

UNIVERSIDADE DO SAGRADO CORAÇÃO

MARCOS VINICIUS ABEL

**TRATAMENTO DE ÁGUA PARA GERADORES DE
VAPOR POR OSMOSE REVERSA**

BAURU
2016

MARCOS VINICIUS ABEL

**TRATAMENTO DE ÁGUA PARA GERADORES DE
VAPOR POR OSMOSE REVERSA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro de Ciências Exatas e Sociais Aplicadas da Universidade do Sagrado Coração, como parte dos requisitos para Química Bacharelado, sob orientação da Prof^ª. Dra. Meire Cristina Nogueira de Andrade.

BAURU
2016

Abel, Marcos Vinicius

A139t

Tratamento de água para geradores de vapor por osmose reversa / Marcos Vinicius Abel. -- 2016.

56f. : il.

Orientadora: Profa. Dra. Meire Cristina Nogueira de Andrade.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química) – Universidade do Sagrado Coração – Bauru – SP.

1. Desmineralização. 2. Osmose Reversa. 3. Membranas. I. Andrade, Meire Cristina Nogueira de. II. Título

Dedico este trabalho aos meus pais que sempre me apoiaram e também a minha amada Letícia que me deu muita força e sabedoria nas horas difíceis.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela minha vida, saúde e condição intelectual. Agradeço aos meus queridos pais por entenderem a minha filosofia e também por me darem o apoio que eu sempre precisei, também agradeço a minha amada Letícia por todo o apoio, pelas palavras de incentivo e pelas dicas de redação, de modo que sem ela esse trabalho não seria o mesmo. Agradeço a Universidade Sagrado Coração por ter permitido que eu realizasse este sonho, e a todos os professores (Mestres e Doutores) que me ajudaram nesse trabalho, em especial a professora e doutora Meire Cristina Nogueira de Andrade, não só pela orientação, mas também pela sua confiança e dedicação neste trabalho.

RESUMO

Os processos de desmineralização de águas possuem um papel extremamente importante em plantas de geração de vapor que operam com vapor superaquecido. A má qualidade da água de alimentação nesses geradores de vapor trazem grandes prejuízos para as indústrias, através de avarias nos equipamentos. Por isso, além de um controle operacional bem sucedido, existe a necessidade de um processo de desmineralização eficaz, para a reposição de água nesses geradores de vapor. Os sistemas de osmose reversa são muito utilizados, pois removem altas taxas de sais dissolvidos na água, além de possuir vantagens em relação a outros processos, como por exemplo, o baixo consumo de produtos químicos e maior tempo de operação. Os sistemas de osmose reversa possuem custos elevados e requerem certos cuidados operacionais com as membranas. Portanto, este trabalho realizou uma revisão de literatura sobre o funcionamento do processo de osmose reversa, voltado para a desmineralização de águas para o uso em geradores de vapor de alta pressão, evidenciando a importância do funcionamento e limpeza adequada dos processos operacionais, os quais mantêm o desempenho e a vida útil das membranas.

Palavras chave: Desmineralização. Osmose reversa. Membranas.

ABSTRACT

The water demineralization processes has an extremely important role in steam generating plants that operate with superheated steam. The poor quality of the feed water in these steam generators brings great damage to the industries, through equipment malfunctions. Therefore, in addition to successful operational control, there is a need for an effective demineralization process for the replacement of water in these steam generators. Reverse osmosis systems are widely used because they remove high rates of salts dissolved in water, and have advantages over other processes, such as low consumption of chemicals and longer operating time. Reverse osmosis systems are costly and require some surgical care with membranes. Therefore, this work carried out a review of the literature on the operation of the reverse osmosis process, focused on the demineralization of water for use in high pressure steam generators, showing the importance of proper operation and cleaning of the operational processes, which maintain performance and life of the membranes.

Key Words: Demineralization. Reverse Osmosis. Membranes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Concepções dos geradores de vapor fogotubulares.	13
Figura 2 - Geradores de vapor fogotubulares verticais.....	14
Figura 3 - Gerador de vapor fogotubular compacto.	15
Figura 4 - Gerador de vapor Aquatubular.	16
Figura 5 - Comparação de alguns aspectos técnicos entre a biomassa e óleos e.....	18
Figura 6 - Fornalha.	19
Figura 7 - Balão.	20
Figura 8 - Superaquecedor.....	21
Figura 9 - Economizador.	21
Figura 10 - Pré-aquecedor de ar.	22
Figura 11 - Canal de gases.....	23
Figura 12 - Chaminé.	23
Figura 13 - Componentes de um gerador de vapor aquatubular.....	24
Figura 14 - Gráfico da relação entre o peso específico da água e do vapor.	26
Figura 15 - Depósito em tubo.	29
Figura 16 - Representação Morfológica das Membranas sintéticas.	36
Figura 17 - Composição de um dos tipos de membranas TFC.....	39
Figura 18 - Módulos de membrana TFC espiral.....	41
Figura 19 - Tipos de incrustações em membranas de Osmose Reversa.....	42
Figura 20 - Sistema de osmose reversa industrial.	46
Figura 21 - Operação e regeneração de trocar de leito misto.	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações técnicas para águas da alimentação de geradores de vapor.	28
Tabela 2 - Condutividade térmica dos materiais.	30
Tabela 3 - Problemas ocasionados pela presença de sólidos totais.	33
Tabela 4 - Comparação entre as membranas de AC e TFC.....	40
Tabela 5 - Parâmetros de operação de um sistema de OR.....	46

SÚMARIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. OBJETIVOS	11
2.1 OBJETIVO GERAL.....	11
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
3 GERADORES DE VAPOR	12
3.1 CLASSIFICAÇÕES DOS GERADORES DE VAPOR	12
3.1.1 Geradores de vapor Fogotubulares	12
3.1.2 Geradores de vapor Aquatubulares	15
3.1.3 Tipos de Combustíveis utilizados nos geradores de vapor	16
3.2 COMPONENTES E ACESSÓRIOS DE UM GERADOR DE VAPOR AQUATUBULAR DE GRANDE PORTE	18
3.2.1 Componentes	18
3.2.2 Acessórios	24
4 A UTILIDADE DA ÁGUA NO PROCESSO DE GERAÇÃO DE VAPOR	26
4.1 CLASSIFICAÇÕES DAS ÁGUAS DE ACORDO COM OS PROCESSOS DE TRATAMENTO.....	27
4.2 ESPECIFICAÇÕES DA ÁGUA PARA ALIMENTAÇÃO DE GERADORES DE VAPOR.....	27
4.3 PRINCIPAIS PROBLEMAS RELACIONADOS À ÁGUA NOS GERADORES DE VAPOR DE ALTA PRESSÃO	28
4.3.1 Depósito	28
4.3.2 Corrosão	30
4.3.3 Arraste	32
5 PROCESSOS DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS	34
5.1 CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS.....	34
5.2 MEMBRANAS SINTÉTICAS	35
5.2.1 O transporte através das membranas	36
5.2.2 Materiais utilizados na fabricação de membranas	37
6 OSMOSE REVERSA (OR)	38
6.1 PRINCIPAIS MEMBRANAS UTILIZADAS NO PROCESSO DE OSMOSE REVERSA (OR).....	39
6.2 DEPÓSITOS EM MEMBRANAS DE OSMOSE REVERSA (<i>FOULING</i>).....	41

6.3 PRÉ-TRATAMENTO DA ÁGUA DE ALIMENTAÇÃO POR OSMOSE REVERSA...	42
6.4 LIMPEZA QUÍMICA	44
6.5 OPERAÇÃO DE UM SISTEMA DE OSMOSE REVERSA INDUSTRIAL	45
6.6 PÓS-TRATAMENTO DA ÁGUA PERMEADA.....	46
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	49

1. INTRODUÇÃO

As plantas industriais de grande porte necessitam de alta demanda de energia para o funcionamento de equipamentos nos processos, o que conseqüentemente tornam elevado o custo de produção ou até mesmo inviável.

Os geradores de vapor ou caldeiras, são capazes de produzir vapor superaquecido com pressões de 100 kgf/cm² e temperaturas de 450°C, são destinados para a geração de energia elétrica, e operam com alta vazão de vapor, conseqüentemente necessitam de alta vazão de água de alimentação. A maior parte da água de alimentação é resultante do próprio vapor gerado, o qual retorna para alimentação após ser condensado. Porém, existe a necessidade de reposição de água, devido às perdas no ciclo de vapor/condensado. (ROVANI, 2012).

Devido às condições físico-químicas impostas por esses geradores de vapor, grande parte dos elementos químicos presentes na água tende a deformar as superfícies, as quais eles entram em contato, resultando em corrosões ou incrustações. Portanto, a água de reposição utilizada em geradores de vapor de alta pressão, é um fator que necessita de total atenção, pois influencia a vida útil do gerador de vapor e outros equipamentos que utilizam o vapor.

Os principais processos de desmineralização de água são: sistemas de osmose reversa e sistemas de troca iônica. Ambos são concorrentes diretos quando o assunto é tratamento de água para geração de vapor de alta pressão. O sistema de osmose reversa trata-se de uma tecnologia mais recente que vem ganhando espaço nos últimos anos. Ele apresenta algumas vantagens em relação ao sistema de troca iônica, apesar de possuir um custo de aquisição mais elevado e maior cuidado durante a operação.

A operação de um sistema de osmose reversa industrial requer um sistema de controle eficiente, de preferência automatizado, além de água tratada para a alimentação do sistema, de acordo com as especificações recomendadas pelo fabricante. Esses cuidados se devem pelo fato das membranas, em sua grande maioria, serem frágeis, podendo ser deterioradas, pois cada tipo de material polimérico, o qual compõe uma membrana, tem suas restrições a respeito de certos fatores físico-químicos da água. Esses fatores são o pH ácido ou alcalino, temperatura e pressão elevada, alta concentração de sólidos solúveis, presença de cloro livre e microrganismos. No entanto, nem todos os tipos de membranas sofrem com os mesmos fatores físico-químicos. Há materiais poliméricos que possuem resistência à temperatura elevada e pH alcalino e ácido, porém se deterioram com um teor baixo de cloro livre.

O sistema de osmose reversa é classificado como um processo de separação por membranas, o qual possui alta seletividade, sendo capaz de reter partículas com 0,0001 μm de tamanho. Apesar de existirem diversos tipos de materiais utilizados para a fabricação de membranas sintéticas, poucos são direcionados às membranas de osmose reversa, sendo que os principais são: acetato de celulose, poliamida, polissulfona, poliuretano, sendo que em algumas membranas, são compostas por mais de um material.

Um sistema de osmose reversa apresenta diversos fatores, os quais influenciam na qualidade final da água permeabilizada, dentre os quais se inclui os cuidados com a membrana. Neste trabalho foi realizado um levantamento bibliográfico, com a finalidade de esclarecer, em um nível técnico, um sistema de osmose reversa, voltado para a produção de água desmineralizada para a geração de vapor.

2. OBJETIVOS

Abaixo estão apresentados os objetivos geral e específico.

2.1 OBJETIVO GERAL

Apresentar, através de uma revisão de literatura, os sistemas de desmineralização de águas para alimentação de geradores de vapor, através do processo de osmose reversa.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Apresentar as especificações técnicas da água utilizada na geração de vapor;
- Demonstrar os problemas relacionados à água no gerador de vapor;
- Apresentar um sistema de osmose reversa industrial e alguns procedimentos operacionais.

3 GERADORES DE VAPOR

Os diversos geradores de vapor possuem as mesmas bases teóricas (armazenamento de água e troca térmica) e finalidade (geração de vapor). (PERA, 1990).

Os primeiros geradores de vapor se resumiam a um vaso de água fechado, feito de aço, denominado de caldeira. O mesmo era conectado por tubos de entrada de água e saída de vapor e era posicionado acima de uma câmara de combustão feita de alvenaria, denominada de fornalha. Os gases provenientes da queima dos combustíveis trocavam calor com água da caldeira, aquecendo-a e gerando o vapor. (TORREIRA, 1995).

Ao decorrer dos anos, devido ao avanço da engenharia mecânica, ciência dos materiais e metalurgia, inúmeras modificações aconteceram, tornando os geradores de vapor mais resistentes, eficientes e seguros. (TROVATI, 2010).

Atualmente, a utilização do vapor não se restringe apenas às indústrias. Diversos prédios comerciais e até mesmo residenciais, também fazem o seu uso em atividades de limpeza, esterilização e secagem. Porém, nas indústrias, onde a sua utilidade é fundamental, os três principais empregos do vapor são: a geração de eletricidade, de trabalho mecânico e calefação do material da produção. (ELETROBRÁS, 2005).

3.1 CLASSIFICAÇÕES DOS GERADORES DE VAPOR

O principal critério de classificação é baseado na concepção construtiva de um gerador de vapor, em relação à disposição dos fluxos de gases de combustão e água, denominados de fogotubular ou aquatubular. Outros critérios como o tipo de combustível utilizado, tamanho, capacidade de produção e pressão de trabalho, também são utilizados para classificação. (PERA, 1990; BAZZO, 1992; TORREIRA, 1995).

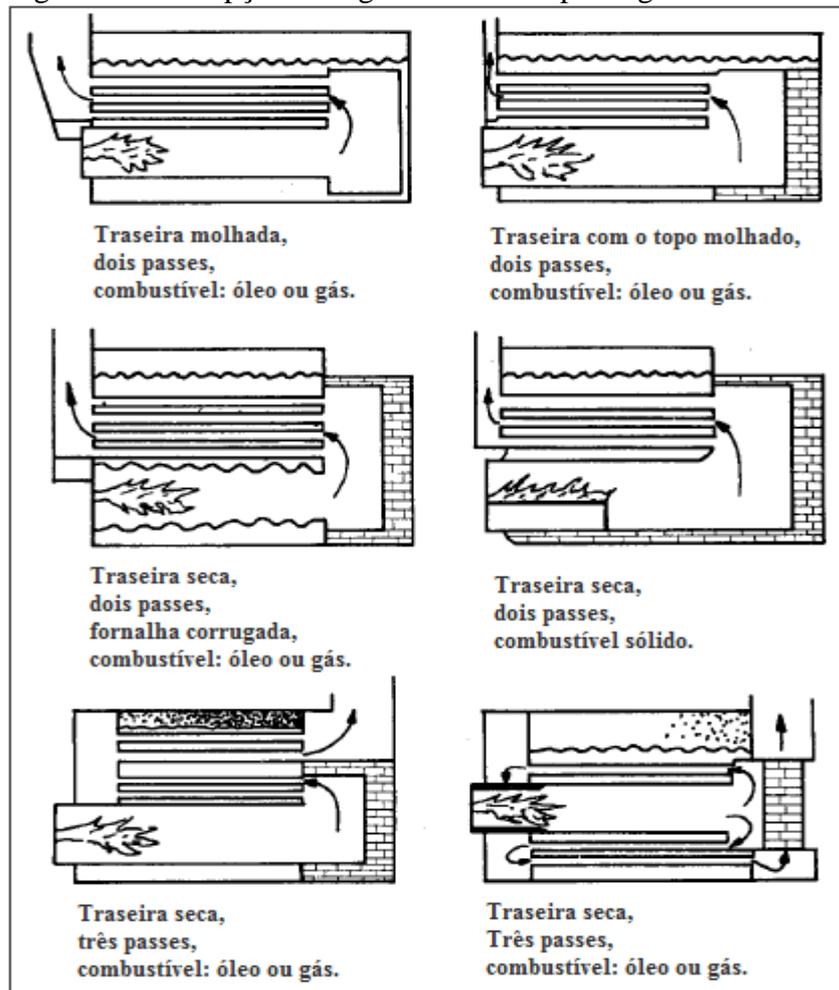
3.1.1 Geradores de vapor Fogotubulares

Os geradores de vapor fogotubulares, também chamados de pirotubulares ou flamotubulares, foram os primeiros tipos de geradores de vapor construídos. Eles possuem um formato cilíndrico, o qual obtém internamente câmara de combustão (fornalha) e câmara de água (balão).

Os gases gerados na combustão passam por tubos, que atravessam a câmara de água, sendo lançados para a atmosfera através da chaminé. Os tubos que recebem os gases são fixados nas paredes da câmara de água. (BAZZO, 1992).

A Figura 1 representa alguns geradores de vapor fogotubulares, os quais possuem variados modelos de fornalhas e diferentes números de passes dos gases através da câmara de água.

Figura 1 - Concepções dos geradores de vapor fogotubulares.



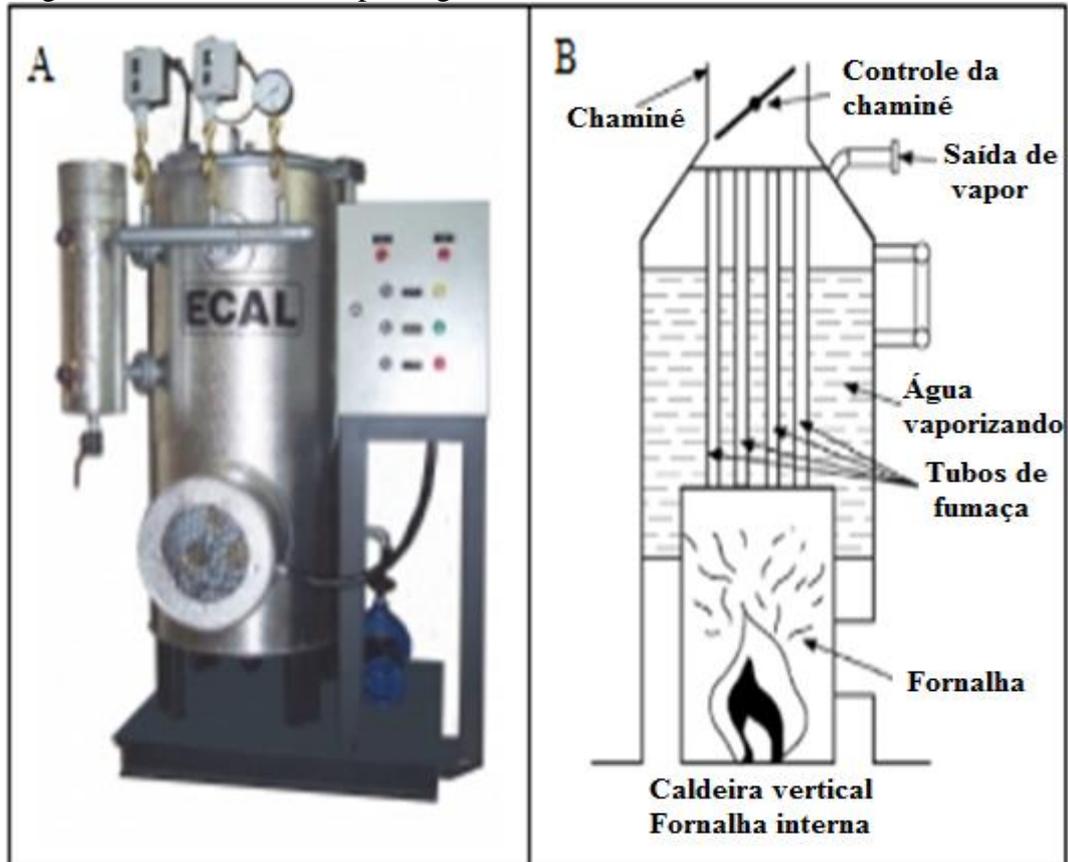
Fonte: Bizzo (2001).

Nota: Adaptado pelo autor.

Atualmente, os geradores de vapor fogotubulares mais empregados são os verticais e os compactos. De acordo com Pera (1990), os geradores de vapor verticais são muito utilizados em hotéis e restaurantes, pelo fato de ocuparem menor espaço e por gerarem vapor com temperaturas e pressões adequadas a esses fins.

Segundo Ecal (2012) um gerador de vapor vertical elétrico (Figura 2.A) pode atingir uma pressão máxima de 12 kgf/cm² e potência de 6 a 150 kw/h. A Figura 2.B representa a vista interna de um gerador vertical com fornalha.

Figura 2 - Geradores de vapor fogotubulares verticais.

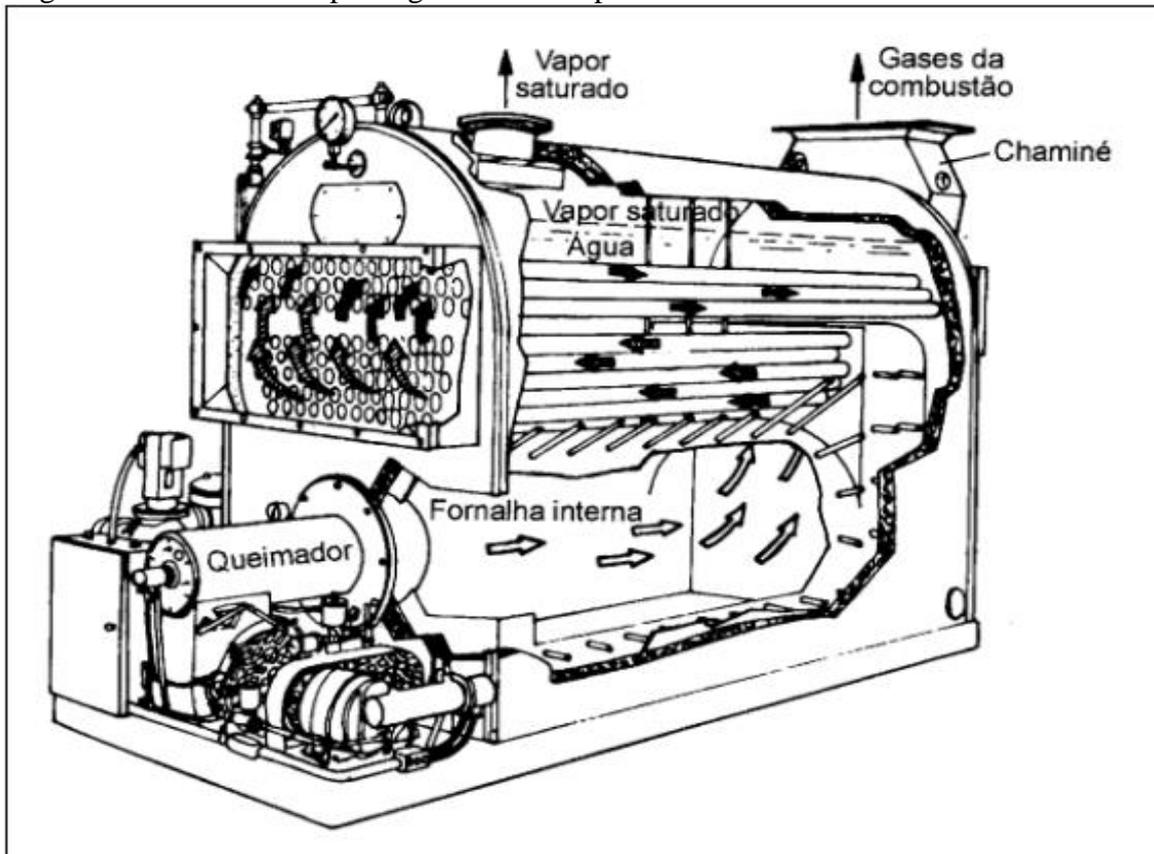


Fonte: A: ECAL CALDEIRAS E AQUECEDORES; B: Pera (1990).

Dentre os geradores de vapor fogotubulares, os compactos são os mais comuns, sendo muito utilizados em pequenas e médias indústrias. Uma das vantagens desses geradores de vapor é que requerem simples instalação e operação.

Segundo Torreira (1995) os geradores de vapor fogotubulares compactos contém todos os equipamentos necessários para a sua operação (Figura 3).

Figura 3 - Gerador de vapor fogotubular compacto.



Fonte: Bizzo (2001)

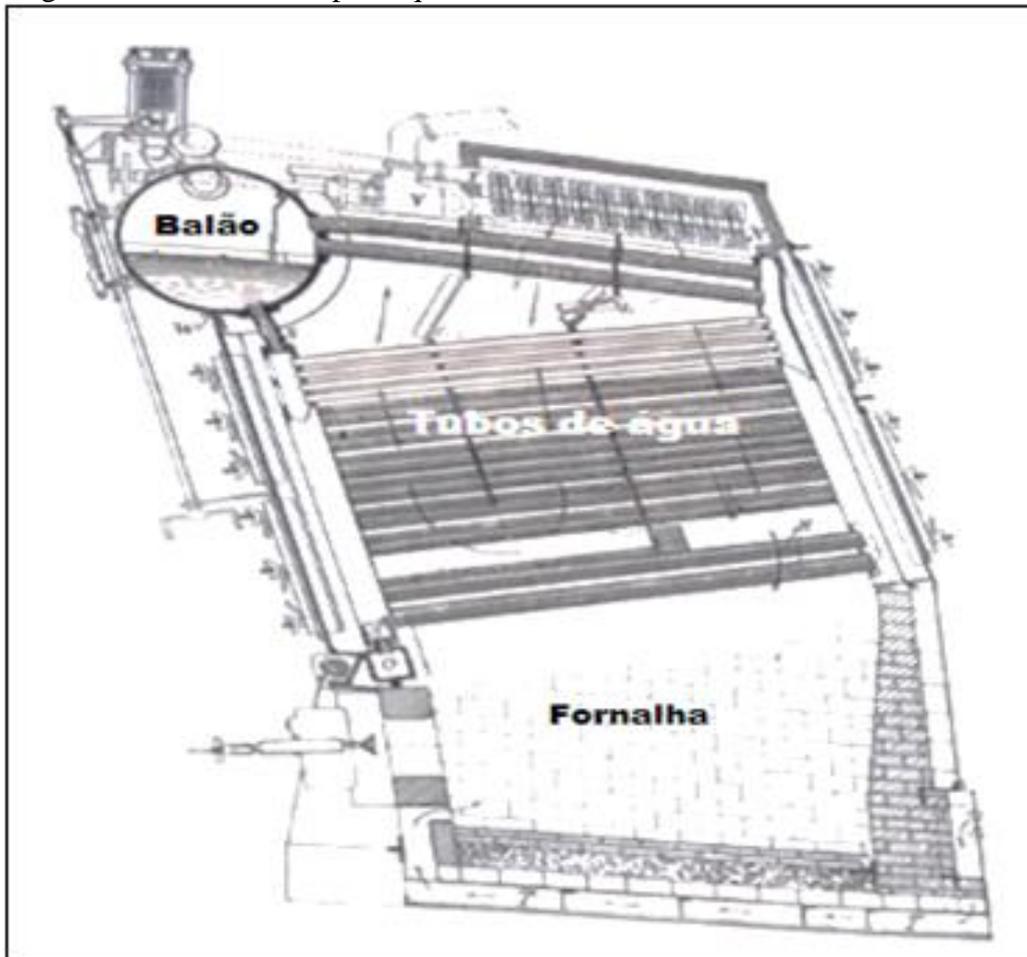
Nota: Adaptado pelo autor.

3.1.2 Geradores de vapor Aquatubulares

Os geradores de vapor aquatubulares possuem uma concepção inversa em relação aos fogotubulares. A água passa por dentro dos tubos, os quais são conectados na parte inferior da câmara de água/vapor, também conhecida como balão de água. Existem geradores de vapor com mais de um balão, sendo interligado com o balão superior através dos tubos. Os gases provenientes da combustão gerada na fornalha passam por fora dos tubos, realizando a troca de calor com a superfície dos mesmos, que por sua vez repassam o calor a água, aquecendo-a e transformando em vapor. (PERA, 1990).

A Figura 4 representa um gerador de vapor aquatubular de tubos retos, o qual foi um dos primeiros modelos de gerador de vapor aquatubular.

Figura 4 - Gerador de vapor Aquatubular.



Fonte: Pera (1995)
Nota: Adaptado pelo autor.

3.1.3 Tipos de Combustíveis utilizados nos geradores de vapor

Existem diversos tipos de combustíveis utilizados na geração de vapor. Os mais comuns são o carvão mineral, gás natural, óleo mineral (xisto e petróleo), a biomassa (bagaço da cana-de-açúcar) e madeiras (lenha e cavaco e pó de serra). Os fatores mais relevantes na escolha do combustível são o menor custo de aquisição e maior eficiência na combustão.

Os diferentes combustíveis possuem diferentes propriedades físico-químicas, de modo que os geradores de vapor necessitam de adaptações para o eficiente uso de cada um deles, como por exemplo, a inserção de espargedores em geradores de vapor alimentados com o bagaço da cana de açúcar. Por isso, os tipos de combustíveis também pode ser um critério de classificação dos geradores de vapor. (ELETROBRÁS, 2005).

O carvão mineral é a fonte mais utilizada para geração de energia elétrica no mundo, respondendo 41% da produção total. Para combustão em caldeira, é preferível que o carvão possua pouco teor de cinza e de enxofre, condições as quais proporcionam bom rendimento térmico. (ZHEHNDONG, 2006; INTERNATIONAL AGENCY ENERGY, 2008).

O óleo diesel é um combustível fóssil, derivado do petróleo, que possui pequena quantidade de oxigênio, nitrogênio e enxofre. É um combustível considerado nobre e pouco utilizado na geração de vapor. (DEMEC, 2009).

Óleo de xisto é obtido através do processamento do xisto betuminoso, sendo denominado como melhor alternativa para os óleos combustíveis derivados de petróleo. O mesmo é um combustível que possui maior fluidez, fácil manuseio e também apresenta menor custo de operação. O óleo de xisto refinado é idêntico ao petróleo de poço, sendo um combustível muito valorizado. (DALLABONA et al, 2007).

Os óleos possuem alguns aspectos relevantes que influenciam na qualidade do mesmo. Dentre eles estão a importância de preservá-lo de modo correto, para que não seja contaminado, durante e após sua entrega à indústria; a importância de armazená-lo aquecido; a importância de manuseio adequado, conforme as recomendações, para a obtenção de uma combustão eficiente. (CENTRO DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS, 2009).

Os combustíveis de biomassa mais utilizados são a lenha (toras de madeira), o cavaco (subproduto de serrarias) e o briquete (bloco cilíndrico compacto, de alta densidade, composto por resíduos de madeiras). Esses combustíveis sólidos mais utilizados nas caldeiras, devido à obtenção de reservas significativas em certas regiões do país (SILVA, 2008).

Os combustíveis gasosos utilizados nos geradores de vapor caracterizam-se principalmente por sua eficiência, limpeza e versatilidade, além de contribuírem para a redução do desmatamento. A combustão do gás natural é isenta de fuligem e de outros materiais que prejudicam o meio ambiente, apresentando baixos teores de contaminantes como o nitrogênio, dióxido de carbono, água e compostos de enxofre. Os gases GLP (gás liquefeito de petróleo) e o gás natural são os combustíveis mais utilizados nos geradores. (PETROBRÁS, 2009).

A Figura 5 apresenta as vantagens e desvantagens do uso da biomassa e dos óleos e gases na geração de vapor.

Figura 5 - Comparação de alguns aspectos técnicos entre a biomassa e óleos e gases.

Tipo de combustível	Vantagens	Desvantagens
Óleos e gases	Alto poder calorífico	Alta taxa de CO ₂ produzido
	Alto teor de hidrocarbonetos	Alto risco de explosão e incêndio
	Maior facilidade no manuseio	Maior Custo
Biomassa	Menor custo	Requer grandes áreas para estocagem
	Fonte renovável	Produção de cinzas na combustão
	Absorve o CO ₂ da atmosfera (plantio)	Maior umidade

Fonte: ARRUDA (2009).

Nota: Adaptado pelo autor.

3.2 COMPONENTES E ACESSÓRIOS DE UM GERADOR DE VAPOR AQUATUBULAR DE GRANDE PORTE

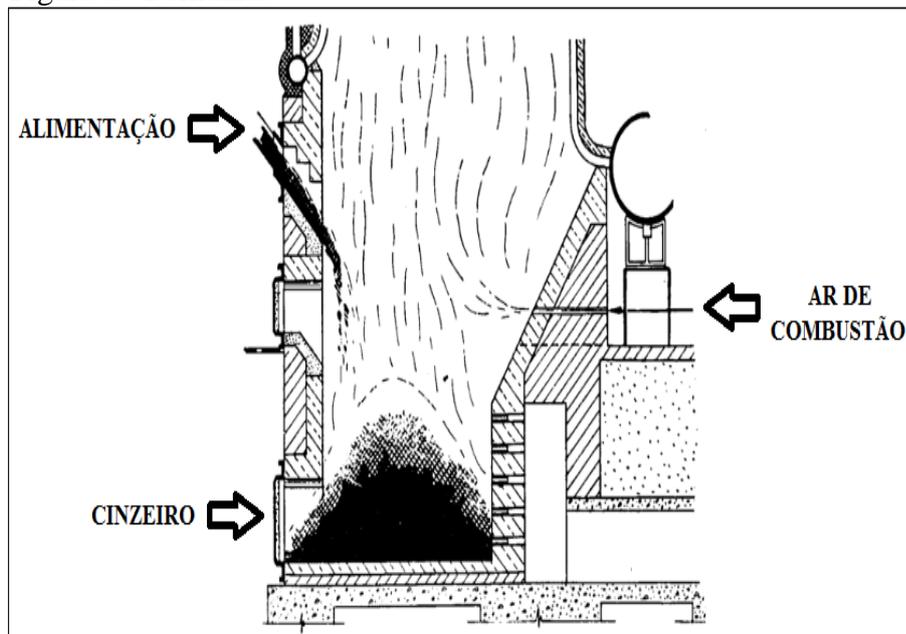
Ao longo do tempo, diversos tipos e modelos de geradores de vapor foram desenvolvidos e aperfeiçoados com intuito de aumentar a capacidade de produção, rendimento térmico e agilidade operacional. Tal evolução ocorreu com desenvolvimento de componentes mais eficientes e de novos acessórios.

3.2.1 Componentes

Os componentes de um gerador de vapor são equipamentos com funções específicas, dos quais alguns são fundamentais e outros auxiliares, são eles:

- Câmara de combustão ou Fornalha: trata-se de um componente fundamental, pois é a parte do gerador de vapor onde ocorre um dos processos fundamentais para a operação do equipamento, o qual é a combustão. Existem diferentes modelos de fornalha, devido a sua necessidade de adaptação para cada tipo de combustível. As fornalhas mais simples (Figura 6), que utilizam combustíveis sólidos, realizam a combustão no piso da base do gerador de vapor. No caso de combustíveis de baixa densidade (bagaço da cana-de-açúcar e pó de serra), as fornalhas são projetadas para realizarem a queima em suspensão, pois uma vez que acumulados no grelha da fornalha não possui uma queima uniforme, gerando oscilações na pressão e também prejudicando o fluxo dos gases. (PERA, 1990)

Figura 6 - Fornalha.

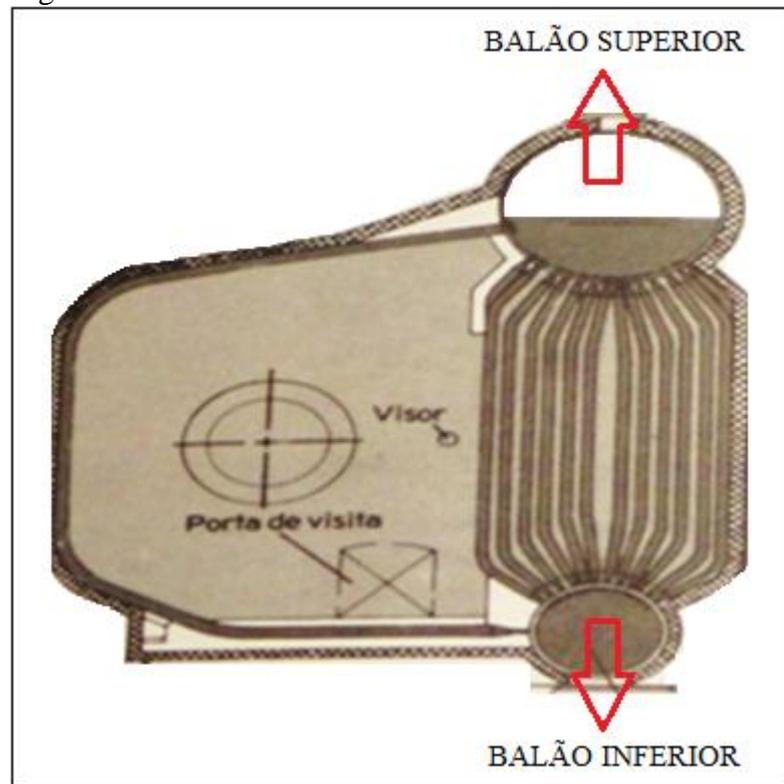


Fonte: Pera (1990).

Nota: Adaptado pelo autor.

- Câmara de água: trata-se de um componente fundamental. São recipientes em forma de invólucros cilíndricos hermeticamente fechados, onde se armazena a água, também são conhecidos como balão, tubulão ou tambor (Figura 7), os quais são feitos de aço, resistentes a alta pressão e devidamente interligados com tubos, de modo a formar um único recipiente hermético (BAZZO, 1992).

Figura 7 - Balão.



Fonte: Torreira, (1995).

- Superaquecedor de vapor: trata-se de um componente auxiliar. É responsável pela elevação da temperatura do vapor que sai do balão, transformando o vapor saturado em vapor superaquecido, através da troca térmica com os gases de combustão, na parte superior do gerador de vapor. A Figura 8 mostra um superaquecedor aguardando a instalação. Na parte interna dos tubos passa o vapor e na parte externa passam os gases de combustão que serão eliminados pela chaminé.

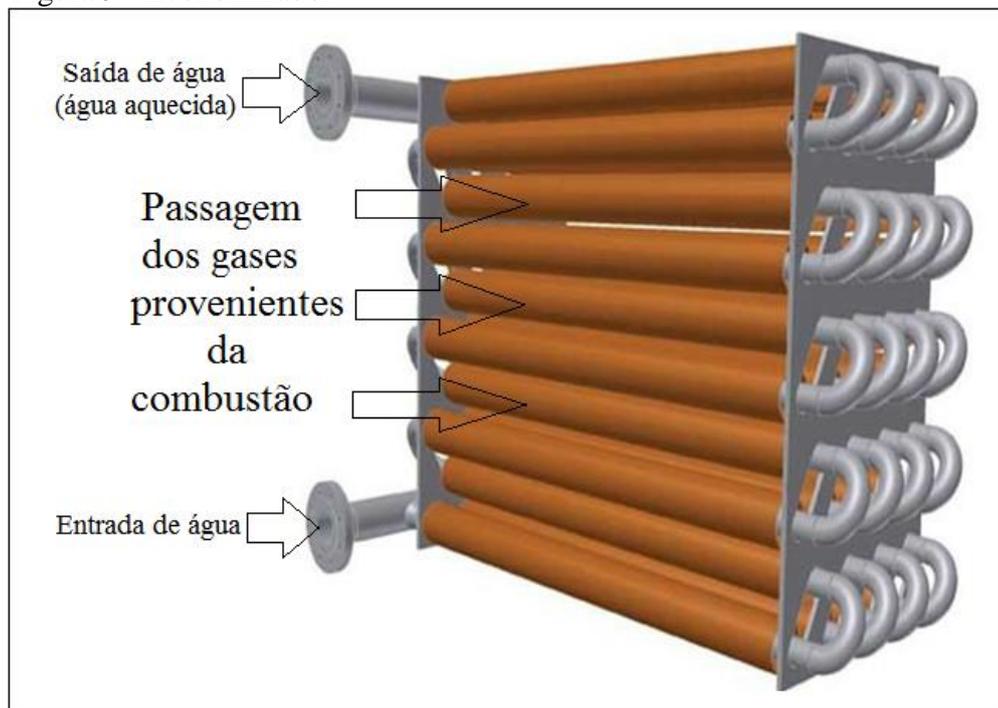
Figura 8 - Superaquecedor.



Fonte: Fatoni (c2009).

- **Economizador:** trata-se de um componente auxiliar, o qual tem a função de aquecer a água de alimentação, através da troca térmica com os gases provenientes da combustão. A Figura 9 representa um economizador.

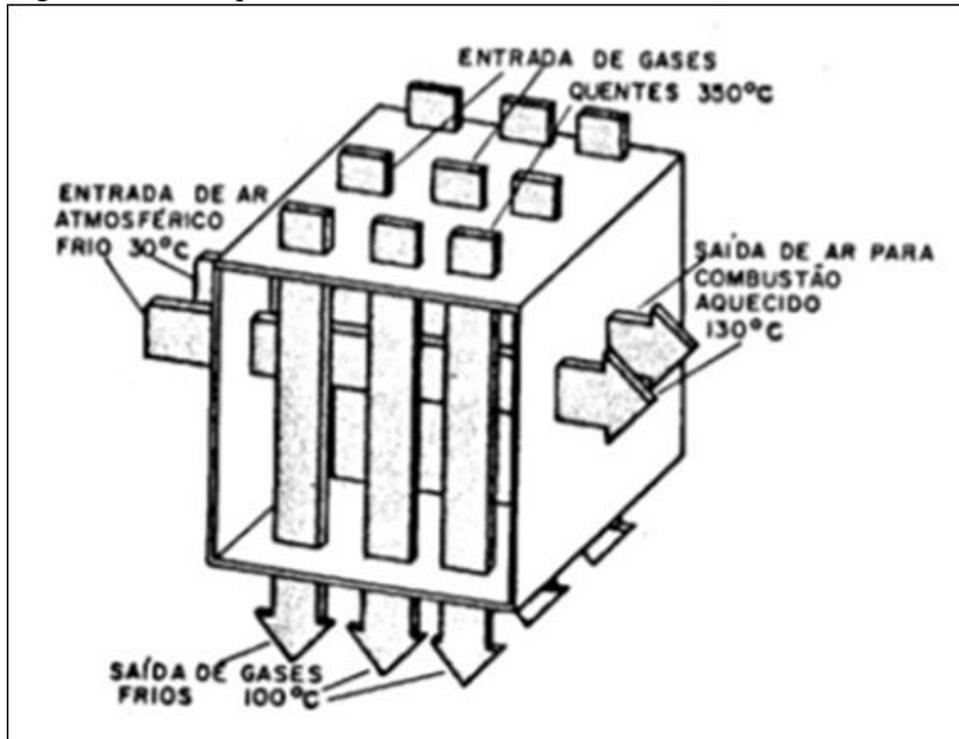
Figura 9 - Economizador.



Fonte: Alibaba.com (c2016).

- Pré-aquecedor de ar: trata-se de um componente auxiliar, o qual tem função de aquecer o ar que será injetado para realizar a combustão. Tal aquecimento ocorre devido à troca de calor com os gases gerados na combustão. Assim como o economizador, o pré-aquecedor também tem a finalidade de economizar combustível (Figura 10).

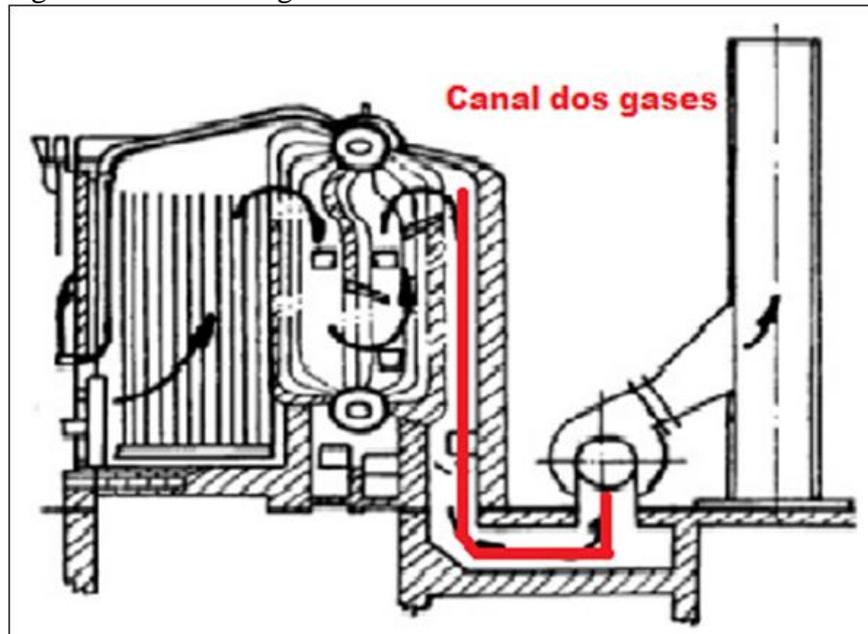
Figura 10 - Pré-aquecedor de ar.



Fonte: Margonar ([1998?]).

- Canal dos gases: trata-se de um componente fundamental. É um duto por onde os gases percorrem até a sua exaustão, os quais são feitos de chapas de aço. O nome que se atribui ao processo de exaustão dos gases do gerador de vapor é tiragem. A Figura 11 representa um esquema de tiragem induzida, onde a exaustão dos gases é feita por exaustores.

Figura 11 - Canal de gases.



Fonte: Margonar ([1998?]).

Nota: Adaptado pelo autor.

- Chaminé: trata-se de um componente fundamental. É um duto vertical, o qual direciona a saída dos gases para a atmosfera, conforme demonstra a Figura 12.

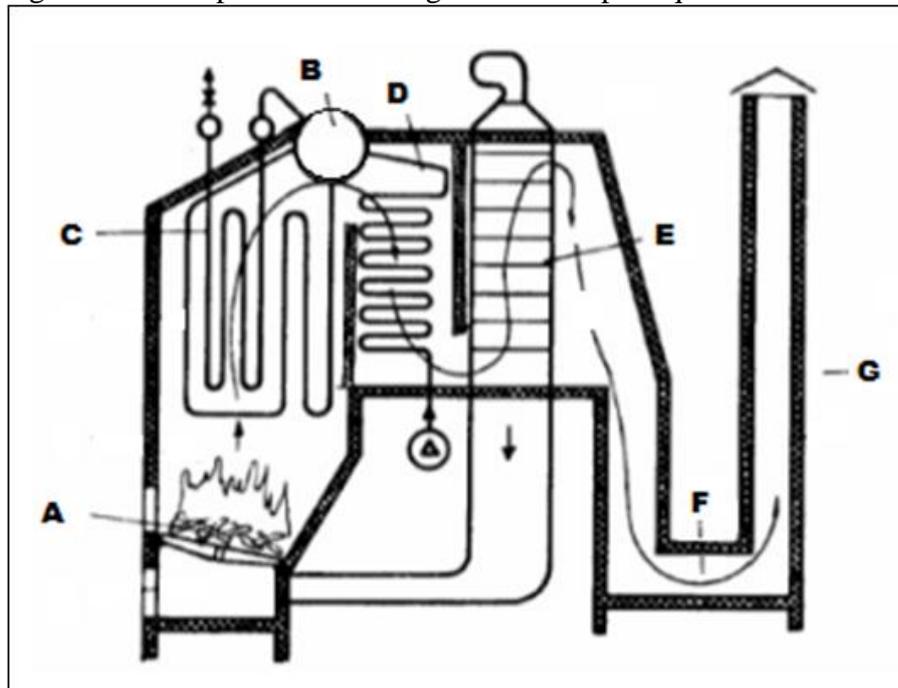
Figura 12 - Chaminé.



Fonte: ACMAV montagens (c2009).

A Figura 13 representa os componentes descritos anteriormente, inseridos em um gerador de vapor aquatubular de grande porte.

Figura 13 - Componentes de um gerador de vapor aquatubular.



Fonte: Pera (1990).

Legenda: A - Fornalha; B - Câmara de água/vapor; C - Superaquecedor;

D - Economizador; E - Pré-aquecedor; F - Canais dos gases; G - Chaminé.

Nota: Adaptado pelo autor.

3.2.2 Acessórios

Os acessórios são definidos como mecanismos, máquinas auxiliares ou dispositivos, imprescindíveis para o funcionamento de um gerador de vapor (BAZZO, 1992). De acordo com este mesmo autor, os principais acessórios empregados nos geradores de vapor e suas respectivas funções são:

- Válvula principal: controla a vazão de saída do vapor superaquecido e é localizada na tubulação de saída de vapor, instalada em um ponto próximo ao gerador de vapor.
- Válvula de segurança: tem a função de abrir, quando a pressão do gerador ultrapassar o limite crítico de operação estabelecido, com o objetivo de evitar uma eventual explosão.
- Medidor de nível: mede o nível de água na câmara de água.
- Pressostato: é um dispositivo de comando que emite um sinal, quando atinge a pressão de referência. É empregado no balão e nas redes de vapor.
- Termostato: é um dispositivo de comando que emite um sinal, quando atinge a temperatura de referência.

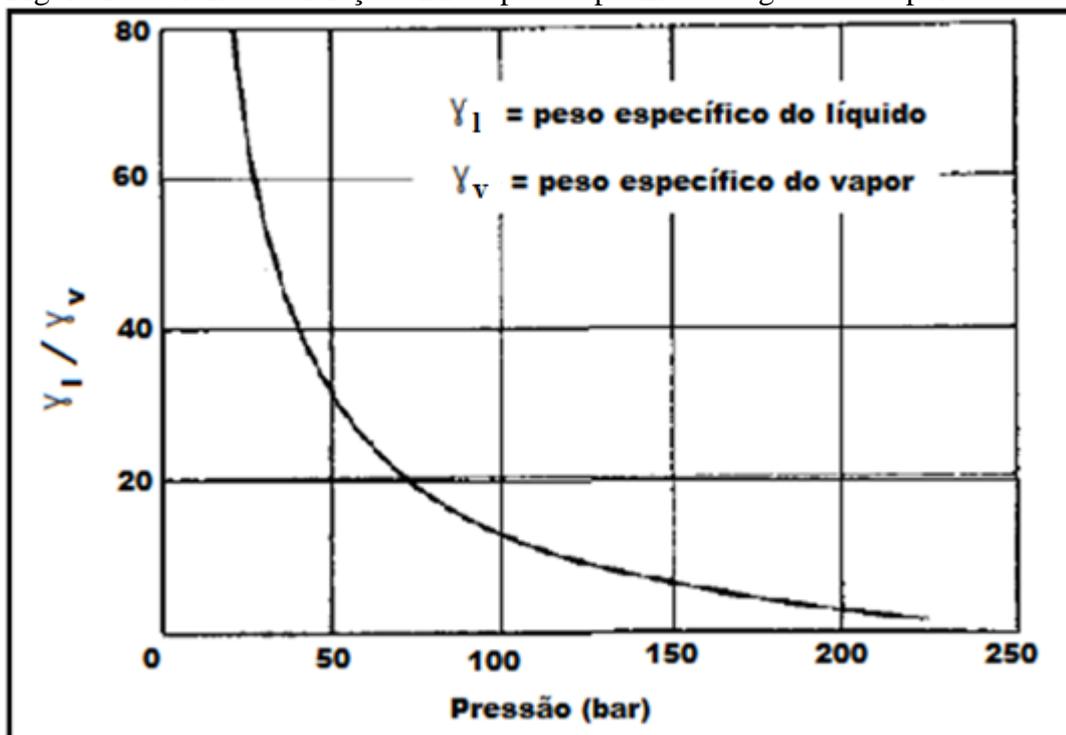
- Ventiladores: são responsáveis pela entrada de ar na fornalha. Eles operam sob controle, para realizar a dosagem de ar ideal para a queima adequada do combustível.
- Exaustores: tem a função de realizar a tiragem dos gases para fora dos geradores de vapor, de modo a manter o controle, dentro da faixa de trabalho.
- Medidores de pressão e temperatura: são responsáveis pela medição das pressões e temperaturas. São instalados em pontos estratégicos nos geradores de vapor e também nas redes de água e vapor.
- Acessórios de alimentação de água: reservatórios, bombas, tubulações, aquecedores, des aeradores e sistemas de tratamento.
- Acessórios de combustão: combustíveis líquidos: reservatórios, filtros, bombas, queimadores. Combustíveis sólidos: esteiras transportadoras, espargidores, grelhas, cinzeiro.

4 A UTILIDADE DA ÁGUA NO PROCESSO DE GERAÇÃO DE VAPOR

Os geradores de vapor de grande porte fornecem vapor para a geração de energia elétrica e também para a troca térmica nas plantas industriais, necessitando de água com quantidades mínimas de impurezas, de acordo com as especificações determinadas pelos fabricantes, garantindo maior vida útil dos equipamentos. (NALCO CHEMICAL COMPANY, 1987).

A água, no interior de um gerador de vapor, circula por convecção natural pelos tubos, devido à diferença de densidade entre o líquido e do vapor. A Figura 14 apresenta um gráfico o qual fornece a relação entre as duas densidades em função da pressão de saturação, de tal modo que a força motriz da circulação da água é exatamente a diferença entre elas. (BIZZO, 2001).

Figura 14 - Gráfico da relação entre o peso específico da água e do vapor.



Fonte: Bizzo (2001).

As tubulações por onde passam o vapor também necessitam de atenção quando se refere a problemas devido a qualidade da água, principalmente nas redes de vapor superaquecido, por operarem sob alta temperatura e pressão.

4.1 CLASSIFICAÇÕES DAS ÁGUAS DE ACORDO COM OS PROCESSOS DE TRATAMENTO

Além do consumo humano, a água possui outros objetivos como lavar, aquecer, diluir soluções e até mesmo gerar pressões negativas. Todas essas finalidades e outras mais são utilizadas nas indústrias, portanto a água recebe classificações, de acordo com a sua função em determinados processos industriais. A seguir apresenta-se a classificação da água, de acordo com o seu processo de tratamento (SABESP, 2011):

- Água salobra: água de mares e oceanos.
- Água bruta: água de rios e lagos, ou seja, a água sem tratamento.
- Água clarificada: água que passa pelo processo de “clarificação”; o qual possui as seguintes etapas: dosagem de produtos químicos, coagulação, floculação e decantação.
- Água filtrada: água que passa através dos filtros.
- Água potável: água apropriada para o consumo humano. Ex.: águas de poços e minas, ou água tratada.
- Água desmineralizada: é a água com quantidades mínimas de minerais, a qual passou por um processo de desmineralização ou destilação.

4.2 ESPECIFICAÇÕES DA ÁGUA PARA ALIMENTAÇÃO DE GERADORES DE VAPORE

Um tratamento de água municipal, que atende as especificações de água potável, não é suficiente para tratar a água que alimenta um gerador de vapor de alta pressão, pois deve ser desmineralizada, com o intuito de reduzir os sais minerais a níveis de tolerância aceitáveis. A sequência do tratamento de desmineralização depende do tipo e da concentração dos sais minerais, além de outros compostos encontrados na água da fonte de abastecimento. (NALCO CHEMICAL COMPANY, 1987).

De acordo com a pressão de trabalho do gerador de vapor, há um critério a ser seguido em relação à qualidade da água de alimentação, de modo a atender as especificações exigidas pelos fabricantes dos geradores de vapor, garantindo o bom funcionamento dos equipamentos. (CERATTO, 2013). A Tabela 1 demonstra as especificações técnicas para águas de alimentação de geradores de vapor.

Tabela 1 - Especificações técnicas para águas da alimentação de geradores de vapor.

Parâmetros	Faixa de controle relativo à pressão de trabalho da caldeira (Kgf/cm ²)					
	10	20	40	60	80	100
Alcalinidade Hidroxida (ppm CaCO ₃)	300-400	250-300	150-200	120-150	100-120	80-100
Dureza Total (ppm CaCO ₃)	0	0	0	0	0	0
Sulfato "SO ₃ " (ppm)	30-60	30-40	20-30	15-20	10-15	5-10
Ortofosfato "PO ₄ " (ppm)	30-60	30-60	20-40	15-20	10-15	5-10
Ferro "Fe" (ppm)	10	5	3	2	2	1
Sílica "SiO ₂ " (ppm)	100	50	30	10	5	3
Sólidos Totais Dissolvidos "TDS" (ppm)	4000	3500	3000	2000	500	300
Matéria Orgânica	70-100	70-100	70-100	50-70	50-700	50-70

Fonte: American Boilers Manufacturers Association – ABMA (1996).

Nota: Adaptado pelo autor.

4.3 PRINCIPAIS PROBLEMAS RELACIONADOS À ÁGUA NOS GERADORES DE VAPOR DE ALTA PRESSÃO

O ideal seria que a água de alimentação de um gerador de vapor de alta pressão fosse isenta de impurezas, porém isso não acontece. Baseando-se nesta informação, não há como conter a corrosão e a incrustação nos geradores de vapor. Entretanto, os danos causados podem ser reduzidos, caso mantenha-se a excelência no tratamento da água, mantendo-a com concentrações mínimas de sais. (RIBEIRO, 2002). Os principais problemas dos geradores de vapor, relacionados à água de alimentação são depósito, corrosão e arraste.

4.3.1 Depósito

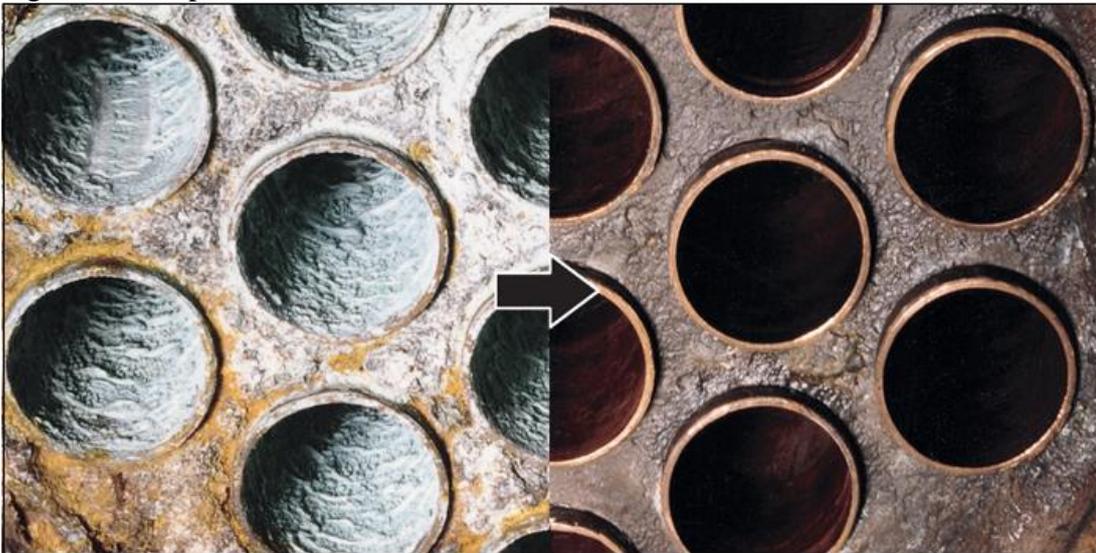
Os depósitos são conglomerados que aderem nas superfícies dos materiais que estão em contato com fluxo de água, provocando a restrição da passagem do fluxo de água e a diminuição do rendimento na troca térmica. (NALCO WATER TREATMENT, 1998).

Um dos tipos de depósito é formado por diversos materiais insolúveis presente na água, como: lamas, óleos, materiais biológicos. Outro tipo é composto por minerais dissolvi-

dos, como o carbonato de cálcio, também conhecido como dureza. O depósito também pode ser formado por esses dois tipos simultaneamente, pois raramente são formados por uma única substância. (REIS, 2011).

Nos processos de geração de vapor, os depósitos se formam em tubos, principalmente nos que compõem a parede de água, onde há uma baixa vazão, facilitando a aderência dos materiais insolúveis e dos sais de menor solubilidade nas paredes dos tubos. Quando os tubos sofrem depósito (Figura 15), o gerador de vapor perde a eficiência, devido à diminuição da troca térmica entre o gás de combustão e a água, pois os materiais depositados nas paredes dos tubos, principalmente o carbonato de cálcio (CaCO_3), possuem características de isolantes térmicos, fazendo com que parte do calor, que deveria ser dissipada para a água, seja contida no metal do tubo. (AZZOLINI, 2007).

Figura 15 - Depósito em tubo.



Fonte: APEX Engineering Products (c 2016).

A Tabela 2 representa os valores de condutividade térmica de alguns materiais e através desses valores é possível comparar a diferença de condutividade entre o aço carbono e alguns sais dissolvidos na água; sendo que alguns materiais agem como isolantes térmicos.

Tabela 2 - Condutividade térmica dos materiais.

Material	Condutividade Térmica (Kcal/cm ² /h.°C.cm)
Aço de caldeira	9,7945
Fosfato de Cálcio	0,7899
Óxido de Ferro	0,6319
Sulfato de Cálcio	0,5055
Fosfato de Magnésio	0,4738
Analcita	0,2780
Refratário	0,2212
Tijolo isolante	0,0221
Incrustação de Silicato	0,0190

Fonte: Macedo (2007).

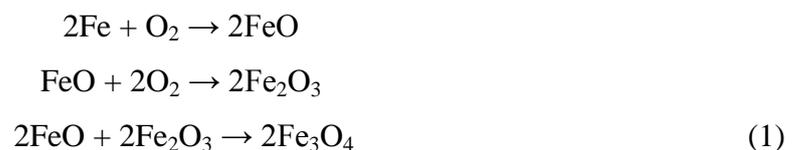
Nota: Adaptado pelo autor.

4.3.2 Corrosão

Em geradores de vapor ocorre grande preocupação sobre a integridade física dos materiais, uma vez que operam sobre altas pressões, podem gerar rompimentos e causar graves acidentes, quando o oxigênio se encontra dissolvido na água. Segundo Crabtree e al (1999) “A corrosão é um dos piores problemas nos sistemas de geração de vapor, pois pode ocasionar acidentes, danos materiais e conseqüentemente parada do equipamento para a manutenção”.

No entanto, um dos principais responsáveis pela degradação dos geradores de vapor é a corrosão, que consiste na transformação de um material devido à reação de oxirredução química ou eletroquímica com o seu meio, sendo caracterizada pela transferência de elétrons entre pelo menos duas espécies envolvidas: a que se oxida (perde elétrons e aumenta o NOx) e a que se reduz (ganha elétrons e reduz o NOx). (CHEIS, 2014).

De modo resumido, a reação entre o aço (maior componente estrutural de uma caldeira) e o oxigênio está descrita na Equação 1:



Portanto, o ferro pode dar origem aos óxidos de ferro (II) e (III), se combinar e formar a magnetita (“ferrugem”), deixando o material frágil.

De acordo com Silva (2009) a corrosão nos geradores de vapor pode ocorrer tanto nas partes em contato com água (corrosão interna), como nas partes em contato com os gases (corrosão externa). Abaixo está a diferenciação entre corrosão interna e externa:

- Corrosão interna: consiste no contato da água com o ferro, nas diversas faixas de temperaturas.
 - a) Oxidação generalizada do ferro: os aços, dos tubos e das chapas, possuem uma fina camada protetora contra corrosão, chamada de magnetita, a qual quando sofre a ação de agentes físicos (choques térmicos, dilatações e/ou agentes químicos) sofre oxidação e deixa de existir, resultando na formação de outros óxidos.
 - b) Corrosão galvânica: ocorre quando dois materiais metálicos diferentes estão na presença de um eletrólito e em contato elétrico, ocasionando um fluxo de elétrons. O par galvânico nas caldeiras pode ser originado quando as partes metálicas (níquel, cobre ou outro metal) se desprendem e se fixam em ranhuras ou em pequenas folgas encontradas nas caldeiras. A Equação 2 representa um exemplo comum da reação de um sal de cobre como eletrólito, a qual contém íons Cu^{2+} em contato com metais ferrosos, como por exemplo o aço:



A reação resulta na corrosão do ferro da liga ferrosa (o qual é oxidado) e a deposição (por redução) do cobre.

- c) Corrosão por aeração diferencial: ocorre nos geradores de vapor flamotubulares quando o oxigênio dissolvido na água provoca corrosão dos tubos superiores, representada pela Equação 3.



- d) Fragilidade cáustica: ocorre quando o hidróxido de sódio (soda cáustica) em concentração superior a 5% migra para fendas ou em outras partes onde não exista a magnetita representada pela Equação 4.



- e) Corrosão por gases dissolvidos: a água da caldeira pode se contaminar por gases, como o oxigênio, os quais reagem com o ferro e o corrói.
- f) Corrosão salina: ocorre quando as concentrações elevadas de cloreto migram nas fendas ou em outras partes onde não exista a magnetita. Ressalta-se que os cloretos reagem

com Fe^{2+} e formam o cloreto de ferro, FeCl_2 , que se hidrolisa formando o ácido clorídrico que atacará o ferro. A Equação 5 representa a corrosão salina descrita anteriormente.



- Corrosão externa: ocorre nas superfícies expostas aos gases de combustão.
 - a) Combustível e temperatura: o gerador de vapor que opera com cinza possui a ocorrência de ataque de O_2 , resultando na destruição da magnetita. Os geradores de vapor aquatubulares possuem Superaquecedor, que apresenta superfícies mais quentes, fazendo com que ocorra a corrosão.
 - b) Ar atmosférico: os geradores de vapor instalados em áreas úmidas apresenta corrosão em todas as suas estruturas.

A corrosão interna pode ser controlada pelos procedimentos a seguir:

- Manutenção adequada do pH e do nível de alcalinidade;
- Controle do oxigênio e contaminantes na água de alimentação;
- Redução do estresse mecânico;
- Operação com especificações projetadas, especialmente para temperaturas e pressões;
- Devidas precauções durante a entrada em operação e a parada;
- Controle e monitoramento efetivo.

4.3.3 Arraste

Trata-se de um fenômeno caracterizado pelo arraste de água do balão do gerador de vapor para a linha de vapor (superaquecido, linhas de distribuição de vapor, turbinas, equipamentos), tornando de suma importância a manutenção e controle eficiente da pureza do vapor, pois a presença de pequenas quantidades de sais inorgânicos na água arrastada pode causar contaminação em processos que requerem o uso do vapor direto. As causas de arraste podem ser divididas em químicos e mecânicos (RAVANI, 2012).

- Químicos:
 - a) Excesso de alcalinidade.
 - b) Excesso de sólidos dissolvidos.
 - c) Excesso de sólidos suspensos.

- d) Presença de contaminantes orgânicos: óleos, detergentes, graxas, açúcar, etc.
- e) Sílica (acima de 40 kgf/cm²).
- Mecânicos:
 - a) Formação dos golpes de aríete nas linhas de vapor, os quais designam as variações de pressões decorrentes às variações de temperaturas.
 - b) Deposição e incrustação de sais nos separadores de vapor e equipamentos na linha de vapor, podendo causar rupturas, desbalanceamentos, etc.
 - c) Abrasão nas válvulas, tubulação e acessórios das linhas de vapor.
 - d) Falha de projeto da caldeira.
 - e) Demanda de vapor superior à produção nominal do sistema.
- As medidas corretivas para os danos causados pelo arrastes são:
 - a) Equacionar demanda e produção de vapor.
 - b) Evitar variações bruscas de consumo.
 - c) Reparos nas colmeias e dispositivos do separador, a fim de evitar fluxos preferenciais.
 - d) Ajustar dosagem de soda cáustica, mantendo pH adequado.
 - e) Evitar contaminações por orgânicos, através do monitoramento frequente dos condensados e água de reposição.
 - f) Em caldeiras com alta taxa de vaporização, utilizar constantemente um agente anti-espumante. Em casos de contaminação deve-se aumentar a dosagem.

Um método eficiente para a detecção de arrastes é a medição de sólidos no vapor, que consiste na coleta do vapor por intermédio de um funil colocado antes de qualquer acessório e diretamente na linha de saída da caldeira. A Tabela 3 demonstra os problemas normalmente ocasionados pela presença de sólidos totais no vapor. (CHEIS, 2014).

Tabela 3 - Problemas ocasionados pela presença de sólidos totais.

Concentração de sólidos Totais Dissolvidos (TDS) no vapor	Problemas observados
0 a 0,01	Nenhum
0,01 a 0,10	Possíveis depósitos nas turbinas e filtros
0,10 a 1,00	Depósitos nas turbinas. Possíveis depósitos nos superaquecedores
Acima de 1,00	Depósitos nas turbinas e também nos superaquecedores

Fonte: Apostila Tratamento da água para a geração de vapor: CALDEIRAS.

5 PROCESSOS DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS

O estudo sobre separação por membranas teve início em 1748, com o Cientista Francês Abbe Nollet, o qual realizou um experimento utilizando um recipiente com vinho, cuja boca foi vedada com uma bexiga de origem animal e, em seguida, o recipiente foi imerso em outro maior contendo água. A bexiga funcionou como uma membrana, permitindo a passagem de água para dentro do recipiente que continha o vinho, evidenciando a característica de semi-permeabilidade. (SINGH, 2005).

O conceito dos processos de separação por membranas refere-se aos processos que possuem membranas como barreiras seletivas entre duas fases, sendo responsáveis pelas separações das mais diversas substâncias físicas, químicas e biológicas presentes na fase de alimentação, em meio líquido ou gasoso. (SCHNEIDER; TSUTIYA, 2001).

Atualmente os processos de separação por membranas têm apresentado um importante papel nas indústrias, devido as suas vantagens em relação aos demais processos de separação. Segundo Mancuso (2003), os processos de separação por membranas ocorrem sem a acumulação de impurezas no interior das membranas e, conseqüentemente, sem necessidade de regeneração. Estes processos operam sob temperatura ambiente e, com isso, preservam os compostos de possíveis alterações ou degradações, permitindo instalações moduláveis. Por se tratar de processos físicos, não necessitam de aditivos químicos para auxiliar na separação e promovem fracionamento sem mudanças de fases e sem gastos excessivos de energia.

5.1 CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS

Os processos de separação por membranas possuem diferentes modelos estruturais. Uma classificação dos processos separação por membranas é feita de acordo com: natureza da força motriz, que promove o fluxo dos fluidos em direção às membranas; mecanismo de separação das membranas e alcance de separação das membranas em relação ao tamanho das moléculas e íons retidos (METCALF E EDDY, 1998).

Os tipos de processos de separação e suas principais características são:

a) Processos de separação por membranas que envolvem correntes gasosas: Há dois tipos de processos que realizam a separação de gases: os que apresentam sólidos porosos como barreira seletiva entre duas fases gasosas e os que possuem membranas, feitas com materiais poliméricos, como por exemplo, a poliamida.

- b) Diálise: Consiste na separação de duas soluções, as quais possuem concentrações distintas. A membrana permite a passagem seletiva dos solutos menores, acumulando do lado contrário os solutos de maior porte, os quais foram retidos pela membrana. Finalmente igualam-se as concentrações e ambas se encontram em lados contrários da membrana.
- c) Microfiltração: Consiste em um processo de filtração que tem a pressão hidráulica como força-motriz. Tal força direciona o fluido em direção as membranas, as quais possuem uma porosidade de 50 nm, separando materiais suspensos nas soluções aquosas, como por exemplo, bactérias, pigmentos de tintas e diversas macromoléculas orgânicas.
- d) Ultrafiltração: Assim como a microfiltração, esse processo tem a pressão hidráulica como força-motriz, porém as membranas apresentam uma porosidade menor, em torno de 2 a 50 nm. Sendo assim, é possível promover a separação de moléculas menores como as proteínas, polímeros e alguns minerais.
- e) Osmose reversa: Esse processo tem muita semelhança com a ultrafiltração, porém as membranas são classificadas como densas, assumindo uma porosidade menor do que 2nm, podendo rejeitar partículas de 0,0001 μm de tamanho, como por exemplo: íons e micromoléculas.

5.2 MEMBRANAS SINTÉTICAS

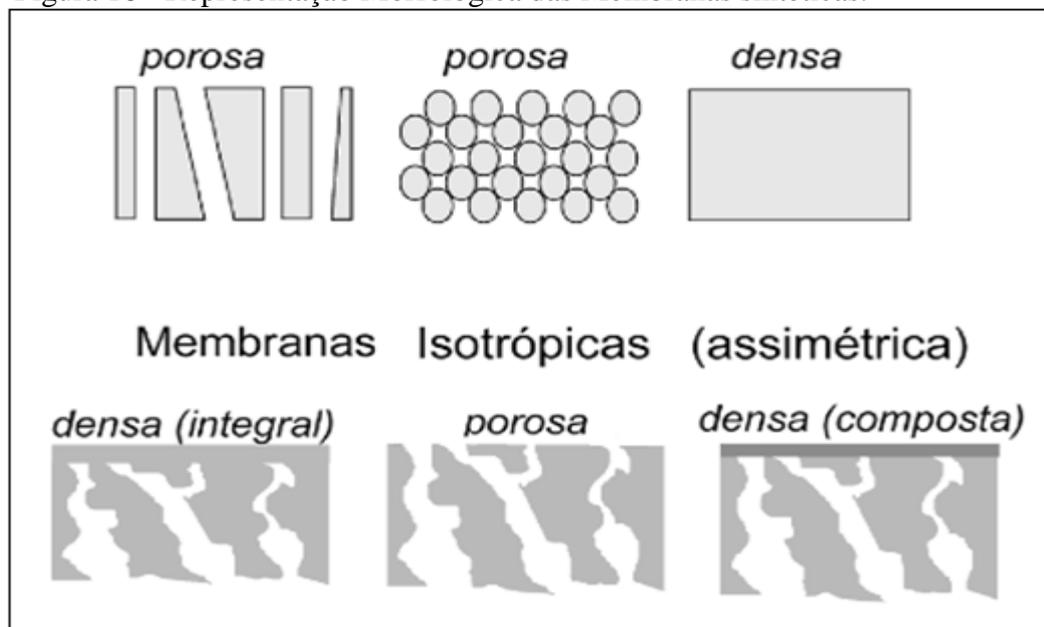
As membranas sintéticas são as peças principais nos processos de separação por membranas, pois realizam a separação, restringindo total ou parcialmente a passagem de certos compostos, moléculas e íons. (SCHNEIDER; TSUTIYA, 2001).

A classificação das membranas sintéticas é feita em relação a sua morfologia, dividindo-se em densas e porosas. As membranas sintéticas densas, conhecidas também como não porosas, além de possuir uma alta densidade, conforme a denominação, também são lisas, ou seja, não possuem poros. Já as membranas sintéticas porosas apresentam alta rugosidade e tamanho de poros variados de acordo com a característica de cada material. (BAKER, 2004).

As membranas isotrópicas (simétricas) e membranas anisotrópicas (assimétricas), se referem também à morfologia das membranas, onde as membranas simétricas possuem uma única estrutura ao longo de toda a sua extensão. Em contrapartida, as membranas assimétricas possuem diferença na estrutura ao longo de sua seção transversal, onde a borda exterior é chamada de “pele”, possuindo uma espessura muito fina e a outra parte é chamada de “camada suporte”. A “pele” é a principal responsável pela seletividade das substâncias a serem separadas, já a camada suporte tem a função de fornecer resistência mecânica à pele.

As membranas simétricas possuem em média uma camada de 100 a 200 μm de espessura, já as membranas assimétricas, entre 0,1 a 0,5 μm na camada da pele e 50 a 150 μm na camada suporte (METCALF & EDDY, 1998). As membranas assimétricas possuem duas classificações, são elas, as integrais, que apresentam apenas um único material; e as compostas, que são formadas por mais de um material, sendo a pele composta por material denso e a camada de suporte por material poroso. A Figura 16 representa a morfologia das membranas sintéticas.

Figura 16 - Representação Morfológica das Membranas sintéticas.



Fonte: Habert (2006).

5.2.1 O transporte através das membranas

Para que ocorra o transporte de moléculas e íons através das membranas, é necessário que haja uma força motriz, ou seja, uma força que age sobre as moléculas e íons, pressionando-os contra as membranas. Há dois mecanismos que explicam o fenômeno do transporte através das membranas. O primeiro é chamado de poro-fixo, o qual é a filtração em si, onde as moléculas menores atravessam os poros da membrana e as moléculas maiores do que os poros são retidas, sendo mecanismo característico das membranas porosas. O segundo mecanismo é chamado de solução-difusão, onde as moléculas e íons que são selecionados pela membrana, são dissolvidos na camada externa da mesma e, em seguida, difundidos para o interior, até finalmente serem permeabilizados, sendo característico das membranas densas. (ANADÃO, 2010).

5.2.2 Materiais utilizados na fabricação de membranas

Existem muitos materiais utilizados na fabricação de membranas sintéticas, onde a maioria são polímeros, os quais apresentam diferentes propriedades morfológicas e de processo, evidenciando o acetato de celulose (CA), que foi um dos primeiros a ser utilizado, destinado às membranas de osmose reversa, apresentando baixa estabilidade térmica e mecânica, estabilidade em água, alta resistência moderada ao cloro livre, baixa resistência à biodegradação e baixo custo. (ENGEL, 2011).

O poliuretano (PU) é utilizado como membranas sintéticas semipermeáveis em diversos processos nas indústrias químicas, incluindo a pervaporação e a permeação de gases. É um dos materiais mais utilizados na produção de membranas assimétricas, através do método de inversão de fase. Ele possui boas propriedades mecânicas, como resistência química. (BELICANTA et al, 2011).

A polissulfona (PSO) é usada para a fabricação de membranas para processos de ultrafiltração e também para a fabricação de membranas compósitas, utilizadas em processos de nanofiltração e osmose reversa, sendo produzidas também, pelo método de inversão de fases. A (PSO) possui ótimas características como a resistência mecânica, resistência a temperaturas elevadas e elevada estabilidade química.

O polietersulfona é considerado um excelente material para promover a separação de gases, pois apresenta alta resistência térmica, mecânica e química. Em relação à polissulfona, o polietersulfona possui uma maior rigidez de cadeia, devido suas irregularidades e por possuir uma cadeia molecular com uma espinha dorsal polar, tornando mais seletiva que a polissulfona. (KIM et al, 2013).

A poliamida (PA) é um polímero termoplástico composto por monômeros de amida conectados por ligações peptídicas. Ela apresenta forte estabilidade térmica e química, além de possuir excelentes propriedades mecânicas e elétricas. Em sua sintetização consegue-se obter um filme polimérico com uma espessura minúscula, o qual é o responsável pela alta seletividade das membranas compósitas de filme fino “Thin Film Composite (TFC)”.

6 OSMOSE REVERSA (OR)

Osmose é um fenômeno que ocorre em organismos vivos, onde substâncias em meio aquoso são separadas por barreiras seletivas, chamadas de membranas, as quais fazem um controle da passagem de moléculas e íons, para dentro e fora das células. Somente algumas dessas moléculas e íons selecionados são permeadas, ou seja, atravessam a membrana. A água tem a passagem livre e devido à diferença de potencial químico entre as duas fases, a água flui do meio hipotônico para o meio hipertônico, com o objetivo de torná-los isotônicos. (HABERT; BORGES; NÓBREGA, 2006).

A osmose reversa é um processo de separação por membranas e possui tal nome, devido à semelhança com o fenômeno osmose, apresentando como objetivo de funcionamento a retenção de substâncias através das membranas semipermeáveis, utilizando a pressão hidráulica como força motriz, de modo a promover a purificação do solvente e a concentração do soluto. (ANADÃO, 2010).

Nos processos de osmose reversa o fluxo é inverso ao da osmose convencional, devido à pressão aplicada, fazendo com que o fluxo de água atravesse a membrana, passando do meio hipertônico para o meio hipotônico, retendo o soluto (moléculas e íons). O fluxo que atravessa a membrana é chamado de “permeado” e o fluxo que não atravessa a membrana é chamado de “rejeito” ou “concentrado”, o qual escoia paralelamente a superfície da membrana e, em seguida, sai do sistema através de tubulação.

Existem cálculos que avaliam o desempenho de um sistema de osmose reversa, sendo realizados através das medições das variáveis de operação e também através das características da água de alimentação. Dentre essas variáveis estão a vazão, pressão, temperatura, pH, condutividade elétrica e o índice de densidade do lodo (SDI).

Dentre as variáveis que caracterizam a membrana, taxa de permeabilidade, seletividade, configuração estrutural e características químicas do polímero, são as mais importantes para garantir a eficiência de um sistema de osmose reversa. (KHEDR, 2002). A taxa de permeabilidade da membrana pode ser definida com base no cálculo de retenção, de acordo com Mulder (1996), representada na Equação 6.

$$Re = \frac{C_F - C_P}{C_F} = 1 - \frac{C_P}{C_F} \quad (6)$$

Onde:

Re = Retenção

Cf = Concentração do soluto na alimentação ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

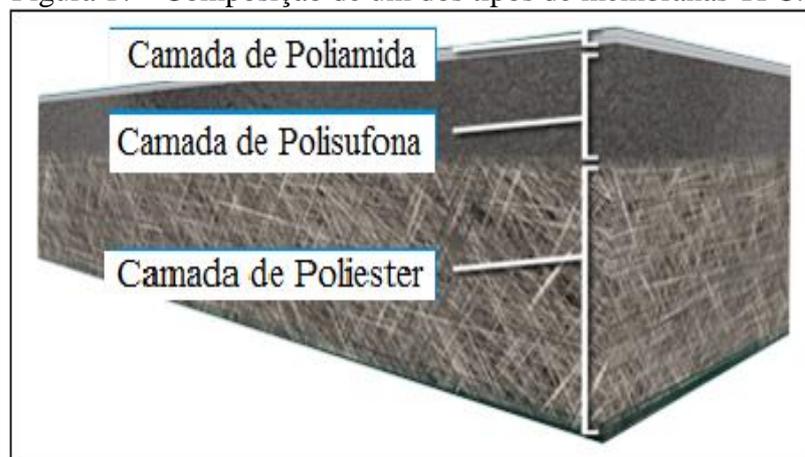
Cp = Concentração do soluto no permeado ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

6.1 PRINCIPAIS MEMBRANAS UTILIZADAS NO PROCESSO DE OSMOSE REVERSA (OR)

Os processos de osmose reversa se tornaram viáveis graças à uiLoeb e Sorirajan (1981), que descobriram as propriedades de assimetria das membranas. A partir desta descoberta, desenvolveram uma técnica de fabricação de membranas, a qual proporcionou um aumento significativo no fluxo de permeado, mantendo a alta taxa de retenção de sais. Essa técnica é chamada de precipitação por inversão de fases. (LOEB, 1981).

Os principais tipos de membranas utilizadas nos processos de osmose reversa são: a membrana de acetato de celulose “*Cellulose Acetate (AC)*”, e as compósitas de filme fino “*Thin Film Composite (TFC)*”, sendo que as TFC’s apresentam vários modelos com diferente composição estrutural, onde a mais comum apresenta a seguinte estrutura: camada suporte de poliéster, camada intermediária de polisulfona e camada externa de poliamida, conforme demonstra a Figura 17. (CHEIS, 2014).

Figura 17 - Composição de um dos tipos de membranas TFC.



Fonte: Auxiaqua (c2011).

A camada de poliamida é responsável pela alta seletividade da membrana, sendo apta a operar em uma faixa de pH de 4 a 11 e temperaturas entre 0 e 30°C, porém são degradadas

na presença do cloro livre, até mesmo em concentrações mínimas (0,1 ppm). (HERMES, 1996; BA, 2010; AMJAD, 2012).

As membranas de Acetato de Celulose (CA) apresentam sensibilidade a degradação na presença de micro-organismos e pH (< 4 e > 6,5), porém são resistentes ao cloro livre. Os materiais da membrana influenciam na definição dos parâmetros operacionais do sistema de tratamento da água. Em função de algumas restrições referentes à resistência destes materiais, a Tabela 4 apresenta algumas recomendações para utilização correta dessas membranas.

Tabela 4 - Comparação entre as membranas de AC e TFC.

PARÂMETRO	ACETATO DE CELULOSE (AC)	COMPÓSITA DE FILME FINO (TFC)
Pressão de operação (psi)	410 a 600	200 a 500
Temperatura de operação (°C)	0 a 30	0 a 45
pH de operação	4 a 6,5	2 a 11
Potencial de degradação da membrana	Hidrolisa em pH alto e baixo	Estável em pH alta e baixo.
Fluxo de permeado (gfd)	5 a 18	10 a 205
Taxa de rejeição de sais (%)	70 a 95	97 a 99
Estabilidade ao cloro livre (ppm)	< 1	<0,1 ppm
Resistência ao <i>Biofouling</i>	Alta	Baixa
Fabricação	Variada	Variada
Custo	Baixo	Entre 50 e 100 % maior

Fonte: LUBRIZOL (c2008).

Nota: Adaptado pelo autor.

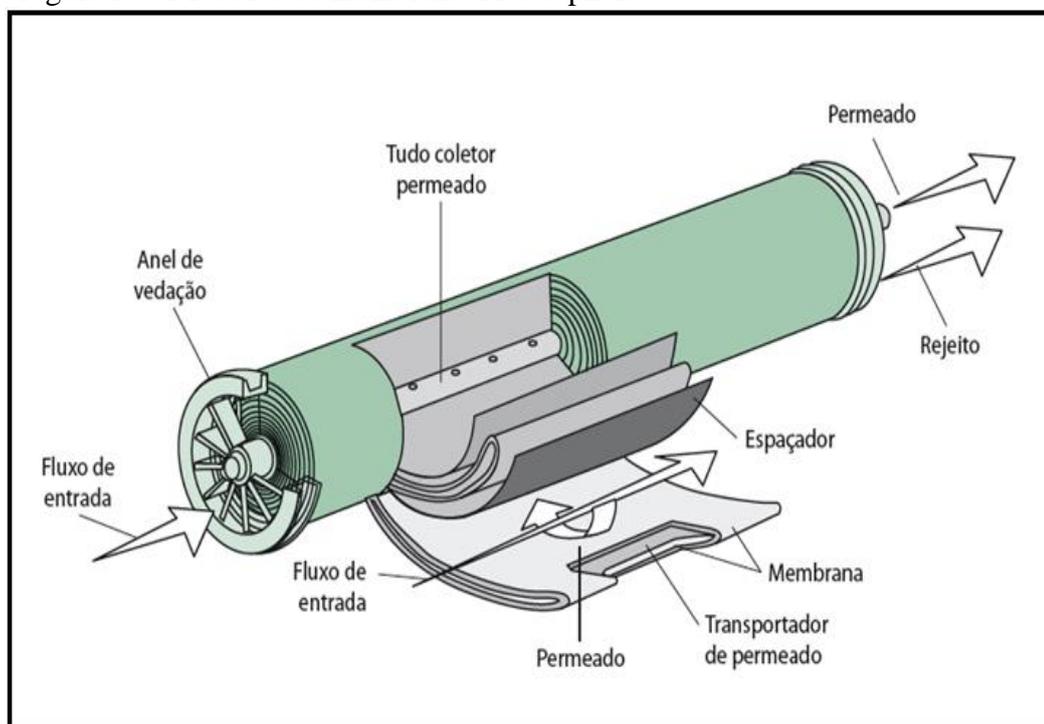
Segundo Bhattacharyya (1992), os quatro modelos de membranas de osmose reversa existente são tubular, placa e quadro, fibra oca e espiral. No entanto, para a produção em escala industrial de água desmineralizada, o modelo espiral é o mais utilizado, devido à moderada incrustação, menor custo aquisitivo e menor custo operacional.

Os modelos tubulares e placa e quadro foram os primeiros a serem utilizados no início do desenvolvimento da osmose reversa. No entanto, os sistemas que fazem uso destes tipos de modelos necessitam de um alto investimento inicial e apresentam uma baixa densidade de empacotamento da membrana, sendo aplicados em tratamento de efluentes ou em soluções

com alta concentração de material em suspensão, como por exemplo, indústrias alimentícias. (SILVA, 2009).

Os modelos em fibra oca processam as membranas com o intuito de obter tubos capilares muito finos, os quais são montados no interior dos vasos de pressão. Já os modelos em espiral (Figura 18) são constituídos por duas camadas de membranas que são fixadas nos lados opostos de um tecido espaçador, conhecido como espaçador do canal de permeado. O tubo central recebe o permeado que vem através do espaçador. Os modelos em espiral garantem alta produtividade, operam com menor pressão (economia de energia), e também possuem uma taxa de rejeição salina equivalente ou superior em relação aos demais modelos.

Figura 18 - Módulos de membrana TFC espiral.



Fonte: Gauto (2013).

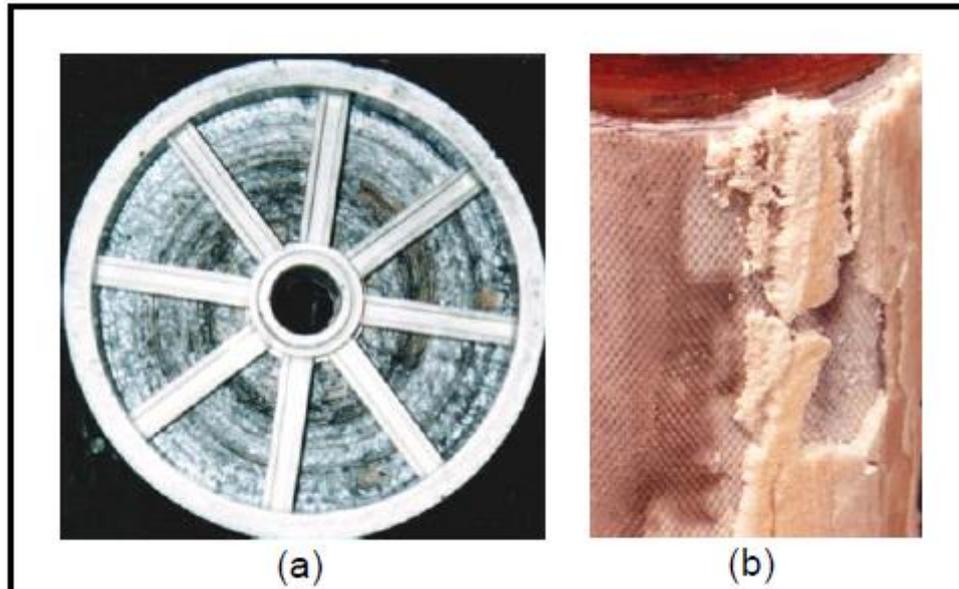
6.2 DEPÓSITOS EM MEMBRANAS DE OSMOSE REVERSA (*FOULING*)

A formação de depósitos em membranas surge com a deposição de substâncias que não estejam dissolvidas ou que se precipitam durante o processo. (BRADLEY, 1992). A maioria dos depósitos em membranas de osmose reversa são causadas por fatores biológicos, coloidais e inorgânicos. (AMJAD, 1993).

Os micro-organismos são um dos riscos potenciais na geração de depósitos em membranas de osmose reversa, pois se aglomeram na superfície formando uma camada fina, a qual

é chamada de biofilme, em inglês é chamado de “biofouling” (Figura 19a). Outro caso de depósito ocorre com a precipitação de sais e óxidos metálicos, sendo chamado de incrustação, em inglês é chamado de “scale” (Figura 19b). Segundo Sheikholeislam et al (2001), a sílica é o maior causador de *scale*, além do mais, a sua remoção através dos processos de limpeza química é complicada. (BAKER, 2004).

Figura 19 - Tipos de incrustações em membranas de Osmose Reversa.



Fonte: Association of Water Technologies “Annual Convention & Exposition” (1998).

Legenda: (a): Biofouling; (b): Scale.

Nota: Adaptado pelo autor.

De acordo com Byrne (1995) o “fouling” é um problema normal em um sistema de osmose reversa, portanto é necessário manter o monitoramento para realizar o controle, através de um pré-tratamento adequado, vazões regulares, dosagens correta de produtos químicos e também realização de limpeza química periodicamente. Porém, de acordo com Amaj (1989) o acúmulo das substâncias causadoras do “fouling”, podem provocar reações de deterioração nas membranas com o passar do tempo e sua remoção pode se tornar irreversível, necessitando a substituição das membranas.

6.3 PRÉ-TRATAMENTO DA ÁGUA DE ALIMENTAÇÃO POR OSMOSE REVERSA

O processo de pré-tratamento em osmose reversa, é um dos fatores mais importantes para manter o bom funcionamento do sistema, sendo definido de acordo com as características da água de alimentação. De acordo com Ho e Sirkar (1992), o pré-tratamento existe em

todos os sistemas de osmose reversa e tem a finalidade de prevenir a formação de depósitos (*fouling*), mantendo o desempenho e a vida útil das membranas.

Os principais processos de pré-tratamento são a clarificação, filtração e desinfecção. Esses processos removem materiais como coloides, bactérias e outras matérias orgânicas de alto peso molecular.

A clarificação é um processo convencional, realizado em estações de tratamento de água e possui as seguintes etapas, dosagem do agente coagulante, coagulação, floculação e decantação. (HO; SIRKAR, 1992).

A filtração é definida pela passagem de um fluido através de um meio poroso, com o objetivo de remover a matéria em suspensão. Pode-se avaliar o desempenho da filtração através de análise de cor e turbidez. (HOOLEY; PITTNER; AMJAD, 1992).

Outras ótimas opções para o pré-tratamento são os sistemas de microfiltração e ultrafiltração, que além de modernas, possuem alta eficiência na remoção de sólidos em suspensão e coloides, ocupam pouco espaço e permitem a operação automatizada.

O condicionamento químico se trata de um pré-tratamento, sendo uma prática comum nos sistemas de osmose reversa, onde os produtos são dosados na entrada do sistema, antes de passarem pelo filtro de cartucho. Os produtos mais utilizados são: agentes oxidantes, agentes anti-oxidantes, agentes anti-incrustantes e o hidróxido de sódio.

Os agentes oxidantes tem a função de desinfetar a água de alimentação e desintegrar os compostos orgânicos que promovem o biofilme nas membranas, sendo estes produtos a base de cloro ou peróxidos. Os agentes antioxidantes têm a função de impedir que os agentes oxidantes deteriorem as membranas. Um dos produtos mais utilizados para essa finalidade é o bissulfito de sódio que é chamado de agente de cloração. Os agentes oxidantes são dosados no início do pré-tratamento, ou dependendo da origem da água de alimentação, ou seja, se a água potável, a qual já passou por desinfecção, não se aplica o tratamento por agentes oxidantes. Já os agentes antioxidantes são dosados no ponto de entrada dos vasos, os quais contêm os módulos de membranas. Essa distância máxima entre a dosagem dos agentes oxidantes e os agentes antioxidantes, tem a finalidade de garantir que o agente oxidante realize com sucesso a sua função antes de ser inibido pelo agente oxidante.

Os agentes anti-incrustantes são constituídos por substâncias do grupo dos fosfatos, as quais reagem com sulfatos e carbonatos, diminuindo o alto potencial de incrustação, por outro lado, esses compostos servem como nutrientes bacterianos, podendo causar incrustações de origem biológicas nas membranas. (VROWENVELDER, 2000).

Para o monitoramento do pré-tratamento existem algumas análises importantes, como o índice de densidade do lodo “*Silt Density Index (SDI)*”, turbidez, condutividade elétrica e pH, pois é fundamental que a qualidade da água de alimentação de um sistema esteja de acordo com as especificações exigidas pelo fabricante das membranas, evitando a degradação das mesmas.

6.4 LIMPEZA QUÍMICA

A limpeza química é um procedimento de limpeza adotado em sistemas de osmose reversa, o qual tem por objetivo a remoção de substâncias incrustadas nas membranas. (AMJAD, 1989).

O período de realização da limpeza química normalmente é definido por dados operacionais (pressões: da alimentação, rejeito e permeado; temperatura da água; vazões: rejeito e permeado) e dados analíticos (condutividade elétrica, turbidez, SDI, pH), os quais são anotados em uma planilha normalizada. Essa planilha irá fornecer os seguintes rendimentos: taxa de permeação, taxa de retenção de sais, perda de carga global e vazão normalizada do sistema de OR. Através de uma avaliação desses rendimentos é determinado a realização da limpeza química.

A limpeza química quando efetuada em intervalos de tempo regulares contribuem na preservação das membranas, de modo evitar o processo de irreversibilidade, o qual ocorre pela formação de incrustações, podendo ser removidas através de processos de limpeza. Uma vez que as incrustações nas membranas tornam irreversíveis, é necessário realizar a substituição da mesma para que o sistema não tenha uma queda de eficiência. (EBRAHIM, 1994).

Normalmente os produtos utilizados na limpeza química são ácidos (HCl, H₃PO₄) e alcalino (NaOH), onde a solução ácida promove a remoção de óxidos metálicos, e a alcalina promove a remoção de substâncias de caráter orgânico que são responsáveis pela formação de biofilmes. (DOW CHEMICAL COMPANY, 2005).

De acordo com Tragardh (1989), outros produtos podem ser utilizados na limpeza química das membranas, porém é importante ter o conhecimento do tipo de incrustação, de modo que sua aplicação se torne eficiente. Segundo Ebrahim (1994), a eficiência da limpeza química não se limita apenas ao uso dos produtos químicos corretos, mas também às condições de operação. O ANEXO A contém o procedimento de limpeza química realizado em um sistema de osmose reversa industrial.

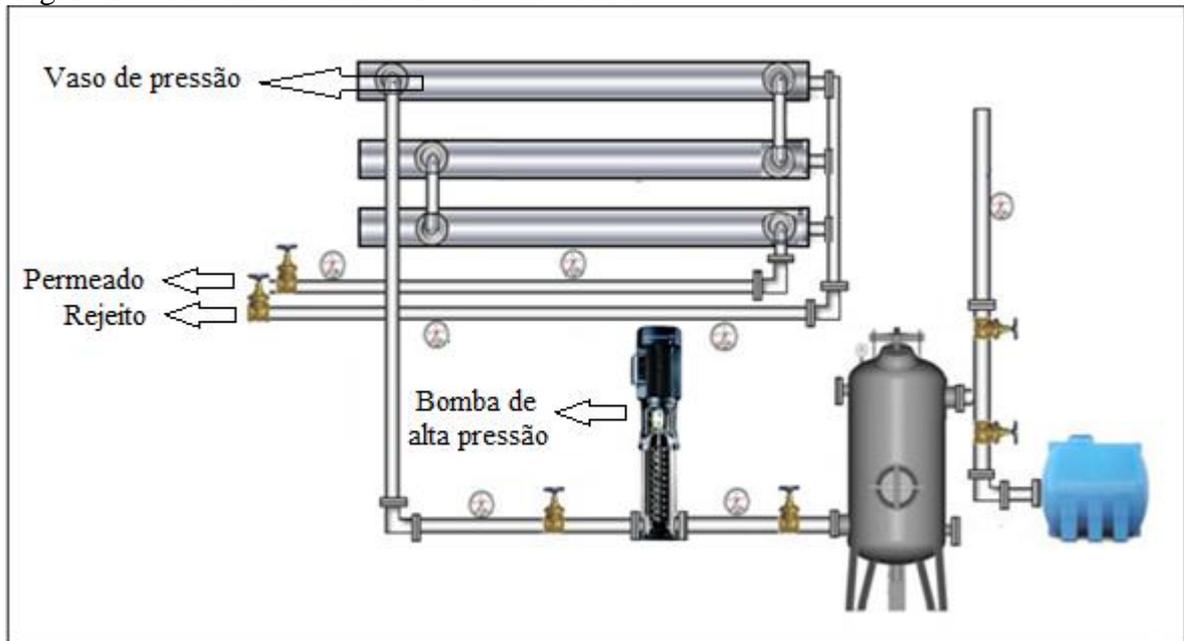
A escolha correta do produto químico e do modo de limpeza, não refere apenas à remoção dos depósitos nas membranas, mas também aos cuidados com a degradação. Os produtos utilizados não podem reagir com a membrana, pois caso ocorra as membranas perdem a seletividade e, conseqüentemente, se tornam impossibilitadas de realizar a retenção das substâncias.

6.5 OPERAÇÃO DE UM SISTEMA DE OSMOSE REVERSA INDUSTRIAL

Atualmente, os sistemas de osmose reversa utilizados no tratamento de água para geradores de vapor de grande porte possuem membranas espirais TFC, as quais são acopladas umas nas outras dentro de vasos de pressão, denominados de baterias de permeadores.

Em um sistema de Osmose Reversa que opera com vazões nominais (30 m³/h de permeado e 10 m³/h de rejeito), existe permeadores com seis vasos, divididos em dois estágios, onde o primeiro contém quatro vasos e o segundo contém dois vasos. O fluxo do sistema ocorre da seguinte maneira: após a saída do pré-tratamento o fluxo de água passa por um filtro de cartucho, o qual é responsável pela remoção das partículas em suspensão que não foram removidas no pré-tratamento, em seguida é succionado por uma bomba de alta pressão, a qual normalmente opera em modo automático com um controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo). O bombeamento é direcionado para o primeiro estágio, onde o fluxo é dividido em duas correntes, o permeado e o rejeito. O permeado segue para o pós-tratamento e em seguida para um reservatório, enquanto o rejeito segue para o segundo estágio, onde ocorre o mesmo processo. Em alguns sistemas existe a opção, na qual parte do rejeito retorna para o sistema de alimentação do sistema de OR. (FLUID BRASIL, 2009). A Figura 20 representa um sistema de osmose reversa industrial.

Figura 20 - Sistema de osmose reversa industrial.



Fonte: Ferraro (2008).

Nota: Adaptado pelo autor.

Um dos principais procedimentos para a operação em modo automático é o ajuste da rotação da bomba de alta pressão em função da vazão de permeado, e a condição de não enquadramento das variáveis da operação em relação às faixas de trabalho imposta. A condição normal de operação do sistema de OR é definida conforme os seguintes parâmetros apresentados na Tabela 5, em caso do sistema registrar algum valor fora da faixa de trabalho, a operação cessará com o desligamento da bomba de alta pressão.

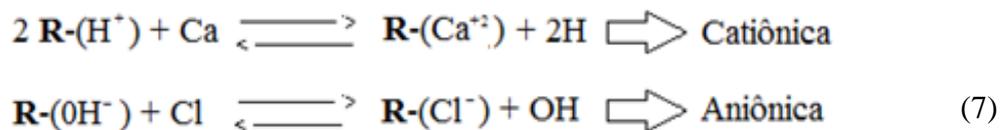
Tabela 5 - Parâmetros de operação de um sistema de OR.

VARIÁVEIS	FAIXA DE TRABALHO
Diferencial de pressão do 1 ^o estágio	< 4,0 Kgf/cm ²
Diferencial de pressão do 2 ^o estágio	< 4,0 Kgf/cm ²
Temperatura	< 28 °C
pH	> 7; < 8
Condutividade elétrica do permeado	< 3,0 µS/cm ²
Potencial de oxi-redução	< 300 mV

Fonte: FLUID BRASIL (2009).

6.6 PÓS-TRATAMENTO DA ÁGUA PERMEADA

A água permeada, após ser submetida ao processo de pós-tratamento, apresenta-se isenta de sólidos em suspensão e com baixo teor de minerais, os quais não se dissolvem, mas dissociam-se em partículas menores, eletricamente carregadas, denominadas íons. O pós-tratamento de água permeada é realizado por troca iônica, o qual consiste em um processo químico, onde os íons das resinas são substituídos por íons de maior valência presente no líquido a ser tratado. Esse processo ocorre com a atividade das resinas aniônicas e catiônicas, conforme representa a Equação 7.



As aniônicas promovem a troca de seus ânions (OH^-) com os ânions presentes na água (CO_3^{2-} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , Cl^- , Si_2O^{3-}) e as catiônicas promovem a troca dos cátions (H^+) com os cátions presentes na água (Fe^{2+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Al^{3+}). Desse modo, elimina-se quase que na totalidade os sais minerais, tornando a água desmineralizada. (FUID BRASIL, 2009).

O trocador de leito misto é um vaso fechado, composto por resinas catiônicas e aniônicas. Sua operação consiste na entrada de água no vaso, onde as resinas estão misturas, de modo a promover a troca iônica com água até a exaustão das mesmas, através da saturação com os íons depositados, sendo necessária a regeneração.

De acordo com Cunha (2006), o procedimento de regeneração de um trocador de leito misto é realizado com as seguintes etapas: contra-lavagem, assentamento, regeneração, enxágue lento, mistura e enxágue rápido.

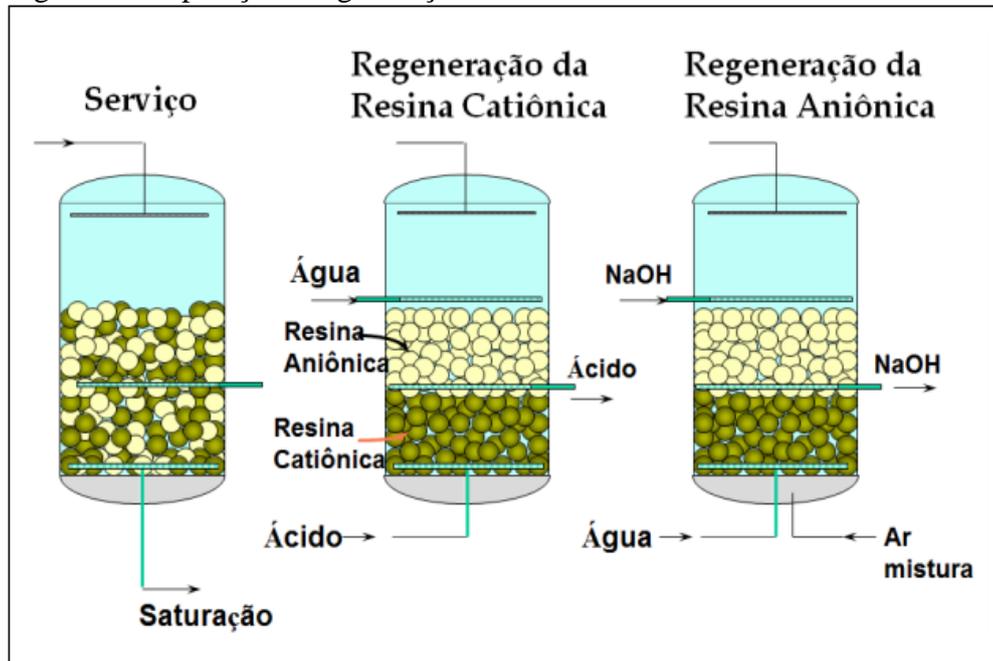
- **Contra-lavagem:** consiste na lavagem com um fluxo inverso ao de operação, onde a água entra pela parte inferior e sai pela parte superior do vaso.
- **Assentamento:** consiste no assentamento das resinas, de modo que as resinas catiônicas (mais densas) ficam na parte inferior e as aniônicas (menos densas) permanecem na parte superior do vaso.
- **Regeneração:** consiste na aplicação de produtos regenerantes (ácido e soda) com a finalidade de promover a remoção dos íons saturados nas resinas, realizando uma reação contrária à Equação 7, a qual consiste na retomada dos cátions H^+ às resinas catiônicas e dos ânions OH^- às resinas aniônicas. Esse processo é realizado da seguinte forma: o ácido é injetado pela parte inferior do vaso, promovendo a regeneração

das resinas catiônicas, e a soda pela parte superior, promovendo a regeneração das resinas aniônicas.

- Enxágue Lento: consiste na remoção dos produtos regenerantes (ácido e soda).
- Aeração: realiza a mistura das resinas no vaso, através da entrada de ar comprimido pela parte inferior do vaso e saída pela parte superior (topo do vaso).
- Enxágue rápido: consiste na remoção do excesso de salmoura (produto da reação entre o ácido e soda na etapa de regeneração).

A operação e a regeneração de um trocador de leito misto estão representadas na Figura 21.

Figura 21 - Operação e regeneração de trocar de leito misto.



Fonte: CUNHA (2006).

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os geradores de vapor têm grande importância nas indústrias, pois promovem funcionamento de equipamentos nos processos por intermédio do vapor gerado. No entanto, alguns procedimentos operacionais devem ser realizados corretamente, como o pré e o tratamento de água, os quais são essenciais para se obter um bom resultado, pois mantêm o desempenho e a vida útil das membranas.

Os sistemas de desmineralização de água para a alimentação de geradores de vapor retem a presença de sais minerais na água, aumentando a vida útil das membranas e dos equipamentos. No entanto o sistema de osmose reversa possui uma tecnologia mais recente e vem ganhando espaço nos últimos anos, devido suas vantagens em relação ao sistema de troca iônica, as quais são a alta seletividade, controle eficiente, boa taxa de retenção de substâncias através das membranas semipermeáveis.

As especificações técnicas da água permitem a redução dos danos ao prevenir o arraste, a corrosão e o depósito, além de aumentar a vida útil dos geradores de vapor, quando se obtém a excelência no tratamento da água, mantendo-a apenas com concentrações mínimas de sais.

Todas essas abordagens anteriores foram importantes para demonstrar quantos desafios existem nos sistemas de osmose reversa industrial e salientar que a qualidade da água produzida para a geração de vapor e o cuidado com as membranas caminham lado a lado, além de ser diretamente proporcionais aos cuidados com a operação dos sistemas de osmose reversa.

REFERÊNCIAS

- AMJAD, Z. **Advances in Membrane Cleaners for Reverse Osmosis Systems**, Ultrapure Water, 1989.
- AMJAD, Z. **“Reverse Osmosis: Membrane Technology, Water Chemistry, and Industrial Applications”**. New York, USA: Van Nostrand Reinhold, 1993.
- ANADÃO, P. **Ciência e Tecnologia da Membrana**. São Paulo: Ar líber Editora, 2010. ASSOCIATION OF WATER TECHNOLOGIES, INC. **1998 Annual Convention & Exposition 24 to 28 October 1998 Washington, DC**: Reverse Osmosis Technology: Fundamentals and Water Applications.
- APEX Engineering Products. c2016. Disponível em: <http://www.apexengineeringproducts.com/rydlyme_foodbev/>. Acesso em: 12 out. 2016.
- AUXIAQUA, (c2011). Disponível em: <<http://www.auxiaqua.es/en/sistemas-filtracion>>. Acesso em: 29 set. 2016.
- AZZOLINI, J; FRINHANI, E. M. D.; ZARDO, F. Água para sistemas de gerador de vapor. **Revista Meio Filtrante**, n. 24, p. 1, jan. 2007. Disponível em: <<http://www.meiofiltrante.com.br/edicoes.asp?id=272&link=ultima&fase=C>>. Acesso em: 12 out. 2016.
- BA, C.Y.; ECONOMY, J. Preparation of pmda/oda polyimide membrane for use as substrate in a thermally stable composite reverse osmosis membrane. **Journal Membrane Science**. EUA, v. 363, n.1-2, p.140–148, 2010. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0376738810005715>>. Acesso em: 21 out. 2016.
- BAKER, R.W. **Membrane technology and applications**. 2ª ed., Wiley Publisher, 2004.
- BAZZO, E. **Geração de vapor**. Florianópolis: Editora UFSC, 1992.
- BHATTACHARYYA, D., M. Williams, M. **Reverse Osmosis** in: W. Ho, K. Sirkar (Eds.), **Membrane Handbook**, Van Nostrand Reinhold, New York, 1992, p. 269–280.
- BIZZO, W. **Geração, distribuição e utilização do vapor**. 2001.
- CEFET – MG. **Centro de Educação Tecnológica de Minas Gerais**. Curso técnico de mecânica. Disciplina de máquinas térmicas. Disponível em: Acesso em: 23 out. 2016.
- CERATTO, W. F.; FARIA, R. H. **ESTUDO DA COGERAÇÃO EM UMA INDÚSTRIA DE BENEFICIAMENTO DE MADEIRA**. Curitiba, 2013. Dissertação (Trabalho de conclusão de curso). Departamento Acadêmico de Eletrotécnica - Universidade Federal do Paraná.

CHEIS, D. **A IMPORTÂNCIA DO TRATAMENTO DE ÁGUA EM CALDEIRAS**. REVISTA TRATAMENTO DE ÁGUAS E EFLUENTES. p. 1, 2014. <<http://www.revistatae.com.br/noticiaInt.asp?id=6637>>. Acesso em: 18 set. 2016.

CRABTREE, M.; ESLINGER, D.; FLETCHER, P.; JOHNSON, A.; KING, G.. **La lucha contra las incrustaciones – Remoción y prevención**. Oilfield Review, p. 30 – 42, 1999.

ČUDA, P.; POSPÍŠIL, P.; TENGLEROVÁ, J. Reverse osmosis in water treatment for boilers. Desalination, v. 198, p. 41–46, 2006.

CUNHA, O. A. **Resinas de Troca Iônicas**. IBP-Tratamento D'água para fins industriais-resinas de Troca Iônica. São Paulo, 2006.

DALLABONA, A. R., SILVA, D. da, HUPALO, M. F. **Estudos de eficiência térmica e de emissão de poluentes em fornos rotativos a óleo de xisto e gás natural**. In: PDPETRO, 4, 2007, Campinas.

DEMEC. **Óleo diesel**. Disponível em: <<http://www.demec.ufmg.br/disciplinas/ema003/liquidos/diesel/especifici.htm>>. Acesso em: 29 out. 2016.

DOW CHEMICAL COMPANY, **Liquid Separations, FILMTEC Reverse Osmosis Membrane**, p. 182, 2005.

Economizador. **Alibaba.com**, (c2016). Disponível em: <<https://portuguese.alibaba.com/product-detail/high-quality-economizer-for-the-boiler-548014590.html>>. Acesso em: 10 nov. 2016.

EBRAHIM, S. Cleaning and Regeneration of membranes in desalination and wastewater applications. **Desalination 96**, p.14, 1998

ELETROBRÁS. **Eficiência Energética no Uso de Vapor**. Rio de Janeiro, 2005.

FERRARO, R., **Sistema de Osmose Reversa**, 2008, 60 f, Monografia (Graduação), Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade São Francisco, Campinas, 2008.

FLUID BRASIL. **Trocadores de Leito Misto**. Disponível em: <<http://www.fluidbrasil.com.br/wp-content/uploads/2015/08/leito-misto.pdf>>. Acesso em 25 nov de 2016.

FLUID BRASIL. **Manual de Operação de Osmose Reversa**. 2009. Disponível em: <<http://livrozilla.com/doc/654278/manual-de-opera%C3%A7%C3%A3o-osmose-reversa>>. Acesso em: 10 nov de 2016.

FRAYNE, C. **Boiler water treatment: principles and practice**. Chemical Publishing Inc. Co., 2002.

GAUTO, M., ROSA, G. **Química Industrial**. Ed. Bookman, Porto Alegre, 2013.

GLATER, J.; HONG, S.; ELIMELECH, M., **The search for a chlorine-resistant reverse osmosis membrane**, 1994.

HABERT, A.; BORGES, C.; NÓBREGA R. **Processos de separação com separação de membranas**, Escola Piloto em Engenharia Química, COPPE/UFRJ - Programa de Engenharia Química, 2006.

HERMES, M. **Enough for One Lifetime, Wallace Carothers the Inventor of Nylon**, Chemical Heritage Foundation, 1996.

HO, W.; SIRKAR, K. **Membrane Handbook**. Chapman & Hall, Part I e VI, 1992.

HOOLEY, J.; PITTNER, G.; AMJAD, Z. **Reverse Osmosis - Membrane Technology, Water Chemistry and Industrial Applications**. Chapman & Hall, Chapter 5, 1992.

KHEDR, M. Development of reverse osmosis desalination membranes composition and configuration: future prospects, **Desalination - 153**, 2002.

KIM, K. et al, Experimental investigation and simulation of hollow fiber membrane process for SF₆ recovery from GIS, **Polymers for Advanced Technologies**, 2013

LEITE, N.; MILITÃO, R. **Tipos e aplicações de caldeiras**. PROMINP ENGENHEIRO DE SUPRIMENTOS. Disciplina: Fabricação e Montagem de Caldeiras e Trocadores de Calor. Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Mecânica. 2008.

Lubrizol Corporation, **TEC-RO**. Disponível em: <<https://www.lubrizol.com/DispensantsWaterTreatment/TechPapers/TEC-RO.html.c2008>>. Acesso em: 04 abr. 2016.

LOEB, S. **The Loeb-Sourirajan Membrane: How It Came About**, Chemical Engineering Department, Ben-Gurion University of the Negev, Beersheva, Israel, 1981.

MACEDO, J. **Águas & Águas**, Jorge Macedo, 3^o ed, p. 1044, Minas Gerais, 2007.

MANCUSO, P.; SANTOS, H. **Potencial de reuso de água no Brasil: indústria, município e recarga de aquíferos**. In: Reúso de água. Barueri: Manole, 2003.

MARGONAR, R. **Caldeiras**, [1998?]. Disponível em: <<http://pt.slideshare.net/RenanMargonar>>. Acesso em: 12 ago 2016.

METCALF & EDDY. **Waste water treatment Handbook**. São Paulo, McGraw-Hill, 1998.

MULDER, M. **Basic principle of membrane technology**. Kluwer Academic Publishers Group, 1996.

PERA, H. **Geradores de vapor: um compêndio sobre conversão de energia com vistas à preservação da ecologia**. São Paulo: Fama, 1995.

PETROBRÁS. Add Cleaner Petrobrás. Manual do produto. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/produtos-e-servicos/produtos/industriais/oleocombustivel/>>. Acesso em: 12 set. 2016.

REIS, M. et al. Mineral scale deposition in surfaces: Problems and opportunities in the oil industry. **Revista Virtual de Química**, Niterói, v. 3, n. 1, p.1-12, 2011. GN1 Genesis Network. DOI: 10.5935/1984-6835.20110002.

RIBEIRO, R.; BERGAMASCO, R., GIMENES, M. Membranes synthesis study for color removal of a textile effluent. **Desalination**, v.145, p. 61-63, 2002.

ROVANI, M. Z. **Estudo da osmose inversa na produção de água desmineralizada para caldeiras**. 2012. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Alimentos, 2012.

SCHNEIDER, R. P.; TSUTIYA, M. T. **Membranas filtrantes para Tratamento de água, esgoto e água de reuso**. In ABES (Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental), 2001.

SHEIKHOLEISLAM, R. et al.; Pretreatment and the effect of cations and anions on prevention of silica fouling. **Desalination**, v. 139, p. 83-95, 2001.

SILVA, B.; SILVA, V. **Combustíveis e queimadores em caldeiras**. PROMINP – Engenharia de suprimentos. Disciplina: Fabricação e montagem de caldeiras e trocadores de calor. Escola Politécnica, departamento de Engenharia Mecânica. 2008.

SILVA, F. **Desenvolvimento de Membranas Cerâmicas Tubulares a partir de Matérias-Primas Regionais para Processo de Microfiltração**. Universidade Feral de Campina Grande. Campinha Grande, 2009.

SILVA, W. **A cogeração de energia elétrica a partir da biomassa inserida na matriz energética brasileira**. 2009. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso). Universidade São Paulo.

THE NALCO WATER HANDBOOK, U.S.A. 1979, Mc Graw-Hill.

TORREIRA, R. **Geradores de vapor**. São Paulo: Melhoramentos, 1995.

TRAGARDH, G. Membrane Cleaning, **Desalination**. V .71, p.11, 1989.

WEND, C. et al, **Pretreatment for membrane water treatment systems: a laboratory study**, 2003.

VROWENVELDER, J. et al, **Biofouling pontencial of chemicals used for scale control in RO and NF membranes**, [S.I.], 2000.

ANEXO A - Procedimento de limpeza química em um sistema de Osmose Reversa industrial.

LIMPEZA QUÍMICA DA OSMOSE

1. OBJETIVOS

Definir o procedimento de limpeza química para melhorar a eficiência do processo de osmose e garantir a vida útil das membranas.

2. ABRANGÊNCIA

Aplica-se no âmbito da UQT, especificamente na Estação de Tratamento de Água (ETA).

3. DOCUMENTOS ASSOCIADOS

NA

4. FUNÇÕES ENVOLVIDAS

Operador de ETA;
Técnico Operacional de Utilidades;
Técnico Facilitador de Utilidades.

5. DEFINIÇÕES

Fouling é o termo referente ao entupimento de ordem física, química ou microbiológica, capaz de diminuir o fluxo do permeado.

6. DESCRIÇÃO DAS OPERAÇÕES

6.1. Preparo da solução de limpeza

6.1.1 Abrir válvula de entrada de água do tanque de preparo de soluções da osmose até o volume desejado (1260 litros para o 1º estágio e 630 litros para o 2º estágio);

6.1.2 Adicionar o produto químico até obter o pH de 12 para soda cáustica e 1 para ácido clorídrico.

6.2 Controle de operação

6.2.1 Trocar os elementos filtrantes do filtro de cartucho.

Deslocamento de água contida nos vasos

6.2.2 Inserir a solução de soda cáustica a pH 12 nos vasos de pressão do 1º estágio, com baixa pressão, de modo que pouco ou nenhum permeado seja produzido.

- Vazão: 4,0 m³/h;
- Pressão: 1,0 kgf/cm².

6.2.3 Descartar a água de processo;

Recirculação a baixa pressão

6.2.4 Recircular a solução com pH de 12, até que não haja mais variação na temperatura.

Molho

6.2.5 Deixar as membranas de molho por 1 h. Se o *fouling* for grande, prolongar o período de molho por 10 -15 h, no período da noite, e manter uma pressão de recirculação baixa.

- Vazão: 0,10 m³/h;
- Pressão: 0,35 kgf/cm².

Recirculação a alta pressão

6.2.6 Recircular a solução de limpeza química com vazão alta, por 40 min.

- Vazão: 8,0 m³/h;
- Pressão: 2,0 kgf/cm².

Remoção da solução de limpeza

6.2.7 Remover a solução de limpeza química com água permeada, até que o pH do vaso se iguale com o pH da água permeada.

6.2.8 Repetir os itens anteriores para o 2º estágio.

6.2.9 Repetir os itens anteriores para a limpeza com ácido clorídrico. O pH deve ser 1 e o molho é sempre de 1h.

6.2.10 Trocar os elementos filtrantes do filtro de cartucho por novos.

Obs.:

- A limpeza química dos estágios do sistema devem ser feitas separadamente.
- Substituir a solução de limpeza caso aumente a cor ou turbidez e repetir a limpeza.
- É possível reservar os elementos filtrantes para serem utilizados somente nas limpezas químicas.
- Se o sistema for desligado por um período maior que 24 h, as membranas devem ser embebidas em Agente de Clorinação Betz Dearborn DCL30 a 1% (em peso).

7. REGISTRO DA OPERAÇÃO

8. ANEXOS

FIGURA 1: Resumo das etapas de operação, que devem ser repetidas para 1º e 2º estágios, e limpeza com soda e com ácido.

