



Estudo para Otimização do Tratamento Interno de Água em Caldeiras Industriais

Study on the Optimization of Internal Water Treatment in Industrial Boilers

Carlos Rogério Ribeiro

Resumo: A água utilizada nos reservatórios de caldeiras provém de diversas fontes naturais (poços, lagos, rios, córregos, lagoas e água subterrânea). Para garantir a segurança e eficiência da operação, é crucial o controle da qualidade dessa água, pois a presença de impurezas pode causar problemas sérios na geração de vapor. Tais problemas incluem incrustações, processos corrosivos e arraste, que não só prejudicam a qualidade do processo e a vida útil do equipamento, mas também elevam o consumo de combustível e de produtos químicos para o tratamento da água e do efluente. A escolha da tecnologia de tratamento mais adequada varia significativamente, dependendo da fonte e do tipo de água, do processo industrial, das condições operacionais e das características da caldeira. Essa variabilidade torna a seleção e o monitoramento do tratamento uma tarefa complexa, demorada e que exige muita dedicação dos profissionais responsáveis pela avaliação dos parâmetros. Diante desse cenário, este estudo teve como objetivo desenvolver um software, utilizando uma tecnologia ainda pouco explorada, para determinar a rota de tratamento ideal tanto para a água bruta de reposição quanto para a água da caldeira, além de acompanhar o tratamento e gerar relatórios com orientações técnicas para a manutenção e estabilidade do processo. O software foi desenvolvido com o Microsoft Access, um gerenciador de dados da Microsoft Corporation. Ele define o tratamento apropriado para a água de reposição e para a água interna da caldeira, considerando a faixa de pressão de trabalho do equipamento, os parâmetros físico-químicos da água e seus limites de controle (como sílica, dureza total, alcalinidade total e hidróxida, pH, condutividade, ferro e cobre totais, cloretos e turbidez), a metalurgia do sistema e o tipo de contato com alimentos. O uso dessa ferramenta apoia os profissionais na seleção da tecnologia de tratamento, correlacionando as características do processo com os valores dos parâmetros analisados. Após o desenvolvimento, um estudo de caso foi conduzido em uma usina termelétrica no interior de São Paulo com um sistema de cogeração de energia, que estava em transição de operação de 48 bar para 67 bar. Foram realizadas análises dos parâmetros da água do sistema por seis meses. Com os resultados, o software foi utilizado para selecionar o tratamento mais eficaz e monitorar o sistema. O sistema confirmou que o tratamento interno em uso era coerente com o sugerido pela literatura para caldeiras nas mesmas condições e, adicionalmente, forneceu sugestões de melhorias no pré-tratamento e no tratamento interno, visando a estabilidade do sistema e a otimização de custos para a planta.

Palavras-chave: tratamento de água de caldeira; tecnologia; águas industriais; cogeração; software.

Abstract: The water used in boiler reservoirs comes from various natural sources (wells, lakes, rivers, streams, ponds, and groundwater). To ensure safe and efficient operation, it is crucial to control the quality of this water, as the presence of impurities can cause serious problems in steam generation. Such problems include scaling, corrosive processes, and carryover, which not only impair the quality of the process and the equipment's lifespan but also increase the consumption of fuel and chemicals for water and effluent treatment. The

selection of the most appropriate treatment technology varies significantly, depending on the source and type of water, the industrial process, the operational conditions, and the boiler characteristics. This variability makes the selection and monitoring of the treatment a complex and time-consuming task, requiring great dedication from the professionals responsible for evaluating the parameters. Given this scenario, this study aimed to develop software, using a technology that is still little explored, to determine the ideal treatment route for both raw makeup water and boiler water, in addition to monitoring the treatment and generating reports with technical guidance for process maintenance and stability. The software was developed using Microsoft Access, a data management system from Microsoft Corporation. It defines the appropriate treatment for makeup water and internal boiler water, considering the equipment's operating pressure range, the water's physical-chemical parameters and their control limits (such as silica, total hardness, total and hydroxide alkalinity, pH, specific conductivity, total iron, total copper, chlorides, and turbidity), the system's metallurgy, and the type of food contact. The use of this tool supports professionals in selecting the treatment technology by correlating the process characteristics with the analyzed parameter values. After development, a case study was conducted at a thermoelectric plant in the interior of São Paulo with an energy cogeneration system, which was transitioning its operation from 48 bar to 67 bar. Analyses of the system water parameters were performed over a six-month period. With the results, the software was used to select the most effective treatment and monitor the system. The system confirmed that the internal treatment in use was consistent with the treatment suggested by the literature for boilers operating under the same conditions and, additionally, provided suggestions for improvements in both pre-treatment and internal treatment, aiming at system stability and cost optimization for the plant.

Keywords: boiler water treatment; technology; industrial water; cogeneration; software.

INTRODUÇÃO

A geração de vapor em caldeiras industriais é um processo crítico que demanda rigoroso controle da qualidade da água utilizada. Impurezas como sílica, dureza, ferro, cloretos e sólidos dissolvidos podem causar incrustações, corrosão e arraste, comprometendo a eficiência térmica, a vida útil dos equipamentos e a segurança operacional (Kemmer, 1988; Trovati, 2009). A seleção do tratamento adequado — que inclui pré-tratamento, tratamento interno e pós-tratamento — é complexa e depende de múltiplos fatores, como pressão de operação, qualidade da água de reposição, metalurgia do sistema e tipo de contato com alimentos (Brunhara, 2020).

A água bruta utilizada para alimentar os reservatórios das caldeiras é proveniente de diversas fontes naturais, como poços, lagos, rios, córregos, lagoas e água subterrânea, podendo, muitas vezes, ser composta por mais de uma dessas fontes (Kemmer, 1988).

A água possui uma notável capacidade de dissolver diferentes substâncias, como óxidos, hidróxidos, gases e sólidos, o que impede que seja encontrada pura na natureza. Além dos materiais dissolvidos, ela pode conter diversos materiais em suspensão, como argila, sólidos em suspensão e óleos (Aquino, 2012).

A presença dessas impurezas em níveis inadequados pode gerar sérios problemas, comprometendo a qualidade do vapor gerado e, crucialmente, a vida útil da caldeira e de seus equipamentos periféricos. Entre os problemas mais comuns estão a corrosão, a incrustação e o arraste de condensado na linha de vapor. De forma geral, a água ideal para a geração de vapor deve apresentar as seguintes características:

- Ausência de materiais orgânicos e materiais em suspensão;
- Temperatura elevada;
- pH na faixa alcalina;
- Ausência de oxigênio e outros gases dissolvidos;
- A menor quantidade possível de óxidos e sais dissolvidos (Aquino, 2012).

Nesse contexto, a automação e o suporte computacional tornam-se ferramentas valiosas para auxiliar engenheiros e técnicos na tomada de decisão. Este capítulo apresenta o desenvolvimento e a aplicação de um software inovador — denominado BWT Solutions — criado para simular, selecionar e monitorar o tratamento de água em caldeiras, com base em parâmetros físico-químicos e condições operacionais.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A Importância da Qualidade da Água em Caldeiras

A água utilizada em caldeiras nunca é pura. Proveniente de fontes naturais como poços, rios e lagos, ela carrega consigo uma variedade de impurezas que, se não controladas, podem levar a três problemas principais:

- Incrustações: Formadas principalmente por sais de cálcio, magnésio e sílica, reduzem a transferência de calor e aumentam o consumo de combustível.
- Corrosão: Causada por oxigênio dissolvido, dióxido de carbono e pH inadequado, levando ao desgaste prematuro de tubos e componentes.
- Arraste: Transporte de sólidos e umidade para a linha de vapor, contaminando processos e equipamentos downstream.

Tratamento de Água de Caldeiras

O tratamento adequado envolve etapas como clarificação, abrandamento, desmineralização (por troca iônica ou osmose reversa) e tratamento interno com sequestrantes, alcalinizantes e dispersantes (Trovati, 2009; Brunhara, 2020).

A operação eficiente e segura de uma caldeira é uma dança delicada contra forças destrutivas inerentes à água e ao calor. Enquanto o tratamento externo (como a desmineralização ou osmose reversa) remove a grande maioria das impurezas, é o **tratamento químico interno** – a dosagem criteriosa de produtos diretamente

no sistema – que atua como a última linha de defesa. Seu objetivo é triplo: prevenir incrustações, controlar a corrosão e evitar o arraste de vapor. Vamos desvendar como cada família de compostos atua nessa orquestração química.

Antes de mergulharmos nas soluções, é vital entender as ameaças. A incrustação forma-se principalmente pela precipitação de sais de dureza (cálcio e magnésio) e sílica, que possuem solubilidade inversa: tornam-se menos solúveis à medida que a temperatura sobe. Um depósito de apenas 1 mm de espessura nas paredes do tubo pode aumentar o consumo de combustível em até 8%, devido ao seu efeito isolante que eleva localmente a temperatura do metal, podendo levar ao seu superaquecimento e ruptura (conforme destacado em manuais de engenharia, como os da ASME (American Society of Mechanical Engineers)).

Já a corrosão é um processo eletroquímico. Em caldeiras, os principais agentes são o oxigênio dissolvido, que causa picadas localizadas e severas (pites), e a baixa ou alta alcalinidade, que pode corroer o metal ou fragilizá-lo por hidróxido de sódio, respectivamente.

A Evolução dos Tratamentos: Dos Precipitantes aos Quelantes

Historicamente, o tratamento interno baseava-se em precipitação controlada. Compostos como fosfatos (trifosfato de sódio) eram adicionados para reagir com os íons de dureza, formando lodos não-aderentes de hidroxiapatita [$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$] e serpentina ($3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Esses lodos eram então removidos por purgas contínuas. A eficácia dependia de um controle rigoroso da alcalinidade e da presença de anti-incrustantes poliméricos (orgânicos sintéticos) para dispersar e manter esses precipitados em suspensão, impedindo que se aderissem às superfícies.

No entanto, a revolução veio com a adoção dos agentes quelantes, notavelmente o EDTA (Ácido Etilenodiamino Tetracético) e, em menor escala, o NTA (Ácido Nitrilotriacético). Diferente dos precipitantes, os quelantes atuam como “garras moleculares”. Eles formam complexos solúveis e extremamente estáveis com os íons metálicos (Ca^{2+} , Mg^{2+}), sequestrando-os e impedindo completamente sua precipitação. Como descreve a EPRI (Electric Power Research Institute), o uso de EDTA em caldeiras de alta pressão resulta em superfícies de transferência de calor notavelmente mais limpas, com ganhos significativos de eficiência térmica.

A grande vantagem dos quelantes é a eliminação dos lodos, reduzindo o volume de purga necessária. Contudo, seu uso exige um controle analítico preciso. A dosagem em excesso, especialmente em condições de alta temperatura e pH, pode torná-los corrosivos, atacando o óxido protetor (magnetita, Fe_3O_4) da superfície do aço. Portanto, a prática recomendada é frequentemente um tratamento híbrido, utilizando uma dosagem subestequiométrica de quelante para complexar uma parte da dureza, enquanto fosfatos e polímeros cuidam do residual, oferecendo uma margem de segurança mais ampla.

O Combate à Corrosão: Sequestrantes de Oxigênio e o Controle do pH

Paralelamente ao combate à incrustação, trava-se uma batalha contra a corrosão. O oxigênio dissolvido é um inimigo implacável. Para eliminá-lo, utilizam-se sequestrantes de oxigênio, também conhecidos como removedores químicos. O agente mais comum é o sulfito de sódio (Na_2SO_3), que reage rapidamente com O_2 para formar sulfato de sódio. Em sistemas de alta pressão, onde o sulfito pode se decompor, compostos orgânicos como a hidrazina (N_2H_4) eram preferidos, pois se decompõe em amônia, que também auxilia no controle do pH. Devido à sua toxicidade, a hidrazina tem sido substituída por alternativas mais seguras, como o eritorbato de sódio ou a carboidrazida, que cumprem a mesma função sem os riscos associados.

Nenhum programa de controle de corrosão, porém, é eficaz sem o controle rigoroso do pH. É aqui que entram os alcalinizantes. A manutenção de um pH alcalino (geralmente entre 10.5 e 11.5 em caldeiras de média e alta pressão) é crucial por dois motivos: primeiro, inibe a corrosão ácida geral; e segundo, promove a formação da magnetita, uma camada passiva e protetora sobre o ferro. Os agentes alcalinizantes mais utilizados são a soda cáustica (NaOH) e, em menor grau, a amônia (NH_3) ou aminas neutralizantes (como a morfolina), que se distribuem tanto pela água da caldeira quanto pelo vapor, protegendo toda a linha de condensado.

Classificação de Caldeiras e Parâmetros de Controle

As caldeiras são classificadas de acordo com a pressão de operação, que define os limites de controle para parâmetros como pH, condutividade, sílica, dureza e ferro. Normas como ASME (American Society of Mechanical Engineers) e ABMA (American Boiler Manufacturers Association) estabelecem diretrizes rigorosas para cada faixa de pressão (ASME, 1979).

Tratamento com Sequestrantes

Sequestrantes de oxigênio são aditivos químicos essenciais, amplamente utilizados para remover o oxigênio dissolvido da água de alimentação de caldeiras, prevenindo assim a corrosão (Carvalho, 2021). No Brasil e globalmente, os mais comuns nesse segmento são: Sulfito de Sódio, Bissulfito de Sódio, Hidrazina, Carbohidrazida, DEHA, Hidroquinona e Ácido Ascórbico. A seleção do sequestrante ideal é determinada por fatores críticos, como a pressão de operação do sistema, a composição metalúrgica e, no setor alimentício, o tipo de contato do vapor (direto ou indireto) com os alimentos (Brunhara, 2021). As condições de dosagem, residual, temperatura e pH de aplicação para cada produto estão detalhadas na figura 1.

Figura 1 - Sequestrantes de oxigênio e condições de aplicação.

Sequestrantes	Dosagem (ppm/ppm de oxigênio)	Residual na caldeira (em ppm)	Temperatura (°C)	pH
Sulfito de Sódio	7,8 - 10	10 - 60	27	>8,5
Bissulfito de Sódio	25 - 30	10 - 60	27	>8,5
Hidrazina 15%	6 - 7	0,1 - 0,3	88	>8,5
Hidrazina 35%	2 - 3	0,1 - 0,3	88	>8,5
Carbohidrazida	20 - 22	0,05 - 0,1	>90	>8,5
DEHA	10 - 12	0,1 - 0,3	>90	>8,5
Hidroquinona	100 - 120	0,01 - 0,05	27	>8,5
Ácido Ascórbico	70 - 80	0,01 - 0,05	82	>8,5

Fonte: Ribeiro, 2022, p. 53.

Controle Analítico do Tratamento

Os limites de controle para os parâmetros físico-químicos da água de alimentação e da água interna da caldeira são definidos primariamente por diretrizes internacionais, em especial as estabelecidas pela *American Society of Mechanical Engineers* (ASME) e pela *American Boiler Manufacturers Association* (ABMA). Adicionalmente, para parâmetros não abrangidos por essas normas, limites podem ser estabelecidos com base em pesquisas de autores especializados.

Para o pré-tratamento da água, os limites de controle são definidos pelas especificações dos fornecedores, em função das características físico-químicas da água de reposição.

A figura 2 apresenta os valores determinados pela ASME, enquanto a figura 3 compila diretrizes da ASME e da ABMA.

Figura 2 - Limites de controle estabelecidos pela ASME para água de alimentação e água de caldeira.

Diretrizes da ASME para caldeiras aquatubulares com requisitos restritivos de pureza do vapor								
Pressão de operação do tambor de vapor	psig 0 - 3000	psig 301 - 450	psig 451 - 600	psig 601 - 750	psig 751 - 900	psig 901 - 1000	psig 1001 - 1500	psig 1501 - 2000
Água de Alimentação								
Oxigênio Dissolvido (mg/L) medido antes da adição de sequestrante de oxigênio	< 0,007	< 0,007	< 0,007	< 0,007	< 0,007	< 0,007	< 0,007	< 0,007
Ferro total em ppm (mg/L) Fe	<=0,1	<=0,05	<=0,03	<=0,025	<=0,02	<=0,02	<=0,01	<=0,01
Cobre total em ppm (mg/L) Cu	<=0,05	<=0,025	<=0,02	<=0,02	0<=0,015	<=0,01	<=0,01	<=0,01
Dureza Total ppm (mg/L)	<=0,3	<=0,3	<=0,2	<=0,2	<=0,1	<=0,05	ND	ND
pH a 25°C	8,3 - 10,0	8,3 - 10,0	8,3 - 10,0	8,3 - 10,0	8,3 - 10,0	8,8 - 9,6	8,8 - 9,6	8,8 - 9,6
Produtos químicos para proteção do sistema pré-caldeira	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE
COT não volátil ppm (mg/L)	<1	<1	<0,5	<0,5	<0,5	<0,2	<0,2	<0,2
Matéria oleosa ppm (mg/L)	<1	<1	<0,5	<0,5	<0,5	<0,2	<0,2	<0,2
Água da Caldeira								
Silica ppm (mg/L) SiO2	<=150	<=90	<=4	<=30	<=20	<=8	<=2	<=1
Alcalinidade total ppm (mg/L)	<700	<500	<500	<200	<150	<100	NE	NE
Alcalinidade OH livre ppm (mg/L)	NE	NE	NE	NE	NE	NE	ND	ND
Condutividade específica (uS/cm) 25°C	1100 - 5400	900 - 4000	600 - 3800	300 - 1500	250 - 1200	200 - 1000	<= 150	<= 80
Sólidos Totais Dissolvidos no Vapor								
STD máximo ppm (mg/L)	0,2 - 1,0	0,2 - 1,0	0,2 - 1,0	0,1 - 0,5	0,1 - 0,5	0,1 - 0,5	0,1	0,1

Fonte: Ribeiro, 2022, p. 64.

Figura 3 - Limites de controle estabelecidos pela ASME para água de alimentação e água de caldeira.

ITEM DE CONTROLE	FAIXA DE PRESSÃO (kgf/cm ²)						
	<10	10 a 20	20 a 40	40 a 60	60 a 80	80 a 100	>100
pH a 25°C	10,5 a 11,5		10 a 11	9,5 a 10,5		9 a 10	8,5 a 9,8
Condutividade (uS/cm, 25°C)	<4000	<4000	<2000	<800	<500	<150	<60
Alcalinidade Total (ppm CaCO ₃)	<700	<700	<400	<150	<50	-	-
Alcalinidade Hidróxida (ppm CaCO ₃)	200 a 400	200 a 400	80 a 150	Depende do tratamento (normalmente nula)			
Sólidos Totais Dissolvidos (ppm)	<3500	<3500	<1800	<1000	<400	<50	<20
Dureza Total (ppm CaCO ₃)	<5,0	<5,0	ND				
Sílica Solúvel (ppm SiO ₂)	<150	<150	<90	<40	<20	<2,0	<1,0
Ferro (ppm Fe)	<3,0	<3,0	<1,0	<0,5	<0,1	<0,1	<0,1
Sólidos Suspensos (ppm)	<300	<150	<50	<5	<1	-	-
Sulfito (ppm de SO ₃) ₂₋	30 a 50	20 a 40	10 a 30	Não recomendado			
Hidrazida (ppm N ₂ H ₄)	0,1 a 0,5	0,1 a 0,5	0,1 a 0,5	0,1 a 0,2	0,05 a 0,1	0,05 a 0,1	0,05 a 0,1
Fosfato (ppm (PO ₄) ₃₋)	30 a 50	20 a 40	10 a 30	5 a 15	Vide curva de fosfato contínuo		

Fonte: Ribeiro, 2022, p. 65.

Materiais e Métodos da Pesquisa

Desenvolvimento do Software

O software foi criado utilizando Microsoft Access. A construção seguiu as seguintes etapas:

1. Criação de tabelas para inserção de dados.
2. Criação de consultas para seleção de dados.
3. Criação de formulários e macros com condições estabelecidas em linguagem VBA.
4. Criação de relatórios para emitir resultados (análises, parâmetros, tipo de tratamento, ciclos de concentração e orientações), cujo conteúdo é dinâmico com base nos dados e decisões pré-estabelecidas.

Metodologia do Estudo de Caso e Coleta de Dados:

- O estudo de caso foi escolhido com base nas características do sistema (pré-tratamento, tratamento interno, metalurgia, combustível) e condições de operação (pressão, temperatura, capacidade de produção de vapor).
- A análise das condições operacionais e a coleta de dados (sobre pré-tratamento e tratamento interno) foram realizadas em uma primeira visita em outubro de 2021, por meio de entrevistas com operadores.
- Todas as visitas (sete no total) foram realizadas com o apoio da equipe técnica de uma empresa especializada em tratamento de águas industriais, localizada em São João da Boa Vista – SP.
- A coleta de amostras e análises físico-químicas foi feita mensalmente pela empresa responsável pelo tratamento.

Análise de Dados e Implementação:

- A análise de dados ocorreu a partir dos resultados físico-químicos mensais, de outubro de 2021 a abril de 2022.
- O objetivo da análise foi identificar oportunidades de melhorias e correções no tratamento, comparar as sugestões com as orientações do software e acompanhar os resultados após as implementações.
- Os resultados das análises mensais foram lançados no software por meio de formulários.
- As correções e melhorias foram acompanhadas durante o período, e as pendências foram confirmadas através dos relatórios emitidos pelo software.

DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE BWT SOLUTIONS

O software BWT Solutions foi desenvolvido em Microsoft Access® e possui módulos integrados para:

- Definição de Tratamento: Seleção do pré-tratamento e tratamento interno com base na qualidade da água bruta, pressão da caldeira, metalurgia e tipo de contato com alimentos. A definição da dosagem de compostos químicos para o sistema ocorreu conforme controle analítico e limites de controle descritos no Item 2.5 e de acordo com a Temperatura e Pressão do sistema analisado.
- Acompanhamento de Tratamento: Ingestão de resultados analíticos com emissão de relatórios comparativos e orientações técnicas.
- Cálculo de Ciclos de Concentração: Determinação do número ideal de ciclos para maximizar a eficiência e reduzir purgas.
- Cadastro de Clientes e Laboratórios: Interface para gestão de múltiplos usuários e históricos de análise.

A figura 4 ilustra a tela de login do software, que dá acesso a um menu inicial modular e intuitivo:

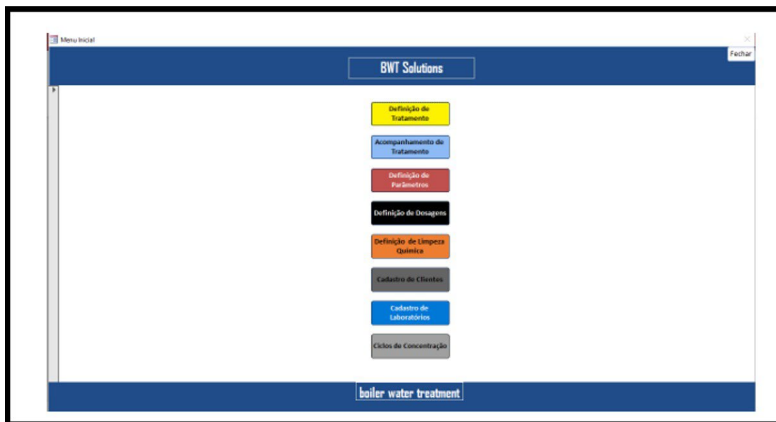
Figura 4 - Tela de login do software BWT Solutions.



Fonte: Ribeiro, 2022, p. 89.

A figura 5 ilustra o Menu Inicial com as seguintes opções: Definição de Tratamento, Acompanhamento de Tratamento, Definição de Parâmetros, Definição de Dosagens, Definição de Limpeza Química, Cadastro de Clientes, Cadastro de Laboratórios e Ciclos de Concentração:

Figura 5 - Tela de menu inicial do software BWT Solutions.



Fonte: Ribeiro, 2022, p. 89.

ESTUDO DE CASO: APLICAÇÃO EM UMA USINA TERMELÉTRICA

Caracterização do Sistema

O software foi aplicado em uma usina termelétrica no interior de São Paulo, com sistema de cogeração operando inicialmente a 48 bar e em transição para 67 bar. A caldeira era do tipo aquatubular, alimentada com água de poço tratada por osmose reversa. O tratamento interno adotado incluía carbohidrazida como sequestrante, blend de aminas para controle de pH no condensado e fosfato trissódico como alcalinizante.

Resultados e Análises

- Pré-tratamento: O software identificou a necessidade de complementar o sistema existente com etapas de oxidação (para remoção de ferro) e abrandamento (para redução da dureza), uma vez que a água osmotizada ainda apresentava teores elevados de ferro (0,029 ppm) e dureza (0,58 ppm).
- Tratamento Interno: O tratamento adotado foi validado pelo software como adequado para ambas as pressões (48 e 67 bar), desde que mantida a condição de zero dureza na alimentação.
- Ciclos de Concentração: O sistema operava com apenas 3 ciclos na

pressão de 67 bar, abaixo do potencial de 6 a 23 ciclos que seria possível com melhorias no pré-tratamento.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O software BWT Solutions mostrou-se uma ferramenta eficaz para:

Auxiliar na seleção do tratamento mais adequado com base em parâmetros operacionais e analíticos;

Emitir orientações técnicas imediatas para correção de desvios e melhorias no sistema;

Otimizar o número de ciclos de concentração, reduzindo o consumo de água, produtos químicos e combustível;

Validar tratamentos existentes e propor upgrades no pré-tratamento, como a instalação de abrandadores e polimento por leito misto.

A aplicação do software em um estudo real demonstrou que a qualidade do pré-tratamento é determinante para a estabilidade e economia do sistema como um todo. Ferramentas computacionais como essa representam um avanço significativo na gestão de utilidades industriais, unindo conhecimento técnico e tecnologia para garantir operações mais seguras, eficientes e sustentáveis.

REFERÊNCIAS

ABNT. (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 14659: Caldeiras - Operação**. Rio de Janeiro, 2015. (Estabelece os requisitos e procedimentos para a operação segura de caldeiras no Brasil, incluindo diretrizes para o controle da qualidade da água e tratamento químico).

AQUINO, A. **Água para caldeiras: conheça os principais problemas e saiba como trata-las**. 2012 Disponível em: <https://www.revistatae.com.br/Artigo/425/agua-para-caldeirasconheca-os-principais-problemas-e-saiba-como-trata-las>. Acesso em: 01 nov. 2021.

ASME. American Society of Mechanical Engineers. **Consensus on Operating Practices for Control of Feedwater and Boiler Water Quality in Modern Industrial Boilers**. New York, 1979.

BETZ Laboratories. **Betz Handbook of Industrial Water Conditioning**. 9th ed., Trevose, PA, 1991. (Um manual técnico clássico e abrangente que detalha a química por trás dos diferentes programas de tratamento, servindo como base fundamental para muitos profissionais da área).

BRUNHARA, J. L. **Caldeiras**. Curso de Tratamento de Água de Caldeira. Notas de Aula. Cursos Digital Water, 2020.

EPRI (Electric Power Research Institute). **Chelant and Polymer Treatment for Industrial Boilers**. EPRI Report TR-102195, 1993. (Estudo clássico e ainda referência fundamental sobre a aplicação, vantagens e cuidados no uso de agentes quelantes como o EDTA em sistemas de caldeiras).

KEMMER, F. N. **The Nalco Water Handbook**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 1988.

RIBEIRO, Carlos Rogério. **Desenvolvimento de Software para Aplicação no Tratamento de Água de Caldeira**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, 2022.

TROVATI, Joubert. **Tratamento de Água para Geração de Vapor: Caldeiras**. 2009. Disponível em: http://www.snatural.com.br/PDF_arquivos/Torre-Caldeira-Tratamento-Agua-Caldeira.pdf. Acesso em: 12 out. 2021.