

ESCOLA TÉCNICA ESTADUAL PROF. ARMANDO JOSÉ FARINAZZO
CENTRO PAULA SOUZA

Carla Haiyslla Pereira Garcia
Emanuela Assis da Silva Martins
Emilie Emily Jaiane Balduino Valerio
João Vitor Dutra da Silva
Mizael Vieira de Lima

IMPORTÂNCIA DO TRATAMENTO DE ÁGUA PARA AS CALDEIRAS

Fernandópolis
2025

Carla Haiyslla Pereira Garcia
Emanuela Assis da Silva Martins
Emilie Emily Jaiane Balduino Valerio
João Vitor Dutra da Silva
Mizael Vieira de Lima

IMPORTÂNCIA DO TRATAMENTO DE ÁGUA PARA AS CALDEIRAS

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como exigência parcial para
obtenção da Habilitação Profissional
Técnica de Nível Médio de Técnico em
Açúcar e Alcool, no Eixo Tecnológico de
Produção Industrial, à Escola Técnica
Estadual Professor Armando José
Farinazzo, sob orientação da Professora
Tamires Cavalcante Francisco

Examinadores:

Tamires Cavalcante Francisco

Joel Gouveia Baptista

Fernando Henrique Dutra Pereira

Fernandópolis
2025

IMPORTÂNCIA DO TRATAMENTO DE ÁGUA PARA AS CALDEIRAS

Carla Haiyslla Pereira Garcia
Emanuela Assis da Silva Martins
Emilie Emily Jaiane Baldoino Valerio
João Vitor Dutra da Silva
Mizael Vieira de Lima

RESUMO: O trabalho refere-se a importância do tratamento de água para caldeiras, e equipamentos essenciais na geração de vapor utilizado em processos industriais. Um tratamento inadequado da água pode causar problemas como incrustação, corrosão e arraste, que comprometem a eficiência, segurança e vida útil da caldeira. Para evitar esses danos, a água precisa passar por um processo rigoroso de purificação, começando na Estação de Tratamento de Água (ETA), que realiza etapas como coagulação, floculação, decantação, filtração, correção de pH e desinfecção. Complementando esse tratamento, utilizam-se equipamentos como o abrandador, responsável por remover a dureza da água; a desmineralização, para retirada de sais dissolvidos; e a osmose reversa, que elimina partículas, bactérias e íons com alta precisão. O estudo também apresenta os tipos de caldeiras, sendo flamotubulares, aquatubulares e mistas, aprofundando e explicando suas características, aplicações e vantagens. Além disso, destaca-se o papel do vapor como fonte de energia e calor na indústria, sendo usado em aquecimento, movimentação de turbinas, esterilização e outros processos. O trabalho também alerta para o fenômeno do arraste, que ocorre quando partículas de água são transportadas junto ao vapor, causando danos aos equipamentos. Por meio da análise técnica e prática dos processos de tratamento e do funcionamento das caldeiras, conclui-se que a qualidade da água é decisiva para a eficiência operacional e a redução de custos com manutenção. O tratamento adequado garante segurança, aumenta a durabilidade dos equipamentos e assegura uma produção estável e eficiente nas indústrias.

Palavras-chave: Abrandador; Caldeiras; Desmineralização; ETA (Estação de Tratamento de Água); Osmose reversa.

ABSTRACT: The work refers to the importance of water treatment for boilers and essential equipment in the generation of steam used in industrial processes. Inadequate water treatment can cause problems such as scaling, corrosion, and carryover, which compromise the boiler's efficiency, safety, and lifespan. To prevent these damages, the water must go through a rigorous purification process, starting at the Water Treatment Plant (WTP), which carries out steps such as coagulation, flocculation, sedimentation, filtration, pH correction, and disinfection. Complementing this treatment, equipment such as the water softener, responsible for removing water hardness; demineralization, for removing dissolved salts; and reverse osmosis, which eliminates particles, bacteria, and ions with high precision, are used.

The study also presents the types of boilers, namely fire-tube, water-tube, and mixed, delving into and explaining their characteristics, applications, and advantages. In addition, it highlights the role of steam as a source of energy and heat in industry, being used for heating, turbine movement, sterilization, and other processes. The work also warns about the phenomenon of carryover, which occurs when water particles are carried along with the steam, causing damage to equipment. Through the technical and practical analysis of treatment processes and boiler operation, it is concluded that water quality is crucial for operational efficiency and cost reduction in maintenance. Proper treatment ensures safety, increases equipment lifespan, and guarantees stable and efficient production in industries.

Keywords: Softener; Boilers; Demineralization; WTP (Water Treatment Plant); Reverse Osmosis.

1. INTRODUÇÃO

A caldeira é um equipamento para produção de vapor sob pressão, a partir da água, por aplicação de calor à elevadas temperaturas." (Vale; Fosfertil, 2013, p.3). São geradoras de vapor fundamentais para as indústrias. Elas fornecem vapor para todo o processo industrial. Portanto, priorizar o tratamento de água para a caldeira é imprescindível.

O maior problema em torno das tubulações das caldeiras são as incrustações causadas pelo tratamento inadequado da água enviada até ela, o que dificulta as trocas de calor necessárias em tal processo.

Devido a impossibilidade da obtenção de uma água isenta de contaminantes, é necessário que por intermédio de métodos de tratamento se alcance os valores mínimos de impurezas mediante os parâmetros de trabalho das caldeiras estabelecidos no projeto, tais como: pressão, temperatura, volume, demanda nominal de geração de vapor, entre outros, para possibilitar uma operação satisfatória, eficiente e, acima de tudo, que garanta a segurança do sistema e dos operadores envolvidos. (Santos; Fraga, 2017, p. 6)

O objetivo do presente trabalho é apresentar a importância de um tratamento impecável da água para a caldeira, que por sua vez, alimenta integralmente o processo com o vapor produzido, além de mostrar o tratamento desta água e os parâmetros a serem seguidos.

O tratamento adequado de água é essencial para evitar problemas sérios que podem comprometer a operação das caldeiras. Os principais problemas associados a má qualidade da água incluem:

Corrosão: A presença de gases dissolvidos, como oxigênio e dióxido de carbono, pode causar corrosão nas superfícies metálicas da caldeira. O tratamento de água remove esses gases ou neutraliza seus efeitos, protegendo o equipamento.

Incrustações: Sais de cálcio e magnésio podem formar depósitos duros nas superfícies da caldeira, reduzindo a eficiência térmica e aumentando o consumo de combustível. O tratamento de água visa remover ou modificar essas impurezas para prevenir a formação de incrustações.

Arraste de água: a água não tratada pode levar a um arraste de vapor molhado, que apresenta qualidade inferior e pode afetar processos e equipamentos industriais.

Um tratamento de água eficaz contribui para a eficiência energética das caldeiras. Quando a água é tratada adequadamente, a transferência de calor é otimizada, resultando em menos consumo de combustível e maior produção de vapor. Isso é especialmente importante em indústrias que dependem de vapor para processos produtivos.

O tratamento de água não apenas melhora a eficiência, mas também prolonga a vida útil das caldeiras, para evitar corrosão e incrustação, o tratamento reduz a necessidade de manutenção e reparos, resultando em economia de custos a longo prazo. Portanto, investir em um tratamento de água é essencial para qualquer operação industrial que utiliza caldeiras.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA (ETA)

O tratamento de água envolve uma série de processos sendo, químicos, físicos e biológicos. Portanto com o tratamento na ETA: “A água bruta passa por um tratamento completo, dotado dos processos de floculação, decantação, filtração, correção de pH, desinfecção e fluoretação, antes de ser distribuída à população.” (ROSCHILD; GUEDES, 2018, p.7)

Estes processos serão explicados separadamente, e referenciados por estudos anteriores, como sendo:

Captação: Nessa primeira etapa a água passa por um gradeamento (sistema de grades) que impede a entrada de elementos sólidos contidos na água, como folhas, galhos e troncos. (OPERSAN, 2020)

Adução: Transporte de água do manancial ao tratamento ou da água tratada ao sistema de distribuição, normalmente por meio de bombas que levam a água captada até a ETA. (OPERSAN, 2020)

Coagulação: A coagulação consiste na adição de coagulantes, como o sulfato de alumínio ou o cloreto férrico, para desestabilizar partículas coloidais presentes na água. (ABICLOR; 2021).

Floculação: Após a coagulação, ocorre a floculação, um processo de agitação lenta que favorece a formação de flocos maiores e mais densos, facilitando sua remoção na etapa seguinte. (ABICLOR; 2021)

Decantação: Ocorre a separação dos flocos formados. Por serem grandes e pesados, eles se depositam no fundo do tanque (DAEV S.A., 2022).

Filtração: Ela acontece à remoção completa das partículas que possam ter passado pelo processo de decantação. Os filtros são de areia e são responsáveis pela retirada dos flocos que o decantador não conseguiu remover (DAEV S.A. 2022).

Pós-alcalinização: Da mesma forma que a pré-alcalinização, a pós-alcalinização serve para ajustar o pH da água, caso necessário. Essa é a correção final (NEOWATER, 2022).

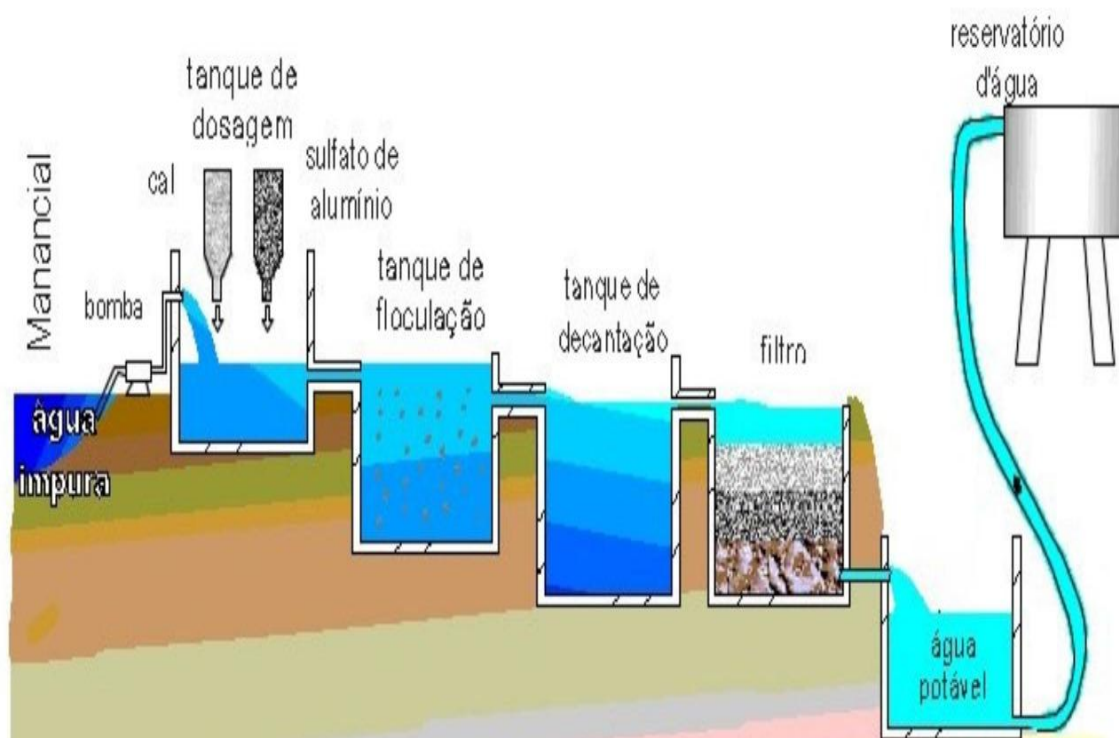
Cloração: A cloração consiste na adição de cloro. Este produto é usado para destruição de micro-organismos presentes na água (SAAE Valença-BA, 2010)

Armazenamento: Após o tratamento, a água é geralmente encaminhada para reservatórios, onde pode ser armazenada e distribuída conforme necessidade (NEOWATER, 2022).

Reservação: Após a desinfecção, a água fica guardada em reservatórios para assegurar o abastecimento da caldeira. Após passar por todas essas etapas, a água purificada é introduzida na infraestrutura de distribuição e transportada até o ponto de consumo. Nesse trajeto, sua potabilidade é garantida pela pressão do líquido nos canos e pela presença do cloro (Abiclor, 2021).

Abaixo na Figura 1, será apresentado as etapas do tratamento de água.

Figura 1. Etapas do tratamento de água (ETA)



Fonte: (GUIA DO ENGENHEIRO, 2018).

2.1.1. Abrandador

A purificação e a limpeza da água envolvem vários processos diferentes, dependendo de quais são os objetivos. O uso de um abrandador de água, por exemplo, é fundamental para o funcionamento de indústrias.

O abrandamento da água nada mais é do que a diminuição da sua “dureza”. Ou seja, é um processo que retira os sais que deixam a água dura, quimicamente falando, como o cálcio e o magnésio. Isso é importante para evitar o acúmulo das chamadas calcites nas máquinas, caldeiras e tubulações, o que pode prejudicar seu funcionamento e até mesmo danificá-los.

O abrandador de água é um equipamento eficaz, automático e prático, que permite o melhor funcionamento da indústria, onde funciona removendo íons de cálcio e magnésio da água, utilizando o processo de troca iônica para transformar água dura em água macia.

Troca iônica: O abrandador de água contém um tanque com resinas especiais que estão carregadas com íons de sódio. Quando a água dura passa pelo tanque, os íons de cálcio e magnésio, que causam a dureza, se ligam as resinas,

enquanto os íons de sódio são liberados na água. Isso resulta em água macia, que é menos propensa a causar depósitos e incrustações.

Regeneração da resina: Com o tempo, as resinas se saturam com cálcio e magnésio e perdem a eficiência. Para restaurar sua capacidade, um processo de regeneração é realizado, onde uma solução de salmoura (mistura de água e sal) é passada pelo tanque. Isso renova os minerais acumulados e recarrega as resinas com íons de sódio, permitindo que o abrandador funcione novamente.

Os abrandadores de água, garantem a eficiência de processos que dependem de água de baixa dureza, como em caldeiras, é um dispositivo eficaz que melhora a qualidade da água, prevenindo problemas associados a dureza e promovendo um uso eficiente dos recursos hídricos.

Figura 2. Abrandador- Carla



Fonte: (GABCO, 2012).

2.1.2. Desmineralização

A água é um recurso essencial para diversas indústrias, desempenhando um papel crítico em processos de produção, limpeza e geração de energia. Contudo, a qualidade da água utilizada nesses processos é um fator determinante para a eficiência e a longevidade dos equipamentos industriais. Nesse

contexto, a desmineralização da água surge como uma solução eficaz para remover impurezas e minerais que podem comprometer o desempenho dos sistemas industriais.

A desmineralização é um processo de purificação que remove minerais e sais dissolvidos da água. Esses minerais, como cálcio, magnésio, sódio, cloretos e sulfatos, podem causar incrustações, corrosão e outros problemas em sistemas industriais.

Ao eliminar esses minerais, a desmineralização proporciona uma água de alta qualidade, essencial para aplicações industriais que demandam precisão e eficiência.

Os minerais dissolvidos na água podem precipitar e formar incrustações nos equipamentos industriais, como caldeiras, torres de resfriamento e trocadores de calor. Essas incrustações reduzem a eficiência dos sistemas e aumentam o consumo de energia.

Com a desmineralização, a água torna-se praticamente livre de sais dissolvidos, minimizando a formação de incrustações. Isso resulta em equipamentos mais eficientes e maior vida útil dos sistemas. A presença de incrustações nos sistemas de aquecimento e resfriamento reduz a transferência de calor, aumentando o consumo de energia. Ao utilizar água desmineralizada, os sistemas operam de maneira mais eficiente, pois não há barreiras para a troca de calor.

Essa melhoria na eficiência energética traduz-se em economia de custos e em uma operação mais sustentável. Muitas aplicações industriais requerem água com padrões de qualidade rigorosos. A desmineralização garante uma água de qualidade consistente, atendendo às necessidades de processos como produção de produtos eletrônicos, indústrias farmacêuticas e geração de vapor.

Essa consistência é crucial para evitar falhas no processo produtivo e manter a conformidade com regulamentos e especificações industriais. Embora a implantação de sistemas de desmineralização possa exigir um investimento inicial, os benefícios a longo prazo são significativos. Com equipamentos mais protegidos contra corrosão e incrustações, os custos de manutenção são reduzidos. Além disso, a eficiência energética proporciona economia no consumo de energia.

A desmineralização também contribui para a sustentabilidade ambiental. Sistemas eficientes reduzem o desperdício de recursos, como energia e água, e minimizam a necessidade de produtos químicos para limpeza e manutenção. Além

disso, ao evitar o descarte de água contaminada com sais minerais, a desmineralização reduz o impacto ambiental das operações industriais.

Equipamentos industriais representam um investimento significativo para as empresas. A utilização de água desmineralizada protege esses equipamentos contra danos causados por corrosão e incrustações, prolongando sua vida útil e otimizando o retorno sobre o investimento.

Os sais minerais presentes na água também contribuem para a corrosão de tubulações e equipamentos. A corrosão não apenas compromete a integridade dos sistemas, mas também pode causar paradas não planejadas e aumento dos custos de manutenção.

A desmineralização reduz significativamente os agentes corrosivos na água, como cloretos e sulfatos, protegendo os equipamentos e garantindo maior confiabilidade operacional.

O processo de desmineralização possui resinas de troca iônica que são polímeros insolúveis, contendo grupos funcionais capazes de realizar reações de troca iônica com os cátions ou ânions presentes na água. Durante o processo de purificação da água, as resinas trocadoras de íons retêm os sais dissolvidos na água e liberam íons OH^- e H^+ , tendo como produto água purificada (SILVA, 2009)

Figura 3. Desmineralização



Fonte: (FILTRANDO, 1994).

2.1.3. Osmose reversa

A osmose reversa industrial é uma tecnologia essencial para o tratamento e purificação da água, amplamente utilizada em diversos setores. Este método eficiente não apenas remove impurezas, como também melhora a qualidade da água para usos industriais e comerciais. Neste contexto, entender o funcionamento, o benefício e as aplicações da osmose reversa são cruciais para a gestão eficaz de recursos hídricos em indústrias. Já que ela utiliza um processo de separação através de uma membrana semipermeável para remover íons, moléculas e partículas maiores da água.

O funcionamento se inicia quando a água bruta é pressurizada e forçada a passar através da membrana. Essa membrana permite que somente as moléculas de água passem, retendo contaminantes, como sais, minerais indesejados e microrganismos. O resultado é água purificada, que atende aos padrões industriais. Na indústria, essa técnica é aplicada em sistemas de tratamento de água potável, dessalinização e purificação de efluentes.

Esta técnica ainda oferece uma série de benefícios para empresas que buscam otimizar o uso de recursos hídricos e garantir a qualidade da água utilizada em seus processos. Um dos principais benefícios é a capacidade de remover contaminantes de forma eficiente, melhorando a pureza da água e, conseqüentemente, aumentando a qualidade dos produtos finais.

Outro benefício relevante é a redução de custos operacionais. Com sistemas de osmose reversa bem mantidos, as empresas podem diminuir a necessidade de produtos químicos para tratamento de água, além de reduzir o consumo de energia em comparação a outros métodos de filtragem. Essa eficiência pode resultar em economias significativas a longo prazo.

A osmose reversa também contribui para a sustentabilidade ambiental. Ao recuperar a água tratada para reutilização em processos industriais, as empresas não apenas diminuem a demanda por água potável, mas também ajudam a preservar fontes hídricas. Essa prática é especialmente importante em áreas onde a escassez de água é uma preocupação constante.

Além disso, a versatilidade da osmose reversa permite que empresas de diferentes setores a integrem facilmente em seus processos. Seja em indústrias de alimentos, bebidas, farmacêuticas ou químicas, o uso dessa tecnologia pode ser

ajustado para atender às necessidades específicas de cada ramo, garantindo uma purificação eficaz em diferentes aplicações.

Por fim, a instalação de sistemas de osmose reversa pode valorizar a imagem da empresa, transmitindo um compromisso com a qualidade e a responsabilidade ambiental. Com consumidores cada vez mais conscientes, ter uma operação sustentável e comprometida com o tratamento responsável da água pode se tornar um diferencial competitivo no mercado.

Em contraste a métodos como filtração por areia e carvão ativado são mais limitados em sua capacidade de remoção. Enquanto a filtração por areia é eficaz na remoção de sedimentos e partículas grandes, ela não elimina microrganismos ou dissolventes químicos. O carvão ativado, por sua vez, é excelente para remover compostos orgânicos e cloro, mas não pode lidar com sólidos dissolvidos como a osmose reversa.

Outro método comum é a ultrafiltração, que utiliza uma membrana para separar partículas maiores, como bactérias e alguns vírus. No entanto, a ultrafiltração não consegue remover sal e outros sólidos dissolvidos, o que a torna menos eficaz em comparação à osmose reversa para aplicações que exigem água de alta pureza.

A destilação é um processo alternativo que purifica a água aquecendo-a até a evaporação e, em seguida, condensando o vapor. Embora seja eficiente na remoção de sais e contaminantes, a destilação consome mais energia e tempo do que a osmose reversa. Por isso, muitas indústrias e empresas preferem a osmose reversa pela sua eficiência energética e rapidez no tratamento.

O futuro da osmose reversa na indústria parece promissor, dado o aumento crescente da demanda por água potável e a necessidade de soluções eficientes para o tratamento de água. À medida que a escassez hídrica se torna uma preocupação cada vez mais urgente em várias regiões do mundo, a osmose reversa se destaca como uma tecnologia chave para a gestão sustentável da água.

Inovações tecnológicas estão impulsionando o desenvolvimento de membranas mais eficazes e duráveis, que melhoram a eficiência do processo de filtração. A sustentabilidade também será uma força motriz no futuro da osmose reversa. A crescente conscientização sobre questões ambientais fará com que as indústrias busquem tecnologias que não apenas tratem a água de forma eficaz, mas também minimizem o desperdício e a pegada hídrica.

Logo abaixo na figura 4 é demonstrado o equipamento de osmose reversa.

Figura 4. Osmose reversa



Fonte: (WATER SOLUTIONS, 2025).

A seguir, na figura 5 são apresentados os parâmetros de qualidade da água e os problemas que podem ser causados na presença deles na água de abastecimento em excesso. Para cada parâmetro não conforme com a norma, são apresentadas soluções para os problemas, interferências nos sistemas geradores de vapor e meios de tratamento.

Figura 5. Parâmetros de qualidade da água

Constituinte	Dificuldades Causadas	Meios de Tratamento
Turbidez	Má aparência da água; depósitos em linhas de água, equipamentos, etc.	Coagulação, sedimentação e filtração.
Dureza	Presença de sais de cálcio e magnésio. Maior fonte de incrustações em equipamentos de troca térmica, caldeiras, linha de tubos, etc.	Abrandamento; desmineralização; tratamento interno para caldeiras; agentes ativados de superfície.
Alcalinidade	Presença de bicarbonatos (HCO_3^-), carbonatos (CO_3^{2-}) e hidróxidos (OH^-). Espuma e arraste com vapor; fragilização do aço da caldeira; bicarbonato e carbonato produzem CO_2 no vapor, uma fonte de corrosão em linhas de condensado.	Abrandamento com cal e soda cáustica; tratamento com ácido; abrandamento com hidrogênio zeólito; desmineralização por troca iônica.
Dióxido de carbono	Corrosão em linhas de água, particularmente vapor e linhas condensados.	Aeração, “desaeração”, neutralização com bases.
pH	O pH varia de acordo com sólidos ácidos e alcalinos na água; a maioria das águas naturais possui um pH de 6,0-8,0.	O pH pode ser aumentado por bases e decrescido por ácidos.
Sulfato	Se adiciona aos constituintes sólidos da água, mas sozinho, normalmente, não é significativo. Se combina com cálcio para formar incrustações de sulfato de cálcio.	Desmineralização, osmose reversa, eletrodialise, evaporação.
Cloro	Se adiciona aos constituintes sólidos e aumenta o caráter corrosivo da água.	Desmineralização, osmose reversa, eletrodialise, evaporação.
Sílica	Incrustações em caldeiras e sistemas de resfriamento de água.	Processo de remoção por sais de magnésio a quente e morno; absorção por troca iônica com resinas de bases fortes, em conjunto com desmineralização, osmose reversa, evaporação.
Ferro e manganês	Mancha a água de precipitação; fonte de depósitos nas linhas de água, caldeiras, etc.; interfere com tingimento, bronzeamento, fabricação de papel.	Aeração; coagulação e filtração; amolecimento a cal; troca catiônica; filtração por contato; agentes superficiais ativos para retenção de ferro ou manganês.
Oxigênio	Corrosão nas linhas de água, trocadores de calor, caldeiras, linhas de retorno, etc.	Desaeração; sódio sulfito; inibidores de corrosão.
Sólidos dissolvidos	Refere-se ao total de matéria dissolvida, determinado por evaporação; grande concentração é condenável por interferir no processo e ser causa de espuma em caldeiras.	Abrandamento com cal e troca catiônica; desmineralização, osmose reversa, eletrodialise, evaporação.
Sólidos suspensos	Refere-se à matéria não-dissolvida, determinada pelo método gravimétrico; causa depósitos em trocadores de calor, caldeiras, linhas de água, etc.	Sedimentação; filtração, usualmente procedida de coagulação e sedimentação.

Fonte: (Adaptado de General Electric Company 2012).

2.2. CALDEIRAS

As caldeiras a vapor constituem um dos pontos mais críticos da infraestrutura do processo produtivo nas indústrias em geral. Por esse motivo, exigem atenção especial quanto à especificação de materiais, inspeções e procedimentos de segurança, a fim de evitar riscos de acidentes.

Caldeiras ou geradores de vapor são equipamentos complexos, fechados, destinados a transformar água em vapor e acumulá-lo sob pressão superior à atmosférica, utilizando qualquer fonte de energia — excetuando-se os reboilers (refervadores) e equipamentos similares empregados em unidades de processo. Esse procedimento ocorre por meio da queima de combustível, que fornece calor sensível à água até atingir a temperatura de ebulição, seguido do calor latente necessário à

vaporização e, posteriormente, do calor de superaquecimento para gerar vapor superaquecido (Trevelim, 2021).

Entre os diferentes tipos de caldeiras existentes, destacam-se as flamotubulares, aquatubulares e as mistas, cada uma com características específicas de indicação, funcionamento e benefícios. Esses tipos serão explicados de forma mais detalhada a seguir.

2.2.1. Caldeiras flamotubulares

As caldeiras flamotubulares recebem esse nome devido ao modo de circulação dos gases de combustão, que passam pelo interior de tubos enquanto a água os envolve externamente. Esse foi o primeiro modelo de caldeira desenvolvido com finalidade de geração de energia.

Nesse tipo de caldeira, os gases provenientes da queima do combustível são conduzidos para dentro dos tubos imersos na água. O calor transferido aos tubos eleva a temperatura da água até que ela se transforme em vapor, possibilitando a geração de energia. E será melhor exemplificado na figura 6 e 7.

As caldeiras flamotubulares são também conhecidas como caldeiras compactas, devido à simplicidade de sua construção e operação. Por isso, continuam amplamente utilizadas em diversas indústrias, mesmo após o desenvolvimento de modelos mais modernos. Como ocorre com outros tipos de caldeiras, as flamotubulares apresentam componentes característicos, entre os quais se destacam:

Componentes da Caldeira Flamotubular

Tubulão: O tubulão é um reservatório onde a água e o vapor são armazenados. Geralmente fabricado com chapas de aço carbono soldadas, ele tem sua capacidade de vapor diretamente associada às dimensões. Nele podem ser encontrados a garrafa de nível, a descarga de fundo para remoção de sólidos, os tubos de troca térmica, a saída de vapor e as válvulas de segurança.

Fornalha: Também chamada de tubo de fornalha, é a parte responsável pela queima do combustível. O oxigênio, que pode ser pré-aquecido no pré-aquecedor de ar entra em contato com o combustível, dando início à combustão. Essa combustão pode ocorrer de diferentes formas, dependendo do tipo de combustível utilizado (líquido, gasoso ou sólido, como biomassa). Algumas caldeiras flamotubulares podem

contar com uma fornalha aquatubular localizada na parte inferior, o que proporciona maior segurança na geração de vapor.

Feixes Tubulares: Conhecidos também como tubos do evaporador ou tubos de fogo, esses feixes são responsáveis por receber o calor dos gases provenientes da combustão. É neles que ocorre a maior parte da transferência térmica para a água.

Aparelhos auxiliares são componentes que auxiliam o funcionamento eficiente e seguro do sistema. Entre eles, destacam-se: Economizador, aquecedor de óleo, sistema de alimentação de combustível, pré aquecedor de ar, lavador de gases e desaerador térmico da água de alimentação.

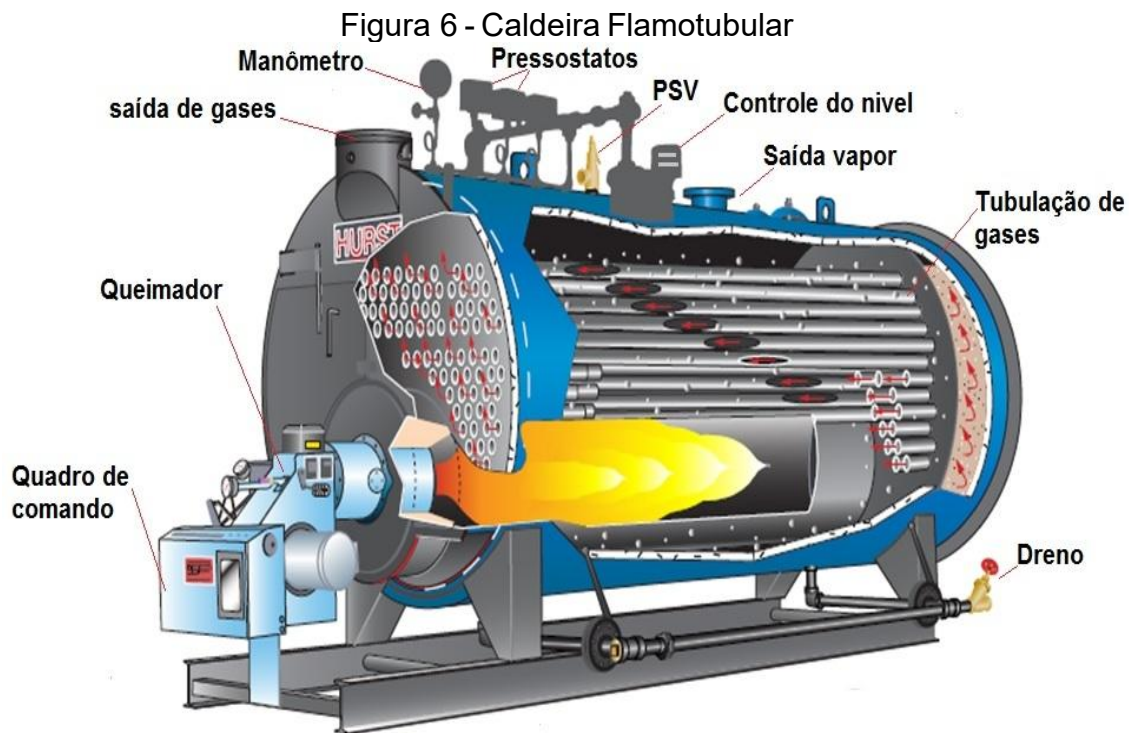
As principais vantagens das caldeiras flamotubulares são:

Relativamente compactas, ocupando menor espaço físico na instalação; Ideais para processos que operam com pressões e temperaturas mais baixas; Podem utilizar uma grande variedade de combustíveis, inclusive diversas formas de biomassa, como cavaco de madeira, serragem, resíduos agrícolas e bagaço de cana; Excelente custo-benefício, pois o investimento inicial, a operação e a manutenção são mais acessíveis, além de apresentarem inspeção facilitada; Podem operar com controle automatizado, incluindo automação da alimentação de combustível; Modelos modernos oferecem maior eficiência de combustão, especialmente na queima de materiais em suspensão e combustíveis com maior teor de umidade, resultando em baixa emissão de material particulado; Os gases quentes circulam pelo interior dos tubos, enquanto a água os envolve externamente, promovendo a transferência de calor que gera o vapor.

Apesar de amplamente utilizadas, as caldeiras flamotubulares apresentam algumas limitações quando comparadas a outros tipos de caldeiras, especialmente as aquatubulares. Entre suas principais desvantagens, destacam-se:

Menor capacidade de produção de vapor, o que limita sua aplicação em processos industriais que exigem grandes volumes de vapor ou altas pressões; Eficiência energética inferior em relação às caldeiras aquatubulares, podendo resultar em custo operacional mais elevado por unidade de vapor produzida; Tempo de resposta mais lento às variações de demanda de vapor, devido ao maior volume de água no tubulão, o que reduz a flexibilidade operacional; Manutenção potencialmente mais complexa e custosa quando se trabalha com combustíveis de baixo poder calorífico ou com alto teor de umidade, pois isso pode aumentar o acúmulo de

resíduos e reduzir a eficiência da combustão; Limitação de pressão e temperatura de trabalho, tornando-as menos adequadas para processos que exigem vapor superaquecido ou condições mais severas de operação.



Fonte: (Gbtécnica, 2013).

Figura 7 - Caldeira Flamotubular



Fonte: (Gbtécnica, 2013).

2.2.2. Caldeiras aquatubulares

As caldeiras aquatubulares, diferente das caldeiras mistas, suportam altas pressões e temperaturas e produzem grande quantidade de vapor, oferecendo maior eficiência na produção. Devido a essas características, esse tipo de caldeira é utilizado principalmente na geração de energia. Mas oferece a possibilidade de desenvolver projetos menores para utilização em processos industriais.

Para que atenda todas as expectativas e necessidades de indústrias e demais processos, a caldeira aquatubular deve contar com algumas peças de extrema importância. Essas peças são as responsáveis por garantir o bom funcionamento do equipamento. Neste sentido, as peças de maior relevância em uma caldeira aquatubular são:

Tubulão: Caldeiras aquatubulares costumam apresentar um ou dois tubulões, sendo classificados de acordo com a configuração de cada equipamento. Estes tubulões podem ser superiores ou inferiores.

Os tubulões superiores, localizados na parte superior da caldeira aquatubular, funcionam como um reservatório que abriga a água no estado líquido ou gasoso. Já os tubulões inferiores são conhecidos como balão de lama, estão localizados na parte de baixo da caldeira. Estes têm a função de armazenar com água as partes de troca térmica. Dessa forma, é feita a vaporização, com uma circulação espontânea.

Feixe tubular e feixe convectivo: É um conjunto de tubos que recebe calor dos gases proveniente da combustão por convecção, pois encontram-se fora da radiação da queima do combustível.

Paredes d'água: Representam os tubos que revestem a fornalha, absorvendo o calor radiante da chama que irá vaporizar a água dentro dos tubos de troca térmica. Assim, aumenta-se a eficiência da caldeira.

Superaquecedor: Composto por serpentinas, tubos lisos, montados no fluxo dos gases de combustão, essencialmente na região mais quente da caldeira. O vapor saturado gerado na caldeira é recebido pelo superaquecedor, que via troca térmica elevam a temperatura do vapor acima da temperatura de saturação. Vale ressaltar que a temperatura não pode ultrapassar a prevista para cada material. Para assegurar que isto aconteça, faz-se uso do dessuperaquecedor de vapor.

Isolamento e refratários: Têm a função de isolar a fornalha, evitando que o calor da combustão se perca por entre as peças da caldeira. Assim, aumenta-se a eficiência térmica.

Estrutura e carcaça metálica: Responsáveis por proteger as peças internas e sustentar toda a estrutura da caldeira, não permitindo que o calor escape.

Saída de gases: Representada pela chaminé através da qual os gases da combustão escapam para a área externa da caldeira.

Por isso, quando comparada à caldeira flamotubular, a caldeira aquatubular apresenta algumas vantagens bastante significativas que estimulam seu uso. Dentre as vantagens mais significativas pode-se citar:

Capacidade em produzir maiores volumes de vapor, necessários em processos mais exigentes; Capacidade em trabalhar com altas pressões; Possibilidade em suportar e gerar altas temperaturas; Possibilidade em ser alimentada por uma variedade bem grande de combustíveis, inclusive a biomassa não necessariamente tem alto poder calorífico; o poder calorífico varia muito entre tipos de biomassa, sendo mais elevado em materiais com menor teor de umidade e mais baixo em materiais com alta umidade. Para a queima ser eficiente, é preciso diminuir o teor de umidade, pois a água absorve energia durante o processo, e também considerar a granulometria (tamanho das partículas) e a composição química, que afetam a eficiência da combustão; Simplificação na limpeza dos tubos, com a possibilidade em ser realizada de forma automática; Durabilidade, tempo de vida de uma caldeira aquatubular pode facilmente chegar até 30 anos. Porém, para isso é fundamental que haja boa manutenção, manuseio e limpezas programadas.

E para finalizar as desvantagens de uma caldeira aquatubular incluem o custo elevado, que pode ser até 50% mais alto que uma caldeira flamotubular com capacidade equivalente. Essa alta de custo pode ser um desafio significativo para algumas indústrias que precisam de caldeiras aquatubulares, especialmente em processos industriais mais exigentes que requerem alta geração de vapor, altas temperaturas e pressões.

Logo abaixo nas figuras 8, 9 e 10 é possível visualizar alguns exemplos de caldeira aquatubular na planta da indústria e um esquema apontando as peças presentes.

Figura 8. Caldeira Aquatubular I



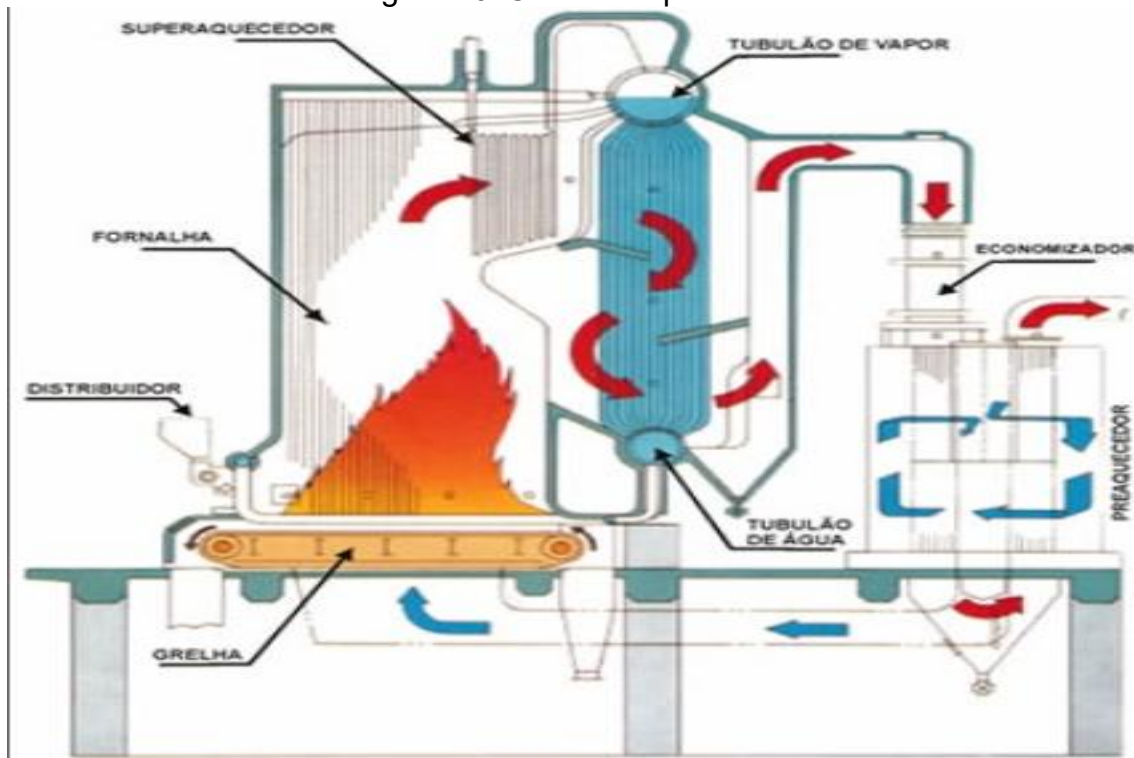
Fonte: (DanPower, 2020)

Figura 9. Caldeira Aquatubular II



Fonte: (DanPower, 2020)

Figura 10. Caldeira Aquatubular



Fonte: (DanPower, 2020)

2.2.3. Caldeiras mistas

A caldeira mista é um equipamento versátil e eficiente, capaz de operar com diferentes tipos de combustíveis, como gás, óleo e biomassa. Essa característica proporciona uma flexibilidade operacional incomparável, tornando-a ideal para indústrias que desejam diversificar suas fontes de energia e otimizar os custos de produção.

Além disso, a capacidade de alternar entre combustíveis garante continuidade no processo produtivo, mesmo em situações de escassez ou indisponibilidade de um determinado insumo energético, aumentando a segurança e a confiabilidade do sistema.

O funcionamento da caldeira mista é simples e eficaz. Por poder empregar diversos combustíveis, o equipamento pode ser adaptado às necessidades específicas de cada indústria, assegurando desempenho otimizado e maior eficiência econômica.

Seu campo de aplicação é vasto, sendo amplamente utilizada em setores que demandam alta produção de vapor e aquecimento industrial, como

indústrias químicas, petroquímicas, alimentícias e de papel e celulose. (VAPOUR, 1998). Segue exemplos de caldeira mista demonstrados na figura 11 e 12.

Figura 11. Caldeira Mista



Fonte: (Danpower, 2020).

Figura 12. Caldeira Mista



Fonte: (Danpower, 2020).

2.3. VAPOR

O processo de geração de vapor desempenha papel fundamental em diversos setores industriais, especialmente naqueles que necessitam de altas demandas térmicas e motrizes. A etapa inicial desse processo envolve a alimentação de água em caldeiras, onde ocorre a sua transformação em vapor por meio do aquecimento gerado por combustíveis como biomassa, bagaço de cana, gás natural, óleo combustível ou energia elétrica. O vapor produzido pode ser saturado ou superaquecido, de acordo com as necessidades específicas do processo industrial.

Além da função térmica, o vapor também é amplamente utilizado como força motriz no acionamento de turbinas e equipamentos mecânicos, evidenciando sua versatilidade nos processos produtivos.

A eficiência do processo de geração de vapor depende do controle de temperatura e pressão, que influenciam diretamente a capacidade de expansão e realização de trabalho mecânico. Conforme destaca a Togawa Engenharia (2017), “para movimentação e como fonte de força motriz, o vapor é normalmente utilizado em turbinas para geração de energia elétrica”.

Em setores que dependem de geração própria de energia, como o sucroalcooleiro, o vapor desempenha um papel crítico no acionamento de turbinas da moenda, geradores de energia e outros equipamentos essenciais.

O vapor é indispensável em praticamente todas as etapas produtivas da indústria sucroalcooleira, atuando direta ou indiretamente em processos como limpeza, geração de energia, aquecimento e evaporação do caldo. Segundo Zanardo (2025), a elevada temperatura do vapor permite eficiência e controle no processo de evaporação, garantindo padrões de qualidade elevados.

Além disso, a utilização do vapor contribui para a sustentabilidade dos processos, uma vez que se trata de uma forma limpa de energia e pode auxiliar na redução de emissões poluentes (ISEN, 2021). A Disparco (2025) reforça essa visão ao destacar a versatilidade do vapor em atender múltiplas funções térmicas e mecânicas.

O arraste caracteriza-se pelo transporte de água e impurezas minerais juntamente com o vapor, comprometendo a pureza necessária para a etapa pós-caldeira. Esse fenômeno pode ocorrer em caldeiras operando em diferentes faixas de pressão e apresenta causas tanto mecânicas quanto químicas.

As causas mecânicas estão relacionadas a flutuações repentinas de carga e operação acima da capacidade projetada. Já as causas químicas envolvem excesso de sólidos dissolvidos, sílica e alcalinidade. As consequências incluem danos a turbinas, formação de depósitos em válvulas e separadores, redução da eficiência operacional e perdas na produção. Conforme observa Dantas (1988), o controle do arraste é fundamental para garantir a integridade dos equipamentos e a confiabilidade do sistema.

O vapor é um elemento essencial para a indústria, com destaque para o setor sucroalcooleiro, devido à sua dupla função térmica e motriz. Sua utilização promove eficiência, qualidade e sustentabilidade aos processos produtivos. Entretanto, a operação e o transporte do vapor exigem cuidados específicos, como a prevenção do arraste, que pode gerar danos significativos aos equipamentos e comprometer a eficiência do sistema. Assim, compreender a geração, aplicação e controle do vapor é indispensável para garantir o funcionamento eficiente e seguro das operações industriais.

3. METODOLOGIA

O tratamento de água para caldeiras é essencial para garantir a segurança e vida útil do equipamento, além de otimizar o consumo de energia e reduzir custos. A água não tratada pode causar problemas como corrosão, incrustação e arraste, comprometendo o desempenho da caldeira e aumentando os riscos de falhas e paradas não programadas.

A corrosão, causada por agentes como oxigênio e íons corrosivos, pode danificar as partes metálicas que tem contato com esta água na caldeira, reduzindo sua vida útil e levando a vazamentos.

Depósitos de sais minerais e sílica alta na água podem formar incrustações nas superfícies de contato, prejudicando a transferência de calor e diminuindo a eficiência da caldeira.

O arraste, que ocorre quando a água é arrastada junto com o vapor, pode baixar a temperatura do vapor causando desarme de turbina do gerador, para evitar danos maiores. Um dos motivos desse arraste de água pode ser causado por condutividade alta.

4. DESENVOLVIMENTO

Ao evitar a corrosão e incrustação, o tratamento de água garante uma melhor transferência de calor, resultando em menor consumo de energia para a produção de vapor. A prevenção de falhas e a melhoria da eficiência energética levam a uma redução nos custos de manutenção e consumo de combustível. O tratamento adequado da água garante uma excelente eficiência na produção de vapor e qualidade de vida dos equipamentos.

Em resumo o tratamento de água para caldeiras envolve diversas etapas e processos, como: Remoção de impurezas através de filtração, decantação e outros processos físicos para remover sólidos suspensos e sedimentos; Abrandamento para diminuição de íons de cálcio e magnésio, responsáveis pela dureza da água, que podem causar incrustações; Desmineralização: para retirada de todos os sais minerais da água, utilizada em caldeiras de alta pressão; Desaeração removendo o oxigênio dissolvido na água, um dos principais agentes corrosivos; Controle de pH e alcalinidade para prevenir a corrosão e garantir a estabilidade do sistema; Inibidores de corrosão adicionando produtos químicos que formam uma camada protetora nas superfícies metálicas, prevenindo a corrosão; Anti-incrustantes também adicionando produtos químicos que impedem a formação de incrustações nas superfícies internas da caldeira; Osmose reversa para remover os sais dissolvidos contidos na água, por meio de alta pressão, filtração por membrana semipermeável no fluxo do meio mais concentrado para o menos concentrado.

Portanto, o presente trabalho aponta que o tratamento de água para caldeiras é um investimento que traz diversos benefícios, como maior eficiência, segurança, vida útil prolongada e redução de custos.

5. RESULTADOS

A osmose reversa é um dos processos mais eficientes utilizados no tratamento de água, sendo amplamente aplicada em sistemas industriais, incluindo caldeiras de médio e alto desempenho. O método consiste na aplicação de pressão sobre a água bruta para forçá-la a atravessar uma membrana semipermeável, que possui poros microscópicos capazes de reter uma grande variedade de

contaminantes. Dessa forma, a água purificada passa pela membrana, enquanto as impurezas são rejeitadas e encaminhadas para descarte.

A tecnologia de osmose reversa é altamente eficaz na remoção de sais dissolvidos, como sódio, cloreto, cálcio e nitratos, além de metais pesados (como chumbo, mercúrio e arsênio), compostos químicos diversos (pesticidas, herbicidas), compostos orgânicos voláteis, micro poluentes, partículas em suspensão e parte dos microrganismos presentes na água.

O processo é considerado o inverso da osmose natural. Na osmose comum, a água tende a se deslocar de uma solução menos concentrada para outra mais concentrada, buscando o equilíbrio das concentrações em ambos os lados da membrana. Já na osmose reversa, esse fluxo é invertido através da aplicação de pressão superior à pressão osmótica natural, permitindo que a água flua do meio mais concentrado para o menos concentrado, garantindo a purificação.

Entre suas principais vantagens, destacam-se a elevada capacidade de remoção de contaminantes, a operação sem necessidade de calor, o menor consumo de energia em comparação a outros métodos térmicos e a redução de custos operacionais a longo prazo. Além disso, trata-se de um processo contínuo, confiável e capaz de produzir água com elevada pureza, adequada para aplicações industriais sensíveis como o abastecimento de caldeiras.

Comprovando assim com base em pesquisas e referências bibliográficas, que além da enorme importância do tratamento de água para manutenção adequada e prolongamento da vida útil de uma caldeira, a técnica de osmose reversa é a mais eficiente entre as outras formas de tratamentos.

Logo abaixo, pode-se identificar na figura 13 uma turbina com palhetas em estágio crítico de incrustações, ocasionado pela falha ou não atenção adequada com o tratamento de água utilizado para alimentar a caldeira e em seguida um exemplo na figura 14, do que se espera que as paletas da turbina se mantenham limpas para não gerar problemas futuros e outros riscos demonstrados com mais detalhes anteriormente neste trabalho.

Figura 13. Turbina com as palhetas em estágio de incrustação



Fonte: (Turbimaq, 2022).

Figura 14. Turbina com as palhetas de estágio limpo



Fonte: (Turbimaq, 2022).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

De fato, a qualidade da água é um fator determinante para a eficiência, segurança e vida útil de caldeiras industriais. A tecnologia de osmose reversa (OR) destaca-se como um dos métodos mais eficazes no tratamento de água para geração de vapor, devido à sua elevada eficiência na remoção de sais dissolvidos, metais pesados, partículas, compostos químicos e parte dos microrganismos.

A necessidade da OR varia conforme o tipo e a pressão de operação da caldeira, pois caldeiras de baixa pressão, a tolerância a impurezas é maior. Sistemas tradicionais de tratamento (filtração, abrandamento e desmineralização parcial) geralmente atendem às necessidades. A OR é opcional, utilizada principalmente quando a água bruta é de baixa qualidade ou quando se busca redução de produtos químicos e maior estabilidade operacional.

Caldeiras de média pressão requerem água com menor dureza, sílica e condutividade. A osmose reversa torna-se altamente recomendável, pois proporciona grande redução de contaminantes e aumenta a confiabilidade do sistema. Comumente é combinada com troca iônica para assegurar qualidade superior.

Já para caldeiras de alta pressão, a água demanda altíssima pureza, devido ao elevado risco de incrustação, corrosão e falhas operacionais. A osmose reversa é essencial, funcionando como etapa inicial antes de processos de polimento (troca iônica, EDI e desgaseificação), garantindo água com condutividade extremamente baixa.

Portanto, a osmose reversa é uma solução de alto desempenho, contínua e confiável, proporcionando significativa redução de custos operacionais, maior eficiência térmica e proteção dos equipamentos. Seu uso varia de opcional a indispensável, conforme a pressão de operação da caldeira, sendo crítica para sistemas de média e fundamental para caldeiras de alta pressão.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABICLOR. **Principais etapas de tratamento de água realizado nas ETAs.** Disponível em: <<https://www.abiclor.com.br/principais-etapas-de-tratamento-de-agua-realizado-nas-etas/>>. Acesso em: Ago. 2025.

ÁGUA E FLUENTES. **Água e efluentes em uma Usina Termelétrica - Parte 2: Desmineralização de Água,** mar de 2023. Disponível

em: <<https://www.aguaeeffluentes.com.br/post/%C3%A1gua-e-efluentes-em-uma-usina-termel%C3%A9trica-parte-2-desmineraliza%C3%A7%C3%A3o-de-%C3%A1gua>>. Acesso em: Ago. 2025.

Carla Legner, C.L. **Tecnologias e processos para desmineralização da água**. Revista TAE especializada em tratamento de água e fluentes, 2021. Disponível em: <<https://revistatae.com.br/Artigo/717/tecnologias-e-processos-para-desmineralizacao-da-agua>>. Acesso em: Jun. 2025.

DAEV. Departamento de Águas e Esgotos de Valinhos (DAEV). Disponível em: <https://www.daev.org.br/educacao-ambiental/as-etapas-de-tratamento-da-agua-bruta?utm_source/>. Acesso em: Jun. 2025.

DAN POWER. **Conheça o sistema de abrandamento água para a indústria**. Imagem disponível em: <<https://danpower.com.br/projetos/caldeiras-mistas-com-grelhas-de-avanco/>>. Acesso em: Ago. 2025.

DANPOWER. **Caldeira aquatubular**. Disponível em: <Caldeira Aquatubular Modelo MD-FV | DanPower>. Acesso em: Nov. 2025.

FOSFETIL VALE. **Tratamento químico em sistema de geração de vapor**. Disponível em: <<http://cntq2.hospedagemdesites.ws/wp-content/uploads/2013/05/Caldeira-TRATAMENTO-QU%C3%8DMICO.pdf>>. Acesso em: Jul. 2025.

GABCO. Focus Publicidade. **Abrandador de água industrial**. Disponível em: <<https://www.gabco.com.br/template/imagens/palavras-chave/abrandador-agua-industrial-1.jpg>>. Acesso em: Jun. 2025.

GBTÉCNICA. **Caldeiras**. Disponível em: <<https://www.gbtecnica.com.br/index.php/novidades/caldeiras/>>. Acesso em: Jul. 2025.

Multiagua industrial Ltda. Disponível em: <<https://multiagua.com.br/solucoes-industriais/tratamento-de-afluentes/o-uso-do-abrandador-no-tratamento-de-agua-industrial/>>. Acesso em: Maio 2025.

NEOWATER, EFICIÊNCIA HÍDRICA. **Conheça o sistema de abrandamento água para a indústria**. Julho de 2021. disponível em: <<https://www.neowater.com.br/post/abrandador>>. Acesso em: Jul. 2025.

Portal tratamento de água. **As etapas do tratamento da água**. Artigo etapas do tratamento de água. Disponível em: <tratamentodeagua.com.br/artigo/etapas-tratamento-agua/>. Acesso em Jun. 2025.

Prótons Brasil. **Osmose Reversa Industrial: Tudo que Você Precisa Saber para Implementar | Prótons Brasil**. Disponível em: <<https://protonsbrasil.com.br/blog/osmose-reversa-industrial-tudo-que-voce-precisa-saber-para-implementar/>>. Acesso em: Nov. 2025.

SAAE. **Etapas do tratamento de água**, dez. de 2008. Disponível em: <https://saaevalenca.ba.gov.br/fases-e-etapas-do-tratamento-de-agua/?utm_sourc>. Acesso em: Jun. 2025.

SANTOS. FRAGA, E. F. **A importância do tratamento e cuidados com a água de caldeiras**. 2017. 10 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado)-Ciência e Tecnologia, UFRSA, Rio Grande do Norte, 2017. <<https://repositorio.ufrsa.edu.br/server/api/core/bitstreams/bf261e6d-a00c-47fb-9be9-f48302aa3bca/content>>. Acesso em: Set. 2025.

SECAMAQ. **Caldeira aquatubular**. Disponível em: <Caldeira aquatubular: Saiba como funciona e conheça suas vantagens – Secamaq>. Acesso em: Nov. 2025.

SECAMAQ. **Caldeira flamotubular**. Disponível em: <<https://www.secamaq.com.br/caldeira-flamotubular-como-funciona-e-suas-vantagens/>>. Acesso em: Jun. 2025.

SINERGIA CIENTÍFICA. **Osmose Reversa**. Disponível em: <<https://www.sinergiaceutifica.com.br/osmose-reversa/>>. Acesso em: Ago. 2025.

SOUZA, S. **A importância do tratamento de água em caldeiras industriais**. 2022. 33 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização) - Graduação de Engenharia, Anhanguera, Santo André, 2022. Disponível em: <<https://repositorio.pgsscogna.com.br/bitstream/123456789/66455/1/Vin%C3%ADciuss%20Schutz%20da%20Sil>>. Acesso em: Nov. 2025.

TERCAL ENGENHAR. **Inspeção de caldeira**. Disponível em: <<https://tercal.com.br/inspecao-de-caldeira/>>. Acesso em: Jul. 2025.

TURBIMAQ. **Turbinas a vapor**. Disponível em: <<http://turbimaq.arkestudio.com.br/>>. Acesso em: Dez. 2025.

Universidade Federal de Pelotas (UFPEL), repositórios da UFPEL; **Tratamento de água**. Disponível em: <<https://wp.ufpel.edu.br/hugoguedes/files/2018/11/Aula-7-Tratamento-de-%C3%A1gua-Caroline-Voser.pdf>>. Acesso em: Jul. 2025.

Unniroyal Química. **Desmineralização: benefícios no processo de tratamento da água**. Disponível em: <<https://unniroyal.com.br/desmineralizacao-da-agua-setor-industrial/>>. Acesso em: Nov. 2025.

VAPOR CALDEIRAS. **Caldeira mista**. Disponível em: <<https://www.vapour.com.br/caldeira-mista>>. Acesso em: Jul. 2025.

WATER SOLUTIONS. **Osmose Reversa - Tratamento de água**. Disponível em: <<https://www.watersolutions.com.br/>>. Acesso em: Nov. 2025.

Zarpelon, W.; Azzolini, J. C.; **Caldeiras de alta pressão: caracterização e avaliação da qualidade do tratamento das águas de abastecimento**, Unoesc & Ciência - ACET Joaçaba, jul./dez. 2015. Disponível em: <<https://periodicos.unoesc.edu.br/acet/article/view/6554/5124>>. Acesso em: Nov. 2025.