempre.

À minha esposa e filha pela compreensão do meu trabalho.

Aos amigos feitos durante o curso.

Aos professores que indiretamente colaboraram na execução deste trabalho.

RESUMO

O propósito principal deste trabalho de monografia foi o de determinar de modo abrangente a importância das caldeiras e geradores de vapor de bordo, repassando os resultados das pesquisas bibliográficas, procurando colocar a teoria na prática, descrevendo situações de segurança necessárias para que aconteçam operações com responsabilidade, dando uma visão geral dos aspectos principais que levam a incidentes e acidentes em todos os seus departamentos, mostrando o que é necessário para que os resultados sejam alcançados de forma segura e eficiente, objetivando o máximo rendimento na produção de vapor dentro dos navios mercantes.

Palavras-chaves: Caldeiras, geradores de vapor, segurança, operações, rendimento.

ABSTRACT

The main purpose of this thesis work was to determine comprehensively the importance of boilers and steam generators on board, reviewing the results of literature searches, trying to put theory into practice, describing situations that happen to necessary security operations with responsibility , giving an overview of the main aspects that lead to incidents and accidents in all its departments, showing what is needed for results to be achieved safely and efficiently, aiming for a maximum yield of vapor inside the merchant ships.

Keywords: boilers, steam generators, security, operations and performance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Avarias provocadas pela corrosão	15
Figura 2	- Caldeira aquatubular, fixa, vertical.	18
Figura 3	- Economizadores (a) simples (b)duplo.	19
Figura 4	- Exemplo de transmissão por irradiação	22
Figura 5	- Exemplo de transmissão por convecção	22
Figura 6	- Exemplo de transmissão por condução	23
Figura 7	- Esquema do ciclo básico da formação do vapor d'água	24
Figura 8	- Geração de energia elétrica utilizando vapor	25
Figura 9	- Dois principais tipos de caldeiras	26
Figura 10	- Caldeira flamotubular	27
Figura 11	- Caldeira com arranjo na horizontal e com arranjo na vertical	28
Figura 12	- Caldeiras locomotivas ou locomoveis	29
Figura 13	- Caldeira escocesa	30
Figura 14	- Caldeira de tubo reto com tambor longitudinal	32
Figura 15	- Caldeira aquatubular com arranjo de tubos curvos	33
Figura 16	- Utilização de uma caldeira de recuperação	36
Figura 17	- Estrago causado por explosão de uma caldeira	45

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
2. TEORIA FÍSICA APLICADA A CALDEIRAS E GERADORES DE VAPOR	
2.1 Definições iniciais.....	12
2.1.1 Vapor saturado	13
2.1.2 Vapor superaquecido	13
2.1.3 Calor sensível	14
2.1.4 Calor latente	13
2.1.5 Entalpia	14
2.2 Definições específicas.....	14
2.2.1 Capacidade de produção de vapor	16
2.2.2 Velocidade da combustão.....	16
2.2.3 Fator de vaporização	16
2.2.4 Vaporização equivalente	16
3. GENERALIDADES SOBRE CALDEIRAS E GERADORES DE VAPOR	17
3.1 Componentes.....	17
3.1.1 Macrocomponentes	18
3.1.2 Outros componentes	20
3.2 Funções das caldeiras	21
3.2.1 Queima de combustível	21
3.2.2 Transmissão de calor do combustível para a água	21
3.2.3 Circulação de água e vapor	23
3.3 Geradores de vapor	24
3.4 Tipos de caldeiras	26
3.4.1 Classificação das caldeiras flamotubulares.....	26
3.4.2 Caldeira vertical	27
3.4.3 Caldeira horizontal	28
3.5 Caldeiras aquatubulares	31
3.6 Caldeiras de recuperação	35
3.7 Caldeiras elétricas	36

4. SEGURANÇA E DISPOSITIVOS DE SEGURANÇA DAS CALDEIRAS DE BORDO.....	38
4.1 Requisitos das caldeiras navais	38
4.2 Considerações iniciais sobre inspeção de caldeiras.....	39
4.3 Considerações gerais sobre inspeções em caldeiras e vasos de pressão.....	39
4.4 Riscos e danos causados por uma caldeira	44
4.4.1 <i>O superaquecimento como causa de explosões</i>	45
4.4.2 <i>Choques térmicos</i>	46
4.4.3 <i>Defeito de mandrilagem</i>	47
4.4.4 <i>Falhas em juntas soldadas</i>	47
4.4.5 <i>Alterações na estrutura metalográfica do aço</i>	48
4.4.6 <i>Erosão</i>	48
4.4.7 <i>Explosões causadas por aumento da pressão</i>	49
4.5 Outros riscos de acidente.....	50
4.6 Considerações finais	50
5. ALIMENTAÇÃO DE ÁGUA DE CALDEIRAS E GERADORES DE VAPOR	52
5.1 Fontes de captação	52
5.2 Características da água	52
5.2.1 <i>Contaminantes</i>	52
5.2.2 <i>Constituintes</i>	53
5.3 Problemas devido à água	54
5.3.1 <i>Corrosão</i>	54
5.3.1.1 <u>Corrosão Uniforme e Localizada</u>	54
5.3.1.2 <u>Corrosão por Metais Dissimilares</u>	55
5.3.1.3 <u>Corrosão por Tensão (“stress”)</u>	55
5.3.1.4 <u>Corrosão pela Formação de Depósitos.</u>	55
5.3.1.5 <u>Corrosão por Ácido Carbônico</u>	56
5.3.1.6 <u>Outros Fatores que provocam Corrosão</u>	56
5.3.2 <i>Depósitos</i>	57
5.3.3 <i>Arraste</i>	58

5.3.4 Outros Problemas.....	59
5.3.4.1 <u>Ataque cáustico ou Corrosão Cáustica.....</u>	59
5.3.4.2 <u>Fragilização por Hidrogênio.....</u>	60
5.3.4.3 <u>Volatilização da Sílica.....</u>	60
5.4 Correções dos problemas.....	60
5.4.1 Corrosão	61
5.4.1.1 <u>Eliminação de Oxigênio Dissolvido.....</u>	61
5.4.1.2 <u>Eliminação de Gás-Carbônico.....</u>	61
5.4.1.3 <u>Eliminação de Gás-Carbônico.....</u>	62
5.4.1.4 <u>Controle de pH e Depósitos.....</u>	62
5.4.2 Depósitos.....	62
5.4.2.1 <u>Comentários sobre Água Condensada.....</u>	62
5.4.2.2 <u>Uso de um Tratamento Químico Adequado.....</u>	63
5.4.3 Descargas	63
5.4.3.1 <u>Descargas de Nível.....</u>	63
5.4.3.2 <u>Descargas de Fundo.....</u>	63
5.4.3.3 <u>Consequências de Descargas Irregulares.....</u>	64
5.4.4 Programas Apropriados para Tratamento Químico	64
5.4.4.1 <u>Programa de Fosfatos.....</u>	65
5.4.4.2 <u>Programa de quelantes.....</u>	65
5.4.4.3 <u>Combinação de Ambos.....</u>	66
5.4.5 Arraste	66
6. CONCLUSÃO	67
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	68

1. INTRODUÇÃO

O trabalho ora apresentado é resultado de pesquisas realizadas em diversas bibliografias. O entendimento sobre caldeiras e geradores de vapor de bordo é um assunto que deve ser conhecido antes mesmo de entrar a bordo de embarcações mercantes, pois são equipamentos que têm uma função importante de gerar vapor para produzir energia a grandes máquinas ou outros equipamentos.

É um assunto extenso e sério e, por isso, será dado ênfase ao que se diz respeito à parte de segurança desses geradores de vapor, pois as caldeiras embarcadas nos trazem muitos benefícios, assim como podem nos provocar problemas graves de acordo com a maneira com que são operadas.

Deve-se planejar e programar bem antes o que pode acontecer e o que deve ser observado durante o procedimento usual das caldeiras e geradores de vapor dos navios.

O trabalhador deve desenvolver suas atividades praticando atos seguros, obedecendo às normas e assegurando assim sua própria vida e a dos outros marítimos embarcados.

As normas citadas no trabalho mostram a necessidade de uma boa condução das caldeiras e geradores de vapor, complementada pela importância de uma manutenção feita com responsabilidade.

O que devemos ressaltar é que, a análise constante dos procedimentos, seja de uma caldeira ou qualquer equipamento de bordo, deve ser realizada por ambos os segmentos empresariais, organização/trabalhador, que seja perene a segurança de vida no ambiente de trabalho.

2. TEORIA FÍSICA APLICADA A CALDEIRAS E GERADORES DE VAPOR

2.1 Definições iniciais

Antes de iniciar o estudo dos geradores de vapor ou caldeiras, como são geralmente chamados, é essencial que se tenha um conhecimento elementar da formação de vapor.

Se colocarmos certa quantidade de água num vaso aberto e levarmos este ao contato de uma chama ou outra fonte qualquer de calor, ele será transmitido à água, através das paredes dos vasos. A temperatura da água aumentará, sem nenhuma mudança de fase. Observar-se-á um pequeno aumento no volume do líquido que, ao alcançar 100° C, entrará em ebulição, se a pressão atmosférica for normal. As temperaturas da água e do vapor em imediato contato com ela permanecerão constantes em 100° C, enquanto houver água no vaso e este for mantido em comunicação com a atmosfera. Se fecharmos o vaso de forma que o vapor não possa escapar, a pressão e a temperatura dentro dele irão aumentando gradativamente, enquanto permanecer a cessão do calor, até que a temperatura do vapor alcance aproximadamente a da fonte de calor. Se fizermos uma pequena abertura no vaso, de forma que o vapor possa escapar numa velocidade constante, e se a quantidade de calor fornecida pela fonte na unidade de tempo, permanecer constante, a pressão dentro do reservatório e a temperatura da água e do vapor também permanecerão constantes, em valores que dependerão do débito do vapor. Aumentando o fluxo de calor e diminuindo o débito de vapor, a pressão se elevará e com ela a temperatura do vapor e da água. Enquanto houver água no reservatório, e enquanto a pressão permanecer constante, as temperaturas da água e do vapor permanecerão constantes e iguais. Nestas condições o vapor terá, em suspensão, certa quantidade de partículas d'água, tendo-se assim o que se chama de vapor úmido.

A proporção, em peso, de vapor seco em tal mistura é chamada de título da mistura e é expressa sob a forma de percentagem. Se a vaporização continua, até que a água seja transformada em vapor, e se o reservatório é, então fechado instantaneamente, sem que nenhuma troca de calor seja permitida, ele ficará apenas cheio de vapor, sem que haja partícula d'água em suspensão. Nestas

condições diz-se que o vapor está saturado seco. Um ponto importante para relembrar é que, quando o vapor está em contato com a água, da qual ele foi formado, se a pressão permanece constante, as temperaturas da água e do vapor serão constantes e iguais, independentemente do título do vapor. Esse fenômeno de relação entre pressão e temperatura é verdadeiro para todos os vapores quando em contato dos líquidos dos quais se formaram. A temperatura de um vapor saturado, correspondente a pressão dada, é chamada temperatura de saturação do vapor naquela pressão.

É indispensável que compreendamos também a diferença entre calor e temperatura. O calor é uma forma de energia e, na prática, é medido numa unidade conhecida como caloria. A unidade de calor pode ser aproximadamente, definida como a quantidade de calor que deve ser fornecida a um kg de água, ao nível do mar, para elevar a temperatura do kg de água de 1°C. A fim de resfriar um kg de água de 1°C, é necessária a remoção de uma caloria da água.

A temperatura é uma medida de potencial, tendendo a causar um fluxo de calor. A diferença de temperatura tem relação com a transmissão de calor entre duas substâncias. Quanto maior for a diferença de temperatura entre duas substâncias em contato térmico ou entre dois pontos de um corpo, tanto maior será a velocidade de transmissão de calor da substância mais quente para a substância mais fria. Os termos explanados a seguir são úteis para entendermos mais adiante outros aspectos relacionados à física aplicada nas caldeiras.

2.1.1 Vapor saturado

Denomina-se vapor saturado ao vapor produzido na temperatura de ebulição à sua pressão absoluta. Tem-se:

- vapor saturado úmido: quando contém partículas de água em suspensão;
- vapor saturado seco: caso contrário.

2.1.2 Vapor superaquecido

No momento em que é vaporizada a última gota de água de certo recipiente, este contém somente vapor saturado seco. Fornecendo ao recipiente,

a partir deste momento, calor proveniente do exterior, a temperatura que até agora se mantinha constante começa a aumentar. Um vapor com temperatura final maior que a temperatura de saturação, é dito vapor superaquecido.

2.1.3 Calor sensível

Ao iniciar-se a produção de vapor em uma caldeira, primeiramente todo o calor fornecido à água através da queima do combustível e dos gases de combustão serve para aumentar sua temperatura. Ao calor associado à mudança de temperatura da água, dá-se o nome de calor sensível.

2.1.4 Calor latente

Em uma caldeira, como em uma panela de pressão de cozinha, por ser um recipiente rígido, à medida que o calor é fornecido à água, a pressão aumenta junto com a temperatura até que aconteça a abertura da válvula de segurança. Na temperatura de saturação relativa à pressão de abertura da válvula de segurança inicia-se a geração de vapor com alta intensidade e todo o calor fornecido à água é para sua mudança de fase, que acontece a pressão e temperatura constantes. Ao calor associado à mudança de fase da água dá-se o nome de calor latente.

2.1.5 Entalpia

Chama-se entalpia total do vapor de água, saturado, à soma do calor sensível e do calor latente, cujas definições já foram explicadas.

2.2 Definições específicas

Nas primeiras instalações, todas as máquinas de vapor eram construídas para trabalhar com vapor saturado. Na realidade, este vapor era raramente, ou quase nunca, saturado seco; tinha certo título, dependente da construção e arranjo da instalação considerada.

Ainda que o vapor possa ser praticamente seco, na saída da caldeira, o efeito refrigerante do ar nas canalizações sem isolamento ou com o isolamento deficiente e nos cilindros das máquinas, permite a condensação parcial do vapor, antes que ele alcance a máquina ou quando nela evolui de tal forma que o título do vapor fica reduzido a um valor entre 75% e 90%. Com a melhoria no traçado da caldeira, com melhor disposição da instalação, empregando canalizações mais curtas, e com maior eficiência do material isolante do calor, estas condições foram gradualmente aperfeiçoadas. A introdução dos separadores de vapor entre a caldeira e a máquina, para remover a umidade do vapor, também concorreu para melhorar o título do vapor admitido na máquina. A condensação parcial do vapor no interior da máquina era inevitável, enquanto se usava o vapor saturado. Os resultados físicos imediatos do uso do vapor saturado seco ou úmido são:

- a) Avarias provocadas nas canalizações e máquinas pela corrosão;
- b) Erosão das partes internas das máquinas, das tubulações e dos acessórios causada pelo choque de partículas d'água, arrastadas pelo vapor em grande velocidade;



Figura 1: Avarias provocadas nas canalizações e máquinas pela corrosão.

- c) Passagem de calor através das canalizações e maquinismos, tendo como resultado a condensação e consequente decréscimo no título do vapor.

Esses efeitos são reduzidos, ou totalmente eliminados, pelo uso do vapor superaquecido. Uma vez que não existe nenhuma umidade para causar corrosão ou erosão, a perda de calor do vapor superaquecido não é suficiente para baixar

a temperatura até o ponto de saturação, e o vapor superaquecido, sendo um mau condutor de calor, comparado com o vapor saturado, não permite que a passagem de calor se faça tão rapidamente, como no caso do vapor saturado. Com isso, a seguir, analisaremos certos termos específicos que nos dão melhor entendimento sobre capacidade de produção de vapor, velocidade da combustão, vaporização equivalente e fator de vaporização.

2.2.1 Capacidade de produção de vapor

A capacidade de produção de vapor de uma instalação é expressa frequentemente em quilogramas de vapor por hora (kg/h) e/ou seus múltiplos (kg/s, ton/h). Mas, para valores distintos de temperatura e pressão, o vapor possui quantidades diferentes de energia, por isso, se expressa a capacidade de uma caldeira em forma de calor total transmitido por unidade de tempo (kcal/h).

2.2.2 Velocidade da combustão

Como o nome já demonstra, ela é expressa sendo:

- a) a quantidade (kg) de combustível queimado por metro quadrado (m²) de superfície de aquecimento por hora, ou
- b) a quantidade (kg) de combustível queimado por metro cúbico (m³) de volume de câmara por hora.

2.2.3 Fator de vaporização

É a relação entre o calor absorvido por 01 (kg) de água de alimentação nas condições da caldeira e o calor absorvido por 01 (kg) de água a 100 (°C) ao vaporizar.

2.2.4 Vaporização equivalente

É definido como sendo a vazão de água a 100 (°C), em (kg/h), que se vaporiza na caldeira.

3. GENERALIDADES SOBRE CALDEIRAS E GERADORES DE VAPOR

A caldeira é um aparelho trocador de calor, com finalidade de produzir vapor d'água e se destina a gerar vapor através de uma troca térmica entre o combustível e a água. Daí, a importância de termos especificado as propriedades do vapor d'água. A geração ou produção desse vapor pode ser realizada de diversas maneiras: desde uma simples chaleira até por meio do calor proveniente dos modernos reatores atômicos, cujo calor vaporiza a água nos chamados geradores de vapor.

Este equipamento é construído com chapas e tubos cuja finalidade é fazer com que água se aqueça e passe do estado líquido para o gasoso, aproveitando o calor liberado pelo combustível fazendo 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. 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 e, com isso, se fez necessário à evolução das caldeiras. Esse vapor é usado em laticínios, fábricas de alimentos (extrato de tomate, doces), gelatinas, curtumes, frigoríficos, indústrias de vulcanização, usinas de açúcar e álcool, tecelagem, navios de guerra e mercantes, fábricas de papel e celulose entre outras. Na área marítima, o vapor teve duas etapas: a propulsão onde o seu ápice foi no uso de turbinas a vapor e no uso secundário, onde elas ocupam seu lugar nos dias atuais.

3.1 Componentes

Tanto a caldeira quanto o gerador de vapor, se destinam a gerar vapor. Porém, chama-se gerador de vapor um aparelho trocador de calor complexo que produz vapor a partir de energia térmica (combustível), ar e fluido vaporizante, constituído por diversos outros trocadores de calor associados e perfeitamente integrados, tais como: economizador, aquecedor de ar e desarejador,

dessuperaquecedor e superaquecedor, o que permite a obtenção do maior rendimento térmico possível.

3.1.1 Macrocomponentes

- Fornalha: principal equipamento para a queima do combustível. Entre as suas funções estão incluídas: a mistura ar-combustível, a atomização e vaporização do combustível e a conservação de uma queima contínua da mistura.

- Cinzeiro: local de deposição das cinzas e restos de combustível que caem da fornalha.

- Câmara de Combustão: às vezes se confundem com a fornalha, sendo que, em outras é completamente independente. É um volume que tem a função de manter a chama numa temperatura elevada com duração suficiente para que o combustível queime totalmente antes dos produtos alcançarem os feixes (dutos) de troca de calor.

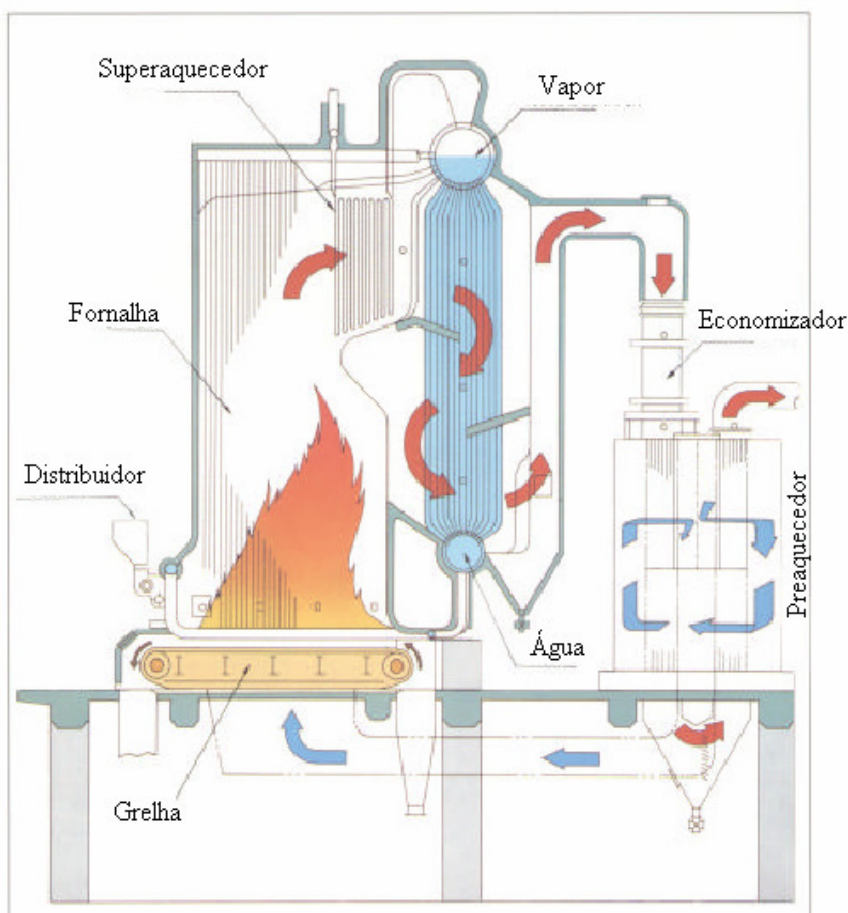


Figura 2: Caldeira Aquatubular, Fixa, Vertical.

- Caldeira de Vapor (Tambor de Vapor): constituída por um vaso fechado à pressão contendo água que será transformada em vapor.
- Superaquecedor: consiste de um ou mais feixes tubulares, destinados a aumentar a temperatura do vapor gerado na caldeira.
- Reaquecedor: tem função equivalente a dos superaquecedores. A sua presença torna-se necessária quando se deseja elevar a temperatura do vapor proveniente de estágios intermediários de uma turbina.
- Grelhas: utilizadas para amparar o material dentro da fornalha, podendo ser fixas, rotativas e inclinadas.
- Economizador: utilizando o calor residual dos gases, aquece a água de alimentação. É normalmente instalado após os superaquecedores. Além de melhorar o rendimento da unidade, sua instalação minimiza o choque térmico entre a água de alimentação e a já existente no tambor.

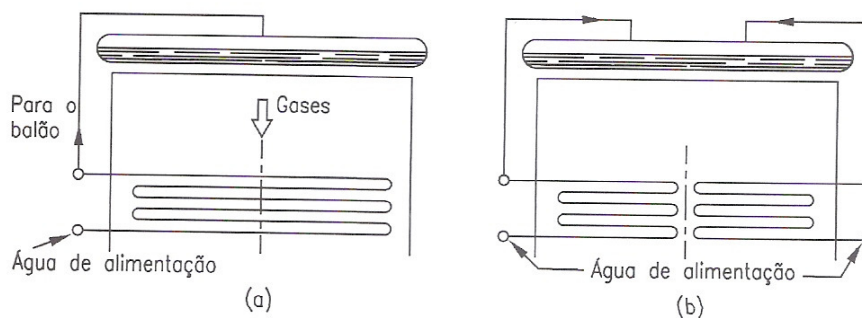


Figura 3: Economizadores (a) simples (b) duplo.

- Aquecedor de ar: aproveita o calor residual dos gases de combustão pré-aquecendo o ar utilizado na queima de combustível. Aquece o ar entre 120°C e 300 °C, dependendo do tipo de instalação e do tipo de combustível queimado.
- Condutores de fumo: são canais que conduzem os gases da combustão até a chaminé.
- Chaminé: tem função de retirar os gases da instalação lançando-os na atmosfera (tiragem).
- Retentor de fuligem: tem como função separar a fuligem, resultante da queima não estequiométrica do combustível, dos gases antes dos mesmos saírem pela chaminé.

3.1.2 Outros componentes

- Visor de nível: é um tubo de vidro colocado no tambor de vapor, que tem por finalidade dar ao operador a noção exata da altura onde se encontra a água da caldeira.

- Controlador de nível: são equipamentos que controlam o nível de água na caldeira. Podem ser constituídos de várias formas, sendo os mais usados os de eletrodos e o sistema de bóia.

- Alarme de falta d'água: sinal sonoro e luminoso que dispara quando o nível de água na caldeira está muito baixo.

- Fusível térmico (tampão): consiste de um parafuso com um furo no centro, sendo este preenchido com uma liga de metal de baixo ponto de fusão.

É instalado num ponto abaixo do qual a água não pode ficar. Se ocorrer o problema, a temperatura do material aumenta, provocando a fusão do metal de preenchimento e dando passagem para a água, que apagará o fogo da fornalha.

- Indicadores de pressão (manômetros): são instrumentos utilizados para medir a pressão de líquidos, gases e vapores.

- Pressostatos: são dispositivos de segurança que comandam o regime de trabalho das caldeiras, de acordo com a pressão do vapor.

- Válvulas de segurança: têm como função promover o escape do excesso do vapor caso a pressão de trabalho venha a ser ultrapassada e os outros dispositivos não atuem.

- Válvulas: têm como função interromper ou regular a passagem de um fluido.

Tipos de Válvulas:

- De retenção: colocadas nas linhas de vapor e óleo para evitar o refluxo;
- De extração de fundo (dreno): permite a retirada de impurezas da água que se deposita no fundo do tambor de vapor;

- De descarga lenta: tem como função assegurar uma perfeita vedação no sistema;

- Solenóide: comandada eletricamente, abre ou fecha a passagem de um fluido;

- De alívio: para retirar o excesso de pressão no aquecedor de óleo das caldeiras;
- De escape de ar: controla a saída ou entrada de ar na caldeira, no início e no fim das operações;
- De serviço: tem seção correspondente a 10% da válvula principal. Tem como função garantir o acionamento de órgãos da caldeira (injetor, aquecimento de óleo, água, etc.);
- Injetor de água: é um dispositivo destinado à alimentação de água, como alternativa em caso de falha nas bombas. Seu funcionamento é baseado no escoamento de vapor, proveniente da própria caldeira através de uma série de tubos, convertendo a energia do vapor em energia cinética criando uma depressão suficiente para succionar a água e pressurizá-la até o nível de operação da caldeira.
- Purificadores de vapor: são dispositivos auxiliares que têm a finalidade de minimizar o arraste de umidade, sais e sólidos em suspensão.

3.2 Funções das caldeiras

Com esses elementos essenciais, é possível agora tratar das transformações e das operações que ocorrem nas caldeiras.

3.2.1 Queima de combustível

É necessário um espaço fechado, podendo ser chamado fornalha ou câmara de combustão. Neste, o combustível que pode ser carvão, óleo ou outro material equivalente, combina-se com o oxigênio existente no ar, e é queimado, cedendo parte do seu calor de combustão à água.

3.2.2 Transmissão de calor do combustível para a água

O calor proveniente da queima de combustível é transmitido às paredes da caldeira e, através deles, à água que, recebendo este calor, se vaporiza. Quando

o combustível é queimado na fornalha, esta fica cheia de gases quentes da combustão. Esses gases têm uma tríplice ação, a saber:

a) Irradiação: os gases da combustão emitem ondas de calor radiante, que são projetadas em todas as direções, e que são absorvidas por todas as superfícies a elas expostas. Essas superfícies incluem:

- paredes e piso da fornalha, que re-irradiam o calor na direção das superfícies geradoras de aquecimento, ou seja, das superfícies das partes da caldeira que contém água e vapor, que, para simplicidade, chamaremos de superfície de aquecimento.

- a própria superfície de aquecimento, que recebe também calor, pela irradiação direta dos gases quentes.

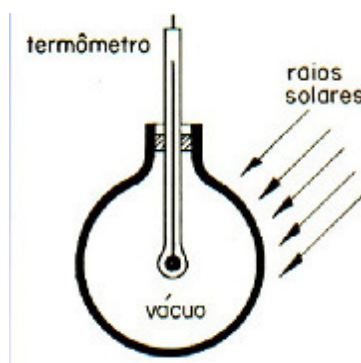


Figura 4: Exemplo de transmissão por irradiação.

b) Convecção: os gases quentes da fornalha, depois de terem transmitidos parte do seu calor à superfície de aquecimento por irradiação, sobem, por convecção, através das partes superiores das caldeiras, onde passam pela superfície adicional de aquecimento, superfície por onde transmitem uma parcela adicional de calor, por contato direto.



Figura 5: Exemplo de transmissão por convecção.

c) Condução: o calor, na sua passagem do gás para a água, deve vencer certo número de resistências térmicas em série.

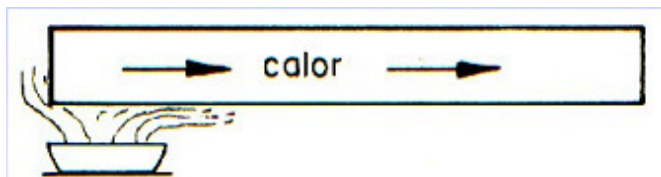


Figura 6: Exemplo de transmissão por condução.

A resistência total à transmissão de calor, da fornalha para a água, é a soma das seguintes resistências dadas na ordem de sua magnitude relativa:

- resistência à convecção, através das camadas de gás e água com vapor, ambas em repouso;
- resistência à condução, através das camadas de fuligem e de incrustações;
- resistência à condução através da parede do tubo metálico;
- resistência à condução através das moléculas de um corpo para o outro.

O efeito das resistências no lado do fogo da parede metálica dificulta a entrada de calor na parede, reduzindo, pois, a intensidade de transmissão de calor e o rendimento da caldeira. Para obter a máxima intensidade de transmissão de calor, é essencial, portanto, que:

- a) As superfícies de aquecimento, em ambos os lados, quer do fogo quer da água, sejam mantidas tão limpas quanto possível;
- b) As películas de gás e de água com vapor sem movimento sejam eliminadas ou reduzidas à menor espessura praticável.

A limpeza das superfícies de aquecimento é conseguida por métodos apropriados de condução e conservação da caldeira, e pelo tratamento adequado da água da caldeira, a fim de eliminar ou neutralizar as impurezas que formam incrustações.

3.2.3 Circulação de água e vapor

Quando se fornece calor ao vapor saturado, ele se torna superaquecido; e, se esse fornecimento de calor continua, a temperatura pode tornar-se demasiado elevada, a ponto de torrar ou fundir o reservatório que contém o vapor. Ainda mais, a circulação de água e vapor é necessária para evitar a formação de bolsas de vapor, que podem causar a distorção ou fusão do metal adjacente.

3.3 Geradores de vapor

Para entendermos o uso e as necessidades das caldeiras e geradores de vapor, é necessário o conhecimento prévio do ciclo básico do vapor d'água. O esquema mostra uma instalação de vapor bastante elementar que serve como base para as instalações modernas de máquinas dos maiores navios mercantes.

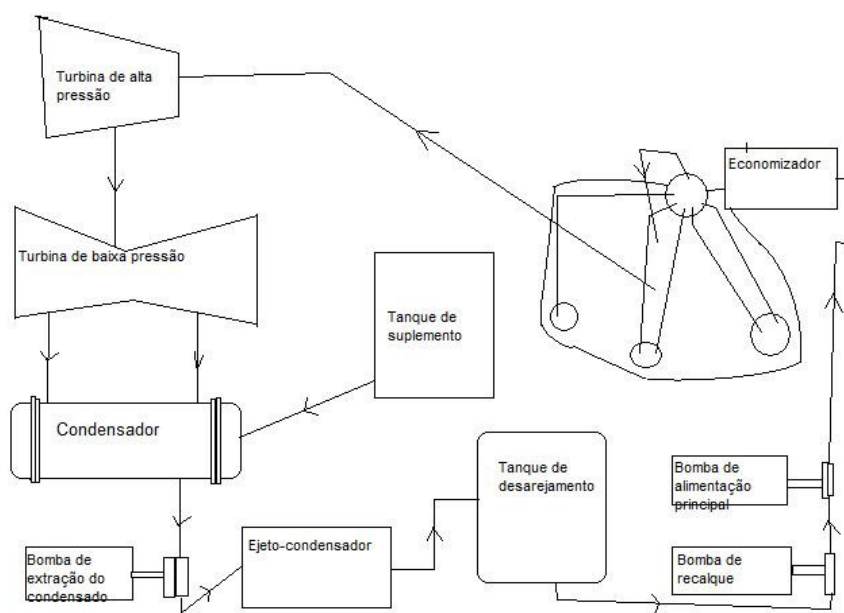


Figura 7: Esquema do ciclo básico da formação do vapor d'água.

A água de alimentação é aquecida no tubulão de vapor e no feixe tubular da caldeira e transformada em vapor. Este vapor passa pelo superaquecedor e recebe uma quantidade adicional de calor, para elevar sua temperatura até o grau desejado.

Este vapor vai à turbina de alta pressão e depois à turbina de baixa pressão, onde a energia do vapor é convertida em energia mecânica ou de trabalho. A pressão e a temperatura do vapor caem à proporção que se expandem, nos vários estágios das turbinas de alta e baixa pressão. Ele é finalmente descarregado no condensador principal, onde entra em contato com tubos, por dentro dos quais circula água do mar. A água do mar esfria os tubos e o vapor se condensa à proporção que entra em contato com eles. Quando o vapor se transforma em água, devido à condensação, o seu volume é reduzido. Dessa redução de volume resulta um vácuo no condensador, que é mantido pelo

ejetor de ar. Como o gerador de vapor descarrega num meio de pressão mais baixa, produz mais trabalho. O condensado é aspirado pela bomba de extração do condensado, mandado para o condensador do ejctor de ar, onde é aquecido pelo vapor usado no ejctor de ar, que se condensa e vai para o tanque de desarejamento. Nesse tanque o condensado é aquecido pelo vapor de descarga das auxiliares e desarejados por meios mecânicos. O condensado constitui assim a água de alimentação, cuja pressão é aumentada ao passar por uma bomba de recalque. Logo após acontece a aspiração da bomba de alimentação. Assim a bomba de alimentação aspira da rede de recalque e descarrega a água de alimentação, sob pressão superior à pressão da caldeira, no economizador da mesma. No economizador, a temperatura da água de alimentação aumenta mais ainda, antes de ser descarregada no tubulão de vapor, de modo a recomençar o ciclo. Observando na figura, o suplemento de alimentação é introduzido no sistema do condensado principal. Ele repõe a água perdida por fugas, no funcionamento da sirene, nos aparelhos de ramonagem (processo para retirar a fuligem contida na tubulação das caldeiras utilizando ar comprimido) e nas válvulas de escape e segurança.

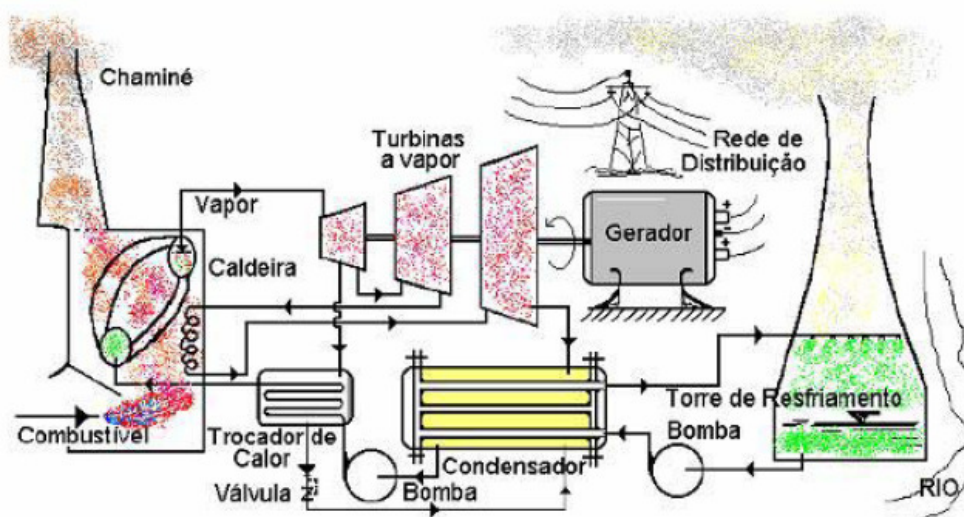


Figura 8: Geração de energia elétrica utilizando vapor (turbina).

3.4 Tipos de caldeiras

Uma das classificações básicas das caldeiras leva em conta a posição relativa dos gases queimados e do fluido a ser vaporizado.

As caldeiras primitivas consistiam de um grande recipiente cheio de água que era aquecido por fogo na sua parte inferior. O grande volume de água em estado de ebulição gerava situações de grande risco caso fosse excedido à pressão máxima admissível.

Para diminuir a quantidade de água em ebulição, aumentar a superfície de contato gás-metal-água e maximizar a transferência de calor foram criadas, primeiro, a caldeira flamotubulare e mais tarde a aquotubulare.

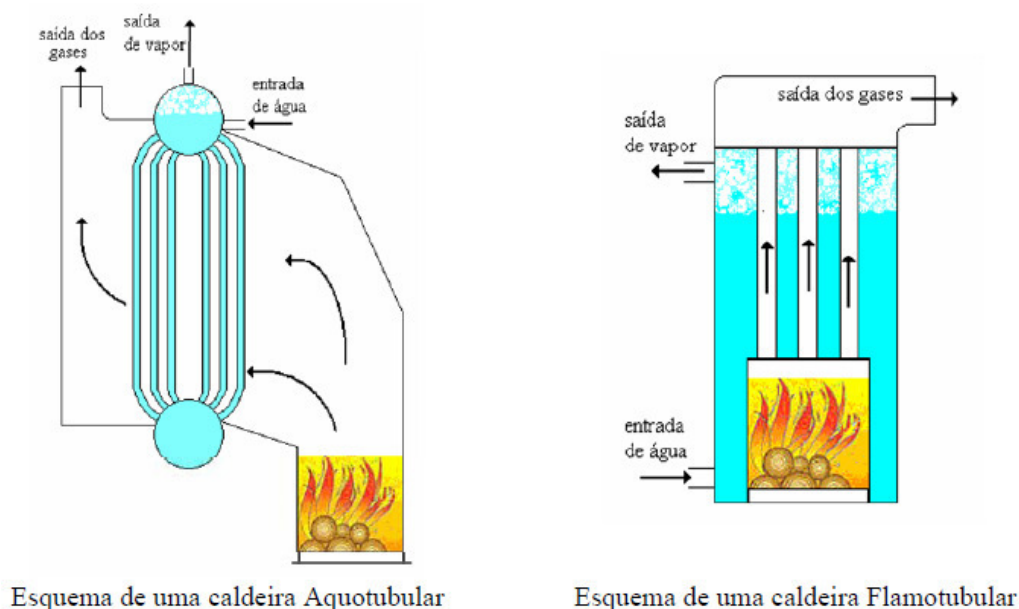


Figura 9: Os dois principais tipos de caldeiras.

3.4.1 Classificação das caldeiras flamotubulares

Nesse 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. As caldeiras flamotubulares são empregadas apenas para pequenas capacidades e quando se quer apenas vapor saturado de baixa pressão.

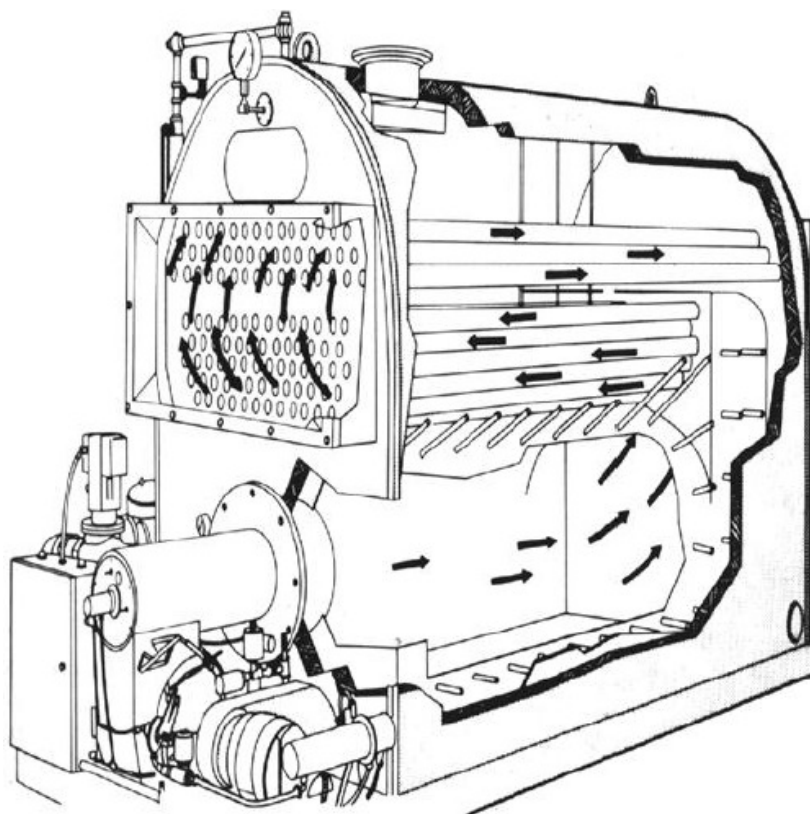


Figura 10: Caldeira flamotubular.

3.4.2 Caldeira vertical

As caldeiras verticais consistem de um corpo cilíndrico fechado nas extremidades por placas circulares, contendo furos regularmente distribuídos. Os furos permitem fixar tubos verticais, assegurando a passagem dos gases quentes da combustão desde a fornalha até a chaminé.

A água permanece no interior do corpo cilíndrico, envolvendo a superfície externa dos tubos, através do qual se processa a transferência de calor.

As caldeiras com fornalha interna possuem uma câmara de água envolvendo a câmara de combustão. Estas caldeiras são facilmente transportáveis, exigem pequenas fundações e apresentam grande facilidade de instalação.

São caldeiras de baixo rendimento térmico (da ordem de 65%), são construídas de 2 a 30 m², com vaporização específica de 15 a 16 kg vapor/h m² e são construídas para suportar pressões de até 10 kgf./cm².

3.4.3 Caldeira horizontal

Nesse tipo podem ser encontradas com fornalhas internas ou externas. Com fornalha interna, são divididas em Cornovaglia, Lancashire (Lancaster), Locomóveis, Locomotivas e Escocesas. Com fornalha externa tem-se a Multitubulares de 2 ou 3 voltas de chama.

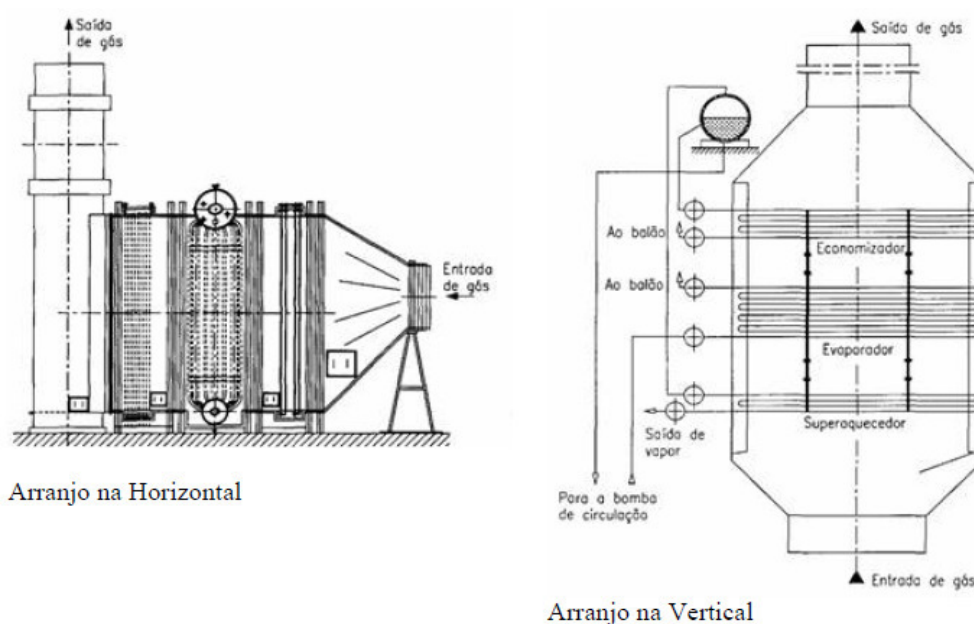


Figura 11: Caldeira com arranjo na horizontal e com arranjo na vertical.

- Caldeiras Cornovaglia e Lancashire:

Ambas as caldeiras obedecem a mesma concepção. Tem um corpo cilíndrico horizontal de grandes dimensões, contendo internamente “tubos de fogo” de grande diâmetro por onde circula os gases da combustão transferindo calor para água através do contato com os tubos.

- Caldeira Cornovaglia:

Esta caldeira possui apenas um tubo de fogo. Apresenta grandes dimensões em torno de 100 m² de superfície. Tem baixo rendimento térmico. A sua pressão máxima é limitada em torno de 10 kgf/cm². A sua capacidade específica varia em torno de 12 a 14 kg de vapor por m² de superfície.

- Caldeira Lancashire:

Também conhecida como Caldeira Lancaster. Representa uma evolução da caldeira Cornovaglia. As caldeiras Lancaster possuem até quatro tubos internos, o que permite maior capacidade e maior pressão de trabalho. Apresentam uma grande área de aquecimento, alcançando valores em torno de 120 a 140 m². Algumas unidades atingem de 15 a 18 kg de vapor por m² de superfície de aquecimento.

- Caldeiras Locomóveis e Locomotivas:

A caldeira locomóvel é uma caldeira multitubular em que a fornalha é revestida por dupla parede metálica, formando uma câmara por onde circula a água do corpo principal. Geralmente possuem apenas uma passagem de gases quentes.

Esses gases quentes são produzidos na fornalha, atravessam o interior dos tubos e alcançam a chaminé pelo espelho posterior.

Esta caldeira é uma adaptação das caldeiras usadas em locomotivas. É uma unidade estacionária (utilizadas em terra, por exemplo, em instalações industriais e fabris) de grande portabilidade, ideal para pequenas instalações de potência quando acopladas a um motor a vapor.

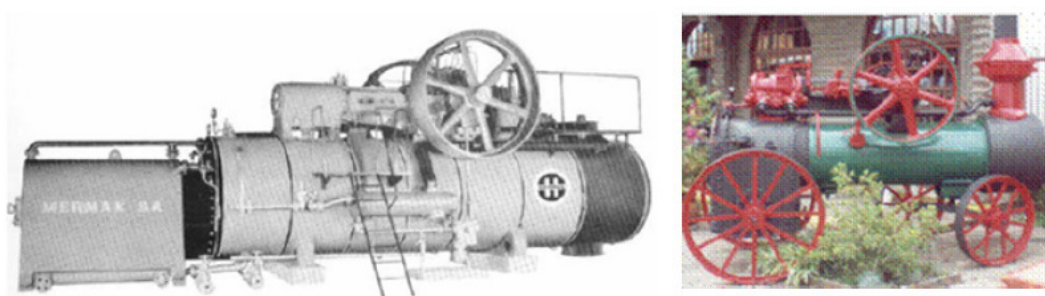


Figura 12: Caldeiras locomotivas ou locomóveis.

São usadas em locais onde há disponibilidade de insumo energético, campos de petróleo, serrarias, etc. Suportam pressões de até 18 kgf/cm² e alcançam capacidades em torno de 8000 kg de vapor/h.

As caldeiras locomotivas são do mesmo tipo construtivo das locomóveis, mas não são estacionárias. Estas são projetadas para operar com variações súbitas de demanda de vapor, mesmo à custa de rendimento térmico. São bastante sofisticadas e algumas possuem superaquecedores.

- Caldeiras Escocesas:

As caldeiras escocesas foram concebidas inicialmente para serviços marítimos, pois reúnem as vantagens das caldeiras multitubulares e a compacticidade assegurada por uma fornalha interna.

É o tipo mais moderno e evoluído de caldeiras flamotubulares. Tem dimensões reduzidas quando comparadas com as caldeiras flamotubulares convencionais.

Essas unidades operam com óleo ou gás.

A circulação dos gases produtos da combustão é garantida por ventiladores (tiragem mecânica). Os gases circulam com grande velocidade, 20 a 25 m/s, permitindo a obtenção de elevado índice de transmissão de calor.

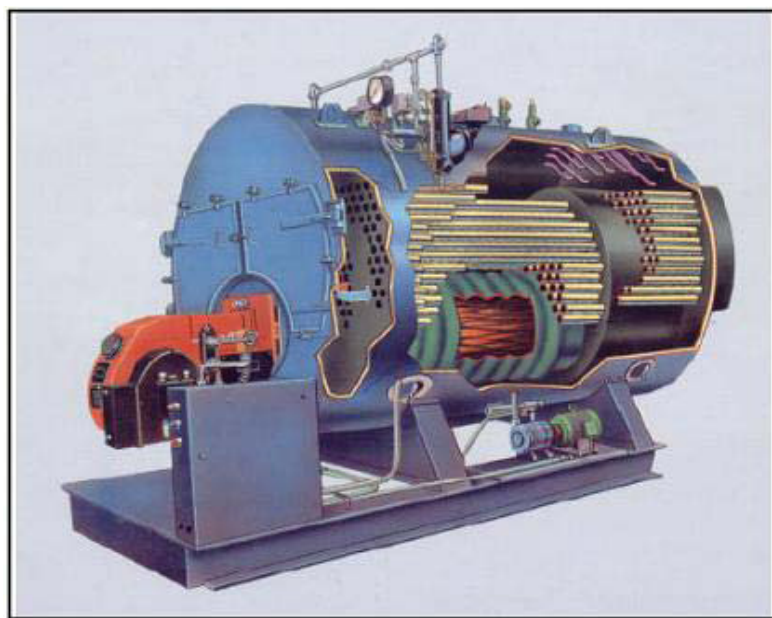


Figura 13: Caldeira escocesa.

As unidades compactas alcançam elevado rendimento térmico, da ordem de 80%. As unidades compactas incorporam numa única peça todos os equipamentos indispensáveis a sua operação; queimador de óleo, bomba para alimentação de água, controles automáticos, etc.

A perda por radiação é muito baixa, não ultrapassando 1%. São fabricadas unidades para produção máxima de vapor em torno de 10 ton. de vapor/h e pressão máxima de 18 kgf/cm².

3.5 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.

A introdução da caldeira aquotubular tornou possível a obtenção de grandes quantidades de vapor de água. Estas caldeiras nada mais são que um feixe de tubos, que constituem a principal superfície de absorção de calor, ligados a dois tambores ou tubulões.

Os tubos podem estar também dispostos na forma de paredes de água na fornalha da caldeira. Os tubos permitem a obtenção de grandes superfícies de transferência de calor. Um cuidado especial deve ser tomado neste tipo de caldeiras com o tratamento da água devido à possibilidade de gerar incrustações no interior dos tubos e comprometer o funcionamento da caldeira.

A produção de vapor varia desde pequenos valores até capacidades da ordem de 800 ton vapor/h, pressões de 150 a 200 kgf/cm² e temperaturas de 450 a 500° C.

Existem também algumas unidades com pressões supercríticas, acima de 250 kgf/cm².

A circulação da água no interior dos tubos pode ser do tipo natural, assistida ou forçada. Através do arranjo dos tubos é possível a concepção de uma série de caldeiras, tais como as de tubos retos ou tubos curvos com um ou vários tambores.

Sendo este tipo o mais importante e a mais utilizada a bordo de navios mercantes, veremos com mais detalhes seus componentes.

Caldeiras aquotubulares de circulação natural:

Neste tipo de caldeiras a circulação da água nos tubos é do tipo natural e ela ocorre devido a diferenças de densidade entre a água situada na parte mais fria da caldeira e a água aquecida e misturada com bolhas de vapor na região onde ocorre forte transferência de calor.

Numa situação convencional a água desce pelos tubos traseiros situados na parte mais fria da caldeira e sobe; já em mistura água e vapor, pelos tubos da caldeira situados nas zonas mais quentes.

Estas caldeiras são geralmente construídas com paredes de água e feixes tubulares. O número de tambores é variável.

A circulação é a característica principal da maioria das caldeiras aquotubulares, entretanto sua abrangência é limitada nas unidades de grande porte até pressões da ordem de 160 bar onde a circulação fica comprometida devido à pequena diferença entre os pesos específicos do líquido e vapor.

Caldeira com Arranjo de tubos retos:

Estas caldeiras podem usar os tambores de forma longitudinal (no mesmo sentido dos tubos) ou de forma transversal em relação ao feixe de tubos. Os tubos retos podem ficar inclinados em relação ao plano horizontal em ângulos de 20° , 25° , 30° ou 45° .

Todos os tubos do feixe de tubos são iguais e paralelos. Estes são normalmente de 4 pol. Comprimentos que variam entre 5 a 7 m e conectados a um único coletor ou diversos coletores sinuosos denominadas câmaras onduladas.

São bastante utilizadas devido, entre outras coisas, a possuírem fácil acesso aos tubos para fins de limpeza ou troca, causarem pequena perda de carga e exigirem chaminés de descarga dos gases pequenas.

Os tubos de água, os coletores e os tambores formam um circuito fechado por onde circula a água.

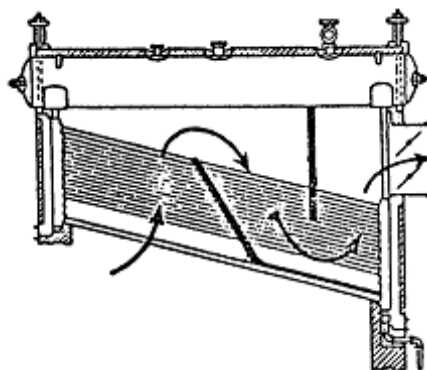


Figura 14: Caldeira de tubo reto com tambor longitudinal.

A água entra pela parte inferior do tambor, desce pelo interior do coletor posterior e sobe pelos tubos inclinados onde se forma o vapor. A mistura de vapor e água ascende rapidamente pelo coletor frontal retornando ao tambor onde tem lugar a separação entre o vapor e a água.

Estas caldeiras podem ser adaptadas à produção de energia e possuem um apreciável volume de água, fator importante para várias aplicações. Sua superfície de aquecimento varia de 67 a 1.350 m², com pressões de até 45 kgf./cm² para capacidades variando de 3 a 30 ton. vapor/h.

Caldeira com Arranjo de tubos curvos:

O emprego de tubos curvos possibilita maior flexibilidade de projeto, praticamente não oferecendo limites aos aumentos na capacidade de geração de vapor. Esta característica as torna de grande importância e utilidade na geração de vapor em centrais térmicas.

As primeiras caldeiras se caracterizavam por possuírem um número elevado de tambores aos quais estavam unidos os tubos. Havia a preocupação de que as caldeiras contassem com um grande volume de água, a exemplo das flamotubulares Cornovaglia a quem vinham substituir.

Com o decorrer do tempo foi diminuindo o número de tambores, sendo usual atualmente, por motivos de segurança, economia e pra eliminar o uso de peças de grande diâmetro, caldeiras de 1 a 2 tambores. As de um único tambor são utilizadas em unidades de alta pressão e capacidade.

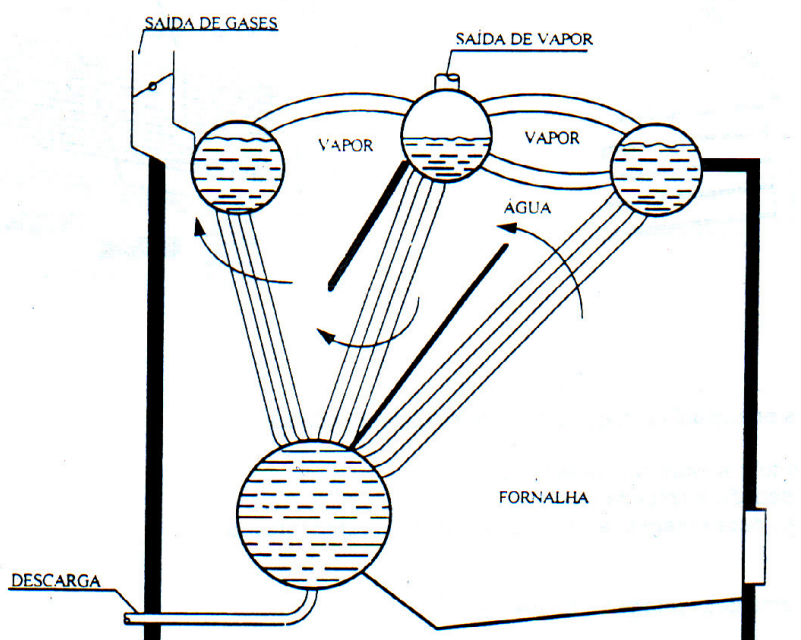


Figura 15: Caldeira aquotubular com arranjo de tubos curvos.

Este tipo de caldeiras é bastante sensível ao tratamento da água, exigindo um controle sistemático, que será tanto maior quanto maior for a pressão de trabalho.

A vaporização específica é da ordem de 28 a 30 kg vapor/h m², atingindo em torno de 50 kg vapor/h m² para caldeiras com de tiragem forçada dos gases quentes.

Caldeiras aquotubulares de circulação assistida:

As caldeiras de circulação assistida são geralmente construídas com paredes de água e um único tambor separador. São também conhecidas como caldeiras de circulação auxiliada ou circulação acelerada.

O princípio de funcionamento é o mesmo das caldeiras de circulação natural, com a diferença que a água do tambor é continuamente movimentada por bombas de recirculação. São usadas bombas de alta vazão e pequeno salto de pressão, especialmente projetado para operarem com água quente.

As caldeiras de circulação assistida são projetadas para operarem desde a pressão zero até valores próximos da pressão crítica da água.

As primeiras unidades receberam a denominação de caldeiras La Mont e foram construídas para atenderem usinas termoelétricas de médio e de grande porte.

Pequenas unidades podem ser encontradas disponíveis comercialmente.

Além de apresentarem alta eficiência térmica, tem a vantagem de atingir rapidamente a condição de regime operacional.

As bombas de recirculação eliminam os problemas inerentes à circulação natural, dispensando a instalação de tubos de grande diâmetro.

Tubos de diâmetro reduzido (25 a 35 mm) representam uma economia de material e eficiente troca de calor com os gases de combustão.

Para evitar problemas de cavitação no bocal de sucção da bomba, estas são montadas na base da caldeira, abaixo do tambor separador.

Caldeiras aquotubulares de circulação forçada:

Nas caldeiras de circulação natural a diferença de pesos específicos da água de alimentação fria, com a água aquecida misturada com bolhas de vapor é a responsável pela movimentação da água no circuito.

Fatores como incrustações, variações de carga, etc., acabam por tornarem-se obstáculos a esta circulação, portanto, apesar de vários cuidados tomados, não se consegue uma circulação orientada, ou como é chamada, uma circulação positiva.

Baseado nisto substituiu-se a circulação por gravidade pela circulação forçada por uma bomba de alimentação.

Diferenciam-se das caldeiras de circulação assistida pela não recirculação da água, de modo que a água é forçada a fluir numa única passagem pela tubulação pela própria ação de uma bomba de alimentação.

As caldeiras de circulação forçada são também conhecidas por caldeiras de passe forçado e foram desenvolvidas para atenderem usinas termoeletricas de alta potência.

As caldeiras de passe forçado dispensam a instalação de tubos de grande diâmetro e não há o inconveniente com a inclinação do feixe de tubos e com o sentido de circulação da água.

A diminuição do diâmetro dos tubos permite aumentar o circuito de tubos podendo dispor os mesmos em forma de uma serpentina contínua formando o revestimento da fornalha, melhorando-se assim a transmissão de calor e reduzindo-se o tamanho dos tambores, coletores e tornando mínimo o espaço requerido.

3.6 Caldeiras de recuperação

São caldeiras que fazem a recuperação de calor visando o máximo aproveitamento energético, onde, por exemplo, o calor das turbinas a gás pode servir como fonte de energia para um ciclo a vapor.

Processos como geração elétrica e propulsão de motores a diesel são aplicadas às técnicas de recuperação de calor, o que permite uma redução considerável do consumo de combustíveis.

A caldeira de recuperação é, basicamente, um trocador de calor composto pelo superaquecedor, evaporador e economizador, estes montados

geometricamente em sequência, desde a entrada do gás até sua saída, visando maximizar a recuperação do calor dos gases e a geração de vapor.

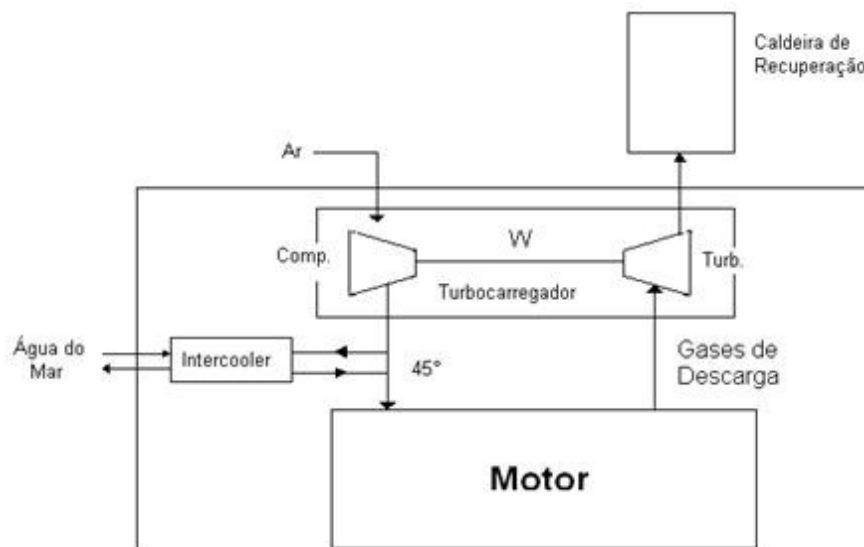


Figura 16: Utilização de uma caldeira de recuperação.

Segundo o arranjo das superfícies de aquecimento, as caldeiras de recuperação podem ser horizontais ou verticais. Dispostas no plano horizontal, as caldeiras de recuperação tem a vantagem de permitir a colocação das áreas de troca de calor sem reforço estrutural, maximizando a recuperação de calor e a geração de vapor; tem como desvantagem, ocupar uma maior área de construção.

As caldeiras de recuperação verticais têm como vantagem ocupar uma menor área construtiva e desvantagem de considerar a necessidade de reforço estrutural, ficando maior o investimento.

3.7 Caldeiras elétricas

As caldeiras elétricas já foram muito utilizadas numa época em que havia excesso de oferta de energia elétrica (de origem hidráulica) e por conta de incentivos tarifários para o seu uso. São equipamentos de concepção bastante simples, basicamente compostas de um vaso de pressão onde a água é aquecida por eletrodos ou resistências elétricas.

Nas caldeiras com resistências elétricas, a água é aquecida através de resistências elétricas blindadas imersas diretamente no líquido; já nas caldeiras com eletrodos, o aquecimento da água é obtido pela passagem de corrente elétrica diretamente através da água, que se aquece por efeito Joule.

As caldeiras elétricas são fáceis de usar e de automatizar; possui uma alta eficiência, da ordem de 95%, podendo ser maior em casos especiais.

Suas principais vantagens em relação às demais caldeiras são as de taxa de poluição ambiental nula, manutenção simples, não necessita de lugar para estocagem de combustível e existe uma resposta rápida a variações no consumo de vapor.

Atualmente o custo de operação de uma caldeira elétrica é bastante elevado em razão dos custos da energia elétrica. Assim, embora a caldeira elétrica tenha alta eficiência, deve ser analisada a viabilidade de sua troca por outro equipamento utilizando outros insumos energéticos.

4. SEGURANÇA E DISPOSITIVOS DE SEGURANÇA DE DAS CALDEIRAS DE BORDO

4.1 Requisitos das caldeiras navais

A causa principal do aperfeiçoamento das caldeiras modernas tem sido a procura de um menor peso, melhor rendimento e maior segurança, a fim de que possa construir navios mais potentes, mais rápidos e mais leves.

Em virtude das condições peculiares sob as quais as caldeiras marítimas devem trabalhar e em virtude da necessidade de merecerem confiança e tornarem a instalação marítima econômica em todos os seus aspectos, elas devem satisfazer uma série de requisitos para que sejam satisfatórias do ponto de vista naval. Esses requisitos são descritos a seguir:

a) Tamanho e peso mínimos, obtidos por:

1. Circulação acelerada da água;
2. Aumento da velocidade dos gases de combustão, o que equivale a aumentar a quantidade de calor transmitida por unidade de área da superfície de aquecimento;
3. Aumento da carga da fornalha, ou seja, do débito de combustível PR metro cúbico de volume da mesma.

b) Flexibilidade máxima, ou seja, capacidade para manter constante a pressão do vapor, sob flutuações grandes e rápidas do seu consumo, como acontece durante as manobras de navio; e capacidade de vaporizar rapidamente, partindo da condição de completamente fria, obtida por:

1. Volume relativamente grande da câmara de vapor;
2. Vazão bastante grande entre a superfície geradora de vapor e o volume d'água contido no interior dela;
3. Simplicidade no controle da combustão.

c) Segurança, ou seja, capacidade de manter a produção de vapor na temperatura desejada, dentro de uma larga faixa de débitos, permitindo operar com segurança e rendimento elevados, sem ser afetado pelo movimento do navio, obtida por:

1. Projeto, construção e instalação adequada da caldeira;
 2. Projeto adequado do superaquecedor e seu controle correto.
- d) Rendimento máximo dentro de uma ampla faixa de produção de vapor, obtida por:
1. Distribuição correta da absorção de calor na caldeira e no economizador;
 2. Isolamento adequado para tornar mínimas as perdas de calor para a praça de máquinas;
 3. Instrumentos adequados e que inspirem segurança para proporcionar um conhecimento contínuo das condições de funcionamento de todas as partes da caldeira, pelo pessoal que nela trabalha.
- e) Ser bastante acessível para inspeções, limpeza e reparos, obtida por:
1. Projeto e instalações adequados.

4.2 Considerações iniciais sobre inspeção de caldeiras

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

Ao projetar um vaso de pressão destinado ao uso naval, tudo que for possível para evitar lesão ou perda de vida de um ser humano, e dano ao meio, que tenham começo dado por acidentes ou situações perigosas, deve ser realizado pelo engenheiro naval ou pelo comandante do navio, que dará continuidade.

Não é difícil notarmos a existência de dois fatores físicos reinantes em um vaso de pressão sujeitos à chama, que são: pressão e temperatura. A NR-13 é uma norma regulamentadora do TEM (Ministério do Trabalho e Emprego) que determina os parâmetros de segurança de 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 projetos de construção, acompanhamento da operação e manutenção, inspeção e supervisão das 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 periódicas e extraordinárias, devendo constar o nome legível e assinatura do “Profissional Habilitado”.

Os projetos de alteração ou reparo devem ser concebidos previamente nas seguintes situações:

- a) Sempre que as condições de caldeiras forem modificadas
- b) Sempre que forem feitos reparos que possam comprometer a segurança
- c) Ser concebido ou aprovado “Profissional Habilitado”
- d) Determinar materiais, procedimentos de execução, controle e qualificação de pessoal.

4.3 Considerações gerais sobre inspeções em caldeiras e vasos de pressão

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).

Primeiramente, para um entendimento dos tópicos a seguir, será necessária a citação do 13.1.9, que define a classificação das caldeiras:

“13.1.9 Para os propósitos desta NR, as caldeiras são classificadas em três categorias conforme segue:

- a) caldeiras de categoria “A” são aquelas cuja pressão de operação é igual ou superior a 1960kpa.*
- b) caldeiras categoria “C” são aquelas cuja pressão de operação é igual ou inferior 588kPa e o volume interno é igual ou inferior a 100 litros.*
- c) caldeiras categoria “B” são todas as caldeiras que não se enquadram nas categorias anteriores.*

Como o objetivo dessa monografia está relacionado mais à inspeção de segurança de caldeiras e ao controle de danos e acidentes que as caldeiras podem causar, serão enfatizados os tópicos 13.5.1 à 13.5.11 e alguns dos tópicos de 13.8.1 à 13.8.11, onde podemos observar:

13.5.1 As caldeiras e vasos de pressão devem ser submetidos a inspeções de segurança inicial, periódica e extraordinária, sendo considerada condição de risco grave e iminente ao não-atendimento aos prazos estabelecidos na NR-13.

13.5.2 A inspeção de segurança inicial deve ser feita em caldeiras novas, antes de entrar em funcionamento, no local de operação, devendo compreender exames internos e externos, testes hidrostático e de acumulação.

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

- a) doze meses para caldeiras das categorias “A”, “B” e “C”;*
- b) doze meses para caldeiras de recuperação de álcalis de qualquer categoria;*
- c) vinte e quatro meses para caldeiras da categoria “A”, desde que aos doze meses sejam testadas as pressões de abertura das válvulas de segurança;*
- d) 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) dezoito meses para caldeiras das categorias “B” e “C”;*
- b) trinta meses para caldeiras da categoria “A”.*

13.5.5 As caldeiras que operam de forma contínua ou 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” citados no anexo II;*
- b) tenham testados a cada 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 das caldeiras;

f) seja homologada como classe especial mediante:

- acordo entre a representação sindical da categoria profissional predominante do 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 vinte e cinco anos de uso, na sua inspeção subsequente, as caldeiras devem ser submetidas à rigorosa avaliação de integridade para determinar a sua vida remanescente e novos prazos máximos para inspeção, caso ainda estejam em condições de uso.

13.5.6.1 Nos estabelecimentos que possuam “Serviço Próprio de Inspeção de Equipamentos” citado no anexo II, o limite de 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:

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, porém respeitando 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 teste prescritos no subitem 13.5.7 as válvulas de segurança instaladas em caldeiras deverão ser submetidas a testes de acumulação, nas seguintes oportunidades:

a) na inspeção inicial da caldeira;

b) quando forem modificadas ou tiverem sofrido reformas significativas;

c) 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 a 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 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 Equipamento”.

13.5.11 Inspeccionada a caldeira, deve ser emitido “Relatório de Inspeção” que passa a fazer parte da documentação.

13.3.1 Toda caldeira deve possuir “Manual de Operação” atualizado, em língua portuguesa, em local de fácil acesso aos operadores, contendo no mínimo:

a) procedimentos de partidas e paradas;

b) procedimentos e parâmetros operacionais de rotina;

c) procedimentos para situações de emergência;

d) procedimentos gerais de segurança, saúde e de preservação do meio ambiente.

13.3.2 Os instrumentos e controles de caldeiras devem ser mantidos calibrados e em boas condições operacionais, constituindo condições de risco grave

e iminente o emprego de artifícios que neutralizem sistemas de controle e segurança

da caldeira.

13.3.3 A qualidade da água deve ser controlada e tratamentos devem ser implementados, quando necessários, para compatibilizar suas propriedades físicoquímicas com os parâmetros de operação da caldeira.

13.3.4 Toda caldeira a vapor deve estar obrigatoriamente sob operação e controle de operador de caldeira, sendo que o não-atendimento a esta exigência caracteriza condições de risco grave e iminente.

13.3.5 Para efeito dessa NR será considerado operador de caldeira aquele que satisfizer pelo menos uma das seguintes condições:

a) possuir certificado de “Treinamento de Segurança na Operação de Caldeiras” e comprovação de estágio “b” prático conforme subitem 13.3.11;

b) possuir certificado de “Treinamento de Segurança para Operação de Caldeiras” previsto na NR-13 aprovada pela portaria 02-84 de 8-5-84;

c) possuir comprovação de pelo menos três anos de experiência nessa atividade até 8 de maio de 1984.

13.3.12 Constitui condição de risco grave e iminente a operação de qualquer

caldeira em condições diferentes das previstas no projeto original, sem que:

a) seja reprojeta levanda em consideração todas as variáveis envolvidas na nova condição de operação;

b) sejam adotados todos os procedimentos de segurança decorrentes de sua nova classificação no que se refere à instalação, operação, manutenção e inspeção.

4.4 Riscos e danos causados por uma caldeira

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:

a) Por se encontrar presente durante todo o tempo de funcionamento, sendo imprescindível seu controle de forma contínua, ou seja, sem interrupções;

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



Figura 17: Estrago causado por explosão de uma caldeira.

c) Por não envolver só os maquinistas, mas toda a tripulação que está embarcada;

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

O risco de explosão do lado da água está presente em todas as caldeiras, pois a pressão reinante nesse lado é sempre superior à pressão atmosférica. Todo fluido compressível tem seu volume bastante reduzido quando comprimido. A massa comprimida de fluido procura então, ocupar um espaço maior através de fendas e rupturas. Isso é conseguido com a explosão, quando, por algum motivo, a resistência do recipiente que o contem é superada. Para evitar a explosão surge a necessidade de empregar-se espessuras adequadas em função da resistência do material e das características de operação.

4.4.1 O superaquecimento como causa de explosões

Quando o aço, do qual a caldeira é construída, é submetido, em alguma parte, a temperaturas maiores àquelas admissíveis, ocorre redução da resistência do aço e aumenta o risco de explosão. Entretanto antes da ocorrência da explosão pode haver danos: empenamento, envergamento e abaulamentos.

Nas caldeiras aquatubulares é muito frequente a ocorrência de abaulamento com a superfície convexa voltada para o lado dos gases,

decorrentes da deformação plástica do aço em temperaturas da ordem de 400 a 550 ° C e sob a ação duradoura de pressão interna de vapor.

Outra consequência do superaquecimento é a oxidação das superfícies expostas, se o meio for oxidante, ou é a carbonetação, se o meio for redutor.

As principais causas do superaquecimento são:

- a) Seleção inadequada do aço no projeto da caldeira
- b) Uso de aços com defeitos
- c) Prolongamento excessivo dos tubos
- d) Queimadores mal posicionados
- e) Incrustações
- f) Operação em marcha forçada
- g) Falta de água nas áreas de transmissão de calor
- h) Falha operacional

4.4.2 Choques térmicos

Os choques térmicos acontecem em virtude de frequentes paradas e recolocação em marcha de queimadores. As caldeiras suscetíveis a essas condições são aquelas que possuem queimadores com potência excessiva ou queimadores que operam em *on-off*, ou seja, que não modulam a chama. As incrustações das superfícies também favorecem os efeitos dos choques térmicos.

Outras situações de ocorrência de choques térmicos são quando a caldeira é alimentada com água à temperatura menor que 80°C ou com entrada de água quente em regiões frias. Os problemas com choques térmicos acontecem com mais frequência com as caldeiras flamatubulares, especialmente aquelas com câmara de reversão traseira seca.

Falha operacional pode também contribuir para a ocorrência de choques térmicos. Isso pode acontecer quando após uma redução excessiva do nível da água, por um motivo qualquer e com parte da superfície de aquecimento sem refrigeração, o operador faz injetar água na tentativa de restabelecer o nível normal.

Em situações como esta, deve-se adotar como medida correta a cessação imediata do abastecimento de combustível aos queimadores.

4.4.3 Defeito de mandrilagem

A mandrilagem é a operação de expansão dos tubos junto aos furos dos espelhos da caldeira. A expansão é feita, portanto, nas extremidades dos tubos por meio de um dispositivo cônico chamado mandril e que gira em torno do seu eixo axial. Através da mandrilagem os tubos ficam ancorados, com a estanqueidade devida, nos espelhos das caldeiras flamatubulares ou nas paredes do tubulão das caldeiras aquatubulares. A estanqueidade pode ficar comprometida, se no momento da mandrilagem houver corpos estranhos na superfície externa das extremidades dos tubos ou nas paredes dos furos. Problemas também podem ocorrer se o problema de mandrilagem não for bem controlado, promovendo o aparecimento de trincas nos espelhos ou nos furos.

4.4.4 Falhas em juntas soldadas

O processo de soldagem é muito empregado na construção de caldeiras: solda de tubos, tubulões e espelhos, de reforços, de estais, etc. Falhas em juntas soldadas aumentam o risco de acidentes nas caldeiras, pois apresentam regiões de menor resistência do metal.

O Instituto Internacional de Solda classifica os defeitos nos seguintes grupos:

- a) Grupo 1: fissuras ou trincas
- b) Grupo 2: cavidades
- c) Grupo 3: inclusão de escória
- d) Grupo 4: falta de fusão e penetração
- e) Grupo 5: defeitos de forma

Hoje, a maior parte dos fabricantes e caldeiras empregam processos automatizados de soldagem, sendo o processo a arco submerso o que tem representado melhores resultados, especialmente na soldagem de placas de grandes espessuras. Esse processo proporciona cordões de solda limpos, alta

eficiência, menor incidência de falhas e é pouco nocivo ao trabalhador, pois não emite radiações e o arco elétrico fica submerso em um pó, chamado fluxo de soldagem, durante todo o tempo de execução da solda.

4.4.5 Alterações na estrutura metalográfica do aço

Devido à alta capacidade de produção de vapor, ocorre nas caldeiras que operam com pressões elevadas, a decomposição da água, com o conseqüente desprendimento de oxigênio e de hidrogênio. O H_2 , difundindo-se na estrutura do aço, atua sobre a cementita (Fe_3C – confere dureza e resistência ao aço carbono) decompondo-a em ferrita e carbono, o que reduz a resistência do aço. O H_2 Pode ainda reagir com o carbono produzindo CH_4 (gás metano), que provoca o empolamento do aço, ou seja, a formação de protuberâncias superficiais.

4.4.6 Erosão

Esse fenômeno pode acontecer de diversas maneiras nas caldeiras. Nas caldeiras flamatubulares pode ocorrer, por exemplo, na alimentação da água pela bomba em que o jato de entrada, podendo conter partículas pesadas, incide sobre a parede externa da fornalha, causando seu desgaste. A erosão pelo vapor pode acontecer em sedes de vedação de válvulas de segurança. Essas válvulas são normalmente fabricadas para resistir à ação abrasiva da passagem do vapor em regime de solicitações normais, ou seja, quando a válvula é aberta apenas em situações de emergência ou de testes. Entretanto, quando outros controles de pressão não estão presentes ou não funcionam, a válvula de segurança deixa de ser um acessório de emergência e passa a funcionar com maior frequência, desgastando de modo excessivo e reduzindo muito a vida útil do disco de assentamento. Nas caldeiras aquatubulares a erosão é frequentemente ocasionada por sopradores de fuligem desalinhados, que direcionam o jato de vapor sobre os tubos, em vez de entre eles.

4.4.7 Explosões causadas por aumento da pressão

A pressão do vapor em uma caldeira é função direta da quantidade de energia disponível na fornalha pela queima do combustível e que é transmitida à água. A pressão interna da caldeira depende fundamentalmente da atuação do queimador. Entretanto, o queimador não é o único responsável pelo aumento de pressão na caldeira, pois a bomba de alimentação injeta água com pressão superior àquela de trabalho. Se a vazão com que a bomba alimenta a caldeira for maior que aquela de saída do vapor, o nível de água sobe e a pressão de trabalho aumenta.

Durante a operação normal da caldeira, a pressão é mantida dentro de seus limites pelos seguintes sistemas:

- sistema de modulação de chama: constituído por um pressostato modulador de chama, um servo-motor e um conjunto de registros. O pressostato possui um diafragma ou fole que se estende com o aumento da pressão e que aciona os contatos que emitem o sinal elétrico para o acionamento do servo-motor. Este transmite movimentos a alavancas, que acionam os registros, alterando a vazão de combustível e a vazão de ar. Com isso a alimentação do queimador fica modificada e obtêm-se a modulação de chama, ou seja, sua redução nos momentos de pressões elevadas e sua intensificação nos momentos de pressões baixas.

- sistema de pressão máxima: composto por uma válvula solenóide e um pressostato. Quando a pressão se eleva além de certo limite, o pressostato é acionado e corta a alimentação elétrica da válvula solenóide. Consequência disso, é o corte completo de combustível ao queimador. Quando a pressão de trabalho se restabelece, o pressostato faz abrir totalmente a passagem do combustível ao queimador.

- válvula de segurança: tem função de deixar sair o vapor quando a pressão ultrapassa a PMTA, fazendo diminuir a pressão interna.

- sistema manual: conforme for a indicação de pressão no manômetro da caldeira, o operador tem condições de acionar os vários dispositivos para intervir, onde for necessário, para manter a pressão interna da caldeira: queimador,

bomba de alimentação ou mesmo na válvula de segurança, esta última podendo ser acionada manualmente liberando vapor à atmosfera.

4.5 Outros riscos de acidente

Outras condições determinam situações de risco de acidentes na praça de máquinas. Uma das situações é o risco de queimaduras, na praça onde ficam as caldeiras, por água quente, vapor, óleo aquecido, tubulações e depósitos desprotegidos. Deve-se considerar ainda, o risco de queimaduras por contato com produtos cáusticos, normalmente utilizados para neutralizar o pH da água da caldeira, como hidróxido de sódio.

A presença de ruídos de baixa frequência dos queimadores e de alta frequência proporcionada por vazamentos de vapor (acidentais ou intencionalmente provocados pelas válvulas de segurança) constitui um espectro sonoro peculiar e variável ao longo da jornada de trabalho.

O desconforto térmico nas operações de caldeiras é muito frequente e de fácil constatação, porém a sobrecarga térmica para ser identificada, exige a análise de cada caso em partículas, sendo necessário para tanto, não só avaliações com termômetros de globo e de bulbo úmido, como também exames médicos e acompanhamento individual.

Há também o risco de os maquinistas terem os olhos expostos à radiação infravermelha em operações de regulação de chama e em observações prolongadas de superfícies incandescentes.

Fumaças, gases e vapor expelidos pela chaminé representam, em certas condições, risco não somente aos maquinistas, como também à comunidade perto de onde os navios passam, pelo risco de intoxicação por monóxido de carbono.

4.6 Considerações finais

Com todas as possibilidades, conjugadas ou não, é de se esperar que as caldeiras tenham grandes chances de ser operadas com segurança, porém há inúmeros acidentes causados por falhas. A possibilidade de falhas em

pressostatos pode ser de natureza mecânica, como o bloqueio de sua comunicação com a caldeira ou a deterioração do diafragma ou de natureza elétrica, pela colagem dos contatos. Falhas nas válvulas solenóides oferecem riscos quando impedem o bloqueio do combustível. Há possibilidade de ocorrer esse defeito por falha mecânica de fabricação ou pela instalação incorreta.

As válvulas de segurança para trabalhar adequadamente devem ser fabricadas em processo de rigoroso controle de qualidade, com molas testadas, dimensões calibradas, concentricidade dos elementos e vedações perfeitas, do contrário não fecham após o alívio da pressão ou não abrem no momento necessário da abertura. A válvula de segurança opera após o sistema de pressão máxima não ter funcionado. Se isso não ocorre, a segurança do sistema estará bem comprometida, restando apenas o sistema manual como possível controle da situação.

Falhas no sistema manual são decorrentes de defeitos em instrumentos de indicação de pressão e de nível, ou nos dispositivos de controle, ou, ainda, por procedimentos inadequados do maquinista.

5. ALIMENTAÇÃO DE ÁGUA DE CALDEIRAS E GERADORES DE VAPOR

5.1 Fontes de captação

Para a alimentação de caldeiras, impõe-se a escolha de uma água cujas características sejam compatíveis com as especificações do equipamento; para tanto, um dos requisitos necessários é o uso de uma água sempre de maior pureza, quanto maior for a pressão de trabalho de uma caldeira.

Inúmeros mananciais podem ser utilizados como fonte de captação da água destinados a alimentação em sistemas geradores de vapor, tais como: águas superficiais de rios, lagos e represas; águas de poços artesianos, águas da rede pública, etc.

5.2 Características da água

5.2.1 Contaminantes

Geralmente as águas naturais captadas nos mananciais possuem uma série de contaminantes, cuja composição e proporção estão relacionadas com a constituição geológica dos terrenos atravessados nas proximidades de centros industrializados, além das variações climáticas no decorrer do ano.

Os contaminantes podem ser classificados em três tipos principais:

- sólidos dissolvidos, dos quais destacamos os sais de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , sílica, bicarbonatos, carbonatos, cloretos e sulfatos.
- sólidos em suspensão: geralmente constituídos de materiais particulados, responsáveis pela turbidez da água.
- gases dissolvidos, entre os principais gases encontrados têm-se o oxigênio e o gás carbônico e menos frequentemente a presença de amônia, gás sulfídrico e cloro.

5.2.2 Constituintes

A maioria das águas de superfícies (lagos, rios e represas), comumente apresenta substâncias orgânicas solúveis provenientes da decomposição de vegetais, resíduos domésticos e industriais e geralmente, não são caracterizados pelo teor de sais minerais dissolvidos, ao contrário das águas de origem subterrânea (poços, fontes).

Classifica-se a água segundo os constituintes nela presentes, caracterizando-as conforme os teores de:

- Dureza: Varia de acordo com o número total de átomos de cálcio e magnésio que ela contém. 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 dureza permanente.

- Alcalinidade: Deve-se à presença de compostos alcalinos. 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.

- Salinidade: Indica a concentração de sais solúveis na água da caldeira; é expressa geralmente em miligramas ou gramas de sais solúveis por litro de água.

- Sílica: O teor de sílica geralmente é expresso em miligramas de SiO_2 por litro de água. A sílica encontra-se principalmente no estado iônico, podendo-se encontrar também no estado coloidal.

- Turbidez: É o inverso da transparência de uma água. Águas superficiais estão mais sujeitas a variações bruscas e sensíveis da turbidez.

- Gases dissolvidos:

a) Oxigênio: sua presença nas águas naturais varia de zero a saturação, conforme a sua origem. É expresso usualmente em miligramas por litro.

b) Anidrido Carbônico: O CO_2 geralmente encontra-se em equilíbrio com os carbonatos e bicarbonatos da água. O CO_2 torna-se agressivo quando em excesso em relação a concentração de equilíbrio. Geralmente se expressa em miligramas de CO por litro de água.

5.3 Problemas devido à água

Inúmeros problemas podem acontecer com gerador de vapor devido à água que nele circula. Serão apresentados, a seguir, as causas e agravantes desses entraves e, posteriormente, correções que podem ser feitas para saná-los ou amenizá-los. Corrosão, depósitos, arraste e alguns dos principais problemas serão explanados abaixo.

5.3.1 Corrosão

É um dos entraves mais sérios em sistemas geradores de vapor, pois pode ocasionar acidentes, perda de material e parada do equipamento para a manutenção. A corrosão é um processo eletroquímico capaz de se desenvolver em meio ácido, neutro ou alcalino, na presença ou não de aeração. Os tipos mais comuns de corrosão são:

5.3.1.1 Corrosão Uniforme e Localizada

Ocorrem 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 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").

5.3.1.2 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 ânodo 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.

5.3.1.3 Corrosão por Tensão ("stress")

Pode ser devida a 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.

5.3.1.4 Corrosão pela Formação de Depósitos

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

5.3.1.5 Corrosão por Ácido Carbônico

A solubilização de gás carbônico do ar, bem como a decomposição pelo calor de carbonatos 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 o 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.

5.3.1.6 Outros Fatores que provocam Corrosão

Entre outros fatores que podem causar ou acelerar o processo corrosivo, pudesse citar:

- Oxigênio dissolvido: O oxigênio é um agente corrosivo, principalmente nas tubulações superiores das caldeiras (flamotubulares) com reaquecedores e linhas de condensado (processo corrosivo por aeração, onde a região com menor teor de oxigênio é anódica, sendo corroída).

- Teores elevados de Cloro: Em concentrações altas, reagem rapidamente com o ferro.

- Presença de Cobre e Níquel: sua presença é responsável pela formação de pilhas galvânicas, principalmente oxidando o ferro pela redução dos óxidos de cobre e de níquel e formando magnetita.

- Sólidos em Suspensão: Estas se depositam facilmente, de forma não aderente, em regiões estagnantes e de alta transferência de calor, produzindo os tipos de corrosão já mencionados.

- Choques Térmicos: Devido às condições de trabalho, a temperatura dos tubos da caldeira pode variar consideravelmente, e em consequência das dilatações térmicas diferenciais pode ocorrer um rompimento entre a camada protetora de magnetita e o aço, provocando em decorrência corrosões localizado.

- Combustível Residual: As impurezas deste podem causar problemas de corrosão nas seções de superaquecedor, economizador e pré-aquecedor de ar de um sistema gerador de vapor.

5.3.2 Depósitos

Os depósitos são responsáveis por inúmeros problemas em geradores de vapor. Ocorrem geralmente na seção pós-caldeira e caldeira dos sistemas operando a baixas e médias pressões. Em sistemas operando a pressões muito altas, ocorrem geralmente na caldeira.

A formação de depósitos ocorre nos tubos e equipamentos de um sistema gerador de vapor, devido aos seguintes fatores:

- excesso de impurezas na água de alimentação
- contaminação do vapor e do condensado
- transferência dos produtos de corrosão de um local a outro
- inadequação da aplicação de produtos destinados ao tratamento químico da água.

Entre as incrustações nos tubos de caldeiras provenientes de sais minerais dissolvidos encontrados na água de alimentação, pode-se citar: carbonato de cálcio, sulfato de cálcio, silicatos de cálcio e magnésio, silicatos complexos contendo ferro, alumina, cálcio e sódio, borras de fosfatos de cálcio ou magnésio e óxidos de ferro não protetores.

A concentração crescente destes sais na água da caldeira devido à evaporação continua da água, faz com que estes compostos solúveis atinjam seu limite de solubilidade numa dada temperatura, precipitando-os. Isto acarretará a rigor, a formação de dois tipos de depósitos:

- incrustações
- lamas

As incrustações são duras e aderentes. Formam-se pelo crescimento cristalino dos sais cuja solubilidade é inversamente proporcional à temperatura. As lamas são mais moles e menos aderentes. São provenientes de sais cujo limite de solubilidade é ultrapassado na temperatura em que se encontram. Em suma, o tipo de depósito formado é função, entre outras, da:

- qualidade da água de reposição e tratamento químico usado
- concentração de sólidos totais dissolvidos
- contaminação da água de alimentação

A formação de crostas aderentes ou não na superfície de aquecimento de caldeiras atua como um isolante térmico de baixa condutividade reduzindo a taxa de transferência de calor da chama e dos gases de combustão para a água, aumentando, portanto, o consumo de combustível para a mesma produção de vapor.

Quanto maior a temperatura de operação de uma caldeira, menor tolerância aos depósitos ela oferece; conseqüentemente, a presença de depósitos além de retardar a troca de calor, pode romper os tubos de metal da caldeira, promover perda de resistência mecânica e deformações, devido ao superaquecimento dos mesmos, além de restringir a área do fluxo de escoamento na linha e possíveis obstruções nas válvulas, resultando em perdas e reposições caras.

5.3.3 Arraste

Arraste representa uma condição de transporte da água e suas impurezas minerais pelo vapor destinado à seção pós-caldeira; tal fenômeno ocorre em caldeiras que operam nas mais diversas pressões. O arraste influi diretamente na pureza do vapor.

As causas do arraste podem ser mecânicas ou químicas. As mecânicas são devidas a flutuações repentinas e excessivas de cargas e operação em níveis superiores ao projetado, entre outras. As químicas são devidas à presença excessiva de sólidos dissolvidos ou em suspensão, sílica ou alcalinidade.

O arraste, na realidade, engloba a formação de espuma, o arraste propriamente dito e o arrebatamento da água pelo vapor como três fenômenos paralelos e simultâneos.

Um nível muito alto na caldeira pode causar arraste de água por meio do vapor. No instante que a bolha de vapor formada se rompe, leva consigo parte da água e as impurezas nela contidas. Um superaquecimento da água, ou a abertura brusca de uma válvula com retirada de grande quantidade de vapor provoca uma

queda de pressão acima da água, ocorrendo em decorrência uma ebulição violenta e tumultuosa, com arraste de água e suas impurezas, responsáveis pela formação de depósitos nas linhas de vapor.

O arrebatamento de água pelo vapor é de grande gravidade, principalmente quando o vapor gerado é destinado à produção de energia, devido aos choques térmicos nos aquecedores e choques mecânicos nas turbinas.

As principais consequências do arraste podem ser distribuídas em:

- danos nas turbinas;
- manutenção cara;
- formação de depósitos nos separadores e válvulas de redução;
- formação de depósitos no aparelho separador de vapor;
- formação de depósitos na seção pós-caldeira;
- produtos danificados e
- perda de produção.

5.3.4 Outros Problemas

5.3.4.1 Ataque cáustico ou Corrosão Cáustica

É provocado por um excesso de soda cáustica na água da caldeira, embora altas concentrações de hidróxido sejam desejáveis para proteção de superfícies de aço.

Como consequência de uma concentração elevada de NaOH em certas áreas do gerador de vapor, ocorre corrosão localizada e severa, provocando fissuras no metal e podendo ocorrer explosões, resultando em produção perdida e substituições caras. Tais fenômenos são mais frequentes em sistemas de alta pressão.

Para se evitar o ataque cáustico basta seguir as recomendações abaixo:

- manter as superfícies metálicas da caldeira limpas
- evitar a presença de dureza na água de alimentação
- manter as concentrações de cobre e ferro em níveis baixos, para se evitar depósitos e incrustações por óxidos metálicos.

5.3.4.2 Fragilização por Hidrogênio

Ocorrem geralmente em caldeiras de alta pressão devido à penetração de átomos e nitrogênio, provenientes de reações e corrosão (ataque cáustico devido a excesso de alcalinidade), nos interstícios do metal dos tubos da caldeira, provocando fadiga interna no aço, tornando-o frágil pela formação de bolhas de metano no metal. Tal processo pode ser acelerado por tensões residuais provocadas por deformações do metal.

Como consequência disto, podem ocorrer rompimentos dos tubos da caldeira, com explosões violentas e danos imprevisíveis.

Entre as medidas preventivas mais eficazes a serem tomadas pode-se destacar:

- manutenção das superfícies metálicas isentas de depósitos
- prevenção de alcalinidade excessiva.

5.3.4.3 Volatilização da Sílica

Geralmente é um problema que ocorre de forma que geradores de vapor que operam a altas pressões e a altas taxas de geração de vapor, devido a volatilização da sílica e seu transporte juntamente com o vapor, o que pode ocasionar posteriormente depósitos em turbinas, desbalanceado.

Nos processos atuais de purificação da água, destinada a geradores de vapor de alta pressão, consegue-se eliminar a quase totalidade dos sais incrustantes, mas não a sílica, que pode se encontrar em excesso para a pressão e temperatura de operação da caldeira. A manutenção de um pH elevado na água auxilia a manter a sílica em solução sob a forma de silicatos.

5.4 Correções dos problemas

Qualquer sistema gerador de vapor é potencialmente sujeito a série de problemas descritos anteriormente. Para sistemas operando altas pressões, os cuidados necessários são maiores, devido aos altos riscos envolvidos. O valor

representado por uma caldeira impõe a necessidade de sua conservação através de cuidados preventivos obtidos mediante o tratamento adequado da água e do equipamento como um todo, visando tirar o máximo proveito útil do sistema, evitando paradas desnecessárias, manutenção freqüente e diminuindo os custos totais.

5.4.1 Corrosão

5.4.1.1 Eliminação de Oxigênio Dissolvido

A água de alimentação, a água da caldeira e o condensado devem estar isentas de oxigênio dissolvido. O melhor método físico de se evitar a introdução de ar na seção pré caldeira é pelo uso de um aquecedor-desaerador. A remoção completa do oxigênio dissolvido é assegurada por um tratamento químico bem realizado, baseado em sulfito de sódio, usado com catalisador a temperaturas inferiores a 90 °C. O uso de sulfito é limitado a caldeiras de baixa e media pressão, devido a possibilidade da sua decomposição em gases sulfídrico (H₂S) e anidrido sulfuroso (SO₂) a altas pressões e o consequente abaixamento do pH do meio, pondo em risco as tubulações e equipamentos da seção pós-caldeira.

5.4.1.2 Eliminação de Gás-Carbônico

Como dito anteriormente, a presença de gás carbônico dissolvido pode causar quedas sensíveis de pH, tornando o meio agressivo ao metal.

Um dos métodos físicos de eliminação de CO₂ consiste no uso de um aquecedor-desaerador. Para assegurar uma eliminação completa de CO₂ recorre-se a métodos químicos, com o emprego de produtos neutralizantes ou inibidores formadores de filmes.

Entre os produtos de ação neutralizante no combate ao gás carbônico, citam-se a amônia e aminas voláteis, tais como a morfolina e a ciclohexilamina. A amônia só é efetiva como neutralizante do gás carbônico em baixas dosagens. Todavia, altas dosagens de amônia num meio principalmente aerado, atacam o cobre e suas ligas.

As aminas voláteis, tais como morfolina e ciclohexilamina neutralizam o gás carbônico, formando bicarbonatos e aumentando o pH do condensado, mantendo a alcalinidade necessária para a inibição de corrosão no sistema.

5.4.1.3 Eliminação de Gás-Carbônico

Entre os produtos de ação neutralizante no combate ao gás carbônico, citam-se a amônia e aminas voláteis, tais como a morfolina e a ciclohexilamina.

A amônia só é efetiva como neutralizante do gás carbônico em baixas dosagens. Todavia, altas dosagens de amônia num meio principalmente aerado, atacam o cobre e suas ligas.

As aminas voláteis, tais como morfolina e ciclohexilamina neutralizam o gás carbônico, formando bicarbonatos e aumentando o pH do condensado, mantendo a alcalinidade necessária para a inibição de corrosão no sistema.

5.4.1.4 Controle de pH e Depósitos

Um valor baixo de pH acentua a tendência corrosiva de uma água, devido ao alto teor de íons de hidrogênio. O pH da água em qualquer parte de um sistema gerador de vapor deve ser mantido o suficientemente alto para controlar a corrosão; isto é feito pela adição de um reagente alcalino e controle do pH numa faixa conveniente.

O reagente alcalino a ser usado (geralmente soda cáustica) e sua dosagem, depende da pressão de trabalho da caldeira.

5.4.2 Depósitos

5.4.2.1 Comentários sobre Água Condensada

O condensado retornado à água de alimentação da caldeira pode encontrar-se contaminado por impurezas provenientes do arraste da água impureza provenientes do processo industrial. Em tal caso o uso de purificadores de condensado proporciona a obtenção de um condensado de alta pureza, que

mediante alguns controles analíticos permitem determinar a qualidade da água condensada.

5.4.2.2 Uso de um Tratamento Químico Adequado

A escolha adequada de um programa de tratamento permite controlar da melhor maneira possível a formação de depósitos.

5.4.3 Descargas

5.4.3.1 Descargas de Nível

São contínuas e visam limitar o teor admissível de sólidos dissolvidos na água do gerador de vapor. Controla os ciclos de concentração (sólidos em suspensão, sólidos totais dissolvidos, alcalinidade ou sílica. Um controle automático das descargas de nível apresenta as seguintes vantagens:

- aumenta a economia na operação do sistema;
- evita arraste devido ao alto teor de sólidos;
- evita desperdício de água, de combustível e de produtos destinados ao tratamento.

5.4.3.2 Descargas de Fundo

São intermitentes e removem a lama e parte dos sólidos dissolvidos. Tais descargas são manuais e sua importância aumentam quando a concentração de lama na água da caldeira é alta. As descargas de curta duração são mais eficientes que as de longa duração.

- descargas de curta duração (5 a 15 segundos): eliminam menor quantidade de água concentrada e grande quantidade de lama formada. São aplicadas em maior número.
- descargas de longa duração (15 a 60 segundos): eliminam mais água concentrada e sais dissolvidos e pouca lama. São aplicadas em menor número.

Em suma, a frequência das descargas de fundo (manual) depende do tipo de água utilizada, tipo de caldeira e capacidade de vaporização, condições de funcionamento, etc. A prática local permite avaliar a melhor aplicação a ser estabelecida.

5.4.3.3 Consequências de Descargas Irregulares

Descargas não controladas criam problemas de superconcentração dos sais dissolvidos na água da caldeira, acúmulo excessivo e perigoso de lama, etc. A concentração excessiva de sais na água da caldeira resulta em fenômenos de espumação, elevação do ponto de ebulição, etc., que danificam as linhas de vapor, purgadores, paletas das turbinas, etc., bem como, eleva o consumo de combustível.

5.4.4 Programas Apropriados para Tratamento Químico

5.4.4.1 Programa de Fosfatos

Este programa consiste na aplicação de um ou mais dos produtos químicos abaixo discriminados, com o intuito de proporcionar uma ação múltipla:

- fosfatos;
- sulfito de sódio ou hidrazina;
- condicionadores orgânicos de lama;
- antiespumantes;
- soda cáustica, quando necessário;
- agente para controle de corrosão na seção pós-caldeira.

A dureza do cálcio que penetra na caldeira juntamente com a água de alimentação reage com complexos (ortofosfatos e/ou polifosfatos), formando uma lama mole e não aderente, facilmente removível da caldeira através de descargas regulares. Dependendo do fosfato complexo usado, se torna necessária a inclusão de soda cáustica, que precipita a dureza de magnésio e reage com a sílica porventura presente.

5.4.4.2 Programa de quelantes

Este programa baseia-se na aplicação equilibrada de um ou mais dos produtos químicos abaixo discriminados:

- sais de EDTA (sais do ácido etileno diamino tetracético) ou de NTA (sais do ácido nitrilo tetracético)

- soda cáustica, se necessário
- agentes sequestrantes de oxigênio (sulfito de sódio ou hidrazina)
- condicionadores de lama, quando conveniente
- sequestrantes de ferro e agentes dispersantes
- agentes antiespumantes

Os quelantes de EDTA a NTA são reagentes estequiométricos que reagem com cátions di e trivalentes (cátions de cálcio, magnésio, ferro II e cobre II), formando complexos solúveis e estáveis ao calor e evitando a formação de depósitos nas superfícies metálicas pela alteração da estrutura química das impurezas da água.

Os agentes quelantes de EDTA e NTA são os mais usados no tratamento de água de caldeiras.

As vezes se torna necessário a inclusão da soda cáustica para controle de pH e alcalinidade, favorecendo a atuação dos quelantes na formação dos complexos solúveis.

Os condicionadores orgânicos de lama inibem a formação de incrustações e auxiliam a dispersão da lama formada mesmo por um programa baseado em quelantes. Tais condicionadores podem ser constituídos de polímeros naturais ou sintéticos que alteram o comportamento físico-químico dos depósitos. A aplicação das descargas de fundo elimina a lama formada e auxilia na manutenção do gerador de vapor limpo. O emprego de sequestrantes de ferro e agentes dispersantes se torna necessário para complementar efetivamente a atuação dos quelantes e evitar a deposição de óxidos de ferro nas superfícies metálicas.

Os agentes antiespumantes, além das finalidades mencionadas no programa de fosfato, devem ser empregados em dosagens que não ultrapassem o teor máximo permissível de sólidos dissolvidos na água.

5.4.4.3 Combinação de Ambos

Às vezes utilizam-se fosfatos juntamente com quelantes, com o intuito de reforçar a ação destes. O tratamento com esta combinação sinérgica, quando não bem conduzido e sem a presença dos condicionadores de lama de fosfatos, resulta na formação de eventuais depósitos, devido a competição entre quelantes e fosfatos pelos íons de cálcio e magnésio.

5.4.5 Arraste

O arraste pode ser devido a condições mecânicas ou químicas. O primeiro não pode ser corrigido por tratamentos químicos. O arraste devido a condições químicas pode ser minimizado com o uso de antiespumantes, aliado a descargas regulares de lama, evitando a deposição da mesma nos tubos da caldeira e assegurando, portanto, um funcionamento seguro e perfeito da unidade.

As descargas regulam os sólidos totais, alcalinidade, sílica e sólidos suspensos em níveis toleráveis, não prejudiciais à operação. As contaminações oleosas porventura presentes na água da caldeira são responsáveis pela formação de espuma e arraste, devendo, portanto, serem evitadas.

6. CONCLUSÃO

O trabalho desenvolvido nesta monografia contribuiu para o aprofundamento dos Conhecimentos do curso de Aperfeiçoamento de Máquinas, especialmente aos ligados ao funcionamento e a segurança necessária no manuseio das caldeiras ou geradores de vapor que movimentam ainda alguns dos navios mercantes do nosso país.

Portanto, o resultado principal deste trabalho foi à inspeção de segurança de caldeiras e o controle de danos e acidentes que as caldeiras podem causar. Para isso, usamos como base neste trabalho as regras da NR-13 (Caldeiras e vasos de pressão).

O estudo em questão levou em consideração o controle da pressão e da temperatura dentro da caldeira, sendo o seu controle realizado por meio de inspeções de segurança (inicial, periódicas e extraordinárias) nas caldeiras e em suas válvulas de controle de pressão.

Por último, foi pesquisado a influência da água utilizada para o processo de resfriamento da caldeira para a segurança deste equipamento; levantando os seus riscos e danos e os meios de preveni-los.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALTAFINE, C. R. **Apostila sobre Caldeiras**. Caxias do Sul: Universidade de Caxias do Sul, 2002.2.

MARTINELLI, L. C.-UNIJUÍ. **Apostila Máquinas Térmicas I**. Panambi: 1998.

MARTINELLI Jr., L. C. Geradores de Vapor-Recepção, Operação e Medidas de Segurança. **Cadernos**. UNIJUÍ, Série Tecnologia Mecânica, Nº 8, Editora UNIJUÍ, Ijuí, RS, 1998.

NR-13: Manual Técnico de Caldeiras e Vasos de Pressão. Edição Comemorativa 10 anos da NR-13. 1. reimpressão. Brasília: TEM, SIT, DSST, 2006. 124 p.

FLORES, L. F. Valadão. **Sistemas Térmicos I**. Apostila EFEI, Itajubá, MG.

BAZZO, Edson. **Geração de Vapor**. Florianópolis, SC: Editora da UFSC.

TORREIRA, Raul Peragallo. **Fluidos térmicos – Água, Vapor, Óleos Térmicos**. São Paulo: Editora Hemus.

BERTASO, Henrique D'Ávila. **Segurança para Operadores de Caldeiras**.

RS: SENAI, 1994.

FERREIRA, Aurélio Buarque de Holanda. **Mini Aurélio**: o minidicionário da língua portuguesa. 6. ed. rev. e atualizada. Curitiba: Positivo, 2004. 896 p.

SAREV, A. S. Campos Panambi. **Características de Tratamento da Água para Geradores de Vapor**. RS: UNIJUI

LEITE, N. R.; MILITÃO, R. A. Escola Politécnica. **Revista PROMINP – Engenheiros de Suprimentos**. Disciplina Fabricação e Montagem de Caldeiras e Trocadores de Calor. Agos

to/ Setembro 2008.