v7.n12.2026

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA DE ALIMENTAÇÃO DE CALDEIRAS AQUATUBULARES DE ALTA PRESSÃO: ESTUDO DE CASO NA REGIÃO TOCANTINA DO MARANHÃO

ASSESSMENT OF FEEDWATER QUALITY IN HIGH-PRESSURE WATER-TUBE BOILERS: A CASE STUDY IN THE TOCANTINA REGION OF MARANHÃO, BRAZIL

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DE ALIMENTACIÓN DE CALDERAS ACUOTUBULARES DE ALTA PRESIÓN: ESTUDIO DE CASO EN LA REGIÓN TOCANTINA DEL ESTADO DE MARANHÃO, BRASIL

Laerte Bruno Nascimento Brito Feitosa[1], Mário Silva de Lucena[2], Marcos Aurelio Rodrigues Sousa Junior[3]

https://doi.org/10.47820/recima21.v7i12.9827

PUBLICADO: 12/2026

RESUMO

As caldeiras aquatubulares são equipamentos fundamentais em diversos setores industriais, pois a produção de vapor depende da eficiência da transferência de calor e da integridade dos componentes submetidos a elevadas pressões e temperaturas. Nesse contexto, a qualidade da água de alimentação influencia o desempenho e a vida útil do sistema. A presença de sais dissolvidos, oxigênio, dióxido de carbono, sílica e sólidos suspensos favorece a corrosão e a formação de incrustações. A corrosão reduz a espessura dos tubos e pode gerar pites, vazamentos e rupturas, enquanto as incrustações dificultam a transferência de calor, aumentam o consumo de combustível e elevam a temperatura dos componentes. O presente estudo analisa a qualidade da água de alimentação de caldeiras aquatubulares de alta pressão em uma unidade industrial localizada na Região Tocantina do Maranhão. Foram monitorados parâmetros físico-químicos em diferentes pontos do sistema de tratamento, entre abril e outubro de 2026. A turbidez foi inferior a 0,2 NTU, e o índice de densidade de sedimentos (SDI) ficou abaixo de 3,0. Após a osmose reversa e o leito misto, a condutividade foi inferior a 0,2 µS/cm, e a sílica, abaixo de 20 ppb. O pH variou de 7,82 a 7,97 na entrada e de 6,33 a 6,63 na saída da Estação de Tratamento de Água para Caldeiras (ETAC). Todos os parâmetros atenderam aos limites de referência adotados. Conclui-se que o tratamento adequado e o monitoramento da água são essenciais para prevenir falhas, aumentar a confiabilidade das caldeiras e promover uma operação industrial segura e sustentável.

PALAVRAS-CHAVE: Caldeiras aquatubulares. Qualidade da água. Corrosão. Incrustações. Tratamento de água.

ABSTRACT

Water-tube boilers are essential equipment in various industrial sectors, as steam production depends on efficient heat transfer and the integrity of components subjected to high pressures and temperatures. In this context, feedwater quality influences system performance and service life. The presence of dissolved salts, oxygen, carbon dioxide, silica, and suspended solids promotes corrosion and scale formation. Corrosion reduces tube wall thickness and may cause pitting, leaks, and ruptures, while scale deposits hinder heat transfer, increase fuel consumption, and raise component temperatures. This study analyzes the feedwater quality of high-pressure water-tube boilers at an industrial facility located in the Tocantina Region of Maranhão. Physicochemical parameters were monitored at different points in the treatment system from April to October 2026.

[1] Graduando em Engenharia Civil na Universidade Ceuma, Campus Imperatriz-MA
[2] Especialista em Pavimentação. Docente na Universidade Ceuma, Campus Imperatriz-MA.
[3] Mestre em Ciência dos Materiais. Docente na Universidade Ceuma, Campus Imperatriz/MA.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Turbidity was below 0.2 NTU, and the Silt Density Index (SDI) remained below 3.0. After reverse osmosis and the mixed bed, conductivity was below 0.2 µS/cm, and silica was below 20 ppb. The pH ranged from 7.82 to 7.97 at the inlet and from 6.33 to 6.63 at the outlet of the Boiler Feedwater Treatment Plant (BFTP). All parameters met the adopted reference limits. It is concluded that appropriate water treatment and monitoring are essential to prevent failures, improve boiler reliability, and promote safe and sustainable industrial operation.

KEYWORDS: *Water-tube boilers. Water quality. Corrosion. Scale formation. Water treatment.*

RESUMEN
Las calderas acuotubulares son equipos fundamentales en la industria, pues la producción de vapor requiere una transferencia de calor eficiente y la integridad de sus componentes ante altas presiones y temperaturas. La calidad del agua de alimentación influye en el rendimiento y la vida útil del sistema. Sales disueltas, oxígeno, dióxido de carbono, sílice y sólidos en suspensión favorecen la corrosión y las incrustaciones. La corrosión reduce el espesor de los tubos y puede provocar picaduras, fugas y roturas; las incrustaciones dificultan la transferencia térmica, aumentan el consumo de combustible y elevan la temperatura de los componentes. Este estudio analiza la calidad del agua de alimentación de calderas acuotubulares de alta presión en una unidad industrial de la Región Tocantina de Maranhão, cuya identidad se mantiene reservada. Se monitorearon parámetros fisicoquímicos en distintos puntos del tratamiento entre abril y octubre de 2026. La turbidez fue inferior a 0,2 NTU y el índice de densidad de sedimentos (SDI) se mantuvo por debajo de 3,0. Tras la ósmosis inversa y el lecho mixto, la conductividad fue inferior a 0,2 µS/cm y la sílice, inferior a 20 ppb. El pH osciló entre 7,82 y 7,97 en la entrada y entre 6,33 y 6,63 en la salida de la Estación de Tratamiento de Agua para Calderas (ETAC). Los parámetros cumplieron los límites de referencia adoptados. Se concluye que el tratamiento y monitoreo del agua son esenciales para prevenir fallas, aumentar la confiabilidad de las calderas y promover una operación industrial segura y sostenible.

PALABRAS CLAVE: *Calderas acuotubulares. Calidad del agua. Corrosión. Incrustaciones. Tratamiento del agua.*

1. INTRODUÇÃO

Desde a Revolução Industrial, o vapor de água ocupa posição estratégica no desenvolvimento tecnológico e na expansão da atividade industrial. Inicialmente, sua produção esteve associada principalmente à queima de carvão mineral. Com a evolução das tecnologias de geração de energia e a necessidade de reduzir impactos ambientais, outros combustíveis passaram a ser empregados, incluindo gás natural, gás liquefeito de petróleo, óleos combustíveis e diferentes tipos de biomassa. Atualmente, o vapor é utilizado em diversos segmentos industriais, como os setores têxtil, de laticínios, metalúrgico, papeleiro e alimentício. Essa ampla aplicação está relacionada às suas propriedades de transferência de energia e à disponibilidade da água, que constitui o principal fluido de trabalho dos sistemas de geração de vapor e pode ser obtida em diferentes fontes, mediante tratamento compatível com as exigências do processo (Galioto, 2023).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

As caldeiras são equipamentos destinados à produção de vapor sob pressão a partir do fornecimento de energia térmica à água. Entre os diferentes tipos construtivos, as caldeiras aquatubulares caracterizam-se pela circulação da água e da mistura água-vapor no interior dos tubos, enquanto os gases resultantes da combustão escoam externamente e transferem calor através das paredes metálicas. Essa configuração é particularmente adequada a instalações que operam com elevadas pressões e temperaturas, além de permitir a geração de grandes vazões de vapor para o acionamento de turbinas, o aquecimento de processos e a movimentação de equipamentos (Garcia *et al.*, 2025).

O desempenho e a segurança desses equipamentos dependem diretamente da qualidade da água de alimentação e da eficiência do tratamento aplicado. A água destinada à caldeira pode conter sais dissolvidos, gases, sílica, sólidos suspensos e microrganismos. Quando essas substâncias não são adequadamente removidas ou controladas, podem ocorrer alterações químicas e físicas no circuito de geração de vapor. Entre os principais efeitos estão a corrosão das superfícies metálicas e a formação de incrustações nas regiões de transferência de calor. Portanto, o tratamento da água não deve ser considerado uma etapa auxiliar, mas uma condição fundamental para assegurar a confiabilidade operacional, a eficiência energética e a integridade estrutural da caldeira.

A ocorrência e a intensidade desses mecanismos não dependem exclusivamente das características naturais da água de alimentação. Também estão relacionadas à eficiência dos sistemas de tratamento, à qualidade do controle operacional e à adequação dos procedimentos de manutenção. Entre as etapas empregadas para o condicionamento da água encontram-se a clarificação, a filtração, a desmineralização, a desaeração e o ajuste químico do pH (Zarpelon; Azzolini, 2015).

O monitoramento contínuo de parâmetros físico-químicos é igualmente necessário para verificar a eficácia do tratamento e identificar condições capazes de comprometer o equipamento. Entre os indicadores mais relevantes estão a condutividade elétrica, a dureza, a alcalinidade, o pH, a concentração de sílica, o teor de sólidos dissolvidos e a concentração de oxigênio dissolvido. O controle desses parâmetros, associado à purga adequada e à dosagem controlada de produtos químicos, contribui para limitar a concentração de contaminantes e reduzir a probabilidade de corrosão e incrustação. Quando essas medidas são negligenciadas, os danos tendem a se acumular e podem resultar em aumento do consumo energético, redução da capacidade de geração de vapor, paradas não programadas e maior frequência de intervenções de manutenção (Zarpelon; Azzolini, 2015).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Além dos prejuízos econômicos e operacionais, a deterioração dos tubos e de outros componentes pressurizados representa um risco à segurança das instalações e dos trabalhadores. A diminuição da vida útil estrutural pode exigir reparos ou substituições prematuras, reduzir a disponibilidade da unidade e interromper a produção. Em casos extremos, a ruptura de um componente submetido à pressão pode provocar a liberação súbita de água e vapor em alta temperatura, com consequências potencialmente graves. Assim, o controle da qualidade da água deve ser integrado às práticas de gestão da integridade dos equipamentos, à manutenção preventiva e ao gerenciamento energético da planta industrial (Frayne, 2002).

Nesse contexto, a análise da influência da qualidade da água sobre a corrosão e a formação de incrustações em caldeiras aquatubulares é relevante para o aprimoramento da eficiência térmica, da segurança operacional e da sustentabilidade dos processos industriais. A compreensão dos mecanismos de deterioração permite relacionar as características da água às perdas de desempenho e aos danos estruturais observados, além de orientar a definição de estratégias mais eficazes de tratamento (Frayne, 2002).

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo discutir a importância do tratamento adequado da água utilizada em uma caldeira aquatubular empregada no processo de produção de papel e celulose, bem como do monitoramento sistemático das condições operacionais, como medidas fundamentais para prevenir processos de corrosão e formação de incrustações, evitar falhas, preservar a integridade do equipamento e garantir a confiabilidade do sistema de geração de vapor.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Caldeiras aquatubulares

As caldeiras aquatubulares, também denominadas caldeiras de tubos de água ou caldeiras de parede d’água, são equipamentos destinados à geração de vapor por meio da circulação da água no interior de tubos submetidos externamente ao calor dos gases resultantes da combustão. O funcionamento inicia-se na câmara de combustão, ou fornalha, onde ocorre a queima do combustível e a produção de gases em elevada temperatura. A energia térmica desses gases é transferida para a água através das paredes dos tubos, provocando seu aquecimento e, posteriormente, sua vaporização, que pode ocorrer de forma parcial ou total, conforme as condições de operação do equipamento (Lima, 2018).

A circulação da água e do vapor é realizada por um sistema constituído por tubos, coletores e tubulões. Os coletores são responsáveis por receber as extremidades dos tubos e

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

estabelecer a conexão entre os feixes tubulares, nos quais ocorre a transferência de calor, e o tubulão superior, também conhecido como tambor de vapor. Posicionado na parte superior da caldeira, esse componente desempenha a função de receber e separar a mistura de água e vapor, armazenar o vapor gerado e encaminhá-lo para sua utilização no processo. Além disso, o tubulão superior contribui para a manutenção do nível adequado de água, condição essencial para assegurar a circulação contínua do fluido e o funcionamento seguro e eficiente da caldeira (Lima, 2018). A configuração geral desse tipo de equipamento é apresentada na Figura 1, que mostra a disposição da fornalha e dos componentes envolvidos no aquecimento da água e na geração de vapor.

2.2. Água de alimentação

A água destinada à alimentação das caldeiras pode ser proveniente de diferentes fontes naturais, como águas subterrâneas e superficiais. As águas subterrâneas, obtidas por meio de poços e poços artesianos, geralmente apresentam menor quantidade de sólidos suspensos, porém podem conter concentrações elevadas de minerais dissolvidos. Já as águas superficiais, provenientes de rios e lagos, apresentam características que podem variar ao longo do ano, principalmente em relação à turbidez e à concentração de partículas suspensas. Dessa forma, mesmo quando considerada adequada para o consumo humano, a água pode apresentar substâncias incompatíveis com as condições exigidas para a geração de vapor, tornando necessário o tratamento prévio antes de sua utilização nas caldeiras (Rocha, 2024).

Dessa forma, a água de alimentação deve ser compreendida como parte integrante do sistema de geração de vapor e não apenas como um meio para produção de vapor. O controle adequado de sua qualidade reduz a entrada de contaminantes no circuito, contribui para minimizar a formação de depósitos e processos corrosivos e favorece a manutenção da eficiência térmica e da integridade dos componentes. Em caldeiras aquatubulares utilizadas em processos industriais de papel e celulose, esse controle assume importância particular devido às elevadas condições de operação e à necessidade de garantir disponibilidade e confiabilidade na geração de vapor (Rocha, 2024).

2.3. Estação de tratamento da água industrial

2.3.1. Clarificação e filtração

A água natural apresenta uma composição variável de impurezas, provenientes principalmente do contato com a atmosfera, o solo e as formações geológicas, podendo conter partículas minerais, matéria orgânica, microrganismos, gases e diferentes espécies químicas

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

dissolvidas. A presença e a concentração desses constituintes dependem das características da fonte de captação e podem comprometer a qualidade da água e sua adequação aos diferentes usos, especialmente em processos industriais que exigem elevado grau de controle da qualidade da água.

Entre os principais constituintes presentes na água encontram-se os sólidos dissolvidos e os sólidos suspensos. Os sólidos dissolvidos correspondem às substâncias presentes na água na forma de íons ou moléculas, incluindo sais minerais, compostos inorgânicos, matéria orgânica e gases dissolvidos. Devido ao seu reduzido tamanho e à sua estabilidade em solução, esses constituintes não são removidos de maneira eficiente por processos convencionais de filtração, sendo necessários tratamentos específicos, como troca iônica, desmineralização e osmose reversa, de acordo com a qualidade requerida para o uso final da água.

Os sólidos suspensos, por sua vez, são constituídos por partículas que permanecem dispersas na massa líquida e não se encontram efetivamente dissolvidas, podendo incluir areia, argila, silte, matéria orgânica, microrganismos e outros materiais particulados. A presença desses sólidos está diretamente relacionada ao aumento da turbidez da água e pode comprometer a eficiência das etapas subsequentes de tratamento, além de favorecer a formação de depósitos e incrustações quando não adequadamente removidos.

A remoção dos sólidos suspensos é realizada, de modo geral, por meio de processos físico-químicos de coagulação, floculação e decantação, etapas que constituem a denominada clarificação convencional.

2.3.2. Coagulação

A coagulação constitui uma das principais etapas do tratamento físico-químico da água e tem como finalidade promover a desestabilização das partículas coloidais e dos sólidos suspensos presentes na água. Essas partículas apresentam, em geral, dimensões reduzidas e cargas elétricas superficiais que favorecem sua permanência em suspensão, dificultando sua remoção por sedimentação natural. Para promover essa desestabilização, são adicionados agentes coagulantes, como sais de alumínio ou de ferro, que, ao serem dispersos na água, sofrem reações químicas e reduzem as forças de repulsão existentes entre as partículas. Como consequência, as partículas tornam-se mais propensas à agregação, possibilitando sua posterior remoção por processos de separação física (Garcia *et al.*, 2025).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

2.3.3. Floculação

A etapa de floculação é caracterizada pela mistura lenta e controlada da água, com o objetivo de favorecer o contato entre as partículas previamente desestabilizadas. Durante essa etapa, as partículas coloidais e os pequenos agregados formados na coagulação se chocam e se unem, originando estruturas maiores denominadas flocos. Diferentemente da coagulação, que está relacionada principalmente à desestabilização das partículas, a floculação está associada ao crescimento e ao fortalecimento desses agregados. A intensidade e o tempo de mistura devem ser cuidadosamente controlados, pois uma agitação insuficiente pode limitar a formação dos flocos, enquanto uma agitação excessiva pode provocar sua ruptura (Garcia *et al.*, 2025).

2.3.4. Decantação

A decantação é a etapa em que os flocos formados na coagulação e na floculação se depositam no fundo do tanque pela ação da gravidade. A água floculada é conduzida para unidades nas quais a velocidade do escoamento é reduzida, proporcionando condições favoráveis à sedimentação dos flocos. Sob a ação da força gravitacional, as partículas agregadas apresentam velocidade de queda superior àquela observada quando se encontravam individualmente dispersas, acumulando-se na parte inferior do decantador na forma de lodo. A água clarificada, por apresentar menor concentração de sólidos suspensos, é coletada na região superior da unidade e encaminhada para as etapas posteriores do tratamento (Garcia *et al.*, 2025).

2.3.5. Filtros de areia

Os filtros de areia são unidades destinadas à remoção de partículas sólidas suspensas que permanecem na água após as etapas de coagulação, floculação e decantação. A filtração ocorre pela passagem da água através de um leito composto por areia e pedregulho, no qual as partículas são retidas principalmente nos espaços existentes entre os grãos do meio filtrante. Esse mecanismo reduz a turbidez e a concentração de sólidos suspensos, contribuindo para a obtenção de uma água com melhores características físicas e adequada para as etapas posteriores de tratamento.

2.4. Estação de tratamento de água para caldeira

2.4.1. Filtros multimídias e cartuchos (pré-tratamento)

O filtro multimídia tem a finalidade de remover sólidos suspensos, partículas e reduzir a turbidez da água, atuando como etapa de pré-tratamento e protegendo os processos posteriores.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Já o filtro de cartucho realiza uma filtração mais fina, retendo partículas menores que permanecem na água após o tratamento anterior, principalmente para proteger as membranas de osmose reversa contra obstruções e danos.

2.4.2. Osmose reversa

A osmose reversa é um processo de separação por membranas utilizado para a remoção de sais dissolvidos, íons e outras impurezas presentes na água. O processo baseia-se na aplicação de uma pressão superior à pressão osmótica sobre a água de alimentação, promovendo sua passagem através de uma membrana semipermeável. Durante esse processo, a membrana permite a passagem preferencial das moléculas de água, enquanto retém grande parte das espécies dissolvidas, resultando na produção de um permeado com reduzida concentração de sais e de uma corrente concentrada contendo os componentes rejeitados (Melo *et al.*, 2021).

2.4.3. Leito misto (polimento)

A desmineralização da água é realizada por meio de um equipamento preenchido com uma mistura de resinas de troca iônica catiônica e aniônica. Durante a passagem da água pelo leito, a resina catiônica remove os íons positivos, como cálcio, magnésio, sódio e ferro, enquanto a resina aniônica remove os íons negativos, como cloretos, sulfatos, nitratos e bicarbonatos. Os íons removidos são substituídos, respectivamente, por íons hidrogênio (H^+) e hidroxila (OH^-), que posteriormente se combinam formando moléculas de água. Dessa forma, o processo reduz significativamente a concentração de íons dissolvidos, produzindo água de elevada pureza. Em sistemas de tratamento de água para caldeiras, o leito misto é empregado como etapa de polimento após processos como a osmose reversa, contribuindo para a obtenção de uma água adequada às condições de operação de sistemas de geração de vapor de alta pressão (Melo *et al.*, 2021).

2.5. Problema relacionado com qualidade da água

2.5.1. Corrosão em sistema de geração de vapor

A corrosão consiste na deterioração do material metálico por reações químicas ou eletroquímicas com o meio aquoso. No interior das caldeiras, esse fenômeno pode ser favorecido pela presença de oxigênio dissolvido, dióxido de carbono, espécies iônicas, variações de pH e condições inadequadas de operação. A progressão do processo corrosivo pode reduzir a espessura das paredes dos tubos, produzir cavidades localizadas, conhecidas como pites, e

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

originar vazamentos. Em situações severas, a perda de material pode comprometer a resistência mecânica de componentes submetidos à pressão e elevar o risco de falhas catastróficas (Santos; Fraga, 2017).

2.5.2. Formação de incrustações

As incrustações, por sua vez, são depósitos de compostos pouco solúveis que se acumulam sobre as superfícies internas dos tubos. Sua formação está associada principalmente à presença de sais de cálcio e magnésio, sílica, óxidos metálicos e outros contaminantes que se concentram durante a evaporação da água. Esses depósitos apresentam baixa condutividade térmica e funcionam como uma camada isolante entre os gases de combustão e a água. Como consequência, a transferência de calor é prejudicada, o consumo de combustível aumenta e a eficiência térmica do equipamento diminui. Além disso, a elevação da temperatura das paredes dos tubos, provocada pela resistência adicional à passagem de calor, pode acelerar a degradação do material e favorecer deformações, trincas e rupturas (Santos; Fraga, 2017).

3. METODOLOGIA

O estudo foi conduzido com base nos resultados das análises laboratoriais e nos registros operacionais de uma unidade industrial localizada na Região Tocantina do Maranhão, referentes ao período de abril a outubro de 2026. Esses dados permitiram acompanhar a variação dos parâmetros monitorados e avaliar a qualidade da água destinada à alimentação das caldeiras.

Para a realização do estudo, foram avaliados os seguintes parâmetros: potencial hidrogeniônico (pH), turbidez, condutividade elétrica, concentração de sílica e índice de densidade de sedimentos (SDI), medido na entrada da osmose reversa. A escolha desses indicadores está relacionada à sua importância para o controle da qualidade da água e para a manutenção das condições adequadas de operação das caldeiras. Os resultados foram comparados aos limites de referência apresentados na Tabela 1, que reúne os parâmetros de controle das etapas de pré-tratamento e desmineralização da água. O desenvolvimento da pesquisa também contempla a rotina de análises, com ênfase nos procedimentos analíticos desenvolvidos diretamente nas bancadas de laboratórios internos. As verificações são realizadas por meio de ensaios, utilizando equipamentos, instrumentos e reagentes específicos para a determinação dos parâmetros de qualidade da água. Essa rotina ocorre a cada oito horas, totalizando três análises diárias, sendo uma em cada turno de trabalho.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

3.1. Parâmetros de qualidade da água avaliados

Neste estudo de caso, foram analisados parâmetros físico-químicos da água em diferentes etapas do tratamento, com o objetivo de acompanhar sua qualidade e avaliar aspectos relacionados à eficiência dos processos empregados.

O pH foi determinado para caracterizar as condições de acidez ou alcalinidade da água, considerando sua relevância para o controle químico do sistema e para a prevenção de processos corrosivos (Michelan *et al.*, 2019).

A turbidez foi utilizada como indicador da presença de partículas suspensas, contribuindo para a avaliação da eficiência das etapas de clarificação e filtração (Michelan *et al.*, 2019).

A condutividade elétrica foi monitorada como indicador indireto da concentração de espécies iônicas dissolvidas na água. Esse parâmetro permitiu acompanhar a eficiência dos processos de desmineralização.

Complementarmente, foi avaliado o índice de densidade de sedimentos (SDI), utilizado para estimar o potencial de colmatação das membranas por sólidos suspensos finos e partículas coloidais. Seu acompanhamento foi relevante para avaliar o risco de entupimento físico e contribuir para a preservação do desempenho e da vida útil das membranas de osmose reversa (Oliveira, 2012).

Por fim, a concentração de sílica foi analisada devido ao risco de formação de depósitos nos equipamentos e à possibilidade de seu transporte pelo vapor, especialmente em sistemas que operavam sob condições elevadas de pressão e temperatura. Em conjunto, esses parâmetros forneceram subsídios para a caracterização da água e para a análise do desempenho das etapas de tratamento consideradas neste estudo de caso (Reckziegel, 2025).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentados correspondem ao acompanhamento mensal dos parâmetros físico-químicos da água em diferentes pontos do sistema de tratamento, no período de abril a outubro de 2026. A análise foi realizada considerando os valores registrados nos gráficos e os parâmetros de referência informados na Tabela 1. A interpretação considera a função de cada etapa do tratamento, desde a água bruta até a água desmineralizada destinada ao sistema de geração de vapor.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

4.1. Comportamento da água bruta e do pré-tratamento

A turbidez é um parâmetro físico utilizado para avaliar a transparência da água e está relacionada à presença de partículas suspensas e coloidais que dificultam a passagem da luz, como argila, silte, matéria orgânica, microrganismos e outros materiais provenientes do solo e do ambiente aquático. Sua determinação é realizada por equipamentos específicos, e os resultados são expressos em unidades nefelométricas de turbidez (NTU). Na entrada de uma Estação de Tratamento de Água (ETA), esse parâmetro permite avaliar as características da água bruta e identificar alterações na concentração de materiais particulados, que podem decorrer de chuvas, erosão do solo, variações no nível dos rios e aumento do escoamento superficial. A concentração dessas partículas influencia o desempenho das etapas de coagulação, floculação e decantação, pois valores elevados de turbidez podem exigir ajustes na dosagem de coagulantes e nas condições operacionais para favorecer a formação e a remoção dos flocos (Pavanelli, 2001).

Na entrada da Estação de Tratamento de Água (ETA), a turbidez apresentou redução ao longo do período analisado conforme evidenciado na Figura 2. Em abril, foi registrado o valor de 17,80 NTU, enquanto em maio e junho os resultados foram de 10,37 NTU e 7,38 NTU, respectivamente. Nos meses seguintes, os valores permaneceram em patamares inferiores, chegando a 3,82 NTU em setembro, com elevação para 5,58 NTU em outubro. Esse comportamento demonstra a variação da qualidade da água bruta captada e reforça a importância de ajustar as etapas de coagulação, floculação e decantação às características da água de entrada.

O pH também influencia diretamente a eficiência da coagulação, pois interfere na carga das partículas, na ação dos coagulantes e na formação dos flocos. Por isso, durante o tratamento, pode ser necessário ajustá-lo para favorecer a remoção de partículas e reduzir a turbidez. O acompanhamento desse parâmetro contribui para a operação adequada das etapas de coagulação, floculação e decantação e, consequentemente, para diminuir a carga de sólidos direcionada à filtração e às unidades posteriores de tratamento (Voltan, 2014).

Conforme apresentado na Figura 3, o pH da água bruta manteve-se próximo da neutralidade ao longo do período analisado, variando de 6,96 a 7,25. A pequena amplitude dos resultados indica relativa estabilidade desse parâmetro na captação de água. Ainda assim, o pH deve ser acompanhado em conjunto com a alcalinidade e com as condições de dosagem dos produtos químicos.

Na saída do sistema Multiflo, o pH variou entre 7,10 e 7,18 ao longo do período de acompanhamento, conforme apresentado na Figura 4. A diferença de apenas 0,08 entre os

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

valores mínimo e máximo indica baixa variação desse parâmetro nessa etapa do tratamento. Além disso, os resultados permaneceram dentro da faixa de referência de 6 a 9 estabelecida na Tabela 1. Essa estabilidade é relevante para o controle operacional e para o acompanhamento da qualidade da água encaminhada às etapas subsequentes do tratamento.

Para a turbidez, os resultados diminuíram de 1,28 NTU em abril para 0,75 NTU em outubro de 2026, como mostra a Figura 5. A redução ao longo dos meses indica desempenho favorável das etapas de clarificação, com remoção progressiva de partículas suspensas. A turbidez ainda observada nessa etapa evidencia a necessidade da filtração subsequente, uma vez que o processo de decantação não elimina integralmente as partículas finas remanescentes.

A filtração em areia, geralmente realizada em um leito composto por camadas de areia e pedregulho, promove a retenção de partículas suspensas que permanecem na água após as etapas de coagulação, floculação e decantação. Com isso, reduz a concentração de sólidos encaminhada às unidades seguintes, como os filtros multimídia, os filtros cartucho e as membranas de osmose reversa. Essa etapa contribui para limitar o acúmulo de partículas e a colmatação dos meios filtrantes e das membranas, ajudando a preservar sua eficiência operacional (Deus; Testezlaf; Mesquita, 2015).

Na saída dos filtros de areia, a Figura 6 evidencia que a turbidez variou entre 0,129 e 0,190 NTU nos meses analisados do estudo. Todos os resultados ficaram abaixo do limite de referência de 0,2 NTU indicado na Tabela 1. Esse resultado demonstra que, no período avaliado, a filtração apresentou desempenho compatível com o critério estabelecido para essa etapa.

Durante os sete meses de monitoramento, os valores médios mensais do índice de densidade de sedimentos (SDI) na entrada da osmose reversa variaram de 1,63 a 2,16, conforme apresentado na Figura 7. O maior valor foi registrado em junho (2,16), enquanto o menor ocorreu em julho (1,63). Todos os resultados permaneceram abaixo do limite de referência de 3,0. Esse comportamento sugere que, no período avaliado, a água apresentou baixa tendência à colmatação das membranas por partículas, segundo o SDI, mantendo-se dentro do critério adotado para essa etapa do tratamento.

4.2. Desempenho da osmose reversa e do leito misto

Na entrada da osmose reversa (Figura 8), a condutividade média mensal variou de 67,83 a 91,01 µS/cm. O maior valor foi registrado em abril (91,01 µS/cm) e o menor, em julho (67,83 µS/cm), com aumento para 76,80 µS/cm em outubro. Após a osmose reversa (Figura 9), os valores ficaram entre 7,20 e 8,24 µS/cm, permanecendo em uma faixa bem inferior à observada na entrada. Considerando a média dos sete resultados mensais, a condutividade diminuiu de

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

aproximadamente 74,70 para 7,64 µS/cm, o que corresponde a uma redução de cerca de 89,8%. Essa queda indica redução da carga iônica da água durante a passagem pela membrana.

Na saída do leito misto (Figura 10), a condutividade variou de 0,118 a 0,147 µS/cm. Todos os valores ficaram abaixo do limite de 0,2 µS/cm indicado na Tabela 1, atendendo ao critério de referência adotado. A redução adicional em relação à saída da osmose reversa evidencia a contribuição do leito misto como etapa de polimento. Esse controle é relevante para a água destinada à geração de vapor, pois a presença de sais dissolvidos pode favorecer a formação de depósitos e prejudicar a transferência de calor (Santos; Fraga, 2017).

4.3. Avaliação da concentração de sílica na saída da osmose reversa e leito misto

A concentração de sílica representa um parâmetro importante no controle da qualidade da água destinada à geração de vapor, devido à possibilidade de formação de depósitos nos equipamentos e ao transporte desse composto pelo vapor, especialmente em sistemas que operam sob condições elevadas de pressão e temperatura (Reckziegel, 2025).

Na saída da osmose reversa, os valores médios mensais de sílica variaram de 1,369 a 1,770 mg/L, conforme apresentado na Figura 11. O menor valor foi registrado em abril (1,369 mg/L), enquanto os maiores ocorreram em julho e agosto (1,770 mg/L). Após esse período, houve redução em setembro (1,577 mg/L), seguida de aumento em outubro (1,647 mg/L).

Na saída do leito misto, os valores médios mensais de sílica variaram entre 12,73 e 16,60 µg/L, conforme apresentado na Figura 12. O menor valor foi registrado em outubro (12,73 µg/L), enquanto o maior ocorreu em junho (16,60 µg/L). Nos meses de abril e maio, foram observadas concentrações de 15,48 e 15,67 µg/L, respectivamente. Em julho, houve uma redução para 15,78 µg/L, seguida de uma queda gradual nos meses seguintes, atingindo 14,97 µg/L em agosto e 12,90 µg/L em setembro.

De modo geral, os resultados demonstram que as concentrações de sílica permaneceram abaixo do limite de referência de 20 µg/L durante todo o período avaliado. Esse comportamento indica um desempenho satisfatório do leito misto na etapa final de desmineralização da água, contribuindo para a obtenção de água com elevado grau de pureza e adequada às exigências do sistema de geração de vapor.

4.4. Condições de pH na estação de tratamento de água para caldeiras

Na entrada da Estação de Tratamento de Água para Caldeiras (ETAC), o pH manteve-se estável, variando de 7,82, em agosto, a 7,97, em maio e junho, conforme apresentado na Figura 13. Na saída da estação, os valores ficaram entre 6,33, em junho, e 6,63, em setembro

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

(Figura 14). Embora o pH tenha sido menor na saída, todos os resultados permaneceram dentro da faixa de referência de 6 a 9 apresentada na Tabela 1. A diferença entre os pontos evidencia a alteração das características químicas da água ao longo do tratamento. O controle do pH é importante para limitar condições que favoreçam a corrosão, mas sua avaliação deve ser associada a outros parâmetros, como oxigênio dissolvido, condutividade, sílica e dureza, além das condições específicas de operação da caldeira.

4.5. Relação dos resultados obtidos com a corrosão e a formação de incrustações

Em conjunto, os resultados demonstram que as etapas de clarificação, filtração, osmose reversa e leito misto desempenham funções complementares no condicionamento da água. A redução da turbidez e do SDI contribui para limitar a entrada de partículas e reduzir a possibilidade de obstrução dos sistemas de membranas. A diminuição da condutividade após a osmose reversa e o leito misto indica redução da concentração de espécies iônicas, aspecto importante para minimizar a entrada de sais que podem participar da formação de depósitos.

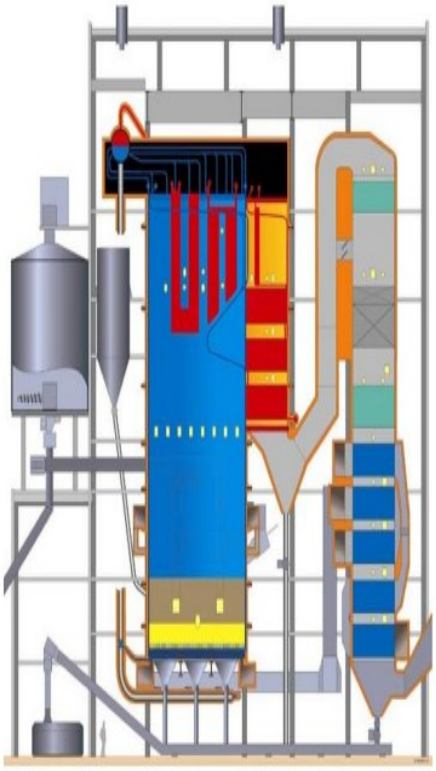
A formação de incrustações está associada à concentração e à precipitação de compostos pouco solúveis, incluindo sais de cálcio e magnésio e compostos de sílica. Quando esses materiais se depositam nas superfícies internas dos tubos, criam uma resistência adicional à transferência de calor, podendo elevar a temperatura do metal e reduzir a eficiência térmica da caldeira. Nesse sentido, o controle da condutividade e da sílica, juntamente com o acompanhamento da dureza e dos procedimentos de purga, constitui medida importante para prevenir a deposição de contaminantes.

Quanto à corrosão, os dados de pH fornecem informações sobre as condições químicas da água, mas não permitem, isoladamente, determinar a taxa de corrosão ou comprovar a ausência de ataque aos componentes metálicos. A corrosão também depende da concentração de oxigênio dissolvido, dióxido de carbono, temperatura, pressão, composição dos materiais e condições de operação.

Dessa forma, os gráficos indicam desempenho satisfatório de diversos parâmetros monitorados, especialmente turbidez na saída dos filtros de areia, SDI, condutividade, sílica após o leito misto e pH nos pontos avaliados.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 1. Diagrama de uma caldeira industrial BFB



Fonte: Power Technology (2016).

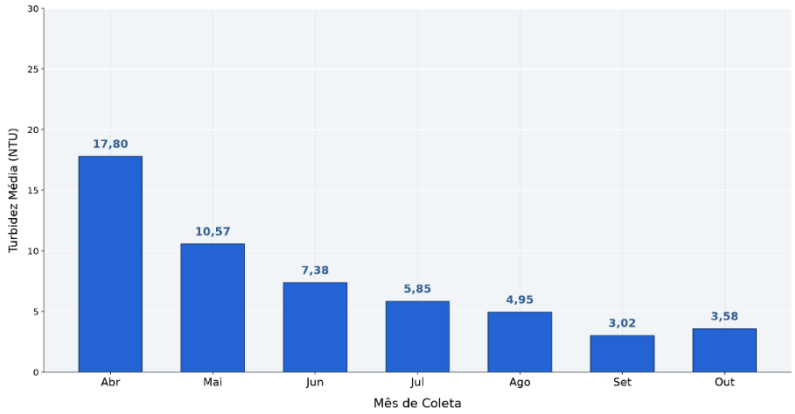
Tabela 1. Parâmetros de controle do tratamento de água e da água desmineralizada

Estação de Tratamento de Água		
Análise	**Unidade**	**Parâmetros**
pH	-	6 – 9
Turbidez	NTU	< 0,2
Pré-tratamento ETAC		
Análise	**Unidade**	**Parâmetros**
SDI	-	< 3
Estação de Tratamento Desmineralizada		
Análise	**Unidade**	**Parâmetros**
pH	-	6 – 9
Sílica	ppb SiO2	< 20
Condutividade	µS/cm	< 0,2

Fonte: Veolia Water Technologies (2026).

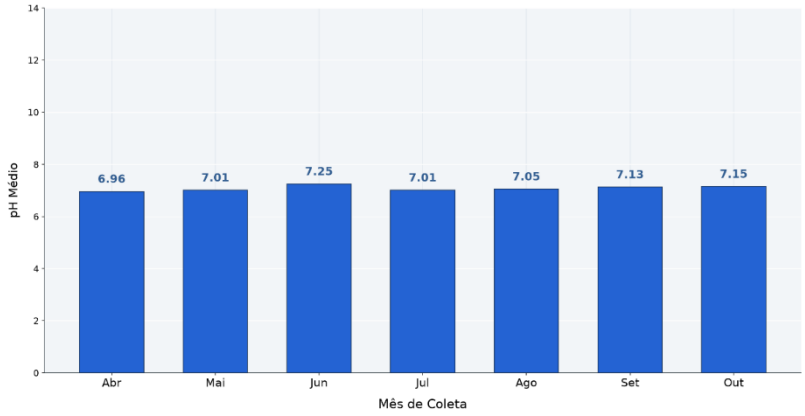
Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 2. Valores de turbidez média mensal da água bruta na entrada da ETA, de abril a outubro de 2026.



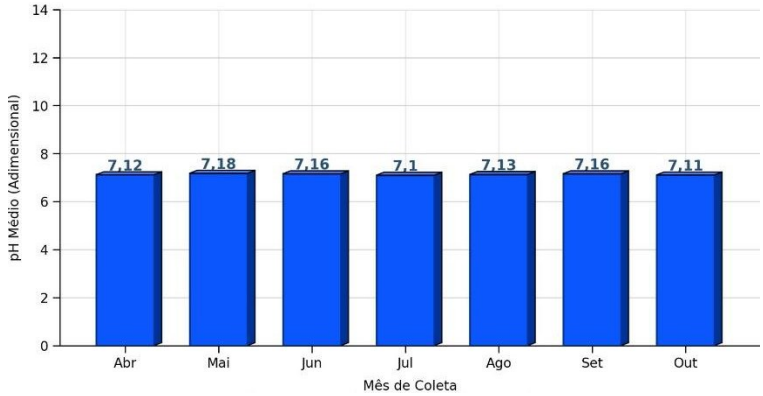
Fonte: Autoria Própria (2026).

Figura 3. Valores médios mensais de pH da água bruta na entrada da ETA, de abril a outubro de 2026.



Fonte: Autoria Própria (2026).

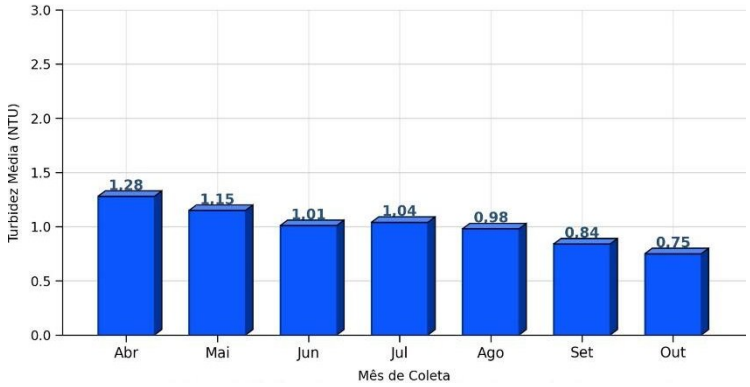
Figura 4. Valores médios mensais de pH da água na saída do sistema Multiflo, de abril a outubro de 2026.



Fonte: Autoria Própria (2026).

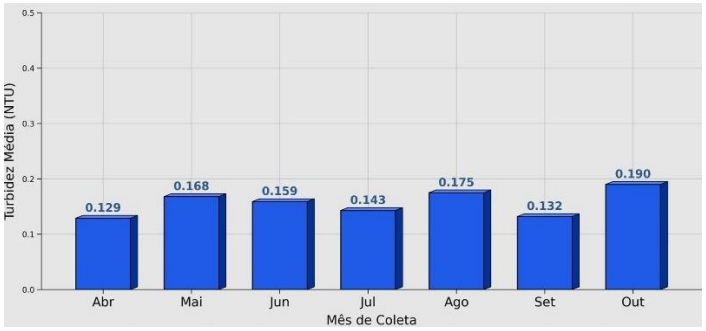
Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 5. Valores da turbidez média mensal da água na saída do sistema Multiflo, de abril a outubro de 2026.



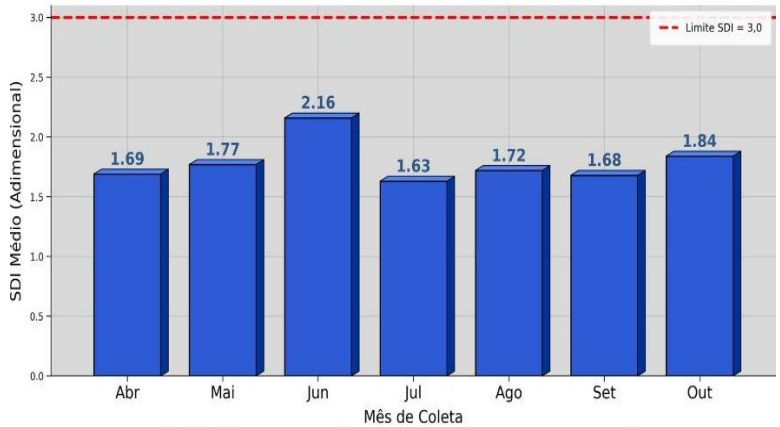
Fonte: Autoria Própria (2026).

Figura 6. Valores da turbidez média mensal da água na saída dos filtros de areia, de abril a outubro de 2026.



Fonte: Autoria Própria (2026).

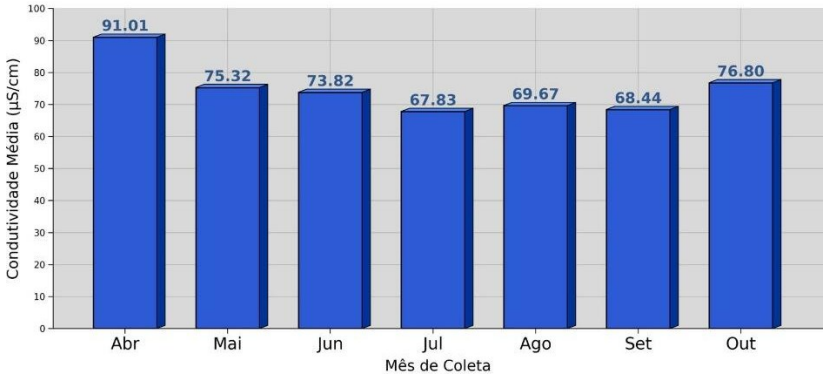
Figura 7. SDI médio mensal na entrada da osmose reversa, de abril a outubro de 2026.



Fonte: Autoria Própria (2026).

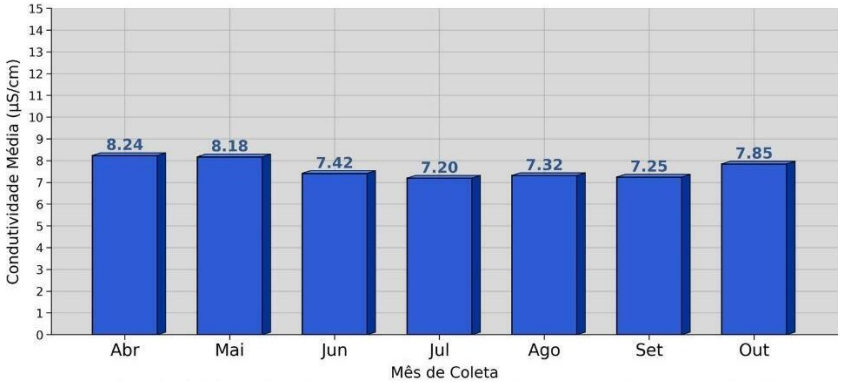
Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 8. Condutividade média mensal da entrada da Osmose Reversa, de abril a outubro de 2026.



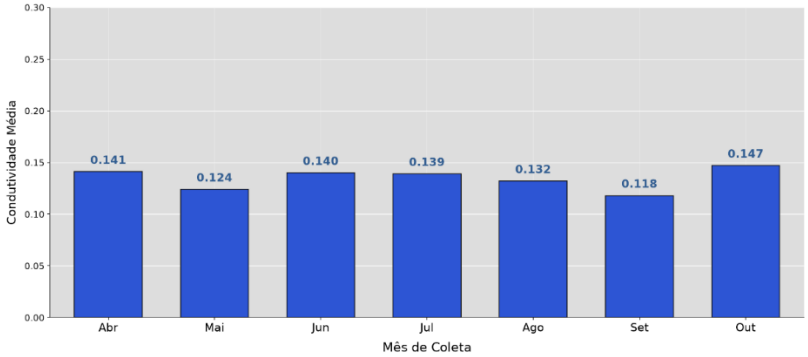
Fonte: Autoria Própria (2026).

Figura 9. Condutividade média mensal da saída da Osmose Reversa, de abril a outubro de 2026.



Fonte: Autoria Própria (2026).

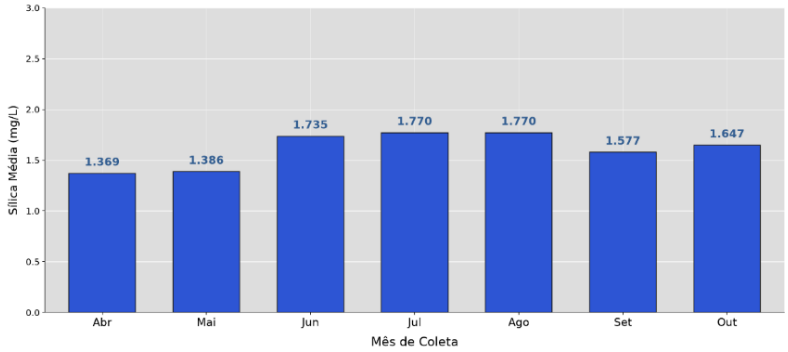
Figura 10. Condutividade média mensal da saída do Leito Misto, de abril a outubro de 2026.



Fonte: Autoria Própria (2026).

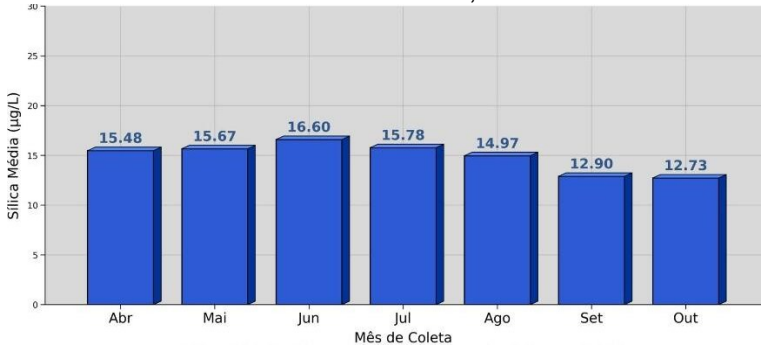
Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 11. Sílica média mensal na saída da osmose reversa, de abril a outubro de 2026.



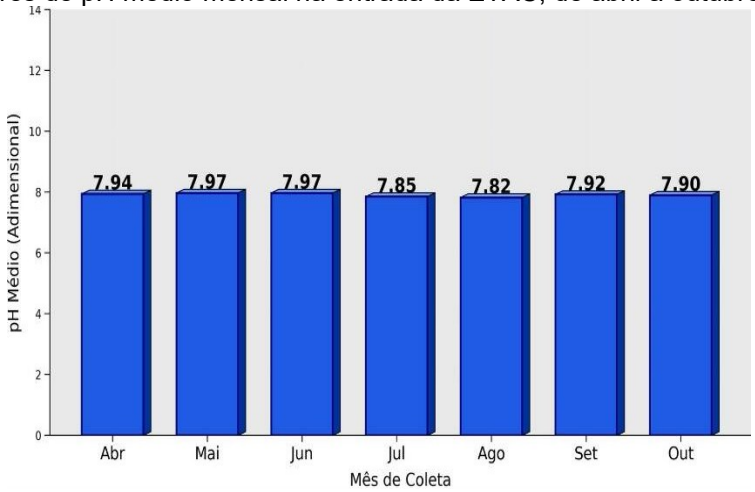
Fonte: Autoria Própria (2026).

Figura 12. Sílica média mensal na saída do leito misto, de abril a outubro de 2026.



Fonte: Autoria Própria (2026).

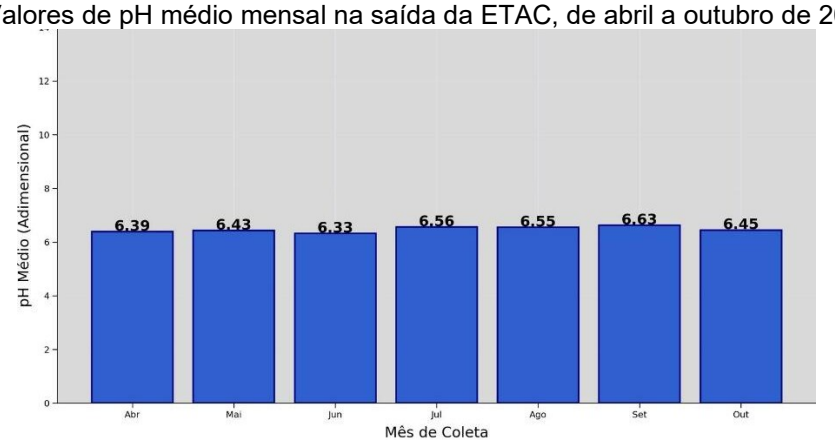
Figura 13. Valores de pH médio mensal na entrada da ETAC, de abril a outubro de 2026.



Fonte: Autoria Própria (2026).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 14. Valores de pH médio mensal na saída da ETAC, de abril a outubro de 2026.



Fonte: Autoria Própria (2026).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho analisou a importância do tratamento e do monitoramento da água destinada à alimentação de uma caldeira aquatubular utilizada em um processo industrial de papel e celulose. Com base nos dados acompanhados entre abril e outubro de 2026, observou-se que as etapas de clarificação, filtração, osmose reversa e leito misto atuam de forma complementar para reduzir partículas e espécies iônicas presentes na água.

Os resultados indicaram que a turbidez na saída dos filtros de areia permaneceu abaixo do limite de referência de 0,2 NTU e que os valores de SDI na entrada da osmose reversa ficaram abaixo de 3,0 durante todo o período avaliado. Também foi observada redução da condutividade após a osmose reversa e o leito misto, com valores finais inferiores a 0,2 µS/cm, conforme o critério adotado no estudo. A concentração de sílica permaneceu abaixo da referência de 20 ppb, enquanto o pH nos pontos avaliados se manteve dentro da faixa estabelecida na tabela de parâmetros.

Em conjunto, esses resultados são compatíveis com o desempenho esperado das etapas de tratamento e indicam que, no período analisado, os parâmetros monitorados atenderam aos critérios de referência definidos para o estudo. O controle da turbidez e do SDI contribui para limitar a entrada de partículas nas membranas, enquanto a redução da condutividade e o acompanhamento da sílica são relevantes para minimizar a presença de substâncias que podem participar da formação de depósitos no sistema de geração de vapor.

Entretanto, os resultados de pH, condutividade, turbidez, SDI e sílica, por si só, não permitem determinar a taxa de corrosão nem comprovar a ausência de incrustações nos componentes da caldeira. Esses fenômenos também dependem de fatores como pressão,

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

temperatura, oxigênio dissolvido, dureza, alcalinidade, condições de operação e procedimentos de purga. Assim, recomenda-se manter o monitoramento periódico dos parâmetros e, quando possível, complementá-lo com análises da água da caldeira e do condensado, inspeções dos equipamentos e avaliação dos registros de operação e manutenção.

Conclui-se que o tratamento adequado da água e o acompanhamento sistemático de sua qualidade são fundamentais para apoiar a operação confiável da caldeira e reduzir riscos associados à entrada de partículas, sais e sílica no circuito. A continuidade do controle operacional permite identificar desvios e orientar ações corretivas, contribuindo para a preservação dos equipamentos e para a eficiência do sistema de geração de vapor.

REFERÊNCIAS

DEUS, Fábio Ponciano de; TESTEZLAF, Ricardo; MESQUITA, Marcos. Eficiência de filtros de areia pressurizados na remoção de diferentes tamanhos de partículas da água de irrigação. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, DF, v. 50, n. 10, p. 939–948, 2015. DOI: https://doi.org/10.1590/S0100-204X2015001000010.

FRAYNE, Colin. *Boiler water treatment: principles and practice*. New York: Chemical Publishing Company, 2002.

GALIOTO, Eduarda Dalmina. *Análise de uma caldeira aquatubular na indústria do papel: estudo de caso em Guaíba, Rio Grande do Sul*. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

GARCIA, Carla Haiyslla Pereira; MARTINS, Emanuela Assis da Silva; VALERIO, Emilie Emily Jaiane Baldoino; SILVA, João Vitor Dutra da; LIMA, Mizael Vieira de. *Importância do tratamento de água para as caldeiras*. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola Técnica Estadual Prof. Armando José Farinazzo, Fernandópolis, 2025.

LIMA, Luiz Gustavo Pellissari Rosa. *Melhoria na eficiência térmica de uma caldeira aquatubular alimentada a cavaco florestal*. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2018.

MELO, Grazielma Ferreira de; LAURENTINO, João Victor Alves; SANTOS, Lucicleitor Oliveira; FREITAS, Virgínia Lauanny Cupertino de. Análise de diferentes fontes de água tratada por osmose reversa para aplicação em caldeiras industriais. *Engineering Sciences*, v. 9, n. 1, p. 138–147, 2021. DOI: https://doi.org/10.6008/CBPC2318-3055.2021.001.0014.

MICHELAN, Denise Conceição Gois Santos; BATISTA, Isabela Ferreira; BATISTA, Daniela Ferreira; SANTOS, Débora de Gois; MENDONÇA, Luciana Coelho; LIMA, Daniel Moureira Fontes. Desempenho das etapas de tratamento de água, da estação de tratamento de água Poxim. *Scientia cum Industria*, v. 7, n. 3, p. 7–14, 2019. DOI: https://doi.org/10.18226/23185279.v7iss3p7.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

OLIVEIRA, Fernando Freitas de. *Avaliação de filtros lentos de areia como pré-tratamento para o controle de biofouling em plantas de osmose reversa aplicadas na dessalinização de água do mar*. 2012. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

PAVANELLI, Gerson. *Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor ou turbidez elevada*. 2001. 216 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

RECKZIEGEL, Daniel Marcos. *Controle de sílica em caldeira de cogeração*. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, 2025.

ROCHA, Geysse Hellen Fontes. *Estudo dos parâmetros físico-químicos da água de caldeira em uma indústria cervejeira*. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Química) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2024.

SANTOS, Enock Jabes do Nascimento; FRAGA, Francisco Edson N. *A importância do tratamento e cuidados com a água de caldeira*. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Ciência e Tecnologia) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2017.

VOLTAN, Paulo Eduardo Nogueira. *Remoção de diuron e hexazinona por meio de adsorção em carvão ativado, oxidação e tratamento em ciclo completo*. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

ZARPELON, Willian; AZZOLINI, José Carlos. Caldeiras de alta pressão: caracterização e avaliação da qualidade do tratamento das águas de abastecimento. *Unoesc & Ciência – ACET*, Joaçaba, v. 6, n. 2, p. 141–154, 2015.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.