

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**CARLOS ROGÉRIO RIBEIRO**

**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE PARA APLICAÇÃO NO**  
**TRATAMENTO DE ÁGUA DE CALDEIRA**

**POÇOS DE CALDAS/MG**

**2022**

**CARLOS ROGÉRIO RIBEIRO**

**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE PARA APLICAÇÃO NO  
TRATAMENTO DE ÁGUA DE CALDEIRA**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Alfenas. Orientadora: Profa. Dra. Izabella Carneiro Bastos

**POÇOS DE CALDAS/MG**

**2022**

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas  
Biblioteca Campus Poços de Caldas

Ribeiro, Carlos Rogério.

Estudo e desenvolvimento de software para aplicação no tratamento de água de caldeira / Carlos Rogério Ribeiro. - Poços de Caldas, MG, 2022.  
160 f. : il. -

Orientador(a): Izabella Carneiro Bastos.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2022.

Bibliografia.

1. Tratamento de água de caldeira. 2. Tecnologia. 3. Águas industriais. 4. Cogeração. 5. Software. I. Carneiro Bastos, Izabella, orient. II. Título.

Ficha gerada automaticamente com dados fornecidos pelo autor.

**CARLOS ROGÉRIO RIBEIRO**

**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE PARA APLICAÇÃO NO  
TRATAMENTO DE ÁGUA DE CALDEIRA**

A Banca examinadora abaixo-assinada aprova a Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Engenharia Química.

Aprovada em: 15 de dezembro de 2022.

Profa. Dra. Izabella Carneiro Bastos

Instituição: Universidade Federal de Alfenas

Profa. Dra. Gilze Belém Chaves Borges

Instituição: Instituto Federal do Sul de Minas

Profa. Dra. Maurielen Guterres Dalcin

Instituição: Universidade Federal de Alfenas



Documento assinado eletronicamente por **Izabella Carneiro Bastos, Professor do Magistério Superior**, em 15/12/2022, às 17:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gilze Belém Chaves Borges, Usuário Externo**, em 16/12/2022, às 09:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Maurielen Guterres Dalcin, Professor do Magistério Superior**, em 19/12/2022, às 10:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unifal-mg.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unifal-mg.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0883731** e o código CRC **C26DE1C3**.

Dedico este trabalho aos meus pais e a todos que sempre me  
incentivaram e acreditaram em mim.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus, por me permitir respirar e viver mais essa etapa da minha vida.

A minha família, em especial minha mãe Edina e meu pai Antônio, que sempre estiveram do meu lado e que são meus maiores exemplos de persistência e dedicação. Agradeço por nunca deixarem de acreditar nos meus sonhos.

A minha orientadora Izabella Carneiro Bastos, pela dedicação em orientar, pela paciência e pela confiança depositada no meu trabalho.

Agradeço a todos aqueles que não os cito aqui, mas que foram minha principal fonte de apoio e inspiração para realizar este trabalho.

Aos membros da banca avaliadora pelo tempo dedicado e pelas sugestões dadas.

À UNIFAL por me proporcionar mais essa oportunidade de estudo.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

“A ciência de hoje é a tecnologia de amanhã.”

(Edward Teller, 2000)

## RESUMO

A água que alimenta os reservatórios de caldeiras é proveniente de fontes naturais, tais como poços, lagos, rios, córregos, lagoas e água subterrânea. Para uma operação segura e eficiente, é extremamente importante o cuidado com a qualidade da água que alimenta esse equipamento, pois ela apresenta impurezas que podem gerar muitos problemas para a geração de vapor, tais como incrustações, processos corrosivos e arrastes, que comprometem tanto a qualidade do processo quanto a vida útil do equipamento, além de aumentar o consumo de combustível e de produtos químicos para tratamento da água e do efluente gerado. A seleção da tecnologia adequada para o tratamento depende do tipo de água a ser tratada e essa escolha é fortemente dependente da fonte de água, do tipo de processo, das condições de processo e das características do equipamento. Sendo assim, o tipo de tratamento adequado varia muito e a sua escolha e o seu monitoramento torna-se uma tarefa dispendiosa e que exige muito tempo dos profissionais responsáveis por avaliar cada parâmetro. O objetivo desse estudo foi apresentar o desenvolvimento de um software com uma tecnologia pouco disseminada até o momento e que determinasse a rota adequada para tratamento de água bruta a ser utilizada como fonte de reposição e também da água da caldeira, além de acompanhar o tratamento e emitir relatórios com orientações técnicas para a manutenção do tratamento e estabilidade do processo. Esse software foi desenvolvido com o *Microsoft Access* que é um gerenciador de dados da empresa *Microsoft Corporation*. O software determina o tipo de tratamento adequado para a água de reposição e para a água interna de uma caldeira através da faixa de pressão de trabalho do equipamento, dos parâmetros físico-químicos da água e suas faixas de controle, metalurgia do sistema e tipo de contato com alimentos. Seu uso auxilia os profissionais da área na escolha da tecnologia de tratamento a partir das características do processo e dos valores dos parâmetros analisados, tais como sílica, dureza total, alcalinidade total, alcalinidade hidróxida, pH, condutividade específica, ferro total, cobre total, cloretos e turbidez. Após o desenvolvimento do software, realizou-se um estudo de caso envolvendo uma usina termelétrica no interior de São Paulo que possui um sistema de cogeração de energia operando, inicialmente, a 48 bar e que se encontrava em fase de transição para 67 bar. Foram realizadas as análises dos parâmetros da água do sistema durante o período de 6 meses e, com os resultados obtidos nas análises, o software foi utilizado para a escolha do melhor tratamento para a água presente no processo e para monitoramento do sistema. Com o auxílio do software, foi possível verificar que o



tratamento interno adotado para a água dessa caldeira condiz com o tratamento sugerido para caldeiras operando nas mesmas condições de acordo com a literatura. Foram realizadas também, sugestões de melhorias tanto para o pré-tratamento quanto para o tratamento interno para que fosse possível manter a estabilidade do sistema e gerar economias para a planta.

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

## **ABSTRACT**

The water that feeds the boiler reservoirs comes from natural sources such as wells, lakes, rivers, streams, ponds and groundwater. For a safe and efficient operation, it is extremely important to be careful with the quality of the water that feeds this equipment, as it has impurities that can generate many problems for the generation of steam, such as incrustations, corrosive processes and drags, which compromise both the quality of the process and the useful life of the equipment, in addition to increasing the consumption of fuel and chemical products for the treatment of water and the generated effluent. The selection of the appropriate technology for the treatment depends on the type of water to be treated and this choice is strongly dependent on the water source, the type of process, the process conditions and the characteristics of the equipment. Therefore, the type of appropriate treatment varies greatly and its choice and monitoring becomes an expensive task that requires a lot of time from the professionals responsible for evaluating each parameter. The objective of this study was to present the development of a software with a little disseminated technology so far that determines the appropriate technology for the treatment of raw water to be used as a replacement source and also of boiler water, in addition to monitoring the treatment and issuing reports with technical guidelines for maintenance of the treatment and stability of the process. This software was developed with Microsoft Access which is a data manager from Microsoft Corporation. The software determines the type of treatment suitable for the make-up water and for the internal water of a boiler through the working pressure range of the equipment, the physical-chemical parameters of the water and its control ranges, system metallurgy and type of contact with food. Its use helps professionals in the field to choose the treatment technology based on the characteristics of the process and the values of the parameters analyzed, such as

silica, total hardness, total alkalinity, hydroxide alkalinity, pH, specific conductivity, total iron, total copper, chlorides and turbidity. After the development of the software, a case study was carried out involving a thermoelectric plant in the interior of São Paulo that has an energy cogeneration system initially operating at 48 bar and which was in the transition phase to 67 bar. Analyzes of the water parameters of the system were carried out during the period of 7 months and, with the results obtained in the analyses, the software was used to choose the best treatment for the water present in the process and to monitor the system. With the help of the software, it was possible to verify that the internal treatment adopted for the water of this boiler matches the treatment suggested for boilers operating under the same conditions according to the literature. Suggestions for improvements were also made for both pre-treatment and internal treatment so that it was possible to maintain the stability of the system and generate savings for the plant.

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

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Caldeira flamotubular de 3 passes.....	28
Figura 2 –	Caldeira aquatubular.....	29
Figura 3 –	Tubulão superior de caldeira com elevada quantidade de lama de origem argilosa.....	35
Figura 4 –	Parte inferior de uma caldeira fogotubular com tubos incrustados por sais de dureza, com lama e depósitos no fundo.....	36
Figura 5 –	Tubo de caldeira aquatubular com incrustações por óxidos de ferro.....	36
Figura 6 –	Presença de incrustações no espelho e no interior dos tubos de uma caldeira aquatubular.....	37
Figura 7 –	Carcaça de uma caldeira com pontos de corrosão localizada (Pites).....	38
Figura 8 –	Corrosão por oxigênio dissolvido.....	38
Figura 9 –	Corrosão por oxigênio em tubo de superaquecedor.....	38
Figura 10 –	Linha do retorno de condensado que sofreu processo de corrosão.....	40
Figura 11 –	Válvula de regulação de uma turbina com deposição de sais de arraste.....	41
Figura 12 –	Tubo de superaquecedor completamente destruído por sais originados de arraste.....	42
Figura 13 –	Ilustração de um processo de troca iônica por Ciclo Hidrogênio.....	46
Figura 14 –	Princípio de funcionamento de uma resina aniônica.....	47
Figura 15 –	Conjunto de vasos de um sistema de desmineralização.....	47
Figura 16 –	Operação de osmose reversa.....	48

Figura 17 – Fluxograma do processo.....	72
Figura 18 – Página de Login.....	77
Figura 19 – Menu Inicial.....	77
Figura 20 – Menu Definir Tratamento.....	79
Figura 21 – Definição de Pré-Tratamento.....	80
Figura 22 – Definição de Tratamento Interno.....	81
Figura 23 – Acompanhamento de Tratamento.....	81
Figura 24 – Acompanhamento de Pré-Tratamento.....	83
Figura 25 – Análises de Água Bruta.....	83
Figura 26 – Análises Abrandada.....	84
Figura 27 – Análises Desmineralizada.....	85
Figura 28 – Análises Osmotizada.....	85
Figura 29 – Acompanhar Alimentação.....	86
Figura 30 – Acompanhar Tratamento Interno.....	86
Figura 31 – Acompanhar Tratamento Interno.....	87
Figura 32 – Registro de Clientes.....	88
Figura 33 – Registro de Laboratórios.....	88
Figura 34 – Formulário para determinação de pré-tratamento do sistema.....	92
Figura 35 – Definição de Tratamento Interno para as condições de operação atuais.....	94
Figura 36 – Definição de Tratamento Interno para as novas condições de operação.....	94
Figura 37 – Faixas de Controle para a alimentação determinadas para a caldeira operando a 48,95 kgf/cm <sup>2</sup> e 170°C.....	95
Figura 38 – Faixas de Controle para a alimentação determinadas para as novas condições de operação (68,32 kgf/cm <sup>2</sup> e 495°C).....	95

Figura 39 – Faixas de Controle determinadas para a água da caldeira operando a 48,95 kgf/cm <sup>2</sup> e 170°C.....	96
Figura 40 – Faixas de Controle para a caldeira determinadas para as novas condições de operação (68,32 kgf/cm <sup>2</sup> e 495°C).....	96
Figura 41 – Orientações de Limpeza Química Pré-operacional para ambas as condições de operação.....	97
Figura 42 – Coleta e análise da água de reposição.....	99
Figura 43 – Coleta e análise da água na saída da osmose.....	100
Figura 44 – Coleta e análise da água na alimentação.....	102
Figura 45 – Coleta e análise da saída de vapor.....	104
Figura 46 – Coleta e análise do retorno de condensado.....	104
Figura 47 – Fluxograma representativo da primeira possibilidade de melhorias no pré-tratamento.....	108
Figura 48 – Fluxograma representativo da segunda possibilidade de melhorias no pré-tratamento.....	108
Figura 49 – Coleta e análise da água da caldeira.....	109
Figura 50 – Relatório de ciclos de concentração da operação no mês de janeiro de 2022 a 48 bar de pressão.....	112
Figura 51 – Relatório de ciclos de concentração da operação no mês de abril de 2022 a 67 bar de pressão.....	113
Figura 52 – Relatório de ciclos de concentração da caldeira operando com uma situação hipotética de melhoria de eficiência de 50% no pré-tratamento.....	117

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Custos operacionais da caldeira.....	30
Gráfico 2 – Perda de massa da superfície metálica de acordo com o teor de sulfatos ( $SO_4^{2-}$ ) na água.....	52
Gráfico 3 – Regiões PT, CTP e EPT.....	60
Gráfico 4 – Carta de Controle CTP Típica.....	60

## LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 - Vista lateral da caldeira.....	70
Fotografia 2 - Esteira de cavaco.....	70
Fotografia 3 - Tubulação de vapor.....	71
Fotografia 4 - Pré-tratamento com Osmose Reversa.....	72
Fotografia 5 - Sistema de dosagem de produtos na caldeira com dosadoras automáticas.....	73
Fotografia 6 - Sistema de coleta de amostras, com os seguintes pontos de coleta: Descarga Contínua, Desaerador, Vapor, Condensado e Osmotizada.....	74
Fotografia 7 – Resfriamento de amostras após a coleta .....	91



## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 -	Problemas observados por arraste na caldeira.....	41
Quadro 2 -	Medidas corretivas para cada caso de arraste.....	42
Quadro 3 -	Sistemas de pré-tratamento em função da pressão da caldeira.....	49
Quadro 4 -	Etapas para limpeza química pré-operacional.....	51
Quadro 5 -	Especificações do sistema.....	89
Quadro 6 -	Tratamento interno adotado.....	90
Quadro 7 -	Definição de Pré-Tratamento.....	93
Quadro 8 -	Orientações para a Água Bruta.....	99
Quadro 9 –	Orientações de Melhorias para o Pré-Tratamento em janeiro de 2021 e fevereiro de 2022.....	101
Quadro 10 –	Orientações de acompanhamento da água de alimentação nos meses de janeiro, fevereiro e abril de 2022.....	106
Quadro 11 –	Orientações de acompanhamento da saída de vapor nos meses de janeiro, fevereiro e abril de 2022.....	106
Quadro 12 –	Orientações de acompanhamento do retorno de condensado nos meses de janeiro, fevereiro e abril de 2022.....	106
Quadro 13 –	Orientações de acompanhamento da água da caldeira nos meses de janeiro, fevereiro e abril de 2022.....	112

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Diretrizes ASME para o teor de oxigênio dissolvido de acordo com cada faixa de pressão.....	51
Tabela 2 - Sequestrantes de oxigênio e condições de aplicação.....	52
Tabela 3 - Limites de controle estabelecidos pela ASME para água de alimentação e água de caldeira.....	64
Tabela 4 - Limites de controle estabelecidos pela ASME e ABMA para água de caldeira.....	65
Tabela 5 - Resultados analíticos da água do poço.....	98
Tabela 6 - Resultados analíticos da saída da osmose.....	100
Tabela 7 - Resultados analíticos da água de alimentação (osmotizada + retorno de condensado) para a caldeira operando a 48 (48,95 kgf/cm <sup>2</sup> ) bar e 170°C.....	103
Tabela 8 - Resultados analíticos da água de alimentação (osmotizada + retorno de condensado) para a caldeira operando a 67 bar (68,32 kgf/cm <sup>2</sup> ) e 495°C.....	103
Tabela 9 - Resultados analíticos da água na saída de vapor da cogeração.....	105
Tabela 10 - Resultados analíticos do retorno de condensado.....	105
Tabela 11 - Resultados analíticos da água da caldeira operando a 48 bar.....	109
Tabela 12 - Resultados analíticos da água da caldeira operando a 67 bar.....	109
Tabela 13 - Comparativo entre os resultados reais e os resultados hipotéticos de melhorias no pré-tratamento para da água de alimentação.....	115
Tabela 14 - Comparativo entre os resultados reais e os resultados hipotéticos de melhorias no pré-tratamento para da água da caldeira.....	115

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABMA	AMERICAN BOILERS MANUFACTURERS ASSOCIATION
ANA	AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS
ASME	AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS
BWT	BOILER WATER TREATMENT
CETESB	COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO
CTP	CONTINUOUS PHOSPHATE TREATMENT
DEHA	N,N-DIETILHIDROXILAMINA
EDTA	SAL DO ÁCIDO ETILENODIAMINOTETRACÉTICO
EPRI	ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE
EPT	EQUILIBRIUM PHOSPHATE TREATMENT
ETA	ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA
FDA	FOOD AND DRUGS ADMINISTRATION
NR 13	NORMA REGULADORA NÚMERO 13
NTA	NITRILOACETATO
NTU	UNIDADES DE TURBIDEZ NEFELOMÉTRICA
PPB	PARTES POR BILHÃO
PPM	PARTES POR MILHÃO
PT	PHOSPHATE TREATMENT
STD	SÓLIDOS TOTAIS DISSOLVIDOS

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	23
2. OBJETIVOS .....	26
2.1. Objetivo Geral .....	26
2.2. Objetivos Específicos .....	26
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	27
3.1. CALDEIRAS .....	27
3.1.1. Classificação das caldeiras quanto ao tipo .....	27
3.1.1.1. Caldeiras fogotubulares/flamotubulares .....	27
3.1.1.2. Caldeiras aquatubulares .....	28
3.1.2. Classificação das caldeiras quanto à pressão .....	29
3.2. QUALIDADE DA ÁGUA.....	30
3.2.1. Impurezas encontradas na água.....	31
3.2.2. Retorno de condensado.....	33
3.3. OBJETIVOS DO TRATAMENTO DE ÁGUA DE CALDEIRA .....	34
3.3.1. Incrustações .....	34
3.3.2. Corrosão.....	37
3.3.2.1. Pittings ou pites e corrosão sob depósitos .....	37
3.3.2.2. Corrosão ácida .....	39
3.3.2.3. Corrosão cáustica.....	40
3.3.3. Arraste .....	40
3.4. PRÉ-TRATAMENTO DA ÁGUA DE REPOSIÇÃO.....	42
3.4.1. Oxidação .....	43
3.4.2. Clarificação .....	44
3.4.2.1. Coagulação, floculação e filtração.....	44
3.4.2.2. Clarificação por membranas de ultrafiltração .....	44

<b>3.4.3. Abrandamento .....</b>	<b>45</b>
<b>3.4.4. Desmineralização .....</b>	<b>46</b>
3.4.4.1. Desmineralização por troca iônica.....	46
3.4.4.2. Desmineralização por osmose reversa .....	48
3.5. TRATAMENTO PRÉ-CALDEIRA .....	49
3.6. LIMPEZA QUÍMICA PRÉ-OPERACIONAL .....	50
3.7. TRATAMENTO INTERNO.....	51
<b>3.7.1. Tratamento com sequestrantes.....</b>	<b>51</b>
3.7.1.1. Sulfito de sódio.....	52
3.7.1.2. Bissulfito de sódio .....	53
3.7.1.3. Hidrazina.....	53
3.7.1.4. Carbohidrazida, ácido ascórbico, deha e hidroquinona.....	54
<b>3.7.2. Tratamento anti-incrustante .....</b>	<b>55</b>
3.7.2.1. Tratamento precipitante .....	55
3.7.2.2. Tratamento quelante.....	56
3.7.2.3. Tratamento dispersante .....	57
3.7.2.4. Tratamento fosfato congruente (cpt), fosfato de equilíbrio (ept) e tratamento com fosfato (pt).....	57
<b>3.7.3. Tratamento neutralizante.....</b>	<b>60</b>
3.8. CICLOS DE CONCENTRAÇÃO.....	61
<b>3.8.1. Ciclo de concentração permissível.....</b>	<b>62</b>
<b>3.8.2. Ciclo de concentração da caldeira .....</b>	<b>63</b>
3.9. CONTROLE ANALÍTICO DO TRATAMENTO .....	63
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>67</b>
4.1. LEVANTAMENTO DE DADOS TEÓRICOS .....	68
4.2. DEFINIÇÃO DO ESTUDO DE CASO REAL.....	68

4.3. DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE .....	68
4.4. ANÁLISE DAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS E COLETA DE DADOS DO TRATAMENTO UTILIZADO NO SISTEMA .....	69
4.5. COLETA DE AMOSTRAS EM CAMPO ENVIO PARA ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS .....	74
4.6. DEFINIÇÃO DE PRÉ-TRATAMENTO, TRATAMENTO INTERNO E ACOMPANHAMENTO DO SISTEMA .....	74
4.7. USO DO SOFTWARE PARA IDENTIFICAÇÃO DE PROBLEMAS E OPORTUNIDADES DE MELHORIAS.....	75
4.8. ENVIO DOS RELATÓRIOS À TERMELETRICA .....	75
4.9. REALIZAÇÃO DE MELHORIAS .....	75
4.10. VALIDAÇÃO DO SOFTWARE EM CAMPO .....	76
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>77</b>
5.1. DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE .....	77
5.2. ESTUDO DE CASO .....	89
<b>5.2.1. Análise das condições operacionais, coletas de dados e amostras .....</b>	<b>89</b>
<b>5.2.2. Definição de pré-tratamento para o sistema em estudo .....</b>	<b>92</b>
<b>5.2.3. Acompanhamento do tratamento .....</b>	<b>98</b>
5.2.3.1. Resultados analíticos da água do poço (fonte de reposição).....	98
5.2.3.2. Resultados analíticos da água osmotizada (saída dosmose).....	100
5.2.3.3. Resultados analíticos da água de alimentação, vapor e condensado .....	102
5.2.3.4. Resultados analíticos da água da caldeira.....	108
<b>5.2.4 Validação do software .....</b>	<b>117</b>
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>119</b>
<b>7. TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>122</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>123</b>
<b>APÊNDICES.....</b>	<b>128</b>

APÊNDICE A - Pré-tratamento sugerido pelo software .....	128
APÊNDICE B - Acompanhamento da água bruta .....	130
APÊNDICE C - Acompanhamento da água osmotizada .....	134
APÊNDICE D - Acompanhamento da água de alimentação, saída de vapor e retorno de condensado .....	138
APÊNDICE E - Acompanhamento da água da caldeira .....	152

## 1 INTRODUÇÃO

As caldeiras (“boilers”, do inglês) são equipamentos utilizados para a produção de vapor, seja ele saturado ou superaquecido. Muitos equipamentos de aquecimento e transferência de calor e que não produzem vapor também são chamados de caldeiras, como por exemplo os geradores de água quente, aquecedores que empregam fluidos térmicos, etc. Nesse trabalho, a aplicação do termo “caldeira” fará referência aos equipamentos para a geração de vapor (TROVATI, 2009).

A caldeira é um equipamento de elevado custo de implantação, de operação e cujo processo e manutenção exigem muita responsabilidade. Existem uma série de normas, códigos e legislações que fiscalizam e padronizam seu projeto, operação e manutenção. O Ministério do Trabalho é responsável pela aplicação da NR-13. Essa norma regulamenta todas as operações envolvendo caldeiras e vasos de pressão no Brasil. Para o projeto de caldeiras, adotam-se, geralmente, códigos específicos. No Brasil, o código comumente utilizado para essa finalidade é o código American Society of Mechanical Engineers (ASME).

A água bruta que alimenta os reservatórios de caldeiras é proveniente de fontes naturais, tais como poços, lagos, rios, córregos, lagoas e água subterrânea. Muitas vezes, a alimentação de uma caldeira pode conter mais de um tipo de fonte (KEMMER, 1988).

A água tem uma tendência a dissolver diversos tipos de substâncias, como por exemplo, óxidos, hidróxidos, gases, sólidos, etc. Esse é o motivo pelo qual a água nunca é encontrada pura na natureza. Além dos materiais dissolvidos, a água pode apresentar vários materiais em suspensão, tais como argila, sólidos em suspensão, óleos, entre outros (AQUINO, 2012).

A presença dessas impurezas fora da faixa de controle podem gerar sérios problemas que irão comprometer não só a qualidade do vapor gerado, mas também a vida útil dos equipamentos e seus periféricos. Podem ser citados como exemplo desses problemas a corrosão, a incrustação e o arraste de condensado na linha de vapor. De um modo geral, considera-se ideal para a geração de vapor, uma água com as seguintes características: Água isenta de materiais orgânicos e materiais em suspensão, temperatura elevada, pH na faixa alcalina, ausência de oxigênio e outros gases dissolvidos e a menor quantidade possível de óxidos e sais dissolvidos (OLIVEIRA, 2007).

De acordo com Pace (1997), alimentando-se a caldeira com uma água de boa qualidade, eliminam-se, de forma antecipada, muitos problemas que podem ocorrer durante a geração de



vapor. O tratamento químico interno pode ser feito com os mesmos procedimentos, porém, com critérios diferentes, uma vez que os parâmetros mudam de acordo com as normas e com a legislação.

Ainda, segundo Trovati (2009), como garantia de que a água de alimentação e a água presente na caldeira encontram-se dentro das condições ideais, é imprescindível a escolha adequada do tipo de tratamento a ser aplicado, seja ele físico e/ou químico. É nesse contexto que os profissionais da área química, sejam eles técnicos, químicos ou engenheiros, gastam boa parte do seu tempo e recurso, fazendo as mais diversas combinações das variáveis que influenciam na qualidade da água para que seja utilizada a melhor solução para cada caso.

Nesse sentido, durante essa pesquisa, foi desenvolvido um software fazendo-se uso do *Microsoft Access* que é um gerenciador de dados da empresa *Microsoft Corporation*. O software desenvolvido é capaz de determinar o tipo de tratamento adequado para a água de reposição e para a água interna de uma caldeira através da faixa de pressão de trabalho do equipamento, além de sugerir as faixas de controle para os parâmetros físico-químicos da água do equipamento e emitir orientações técnicas para melhorias no sistema, de forma a garantir a sua estabilidade e o melhor aproveitamento dos recursos disponíveis, tais como água, produtos químicos e combustível.

Um software para esse tipo de aplicação e com todas as funções citadas é uma ferramenta ainda muito pouco disseminada e que otimiza o trabalho dos profissionais responsáveis pelo tratamento e monitoramento da água de caldeiras, tornando seu trabalho menos árduo, poupando-lhes tempo e recursos, além de tornar o processo de tratamento ainda mais eficiente com o melhor gerenciamento dos insumos presentes.

Após o desenvolvimento do software, realizou-se um estudo de caso envolvendo uma usina termelétrica no interior de São Paulo que possui uma caldeira de cogeração de energia operando, inicialmente, a 48 bar e que se encontrava em fase de transição para 67 bar. Foram realizadas as análises dos parâmetros físico-químicos da água do sistema durante o período de 7 meses e, com os resultados obtidos nas análises, o software foi utilizado para a escolha do melhor tratamento para a água presente no processo e também para monitoramento do sistema.

O acompanhamento do tratamento e as análises físico-químicas foram realizadas em parceria com a empresa responsável pelo tratamento da água dessa caldeira. Tal empresa, cuja unidade matriz está localizada em São João da Boa Vista – SP e as demais unidades localizadas

em outros 5 estados, realizou análises mensais da água em diferentes pontos do sistema e forneceu os resultados para aplicação no software.

A pesquisa teve o intuito de verificar a contribuição do uso desse tipo de tecnologia na determinação e monitoramento do pré-tratamento e do tratamento interno da água de caldeiras, além de comparar o tratamento utilizado hoje, em uma usina termelétrica, com o tratamento sugerido pelo software e também de acompanhar a forma com que as melhorias realizadas no sistema contribuía para o melhor gerenciamento de seus recursos e, com esses resultados realizar a validação em campo desse software.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo Geral:

O objetivo geral desse estudo é o desenvolvimento e aplicação de um software, com estudo de caso e validação com dados reais. O software determina o tratamento adequado para água de caldeiras, alimentação e água interna, de acordo com as características da água e do processo.

### 2.2 Objetivos Específicos:

- a) Realizar um levantamento dos tipos de tratamentos a serem sugeridos para caldeiras de acordo com cada faixa de pressão de operação, metalurgia do sistema e tipo de contato com alimentos;
- b) Realizar um levantamento das várias condições que podem interferir na qualidade da água utilizada em caldeiras;
- c) Realizar um levantamento da influência exercida no processo pelos parâmetros sílica, dureza total, alcalinidade total, alcalinidade hidróxida, condutividade específica, pH, ferro total, cobre total, cloretos, turbidez e oxigênio dissolvido, quando fora das faixas de controle;
- d) Desenvolver um software capaz de determinar o tipo de tratamento adequado para a água de reposição e para a água interna de uma caldeira através da faixa de pressão de trabalho do equipamento, além de sugerir as faixas de controle para os parâmetros físico-químicos da água do equipamento e emitir orientações técnicas para melhorias no sistema;
- e) Aplicar o software em um estudo de caso real de forma a verificar a contribuição do uso desse tipo de tecnologia na determinação e monitoramento do pré-tratamento e do tratamento interno da água de caldeiras, além de comparar o tratamento utilizado hoje, na caldeira e no sistema em estudo; com o tratamento sugerido pelo software, além de acompanhar a forma com que as melhorias realizadas no sistema contribuem para o melhor gerenciamento de seus recursos e assim, realizar a validação do software.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 CALDEIRAS

Caldeiras são equipamentos destinados à geração de vapor, seja vapor saturado ou vapor superaquecido, através de uma troca térmica que ocorre em duas etapas. Na primeira etapa, ocorre a transferência de calor entre os gases de combustão e as partes metálicas. Na segunda etapa, ocorre a troca de calor entre o metal e a água no interior do equipamento (SATHISH *et. al*, 2021).

De acordo com Trovati (2009), a caldeira é um equipamento que, dentro de uma unidade de processo, possui alto custo, grande responsabilidade e cujo projeto, manutenção e operação são padronizados e também fiscalizados por normas, códigos e legislações.

O Ministério do Trabalho e Previdência é responsável, no Brasil, por regulamentar, através da aplicação da NR – 13, todas as operações envolvendo caldeiras, vasos de pressão, tubulações e tanques metálicos de armazenamento. Para projeto, controle e monitoramento desses equipamentos, adotam-se, normalmente, códigos específicos. No Brasil, o código comumente utilizado é o código da ASME.

##### 3.1.1 Classificação das caldeiras quanto ao tipo

De acordo com Brunhara (2020), existem cinco tipos de caldeiras: Fogotubulares ou Flamotubulares, Aquatubulares, Mistas, Elétricas e Caldeiras de Serpentinhas, sendo que as mais utilizadas são as caldeiras fogotubulares e as caldeiras aquatubulares.

###### 3.1.1.1 Caldeiras fogotubulares/flamotubulares

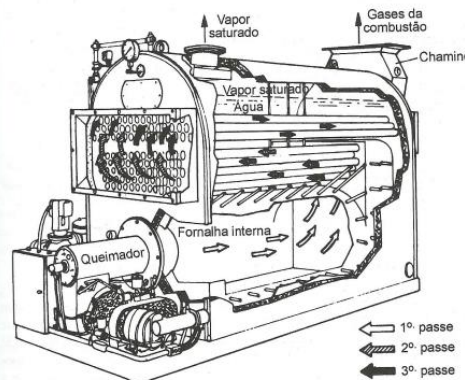
Nesse tipo de caldeira, os gases quentes passam no interior de tubos, ao redor dos quais circula-se a água que será aquecida e evaporada. Os tubos são montados entre espelhos, na

forma de um único feixe tubular e os gases quentes circulam no interior dos tubos (BAZZO, 1992).

Dentre as vantagens desse tipo de caldeira podem ser citados: baixo custo para aquisição do equipamento, pouca exigência de alvenaria e atendimento instantâneo da demanda de vapor. Dentre as desvantagens destacam-se: baixo rendimento térmico, partida lenta devido ao baixo volume interno de água, baixa taxa de vaporização (cerca de  $40 \frac{ton}{h}$ ), limitação de pressão de operação (máximo de  $15 \frac{kgf}{cm^2}$ ), capacidade limitada de produção e dificuldade de instalação de economizador, pré-aquecedor e superaquecedor (LEITE; MILITÃO, 2008).

De acordo com Bazzo (1992), as caldeiras fogotubulares podem ser construídas com fornalha interna ou externa e a capacidade de produção de vapor é maior nas caldeiras de fornalha interna, conforme figura 1 a seguir:

Figura 1 – Caldeira flamotubular de 3 passes



Fonte: BEGA (2003, p. 37)

### 3.1.1.2 Caldeiras aquatubulares

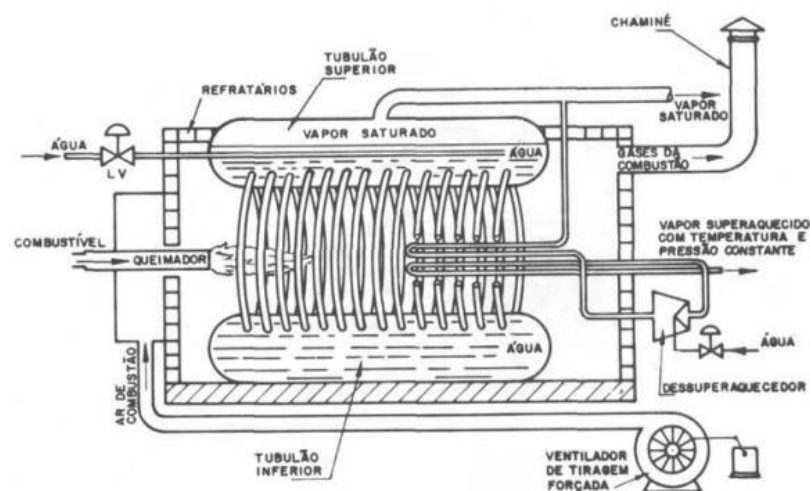
De acordo com Brunhara (2020), as caldeiras aquatubulares surgiram com a necessidade de maiores produções de vapor e maiores pressões de operação. Trata-se de um modelo em que a água ocupa o interior dos tubos, enquanto o fogo e os gases quentes ficam na parte externa.

Existem, hoje, caldeiras operando a uma pressão na ordem de  $300 \frac{kgf}{cm^2}$  (caldeiras supercríticas) e  $2500 \frac{ton}{h}$  (toneladas por hora de produção de vapor).

Existe uma grande variedade no arranjo e na construção desses equipamentos e a concepção mais frequente é com dois balões (tubulões) horizontais, que são posicionados um sobre o outro e ligados entre si pelos tubos do feixe e da parede d'água (BRUNHARA, 2020).

Há alguns anos, utilizavam-se caldeiras com até cinco balões e os projetos mais modernos para caldeiras de pressões elevadas (acima de  $65 \frac{kgf}{cm^2}$ ) utilizam apenas um tubulão, conhecidas também como caldeiras “monodrum” (BRUNHARA, 2020). A figura 2 a seguir ilustra uma caldeira aquatubular:

Figura 2 – Caldeira Aquatubular



Fonte: BEGA (2003, p. 38)

### 3.1.2 Classificação das caldeiras quanto à pressão

Brunhara (2020), apresenta os principais problemas causados por tratamentos inadequados quando não são levadas em consideração as faixas de pressão de operação das caldeiras na escolha do tratamento. O autor classifica as caldeiras em:

- Baixa Pressão: pressão de operação inferior a  $300 \frac{kgf}{cm^2}$  (21,09  $\frac{kgf}{cm^2}$ );
- Média Pressão: pressão de operação entre  $301 \frac{kgf}{cm^2}$  (21,16  $\frac{kgf}{cm^2}$ ) e  $900 \frac{kgf}{cm^2}$  (63,28  $\frac{kgf}{cm^2}$ );

- Alta Pressão: pressão de operação superior a 901 psig ( $63,35 \frac{kgf}{cm^2}$ ).

### 3.2 QUALIDADE DA ÁGUA

De acordo com Aquino (2012), para que seja mantida a confiabilidade e o bom funcionamento do sistema, a água de alimentação das caldeiras é um dos principais fatores a serem analisados, evitando a ocorrência de problemas devido à aplicação de água inadequada para esse fim.

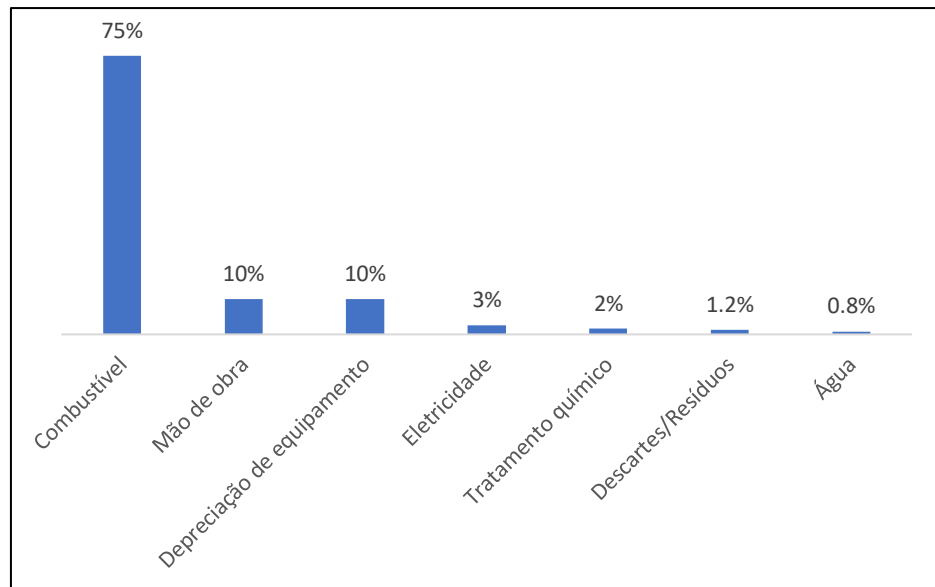
Trovati (2009) defende que a água ideal para a geração de vapor possui as seguintes características: menor concentração possível de sais e de óxidos dissolvidos, ausência de oxigênio e outros gases dissolvidos, materiais em suspensão ausentes, ausência de materiais orgânicos, temperatura elevada e pH adequado (faixa alcalina).

Segundo Lenntech (2021), à medida que o vapor é produzido, ocorre a concentração dos sólidos dissolvidos na água da caldeira e essa concentração leva à formação de depósitos no equipamento. Gases dissolvidos tais como dióxido de carbono e oxigênio levam à corrosão da caldeira.

O tratamento de água para a geração de vapor se inicia antes da caldeira, principalmente em caldeiras de alta pressão. Se alguma impureza chegar à caldeira é preciso elevar as descargas do equipamento, como medida preventiva aos problemas mencionados acima. A descarga (ou purga) da caldeira elimina não somente as impurezas contidas na água como também toda a energia contida nela, sendo necessário aquecer novamente essa água para geração de vapor, consumindo para isso, mais combustível (TROVATI, 2009).

De acordo com Brunhara (2020), o combustível representa 75% dos custos do setor de utilidades em uma operação utilizando caldeira, ou seja, o maior custo desse setor, hoje, ocorre com o consumo de combustíveis e esse consumo é proporcional ao número de purgas realizadas no equipamento em um espaço de tempo. Dessa forma, é preciso trabalhar com menos descargas, o que resultaria em menor consumo de combustível e menores custos. O gráfico 1 a seguir apresenta esses valores:

Gráfico 1 – Custos Operacionais da Caldeira



Fonte: ADAPTADO DE BRUNHARA (2020)

Ainda de acordo com Brunhara (2020), é possível eliminar, de forma antecipada, grande parte dos problemas que ocorrem nos geradores de vapor através de uma água de boa qualidade na alimentação.

### 3.2.1 Impurezas encontradas na água

Kemmer (1988) classifica as impurezas presentes na água em duas diferentes categorias: Matéria Dissolvida e Constituintes Não-Solúveis (matéria em suspensão). Dentre os materiais dissolvidos podem ser citados: cálcio, magnésio, ferro, sílica, carbonatos e bicarbonatos, sais, oxigênio e outros gases dissolvidos.

Dos materiais em suspensão, podem ser citados, principalmente, os materiais orgânicos, sais em suspensão, óleos e argila (TROVATI, 2009).

Todas essas impurezas, quando no interior da caldeira, sofrem um processo de concentração em função da evaporação da água, fenômeno conhecido na operação de uma caldeira como Ciclo de Concentração. A concentração desses compostos no interior da caldeira pode provocar incrustação ou corrosão (BRUNHARA, 2020).



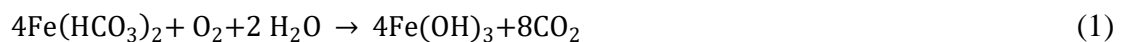
A concentração indesejável dos compostos mencionados ocorre em função do tipo de sistema utilizado para a geração de vapor e, principalmente, da pressão de operação. Quanto maior a pressão de operação, melhor deverá ser a qualidade da água e mais crítico será o tratamento dela (BRUNHARA, 2020).

Chauhan (2019), define Turbidez como sendo o termo aplicado à matéria de qualquer natureza em suspensão e que se precipita lentamente. A matéria em suspensão que se precipita rapidamente pode ser chamada de sedimento.

Segundo Kemmer (1988), o ferro é um componente originado de rochas ígneas e minerais de argila e que, na ausência de oxigênio, é encontrado nas suas formas reduzidas ( $Fe^{2+}$  e  $Fe^{3+}$ ).

A forma mais comum em que o ferro solúvel é encontrado em águas é como bicarbonato ferroso ( $Fe(HCO_3)_2$ ). Esse componente está presente em águas subterrâneas profundas e, em contato com o oxigênio, sedimenta-se em depósitos amarelo-marrom avermelhado, gerando depósitos e crostas de ferro ( $Fe_2O_3$ ) nas caldeiras, além de coloração em produtos que entram em contato com a água em processos industriais (BRUNHARA, 2020).

Seguem as reações do ferro com o oxigênio e também de formação de óxido de ferro, conforme as equações (1) e (2) a seguir:



A dureza da água é proporcional à quantidade de cálcio e magnésio presentes, sendo que a quantidade de cálcio chega a ser duas vezes maior que a quantidade de magnésio. Esses valores podem variar de 5 ppm a 500 ppm como  $CaCO_3$  (KEMMER, 1988).

A sílica é constituinte de todas as águas naturais, superficiais e subterrâneas. Os valores de sílica estão na faixa de 3 ppm a 50 ppm como  $SiO_2$ . Esse componente pode formar sais altamente incrustantes e isolantes (CHAUHAN, 2019).

Baccan (2015) define pH como sendo uma maneira de se medir a acidez ou a alcalinidade da água. O potencial hidrogeniônico (pH) pode alterar o efeito de diversas substâncias e é responsável pela ocorrência de corrosão química na caldeira. Com o  $pH = 7,0$  a água é considerada neutra e quanto mais próxima de  $pH = 0$ , mais ácida é a água e, portanto, mais corrosiva.

Dos gases dissolvidos em água podem ser citados o oxigênio, o gás carbônico, o sulfeto de hidrogênio e o metano. O oxigênio é derivado do contato da água com o ar, enquanto que o dióxido de carbono e o sulfeto de hidrogênio são provenientes da decomposição dos materiais orgânico e inorgânico. O metano, raramente encontrado dissolvido em água, é originado da decomposição do material biológico (BRUNHARA, 2020).

Para a determinação da quantidade de íons dissolvidos em água utiliza-se a condutividade elétrica, que é uma medida indireta da concentração de Sólidos Totais Dissolvidos (STD). Dessa forma, as medidas de condutividade elétrica e de sólidos totais dissolvidos são diretamente proporcionais (LISAUSKAS, 2017).

Os Sólidos Totais Dissolvidos (STD) são a soma de todos os sólidos dissolvidos em água e estão presentes em um intervalo de 25 ppm a 5000 ppm. Seu efeito é limitar a extensão com que a água pode ser concentrada antes de ser descartada do interior da caldeira (KEMMER, 1988).

A alcalinidade mostra a influência de íons fosfatos, hidróxidos, silicatos e bicarbonatos, uma vez que esses íons compõem a alcalinidade da água (BLUMBERG; AZEVEDO NETTO, 1956).

De acordo com Brunhara (2020), para que a sílica se mantenha solúvel no interior da caldeira, a concentração de alcalinidade hidróxida deve ser igual a duas vezes e meia (2,5x) a concentração de sílica. Assim o valor do pH estará em uma faixa de 8,5 a 12,7; que é a menor taxa de corrosão química possível no interior da caldeira.

A água possui diversos íons que podem ser considerados impurezas. Dos ânions presentes na água podem ser citados os cloretos ( $Cl^-$ ), sulfatos ( $SO_4^{2-}$ ) e bicarbonatos ( $HCO_3^-$ ). Dos cátions presentes, ocorrem com maior frequência o cálcio ( $Ca^{2+}$ ), o magnésio ( $Mg^{2+}$ ), o sódio ( $Na^+$ ), e o alumínio ( $Al^{3+}$ ) (BRUNHARA, 2020).

### **3.2.2 Retorno de condensado**

O condensado é originado do processo de condensação do vapor. Essa corrente possui altíssima pureza, justamente pelo fato de que o vapor não leva consigo o material dissolvido. Quanto maior a quantidade de água retornando para alimentação como condensado, menor será

a necessidade de água de reposição e menores serão os custos com pré-tratamento e com combustíveis (BRUNHARA, 2020).

Além da possibilidade de contaminação do condensado por vazamentos, existe a possibilidade de ocorrência de arrastes tanto de água quanto de sólidos da água da caldeira para o vapor. Dentre os métodos mais utilizados para monitoramento dessa corrente podem ser citados, principalmente, a condutividade e o pH, seja de forma manual ou por analisadores on-line (BRUNHARA, 2020).

### 3.3 OBJETIVOS DO TRATAMENTO DE ÁGUA DE CALDEIRA

O tratamento de água de caldeira, seja ele o pré-tratamento, tratamento pré-caldeira, tratamento interno ou tratamento pós-caldeira, tem como objetivos: evitar a formação de incrustações, evitar processos corrosivos e evitar também a ocorrência de arrastes no sistema (KURITA, 2021).

#### 3.3.1 Incrustações

A falta ou operação inadequada do tratamento pré-caldeira ou pré-tratamento, tratamento interno ou tratamento pós-caldeira; ou ainda, a presença de contaminações, podem fazer com que a água da caldeira apresente algumas impurezas, tais como sais e óxidos dissolvidos, que possuem solubilidades diferentes e que, com a vaporização da água da caldeira, ocorre um aumento na concentração desses compostos, que atingem o seu limite de solubilidade e incrustam no interior da caldeira (KURITA, 2021).

Essa aderência dos compostos mencionados pode ocorrer nas superfícies de troca térmica, tais como tubos da parede d'água, tubos da fornalha, tubos do feixe de convecção e tubulões. Além dos sais e óxidos dissolvidos, outras impurezas podem se depositar nas superfícies da caldeira, como por exemplo produtos de corrosão da seção pré e pós-caldeira, materiais orgânicos, sólidos em suspensão e compostos insolúveis advindos do excesso de dosagem de produtos químicos para tratamento (TROVATI, 2009).

Segundo Kurita (2021), as principais consequências da ocorrência de incrustações são:

- Aumento no consumo de combustível, uma vez que encontram-se presentes compostos isolantes, que reduzem ou inibem a troca térmica;
- Redução na vida útil do equipamento, visto que pode ocorrer uma corrosão sobre as incrustações formadas, danificando os equipamentos, além de entupimentos e obstruções dos tubos;
- Aumento no custo da operação, seja com combustível ou com limpeza química para remoção das incrustações.

A prevenção às incrustações pode ser realizada no pré-tratamento, evitando que compostos incrustantes adentrem a caldeira ou no tratamento interno, evitando que os compostos presentes na caldeira incrustem em sua superfície (TROVATI, 2009). As figuras de 3 a 6 evidenciam esse problema:

Figura 3 – Tubulão superior de caldeira com elevada quantidade de lama de origem argilosa



Fonte: TROVATI (2009, p. 35)

Figura 4 - Parte inferior de uma caldeira fogotubular com tubos incrustados por sais de dureza, com lama e depósitos no fundo



Fonte: TROVATI (2009, p. 35)

Figura 5 – Tubo de caldeira aquatubular com incrustações por óxidos de ferro



Fonte: TROVATI (2009, p. 35)

Figura 6 – Presença de incrustações no espelho e no interior dos tubos de uma caldeira aquatubular



Fonte: TROVATI (2009, p. 38)

### 3.3.2 Corrosão

Existem várias formas de o processo corrosivo ocorrer em uma caldeira, dentre os quais pode mos citar: os “Pittings” (ou Pites), Corrosão Ácida, Corrosão sob Depósitos e Corrosão Cáustica.

#### 3.3.2.1 “Pittings” ou pites e corrosão sob depósitos

Os pittings são corrosões localizadas/pontuais que ocorrem quase totalmente devido à presença de oxigênio dissolvido e indevido na água da caldeira. Se o controle a esse tipo de corrosão não for eficiente, pode ocorrer grande penetração do metal (presença de furos) e inutilização do equipamento (BRUNHARA, 2020).

A corrosão localizada também pode ocorrer sobre depósitos formados no interior do equipamento em locais de falha na estrutura do metal e também em locais que são submetidos a tensões elevadas (TROVATI, 2009).

A prevenção a esse tipo de corrosão pode ocorrer através da desaeração mecânica, que remove em torno de 99% do oxigênio da água (se o desaerador for bem operado) e desaeração química, que ocorre pela adição de um composto químico sequestrante de oxigênio (BRUNHARA, 2020). As figuras de 7 a 9 evidenciam essas condições:

Figura 7 – Carcaça de uma caldeira com pontos de corrosão localizada (Pites)



Fonte: TROVATI (2009, p. 53)

Figura 8 – Corrosão por oxigênio dissolvido



Fonte: BRUNHARA (2020, p. 50)



Figura 9 – Corrosão por oxigênio em tubo de superaquecedor



Fonte: TROVATI (2009, p. 54)

### 3.3.2.2 Corrosão ácida

A corrosão ácida é um tipo de corrosão generalizada que ocorre devido à queda no pH pela presença de compostos ácidos advindos de contaminações ou ácidos formados dentro do sistema por decomposição de compostos na linha de vapor (BRUNHARA, 2020).

Ainda de acordo com Brunhara (2020), águas de reposição, principalmente aquelas de origem subterrânea, apresentam altas concentrações de carbonatos ( $CO_3^{2-}$ ) e bicarbonatos ( $HCO_3^-$ ) que, na linha de vapor, em altas temperaturas, são convertidos em dióxido de carbono ( $CO_2$ ). Na corrente de condensado, o dióxido de carbono formado reage com a água, formando ácido carbônico, que reduz o pH do sistema e gera corrosão química, conforme a equação (3) a seguir:



A prevenção a esse tipo de corrosão ocorre pela retenção desses íons no tratamento pré-caldeira e, no caso de escape na reposição, pela neutralização do sistema adicionando-se



compostos químicos alcalinos e voláteis (BRUNHARA, 2020). A figura 10 evidencia um caso de corrosão ácida.

Figura 10 – Linha do retorno de condensado que sofreu processo de corrosão



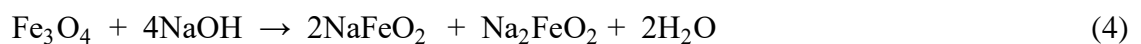
Fonte: BRUNHARA (2020, p. 52)

### 3.3.2.3 Corrosão cáustica

O ataque cáustico é um tipo de corrosão que ocorre devido à alta concentração de alcalinidade hidróxida (íons  $OH^-$ ) que é proveniente da soda cáustica dosada para que o pH seja mantido na faixa alcalina (TROVATI, 2009).

A concentração das hidroxilas é maior próxima à superfície metálica quando comparado ao seio do fluido. Isso ocorre devido à vaporização da água na região (TROVATI, 2009).

A magnetita  $Fe_2O_3$  é um filme passivador que protege a superfície do metal. As hidroxilas em alta concentração reagem com essa camada de magnetita e gera a corrosão cáustica, conforme a equação (4) a seguir:



### 3.3.3 Arraste

Arraste é outro problema causado na água utilizada para a geração de vapor. Os arrastes ocorrem da caldeira para a seção pós-caldeira (linhas de distribuição de vapor, superaquecedor,

turbina e outros equipamentos) e eles podem se dar através do arraste de umidade e/ou arraste de sólidos (TROVATI, 2009).

De acordo com Brunhara (2020), dentre as principais causas químicas do arraste podem ser citadas a alcalinidade hidróxida elevada na caldeira e a consequente geração de espuma, contaminações orgânicas (que também geram espuma), ciclos de concentração elevados e qualquer outra forma de geração de espuma.

Dos prejuízos causados pelo arraste às caldeiras podem ser citados: vapor de baixa pureza, necessidade de troca de tubos do superaquecedor pela ocorrência de furos, baixa eficiência da turbina, parada da turbina para limpeza e compra de energia e também problemas de incrustação e deposição no processo (BRUNHARA, 2020).

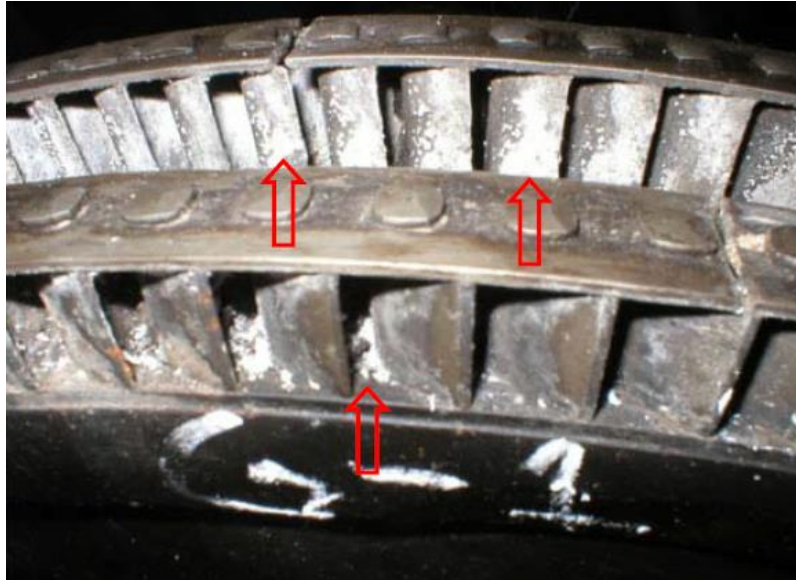
O quadro 1 e as figuras 11 e 12 a seguir evidenciam os problemas observados de acordo com a concentração de sólidos totais no vapor.

Quadro 1 - Problemas observados por arraste na caldeira

<b>Concentração de sólidos totais no vapor (ppm)</b>	<b>Problemas Observados</b>
0 a 0,01	Nenhum
0,01 a 0,1	Possíveis depósitos nas turbinas e filtros.
0,1 a 1,0	Depósitos nas turbinas. Possíveis depósitos nos superaquecedores
Acima de 1,0	Depósitos nas turbinas e também nos superaquecedores

Fonte: TROVATI (2009, p. 69)

Figura 11 - Válvula de regulação de uma turbina com deposição de sais de arraste



Fonte: TROVATI (2009, p. 70)

Figura 12 – Tubo de superaquecedor completamente destruído por sais originados de arraste



Fonte: TROVATI (2009, p. 71)

O quadro 2 a seguir apresenta as principais causas e medidas corretivas para o caso de arraste:

Quadro 2 - Medidas corretivas para cada caso de arraste

<b>Tipo de Arraste</b>	<b>Causa</b>	<b>Medida Corretiva</b>
<b>Químico</b>	Excesso de alcalinidade hidróxida	Ajustar dosagem de soda cáustica, mantendo pH e alcalinidade hidróxida convenientes
	Excesso de sólidos suspensos	Manter a concentração de sólidos suspensos e sólidos dissolvidos abaixo dos níveis aceitáveis
	Excesso de sólidos dissolvidos	Evitar contaminação por orgânicos através de monitoramento contínuo. Em caso de contaminação, isolar a causa e abrir as descargas
	Presença de contaminantes orgânicos (óleos e graxas, detergentes, açúcares, etc)	Em caldeiras com alta taxa de vaporização, fazer uso constante de antiespumantes. Auamentar a dosagem em caso de contaminação

Fonte: adaptado de TROVATI (2009, p. 72)

### 3.4 PRÉ-TRATAMENTO DA ÁGUA DE REPOSIÇÃO

São tratamentos recomendados para a remoção de todas as impurezas que estão presentes na água de reposição, evitando consequências no interior das caldeiras. A atuação do pré-tratamento ocorre, primeiramente, sobre as impurezas mais grosseiras, como por exemplo, a turbidez (sólidos em suspensão) e os materiais orgânicos (TROVATI, 2009).

Após a remoção ou redução da turbidez e dos materiais orgânicos, dependendo da necessidade do sistema de geração de vapor e da pressão da caldeira, outras etapas do pré-tratamento, tais como Abrandamento e Desmineralização (por troca iônica ou por osmose reversa) são inseridas, com a finalidade de realizar a remoção dos sais dissolvidos (BRUNHARA, 2020).

Por fim, realiza-se um processo de desaeração para a remoção de oxigênio e outros gases dissolvidos na água, que ocorre na seção pré-caldeira com o uso de um desaerador mecânico (BRUNHARA, 2020).

### 3.4.1 Oxidação

A oxidação é o primeiro tratamento químico da água bruta e que ocorre através da adição de um agente oxidante, como por exemplo: hipoclorito de sódio, cloro gás, dióxido de cloro, ácido tio-isocianúrico, peróxido de hidrogênio, hipoclorito de cálcio ou ozônio (BRUNHARA, 2020).

A finalidade da etapa de oxidação é a remoção de matéria orgânica e do ferro, que são componentes que envenenam as resinas de abrandadores, desmineralizadores e as membranas da osmose; além do fato de que a matéria orgânica não decanta, motivo pelo qual ela precisa ser oxidada (RAMOS, 2010).

A quantidade de cloro necessária para a oxidação depende da qualidade da água, da carga orgânica e da vida biológica presentes na água. Os oxidantes mais usados são hipoclorito de sódio, cloro gás, dióxido de cloro e ácido tio-isocianúrico em função da sua disponibilidade, eficiência e custo benefício (BRUNHARA, 2020).

### 3.4.2 Clarificação

A clarificação da água é realizada quando se utiliza água de superfície e pode ser realizado através de uma Estação de Tratamento de Água (ETA) Convencional ou através de Ultrafiltração (uso de membranas). O processo de clarificação é realizado para a remoção de sólidos suspensos não dissolvidos, que provocam a turbidez da água, como por exemplo: material biológico, lama e areia. No sistema convencional a clarificação é constituída das seguintes etapas: Oxidação, Coagulação, Floculação e Filtração (KEMMER, 1988).

#### 3.4.2.1 Coagulação, floculação e filtração

Após o processo de oxidação, inicia-se o processo de clarificação. O processo de clarificação convencional consiste nas etapas de Coagulação, Floculação e Filtração. A coagulação é realizada pela aplicação de um agente coagulante, que pode ser sulfato de alumínio isento de ferro, sulfato de alumínio ferroso, policloreto de alumínio (PAC), cloreto férrico ou tanino (BOTARI; BOTARI; GREATTI, 2016).

#### 3.4.2.2 Clarificação por membranas de ultrafiltração

Membranas de ultrafiltração são membranas semipermeáveis de filtração utilizadas para a remoção de sólidos suspensos da água, reduzindo a turbidez. Esse processo tem a mesma função da clarificação e pode substituir uma ETA convencional (MIERZWA *et al.*, 2008).

A ultrafiltração possui as vantagens de utilizar menos produtos químicos, utilizar menos espaço para instalação quando comparada com uma ETA convencional; manter uma qualidade constante da água clarificada independentemente da qualidade da água bruta e ter uma eficiência de 99% na remoção de patógenos. Esse processo produz água a uma turbidez menor que 0,1 NTU (FUSATI, 2020).

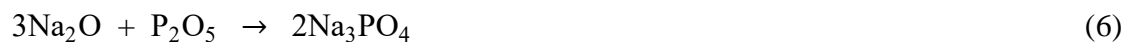
#### 3.4.3 Abrandamento

O abrandamento é um tratamento complementar que visa à remoção de cálcio e magnésio da água clarificada, utilizando-se para isso, resinas de troca iônica, que são pequenas esferas porosas de material plástico com íons de sódio ligados na sua superfície (CARVALHO; SILVA, 2021).

Nesse processo, a água a ser tratada passa por um vaso que contém o leito de resinas (leito catiônico). No leito catiônico ocorre a troca iônica do cálcio ( $Ca^{2+}$ ) e do magnésio ( $Mg^{2+}$ ) pelo sódio ( $Na^+$ ), processo conhecido como Ciclo Hidrogênio, até que o leito fique saturado, momento em que o leito deve ser regenerado com solução de cloreto de sódio. Alguns cuidados devem ser tomados no processo de abrandamento, como por exemplo, íons de ferro,

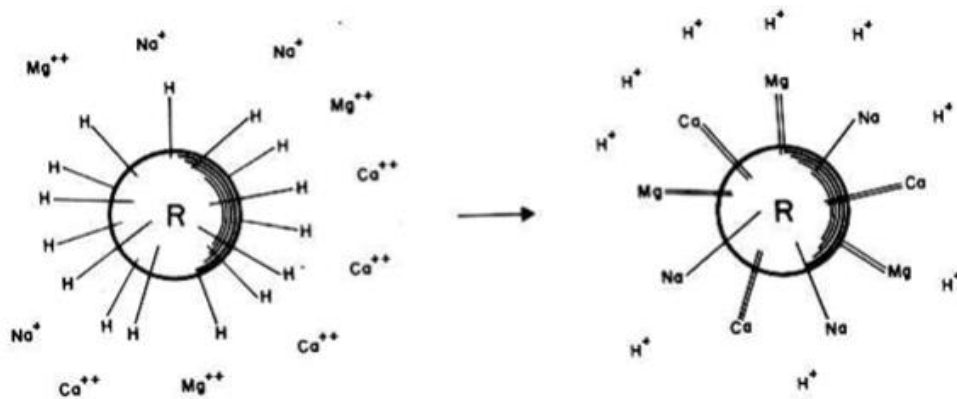
sólidos suspensos e matéria orgânica, que podem causar o envenenamento das resinas. (CARVALHO; SILVA, 2021).

De acordo com Brunhara (2020), o abrandador é um equipamento de baixo custo de instalação, quando comparado com equipamentos utilizados para desmineralização, baixo tempo e baixo custo de regeneração. Entretanto, abrandadores não são as melhores escolhas para água com alto teor de sílica e de ferro, pois, além do fato de os íons de ferro causarem o envenenamento da resina, alguns compostos incrustantes podem ser formados no interior da caldeira, tais como silicato de sódio ( $Na_2SiO_3$ ) formado pela reação entre a sílica e o sódio liberado pela resina, segundo a equação (7) fosfato de ferro ( $FePO_4$ ), de acordo com a equação (5), e fosfato trissódico ( $Na_3PO_4$ ), segundo a equação (6) formados pela reação do ferro de alimentação ou do sódio liberado pela resina com fosfatos utilizados no tratamento interno da caldeira, ou até mesmo, incrustação pela própria sílica ( $SiO_2$ ). As reações de formação desses compostos estão evidenciadas pelas equações (5), (6) e (7) a seguir:



Compostos formados por sílica, como por exemplo o Silicato de Sódio, formado a partir da equação (7), são altamente incrustantes, altamente isolantes e de difícil remoção. A Figura 13 ilustra o processo de troca iônica.

Figura 13 – Ilustração de um processo de troca iônica por Ciclo Hidrogênio



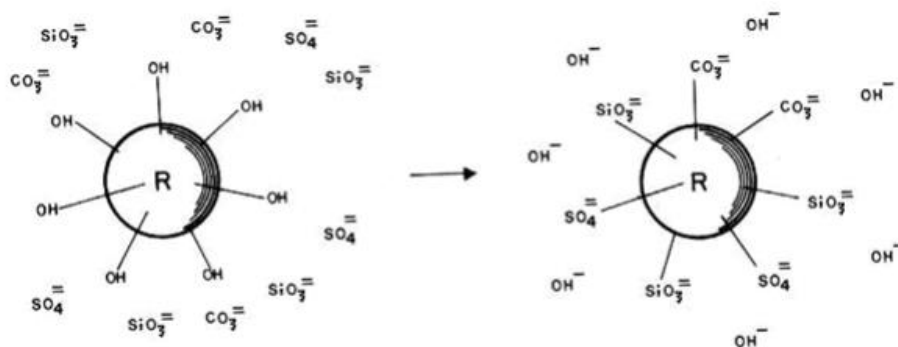
### 3.4.4 Desmineralização

A desmineralização é a melhor opção para o pré-tratamento da água de caldeiras, sejam caldeiras de baixa, média ou alta pressão, uma vez que ela produz água com teores de impureza extremamente baixos, a níveis de ppb, permitindo operações com elevados ciclos de concentração, baixa vazão de descargas, baixo consumo de produtos químicos e, principalmente, baixo consumo de combustível, que representa 75% do custo total do setor de utilizadas em uma operação de caldeira (BRUNHARA, 2020).

#### 3.4.4.1 Desmineralização por troca iônica

Nesse processo a água passa por um vaso de resina catiônica de ciclo de hidrogênio e, em seguida, por um vaso de resina aniônica. Dentre os íons que esse processo remove, podem ser citados, principalmente: cálcio, magnésio, sílica, silicatos solúveis, carbonatos, bicarbonatos, sulfatos, nitratos, cloreto e ferro, deixando a água quase isenta de sais dissolvidos. O leito de resina catiônica deve ser regenerado com ácido clorídrico ou ácido sulfúrico após a sua saturação. O leito de resina aniônica deve ser regenerado com hidróxido de sódio (BRUNHARA, 2020). A figura 14 ilustra esse processo de troca iônica e a figura 16 ilustra um conjunto de vasos de desmineralização.

Figura 14 – Princípio de funcionamento de uma resina aniônica



Fonte: TROVATI (2009, p. 28)



Figura 15 – Conjunto de vasos de um sistema de desmineralização



Fonte: TROVATI (2009, p. 28)

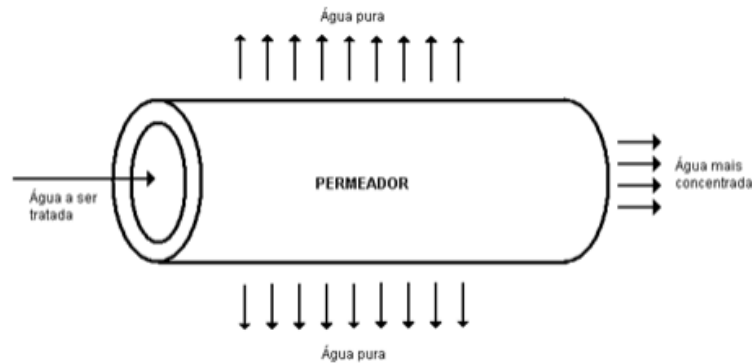
A água desmineralizada pode ainda, dependendo do processo e da qualidade da água, passar por um leito misto de resinas, o que garante maior pureza da água de reposição. No leito misto as duas resinas estão misturadas em um mesmo vaso e esse processo é utilizado como polimento de água desmineralizada (BRUNHARA, 2020).

#### 3.4.4.2 Desmineralização por osmose reversa

Na Osmose Reversa a água passa por um dispositivo chamado de “permeador”, no qual os sais presentes na água são retidos por membranas seletivas. A água pura que passou pela membrana é aproveitada, enquanto que a água não permeada, ou seja, o rejeito, é descartada com uma concentração maior de sais dissolvidos (TROVATI, 2009).

De acordo com ALPHENZ (2022), a osmose reversa é capaz de remover 99% da dureza, condutividade, cálcio e magnésio, podendo ser utilizada no pré-tratamento da água de torres e caldeiras industriais e os projetos apresentam características específicas de acordo com as aplicações de cada cliente. A figura 16 ilustra um sistema de osmose reversa:

Figura 16 – Operação de osmose reversa



Fonte: TROVATI (2009, p. 29)

As membranas que operam em osmose reversa podem ser fabricadas de diversos materiais, sendo as membranas poliméricas as mais comuns, que são constituídas de celulose, polisulfona, poliacrilonitrila e polipropileno. Cloro e micro-organismos podem deteriorar as membranas, devendo, portanto, ser eliminados em uma etapa anterior. O cloro pode ser removido por Metabissulfito de Sódio uma vez que o uso do carvão ativado não é recomendado para essa finalidade em sistemas de osmose reversa por ser uma fonte de proliferação de micro-organismos (BRUNHARA, 2020).

Ainda de acordo com Brunhara (2020), periodicamente, dependendo das condições operacionais do sistema, deve ser realizado um procedimento de limpeza química das membranas da osmose com a utilização dos seguintes ativos:

- Agente alcalino e tensoativos, para remoção da deposição orgânica;
- Agente ácido para remoção da deposição inorgânica;
- Biocida para desinfecção do sistema.

A escolha do tratamento da água de reposição da caldeira deve ser realizada em função das características físico-químicas da água bruta e da pressão de operação da caldeira, uma vez que, quanto maior a pressão, mais rigoroso deverá ser o controle e monitoramento e maior deverá ser a qualidade da água do sistema para garantia da estabilidade do sistema. O quadro 3 a seguir apresenta os diversos sistemas normalmente utilizados para pré-tratamento em função da pressão da caldeira.

Quadro 3 – Sistemas de pré-tratamento em função da pressão da caldeira

Pressão (psig)	Tecnologias Utilizadas para Pré-Tratamento da Água de Reposição
Até 300	Clarificação (mínimo) Abrandamento (dependendo do teor de dureza total) Desmineralização (ideal)
301 - 900	Clarificação + Abrandamento (mínimo) Desmineralização (ideal)
> 901	Clarificação + Desmineralização + polimento da água desmineralizada (mínimo) + polimento de condensado (dependendo do teor de ferro do condensado)

Fonte: BRUNHARA (2020, p. 36)

### 3.5 TRATAMENTO PRÉ-CALDEIRA

De acordo com Brunhara (2021), o sistema pré-caldeira pode ser composto por tanques de alimentação, que são tanques não pressurizados no qual água fria e condensado são misturados, que são comuns em caldeiras de alta pressão e raros em caldeiras de média e alta pressão. O sistema pré-caldeira também pode ser composto por desaeradores, que são tanques pressurizados e que trabalham na faixa de  $0,2 \frac{kgf}{cm^2}$  a  $1,0 \frac{kgf}{cm^2}$  de pressão.

O desaerador realiza o trabalho de desaeração mecânica e é responsável pela remoção de 99% do oxigênio presente na água de alimentação. A remoção do oxigênio residual e a ação em caso de falha na desaeração mecânica fica por conta dos sequestrantes de oxigênio, ou seja, da desaeração química (TOGAWA, 2018).

De acordo com as diretrizes da ASME, sugere-se que a concentração de oxigênio dissolvido na água de alimentação esteja abaixo de 0,007 ppm (partes por milhão) para qualquer faixa de pressão como forma de prevenir a corrosão por oxigênio, conforme a tabela 1 a seguir:

Tabela 1 - Diretrizes ASME para o teor de oxigênio dissolvido de acordo com cada faixa de pressão

Diretrizes da ASME para caldeiras aquatubulares com requisitos restritivos de pureza de vapor								
Pressão de operação do tambor de vapor	psig (0 - 300)	psig (301 - 450)	psig (451 - 600)	psig (601 - 750)	psig (751 - 900)	psig (901 - 100)	psig (1001 - 1500)	psig (1501 - 2000)
<b>Água de Alimentação</b>								
Oxigênio Dissolvido ppm (mg/L) de O <sub>2</sub> medido antes da adição de sequestrante de oxigênio	<0,007	<0,007	<0,007	<0,007	<0,007	<0,007	<0,007	<0,007

FONTE: adaptado de ASME (1979)

### 3.6 LIMPEZA QUÍMICA PRÉ-OPERACIONAL

De acordo com Brunhara (2020), as caldeiras precisam estar limpas antes do início da operação. Dessa forma, faz-se necessário um procedimento de limpeza química pré-operacional, também conhecido como “boil out” para remoção de óxidos, restos de materiais de montagem, carepas, óleos e graxas. As etapas desse tipo de limpeza são dadas de acordo com a faixa de pressão da caldeira, conforme o quadro 4 abaixo:

Quadro 4 - Etapas para limpeza química pré-operacional

Etapa necessária	Faixa de Pressão	
	< 600 psig	> 600 psig
Limpeza química alcalina	X	X
Descarga das linhas de vapor	X	X
Limpeza química ácida	-	X
Lavagem com tenso-ativos na seção pré-caldeira	-	X
Passivação	-	X

Fonte: adaptado de BRUNHARA (2020, p. 37)

### 3.7 TRATAMENTO INTERNO

O Tratamento Interno ocorre no interior da caldeira através da dosagem de produtos químicos destinados à prevenção aos fenômenos de corrosão, incrustação e arraste. Esse tratamento ocorre através da aplicação de sequestrantes de oxigênio, alcalinizantes da linha de vapor e de condensado e anti-incrustantes, que se subdividem em: precipitantes, quelantes e dispersantes (TROVATI, 2009).

#### 3.7.1 Tratamento com sequestrantes

Sequestrantes de oxigênio são compostos químicos que reagem com o oxigênio, removendo o oxigênio dissolvido da água e inibindo o processo de corrosão (CARVALHO, 2021).

Os sequestrantes mais utilizados em processos de geração de vapor, no Brasil e no mundo, são: Sulfito de Sódio, Bissulfito de Sódio, Hidrazina, Carbohidrazida, DEHA, Hidroquinona e Ácido Ascórbico. A escolha do sequestrante é realizada, principalmente, a partir da pressão de operação do sistema, da metalurgia do sistema e o tipo de contato do vapor com alimentos (direto ou indireto) no caso de indústrias alimentícias (BRUNHARA, 2021).

Seguem, na tabela 2 a seguir, as informações de dosagem, residual, temperatura e pH de aplicação de acordo com cada sequestrante:

Tabela 2 - 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: BRUNHARA (2021)

### 3.7.1.1 Sulfito de sódio

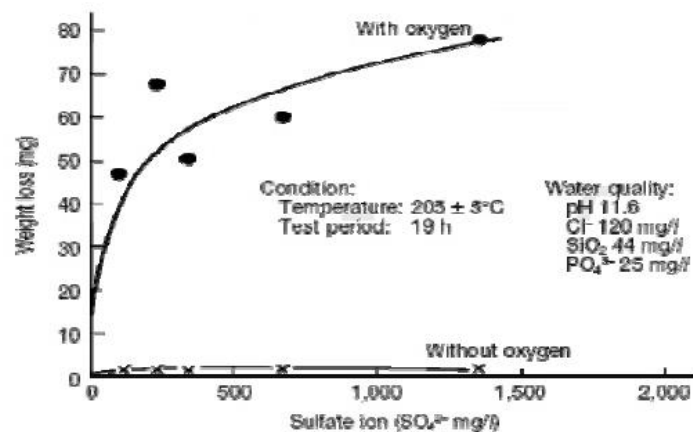
O sulfito de sódio é um sequestrante muito utilizado para aplicações em caldeiras, uma vez que possui baixa dosagem estequiométrica, alta eficiência e baixo custo, além de ser aprovado pelo FDA (“Food and Drugs Administration”, Agência Federal dos EUA) para uso em sistemas cujo vapor entra em contato direto com alimentos (CARVALHO, 2021).

Segue a equação (8) da reação do sulfito de sódio com o oxigênio:



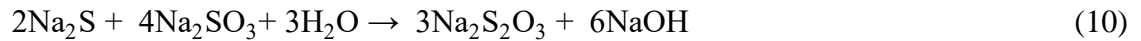
A reação do sulfito de sódio com oxigênio forma sulfato de sódio, que aumenta a concentração de sólidos totais dissolvidos e, conseqüentemente, a condutividade, tornando necessária, muitas vezes, a realização de purgas para desconcentrar o sistema. Se a dosagem de sulfito de sódio for insuficiente, a presença de sulfatos e de oxigênio pode acelerar os processos corrosivos, conforme podemos verificar no gráfico 2 a seguir:

Gráfico 2 – Perda de massa da superfície metálica de acordo com o teor de sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) na água



Fonte: CARVALHO (2021)

Ainda de acordo com Carvalho (2021), o sulfito de sódio se decompõe em temperaturas acima de 285°C de acordo com as seguintes equações (Equações de 9 a 11):



Segundo Brunhara (2021), a reação da equação (11) ocorre em pressões acima de 900 psig. Devido aos subprodutos formados, que podem gerar processos corrosivos no sistema, a utilização de sulfito de sódio fica limitada a caldeiras com pressão de operação abaixo de 65  $\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ , o que limita a sua aplicação, dessa forma, a caldeiras de baixa e média pressão para contato direto ou indireto do vapor com alimentos.

#### 3.7.1.2 Bissulfito de sódio

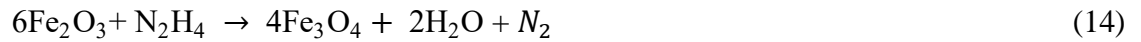
O uso bissulfito de sódio como sequestrante, da mesma forma que o sulfito de sódio, requer baixa dosagem estequiométrica, é um composto químico de baixo custo e eficiente, entretanto, além de não ser um sequestrante aprovado pelo FDA para uso em contato direto com alimentos é um composto que forma ácidos em sua decomposição, sendo prejudicial para o sistema a depender do pH da água de alimentação (BRUNHARA, 2021). Segue a reação (equação 12) do bissulfito de sódio quando utilizado como sequestrante:



#### 3.7.1.3 Hidrazina

Dos sequestrantes de oxigênio listados acima, a hidrazina seria a melhor opção técnica e comercial, sendo um ótimo sequestrante por realizar a passivação da superfície e por não gerar sólidos no sistema, entretanto, sua aplicação possui forte restrição por ser considerada carcinogênica e por formar amônia na sua decomposição a depender das condições de

temperatura e pressão. A amônia é corrosiva para o cobre, que pode compor a metalurgia do sistema (BRUNHARA, 2021). Seguem as equações de (13) a (15) para a Hidrazina:



#### 3.7.1.4 Carbohidrazida, ácido ascórbico, deha e hidroquinona

De acordo com Brunhara (2021), sequestrantes como a DEHA e a Hidroquinona geram subprodutos que podem ser danosos ao sistema, tais como a geração de ácidos, que geram a queda de pH e aumentam a possibilidade de corrosão química, conforme as equações (16) e (17) a seguir, que dizem respeito à reação da DEHA e da Hidroquinona, respectivamente, com oxigênio:



A carbohidrazida e o Ácido Ascórbico são opções de sequestrantes que não apresentam impedimentos com relação à pressão de operação, sendo boas opções técnicas e comerciais para caldeiras de alta pressão. Desses dois sequestrantes, apenas o ácido ascórbico é aprovado pelo FDA para uso em sistemas cujo vapor entra em contato direto com alimentos (BRUNHARA, 2021). Seguem as reações da Carbohidrazida (Equação 18) e do Ácido Ascórbico (Equação 19) com o oxigênio:





### 3.7.2 Tratamento anti-incrustante

O tratamento anti-incrustante pode ser baseado na dosagem de fosfatos (Tratamento Precipitante), agentes quelantes (Tratamento Quelante) ou Dispersantes (Tratamento Disperso-solubilizante), que são indicados para caldeiras de baixa e média pressão. Para caldeiras de alta pressão, indica-se o Tratamento Fosfato Congruente (TROVATI, 2009).

#### 3.7.2.1 Tratamento precipitante

O Tratamento Precipitante é um dos tratamentos mais utilizados na prevenção a incrustações na caldeira. Esse tratamento é realizado à base de fosfatos (fosfatos monodissódicos, fosfatos trissódicos ou polifosfatos). O íon fosfato ( $PO_4^{3-}$ ) liberado na água nesse tipo de tratamento reage com o cálcio ( $Ca^{2+}$ ) que compõe a dureza e com a hidroxila ( $OH^-$ ) liberada pelo hidróxido de sódio dosado de forma estequiométrica, formando uma lama “desejável”, conhecida como Hidroxiapatita de Cálcio ( $Ca_3(PO_4)_2 \cdot Ca(OH)_2$ ), que é removida nas descargas de fundo (TROVATI, 2009). Segue a equação (19) de formação desse composto:



A hidroxila ( $OH^-$ ) é dosada de forma que seu residual também possa reagir com a sílica ( $SiO_3$ ) e com o magnésio ( $Mg^{2+}$ ) presentes na água, formando o Hidroxilato de Magnésio ( $2MgSiO_3 \cdot Mg(OH)_2 \cdot H_2O$ ), um composto formador de uma lama “desejável” que também é removida nas descargas de fundo e conhecida como Serpentina (TROVATI, 2009). Segue a reação de formação desse composto (Equação 20):



Além do fosfato é dosado um “condicionador de lama”, que dispersa a lama formada, evitando que ela incruste na superfície de aquecimento. Para essa finalidade podem ser dosados produtos tais como polímeros baseados em acrilatos (Exemplo: Poliacrilato de Sódio), sulfonados e fosfina carboxílicos (BRUNHARA, 2020).

### 3.7.2.2 Tratamento quelante

De acordo com Trovati (2009), o Tratamento Quelante é baseado na quelação (complexação) de íons de cálcio e magnésio presentes na água, formando complexos hidrossolúveis e estáveis sem que haja a formação de lama, evitando qualquer tipo de incrustação. Os agentes quelantes mais utilizados para esse fim são o EDTA (sal do ácido etilenodiaminotetracético) e NTA (Nitrilo Acetato).

Esse tipo de tratamento também é indicado para caldeiras de baixa e média pressão com baixo teor de dureza, uma vez que quelantes em alto teor na caldeira podem gerar corrosão (BRUNHARA, 2020)

### 3.7.2.3 Tratamento dispersante

De acordo com Trovati (2009), o tratamento com dispersantes (ou disperso-solubilizantes) é um tratamento moderno baseado na dispersão (modificando-se o tamanho dos cristais), na modificação do formato do cristal e na redução na tendência à precipitação de compostos de cálcio e magnésio, efeito conhecido como “Threshold” ou “Limiar”.

Assim como os agentes quelantes, esse tipo de tratamento não forma lama, apresenta também, boa dispersão para o ferro, indicado para caldeiras de baixa e média pressão. Trata-se do uso de ácidos carboxílicos e seus derivados, sendo utilizado, geralmente, juntamente com uma baixa dosagem de quelantes (BRUNHARA, 2020).

### 3.7.2.4 Tratamento fosfato congruente (cpt), fosfato de equilíbrio (ept) e tratamento com fosfato (pt)

De acordo com Selby (2009), os programas originais de tratamento de água de caldeira utilizando fosfato utilizavam altos níveis de fosfato para prevenção a incrustações. Com o avanço da tecnologia e o desenvolvimento de caldeiras de alta pressão, começaram a surgir diversos casos de danos aos tubos das caldeiras atribuídos ao ataque cáustico.

Antes do surgimento das tecnologias de pré-tratamento da água de reposição por troca iônica, o fosfato fornecia tanto controle do pH quanto proteção à entrada de íons formadores de incrustações (SELBY, 2009).

Na época, como não existiam caldeiras de alta pressão e nem tecnologias de pré-tratamento, as caldeiras eram alimentadas com água bruta e, para prevenção à incrustações por sais de cálcio e magnésio, utilizava-se um tratamento interno à base de soda cáustica (NaOH) e carbonato de sódio ( $Na_2CO_3$ ), que fazia com que o carbonato de cálcio ( $CaCO_3$ ) precipitasse sobre uma camada (mais aderente) de sulfato de cálcio ( $CaSO_4$ ), gerando incrustações e prevenindo o sistema apenas contra a corrosão (SELBY, 2009).

Mais tarde, descobriu-se que o tratamento com fosfato poderia prevenir tanto contra a corrosão quanto contra incrustações. Assim, misturas de fosfato trissódico ( $Na_3PO_4$ ) e fosfato dissódico ( $Na_2HPO_4$ ) ou fosfato monossódico ( $NaH_2PO_4$ ) foram alimentadas na caldeira de forma a manter o pH da caldeira a uma faixa de 5 a 15 ppm e uma e uma faixa de pH equivalente a uma razão sódio-fosfato (Na: $PO_4$ ) de 2,85:1 a 3:1 (SELBY, 2009).

Ainda segundo Selby (2009), esse não era mais um programa que utilizava fosfato como agente precipitante (formador de lama) como é utilizado em caldeiras de baixa e média pressão. O objetivo desse tipo de tratamento era apenas controlar o pH, entretanto, alguma prevenção contra a entrada de sais ainda foi mantida pelo Tratamento com Fosfato (PT) que agora, exigia uma água de reposição consistente e de alta pureza.

Esse tipo de tratamento tem como pré-requisito zero dureza na alimentação, uma vez que o fosfato é dosado apenas para controle do pH a uma proporção estequiométrica Na/ $PO_4$  (BEBER, 2015).

O tratamento utilizando de fosfato trissódico ( $Na_3PO_4$ ) e fosfato dissódico ( $Na_2HPO_4$ ) ou fosfato monossódico ( $NaH_2PO_4$ ) ainda gerou ataque cáustico, principalmente nos casos em que a pressão da caldeira aumentou para valores acima de 1500 psig ( $P > 105,46 \text{ kgf/cm}^2$ ), possivelmente, por ação de fosfato ácido. Dessa forma, foi desenvolvido o Programa de

Tratamento de Fosfato Congruente (CPT) de forma que fosse reduzido o pH da caldeira e fossem evitados os ataques cáusticos (BEBER, 2015).

O CPT operou mantendo-se uma concentração de fosfato de 2 a 5 ppm de  $PO_4$ , podendo chegar até 10 ppm. A razão sódio-fosfato ( $Na:PO_4$ ) era mantida de 2,3:1 a 2,6:1; variando de um mínimo de 2,1:1 a um máximo de 2,8:1. O Tratamento de Fosfato Congruente gerou o que é conhecido como “*esconderijos de fosfatos*” (“Phosphates Hideout”) e falhas no tubo da caldeira devido à ação de corrosão de fosfatos ácidos (SELBY, 2009).

A partir dos resultados utilizando o Tratamento Fosfato Congruente, projetou-se um programa de tratamento chamado de Tratamento de Fosfato de Equilíbrio (EPT) utilizando-se baixos níveis de fosfato e permitindo uma pequena quantidade de cáustico livre de forma a prevenir o “*esconderijo de fosfato*” e a corrosão por fosfato ácido. O tratamento EPT foi operado utilizando-se fosfato trissódico ( $Na_3PO_4$ ) mantendo-se uma faixa de controle de fosfato < 2 ppm de  $PO_4$  com até 1 ppm de hidróxido livre ( $OH^-$ ) (SELBY, 2009).

Ainda de acordo com Selby (2009), o EPT minimiza o “*esconderijo*” de fosfatos, mas não protege o sistema contra corrosão resultante de espécies aniônicas, tais como cloreto e sulfato. De acordo com o Electric Power Research Institute (EPRI), o EPT tem sido associado a danos causados pelo hidrogênio.

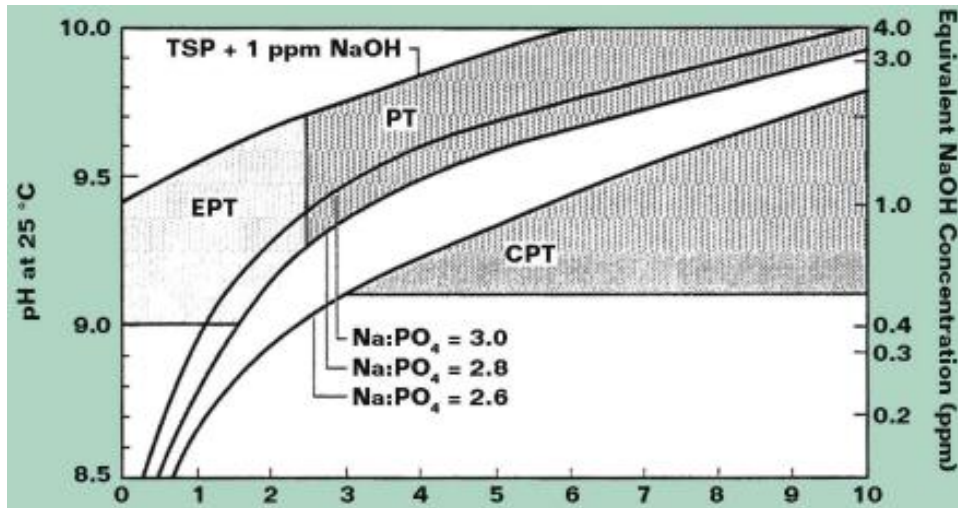
Dado que foram identificados danos de corrosão por fosfato ácido no programa CPT, o uso deste programa de tratamento foi substituído pelo EPT que, de acordo com o Electric Power Research Institute (EPRI), tem sido associado a danos causados pelo hidrogênio (SELBY, 2009).

Assim, após todas as constatações de danos causados tanto pelo CPT quanto pelo EPT, o EPRI desenvolveu o conceito de Fosfato Contínuo (CP) em que a concentração de fosfato é uma função da água de alimentação e da pureza do vapor. O EPT deixou de existir no CP e uma das recomendações do EPRI é que não sejam utilizados polímeros e que seja utilizado apenas fosfato trissódico ( $Na_3PO_4$ ) em vez de misturas contendo fosfato trissódico ( $Na_3PO_4$ ) e fosfato dissódico ( $Na_2HPO_4$ ) ou fosfato monossódico ( $NaH_2PO_4$ ) (SELBY, 2009).

O programa Fosfato Contínuo (CP) estabelece uma concentração mínima de fosfato de 0,2 ppm de  $PO_4$  e sua faixa de tratamento é limitada pela linha de razão molar ( $Na:PO_4$ ) de 3,0 e pela linha Fosfato Trissódico (TSP) + 1 ppm de Hidróxido de Sódio (NaOH) representada pela Figura 19 a seguir.

O gráfico 3 é um gráfico que resume as faixas de controle que foram utilizadas para PT, CTP e EPT. Nota-se que tanto CTP quanto EPT não fazem parte dos programas recomendados pelo EPRI.

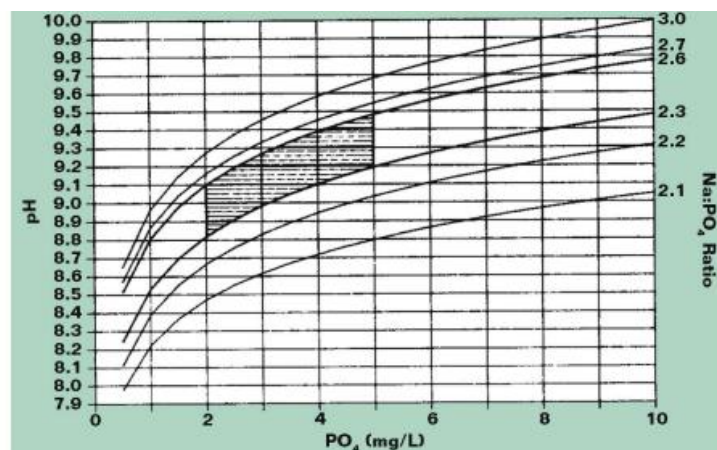
Gráfico 3 – Regiões PT, CTP e EPT



Fonte: SELBY (2009, p. 2)

O Gráfico 4 a seguir mostra uma carta de controle CTP típica para o Programa de Tratamento com Fosfato (PT), evidenciando uma “caixa” de controle com um tratamento a uma concentração de fosfato ( $PO_4$ ) de 2 a 5 ppm e uma razão sódio-fosfato ( $Na:PO_4$ ) de 2,3:1 a 2,6:1.

Gráfico 4 – Carta de Controle CTP Típica



Fonte: SELBY (2009, p. 2)

### 3.7.3 Tratamento neutralizante

De acordo com Trovati (2009), a água do retorno de condensado de sistemas geradores de vapor apresentam, geralmente, um teor ácido devido à presença de ácido carbônico. Esse ácido é formado devido à presença de íons carbonato ( $CO_3^{2-}$ ) e bicarbonato ( $HCO_3^-$ ) presentes na água, principalmente em águas de fonte subterrânea. Esse processo é descrito pelas equações (21) e (22) a seguir:



A presença de ácido carbônico na linha de condensado gera uma queda de pH, sendo necessária, para correção e prevenção à corrosão química, a dosagem de compostos alcalinos voláteis que sejam capazes de vaporizar junto com a água e, na condensação, neutralizar a corrente de condensado (TROVATI, 2009).

Ainda de acordo com Trovati (2009), são usadas para esse fim as seguintes aminas: amônia (na forma de hidróxido de amônio -  $NH_4OH$ ), Morfolina e Ciclohexilamina. A escolha da amina ocorre em função da diferença de volatilidade desses compostos, uma vez que aminas muito voláteis como a amônia não são recomendadas para altas pressões (em função das elevadas temperaturas do processo) e elas tendem a se acumular nas áreas mais frias do sistema. Outro requisito na escolha do tipo de amina é a metalurgia do sistema, dado que a amônia é corrosiva para o cobre.

## 3.8 CICLOS DE CONCENTRAÇÃO

Ciclos de concentração podem ser descritos como o número de vezes em que a água pode se concentrar na caldeira até que seja atingido o limite de solubilidade dos sais. Conforme

a água evapora no interior da caldeira, as impurezas presentes na água vão se concentrando no interior do equipamento (TOGAWA, 2018).

Com a evaporação da água, o número de ciclos e os sólidos totais dissolvidos aumentam, aumentando também a condutividade elétrica da água. Esse aumento gera como consequência a necessidade de realização de purgas (ou descargas) para a correção desses parâmetros (TOGAWA, 2018).

### 3.8.1 Ciclo de concentração permissível

É o ciclo com o qual se pode trabalhar de acordo com as características da água de reposição, sendo portanto, determinado por essa corrente. De acordo com Brunhara (2020), o ciclo de concentração pode ser calculado através das equações de (23) a (26) a seguir, em que o ciclo permissível é o menor valor obtido a partir dos cálculos realizados com essas equações:

$$C_{SiO_2} = \frac{\text{Sílica permitida na caldeira}}{SiO_2 - (0,4 * Mg)} \quad (23)$$

$$C_{Alcalinidade\ Total} = \frac{\text{Alcalinidade Total permitida na caldeira}}{\text{Alcalinidade Total} - \frac{1}{2}(\text{Dureza Total})} \quad (24)$$

$$C_{SS} = \frac{\text{Sólidos Suspensos permitidos na caldeira}}{\text{Dureza Total}} \quad (25)$$

$$C_{STD} = \frac{\text{STD permitos permitidos na caldeira}}{\text{STD} + (O_2 * 12,7)} \quad (26)$$

em que os valores permitidos na caldeira (numeradores das equações) são determinados pelas diretrizes da ASME ou da American Boilers Manufacturers Association (ABMA).

Da equação (23):  $C_{SiO_2}$  é o ciclo determinado pela concentração de sílica permitida na caldeira, concentração de sílica na alimentação e concnetração de Magnésio (Mg) na alimentação.

Da equação (24): o termo  $(\text{Alcalinidade Total} - \frac{1}{2}(\text{Dureza Total}))$  são valores desses parâmetros na alimentação. Trata-se do cálculo do ciclo de concentração a partir da alcalinidade total.

Da equação (25): o denominador é dado pela dureza total na alimentação. Trata-se do cálculo do ciclo de concentração a partir da concentração de sólidos suspensos.

Da equação (26): STD são os sólidos totais dissolvidos e  $O_2$  a concentração de oxigênio dissolvido na alimentação. Trata-se do cálculo do ciclo de concentração a partir da concentração de sólidos totais dissolvidos.

Ainda de acordo com Togawa (2018), quanto maior a pureza da água de reposição e quanto mais adequado o tratamento dessa corrente, com mais ciclos é possível se trabalhar, realizando menos descargas na caldeira e utilizando-se menos combustível no processo.

### 3.8.2 Ciclo de concentração da caldeira

Trata-se do ciclo com o qual a caldeira está operando, podendo ser menor, igual ou maior que o ciclo permissível. Quando o equipamento opera com valores maiores que os permitidos, é necessário realizar a descarga do equipamento para que ele seja desconcentrado (TOGAWA, 2018).

De acordo com Brunhara (2020), os ciclos de concentração da caldeira podem ser determinados pelas equações (27), (28) e (29) a seguir:

$$C_{Cl} = \frac{\text{Concentração de cloretos na caldeira}}{\text{Concentração de cloretos na alimentação}} \quad (27)$$

$$C_{SiO_2} = \frac{\text{Concentração de sílica na caldeira}}{\text{Concentração de sílica na alimentação}} \quad (28)$$

$$C_{\text{Condutividade}} = \frac{\text{Condutividade na caldeira}}{\text{Condutividade na alimentação}} \quad (29)$$

O ciclo de concentração na caldeira geralmente é calculado pela equação (28), uma vez que os cloretos podem sofrer interferências na presença de hidróxido de sódio e a condutividade pode sofrer interferências de produtos químicos em geral.



### 3.9 CONTROLE ANALÍTICO DO TRATAMENTO

Os limites de controle para os parâmetros físico-químicos da alimentação e da água da caldeira são determinados por diretrizes estabelecidas principalmente pela ASME e ABMA, como também podem ser determinados por alguns autores de acordo com os resultados de suas pesquisas para os parâmetros não especificados pelas diretrizes citadas.

Para o pré-tratamento, os limites de controle são determinados por especificações dos fornecedores de acordo com as características físico-químicas da água de reposição. As tabelas a seguir listam os limites de cada parâmetro de acordo com a pressão da caldeira, sendo que na Tabela 3 os valores são determinados pela ASME e os valores da Tabela 4 são determinados por ASME e ABMA:

Tabela 3 - 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
<b>Água de Alimentação</b>								
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
<b>Água da Caldeira</b>								
Sílica ppm (mg/L) SiO <sub>2</sub>	≤ 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
<b>Sólidos Totais Dissolvidos no Vapor</b>								
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: adaptado de ASME (1979)

Tabela 4 - Limites de controle estabelecidos pela ASME e ABMA para água de caldeira

ITEM DE CONTROLE	FAIXA DE PRESSÃO (kgf/cm <sup>2</sup> )						
	<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 <sub>3</sub> )	<700	<700	<400	<150	<50	-	-
Alcalinidade Hidróxida (ppm CaCO <sub>3</sub> )	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 <sub>3</sub> )	<5,0	<5,0	ND				
Sílica Solúvel (ppm SiO <sub>2</sub> )	<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 <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> -)	30 a 50	20 a 40	10 a 30	Não recomendado			
Hidrazida (ppm N <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	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 <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> -)	30 a 50	20 a 40	10 a 30	5 a 15	Vide curva de fosfato contínuo		

Fonte: Adaptado de ASME e ABMA (como citado em BRUNHARA, 2020; p. 56)

Conforme citado anteriormente, seguem alguns limites de controle estabelecidos por autores diversos e especificações de equipamentos:

- Dureza Total (Caldeira): Silva (2008) adota limites ainda mais restritivos para a dureza total na água da caldeira, considerando que o limite deva ser 0 ppm de dureza total para qualquer faixa de pressão.
- pH (Alimentação): de acordo com Moura (2011), valores de pH menores que 6 na água de alimentação, seja pela fonte de reposição, seja por escapes de ácido regenerados na desmineralização, podem causar corrosão generalizada. Segundo Baccan (2015) *apud* Lizauskas (2017), águas brutas possuem faixa de pH de 6,3 a 6,5; sendo elas ligeiramente ácidas. Ainda segundo a Agência Nacional de Águas (ANA), para a manutenção da vida aquática, a Resolução Conama 357 define que o pH da água deve estar entre 6 e 9. Assim, considerando essas afirmações, pode-se definir como limite de controle da água de reposição uma faixa de pH de 6 a 9.
- Água desmineralizada por troca iônica: de acordo com Rubim (2017), a água na saída de desmineralizadores deve apresentar um teor de ferro total e sílica total menor ou igual a 0,01 ppm, um valor de condutividade específica menor ou igual a 0,5 uS/cm, dureza total menor ou igual a 0,01 ppm de CaCO<sub>3</sub> e pH de 6 a 8 ppm.
- Água osmotizada: os limites de controle para o sistema de osmose reversa dependem das especificações do fornecedor da membrana de acordo com as características físico-

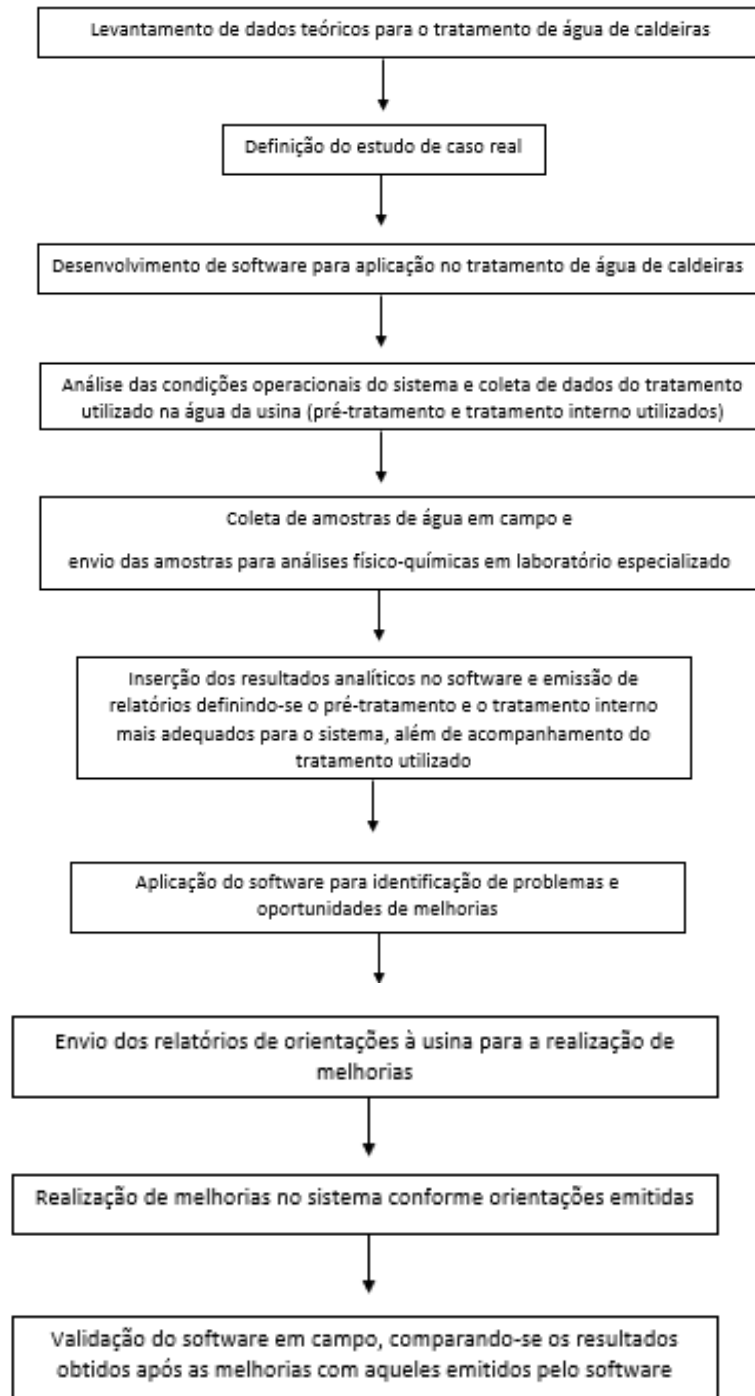
químicas da água de reposição e do projeto do equipamento. De acordo com McGowan (2011) *apud* Petrochem, as membranas da osmose são capazes de remover até 99% dos sais dissolvidos, chegando à remoção de 98% de ferro, 99% de cobre e 92% de cloretos. De acordo com as especificações da ALPHENZ, fabricante e fornecedor do sistema de osmose reversa, para a determinação dos limites de controle para os sais em um sistema que utiliza a osmose reversa como pré-tratamento, é necessário que a água de reposição atenda aos limites da alimentação, considerando-se os limites mais rigorosos, ou seja, valores menores que 0,01 ppm de ferro total, menores que 0,01 ppm de cobre total e menores que 0,05 ppm de dureza total (ASME, 1979).

- pH (Caldeira): segundo Togawa (2018), conforme a água concentra pela evaporação constante, seu pH aumenta. Para caldeiras de baixa taxa de evaporação, o pH recomendado fica entre 10,5 e 11,5 e para caldeiras de alta taxa, a faixa recomendada de pH é de 11,5 a 12,5.
- pH (Condensado): a faixa de pH do condensado é ligeiramente mais ácida que a água da caldeira (devido aos teores de carbonatos e bicarbonatos gerando subprodutos ácidos) e ligeiramente mais alcalina que a água de reposição (BRUNHARA, 2020).
- Cloretos (Caldeira): segundo Brunhara (2020), a concentração máxima de cloretos deve ser especificada pelo fabricante do equipamento. Outra opção seria definir um limite considerando a criticidade e o histórico do sistema. Normalmente, o limite deve ser <300 ppm.
- Fosfato (Caldeira): de acordo com a **figura 20** (Carta de Controle CTP Típica) da seção 3.7.2.4, para uma dosagem de fosfato entre 4 e 6 ppm utilizando-se apenas fosfato trissódico para regular o pH da caldeira (razão  $\text{Na:PO}_4 = 3,0$ ), a faixa de controle para o pH da caldeira deverá ser de 9,6 a 9,8 (SELBY, 2009).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada através do procedimento metodológico descrito na figura 16 a seguir:

Figura 16 – Fluxograma representativo do procedimento metodológico



Fonte: Do autor (2022)

#### 4.1 LEVANTAMENTO DE DADOS TEÓRICOS

A pesquisa de dados teóricos foi realizada com o objetivo de se realizar um levantamento das principais impurezas que adentram a caldeira em um processo, os problemas causados, sua influência na eficiência e nos custos do processo e também os principais tipos de tratamento disponíveis para água de caldeiras.

#### 4.2 DEFINIÇÃO DO ESTUDO DE CASO REAL

Para a escolha do estudo de caso foram consideradas duas variáveis: temperatura e pressão. Foi definido, para acompanhamento, um sistema próximo a um sistema crítico para o tratamento de água de caldeiras, devido à pressão e à temperatura elevadas; exigindo, para a estabilidade do sistema, tratamento e monitoramento rigorosos.

Além disso, o sistema em questão encontrava-se em fase de transição de média para alta pressão, o que possibilitaria um estudo comparativo do tipo de tratamento exigido com o tratamento adotado para ambas as condições, além da determinação das faixas de controle.

#### 4.3 DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE

O Microsoft Access é um software da Microsoft Corporation. Trata-se de uma ferramenta que auxilia o usuário na gestão de banco de dados, possibilitando o armazenamento e a análise de grandes quantidades de informações e também gerencia dados relacionados de maneira mais eficaz que outros softwares da mesma categoria.

O Microsoft Access possui seis componentes principais: as tabelas, as consultas, os formulários, os relatórios, as macros e os módulos. As tabelas são criadas para o armazenamento de informações, sendo possível realizar o relacionamento entre elas para um melhor gerenciamento dos dados. Os formulários são utilizados para inserção dos dados nas tabelas, enquanto que as consultas são utilizadas para a busca e seleção de informações.

As macros são uma forma automática de se executar uma série de ações para o banco de dados. Essas mesmas ações podem ser descritas em linguagem VBA, utilizando-se os módulos. Já os relatórios são utilizados para a apresentação das informações de forma organizada.

No desenvolvimento do software, primeiramente, foram criadas as tabelas para o recebimento dos dados a serem inseridos. Em seguida, foram criadas consultas que possibilitassem a seleção de dados. Na sequência, foram criados os formulários e as macros, nos quais foram estabelecidas condições, em linguagem VBA.

Na última etapa, foram criados relatórios para emissão dos resultados das análises, parâmetros, tipo de tratamento, ciclos de concentração e orientações. O conteúdo dos relatórios varia de acordo com cada parâmetro inserido, cada condição e cada decisão tomada pelas condições pré-estabelecidas.

#### 4.4 ANÁLISE DAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS E COLETA DE DADOS DO TRATAMENTO UTILIZADO NO SISTEMA

O estudo de caso foi realizado em uma usina termelétrica no interior do estado de São Paulo. Trata-se de uma cogeração de energia inaugurada em maio de 2021 e que operou, de maio de 2021 a maio de 2022 a uma pressão de 48 bar ( $48,95 \text{ kgf/cm}^2$ ) produzindo em torno de 30 ton/h de vapor a  $170^\circ\text{C}$ , que era fornecido a uma empresa vizinha com processo de fabricação de gomas (de gelana, xantana, cítrica), entre outros produtos; e retornava como condensado (ciclo fechado).

A caldeira encontrava-se em uma fase de transição, passando a operar, a partir de maio de 2022, a  $68,32 \text{ kgf/cm}^2$ , 60 ton/h de produção de vapor e temperatura de  $495^\circ\text{C}$ . Essa transição influencia diretamente nos limites de controle (parâmetros mais rígidos) e, conseqüentemente, no tipo de tratamento utilizado, tanto na seção pré-caldeira quanto na seção interna e pós-caldeira (tratamento mais rigoroso), pois os riscos de corrosão, incrustação e arraste são maiores para essa faixa de pressão.

Seguem algumas figuras que registram o sistema de estudo real. Na fotografia 1 estão indicadas a fornalha da caldeira, região por onde circula a água no interior dos tubos e também o desaerador mecânico, cuja função é a remoção do oxigênio dissolvido.

Fotografia 1 - Vista lateral da caldeira



Fonte: Do autor (2022)

Em que:

A: Desaerador mecânico

B: Fornalha

A fotografia 2 a seguir trata-se da esteira de cavaco, que leva o combustível (cavaco) para ser queimado na fornalha.

Fotografia 2 – Esteira de Cavaco



Fonte: Do autor (2022)

A fotografia 3 evidencia a tubulação de vapor com comprimento de, em torno de 300 m, que forneceu vapor durante o primeiro ano de processo para uma empresa vizinha à usina.

Fotografia 3 – Tubulação de vapor



Fonte: Do autor (2022)



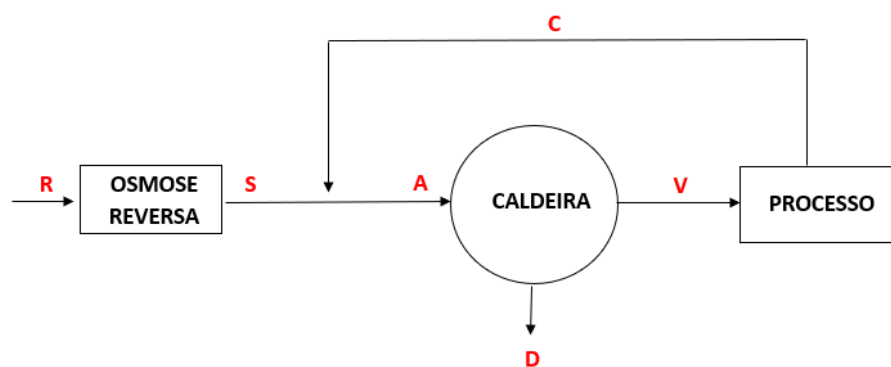
A fotografia 4 trata-se do pré-tratamento da água do sistema, composto apenas por um sistema de osmose reversa. Assim, a água da caldeira tem origem em um poço subterrâneo, passa pela osmose reversa e adentra a caldeira, conforme ilustrado também pelo fluxograma da figura 17.

Fotografia 4 – Pré-tratamento com Osmose Reversa



Fonte: Do autor (2022)

Figura 17 – Fluxograma do processo



Fonte: Do autor (2022)

em que:

R: Água de Reposição

A: Água de Alimentação

D: Ponto de Descargas de Fundo

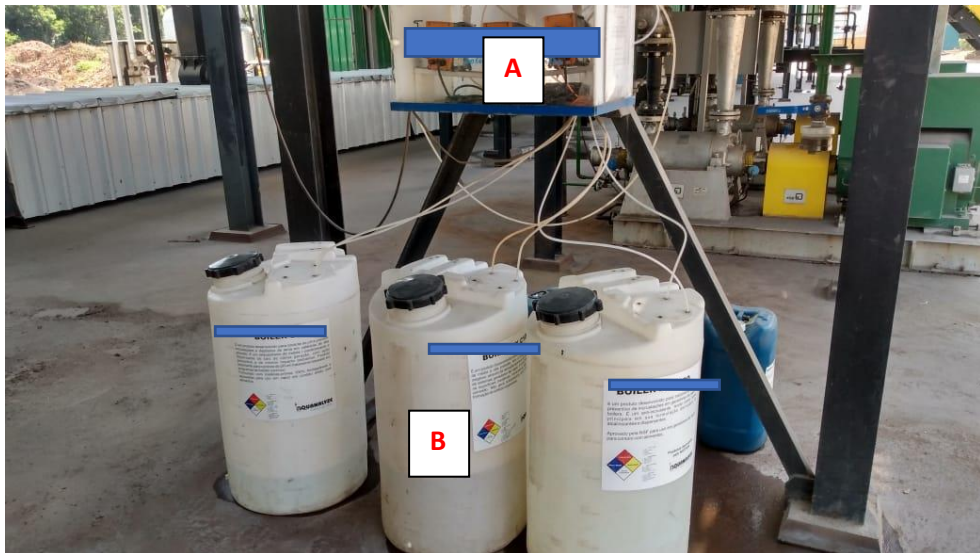
S: Saída da Osmose

V: Linha de Vapor

C: Retorno de Condensado

A fotografia 5 a seguir é o sistema de dosagem automática dos produtos utilizados no tratamento interno da caldeira: Sequestrante de oxigênio, Alcalinizante e Anticorrosivo da linha de vapor.

Fotografia 5 – Sistema de dosagem de produtos na caldeira com dosadoras automáticas



Fonte: Do autor (2022)

Em que:

A: Bomba dosadora de produtos químicos automática

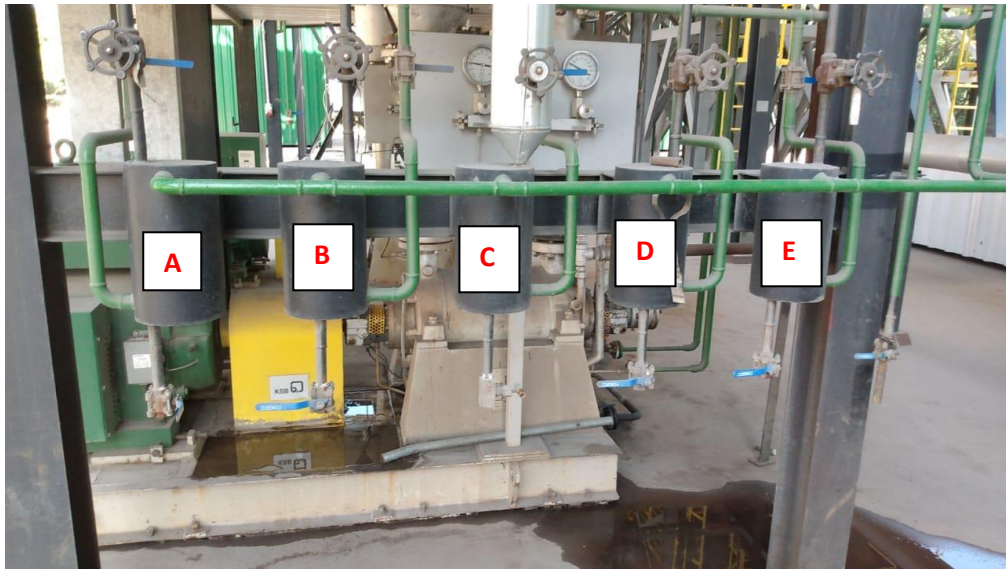
B: Bombonas de produtos para tratamento interno

#### 4.5 COLETA DE AMOSTRAS EM CAMPO E ENVIO PARA ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

As amostras foram coletadas utilizando-se frascos de 500 mL previamente desinfetados e com tampas rosqueáveis para que não houvesse contaminação. Antes da coleta, os frascos foram ambientados com material da amostra e, após a coleta, os frascos foram tampados para

que não houvesse consumo de sequestrante de oxigênio. As amostras da caldeira, vapor e condensado foram resfriadas até a temperatura ambiente para que fossem realizadas as análises físico-químicas. A fotografia 6 evidencia os pontos de coleta

Fotografia 6 – Sistema de coleta de amostras, com os seguintes pontos de coleta: Descarga Contínua, Des aerador, Vapor, Condensado e Osmotizada



Fonte: Do autor (2022)

Em que:

- A: Ponto de coleta da saída da osmose
- B: Ponto de coleta da alimentação
- C: Ponto de coleta da caldeira
- D: Ponto de coleta da saída de vapor
- E: Ponto de coleta do retorno de condensado

As amostras foram enviadas para o laboratório de uma empresa terceirizada e especializada em tratamento de água de caldeiras, situada em São João da Boa Vista/SP, e que é responsável pelo tratamento da água da caldeira da termelétrica. As análises foram realizadas seguindo metodologia própria da empresa.

#### 4.6 DEFINIÇÃO DE PRÉ-TRATAMENTO, TRATAMENTO INTERNO E ACOMPANHAMENTO DO SISTEMA

Os resultados das análises físico-químicas realizadas foram utilizados para a definição do pré-tratamento e do tratamento interno mais adequados para o sistema de acordo com os resultados obtidos quando comparados com as faixas de controle. Os dados foram inseridos no sistema para que o software emitisse um relatório de orientações dos tratamentos sugeridos, além das faixas de controle e ciclos de concentração. O principal objetivo era comparar o tratamento definido pelo software com o tratamento utilizado pela empresa e assim, sugerir melhorias.

O acompanhamento do sistema foi realizado durante sete (7) meses, com a realização mensal das coletas e das análises e inserção dos resultados no software para que ele emitisse relatórios de orientações técnicas e para que fossem identificados problemas e sugeridas melhorias para o tratamento da água da caldeira.

#### 4.7 USO DO SOFTWARE PARA IDENTIFICAÇÃO DE PROBLEMAS E OPORTUNIDADES DE MELHORIAS

Os resultados das análises mensais foram inseridos no software para que, automaticamente, ele comparasse os resultados obtidos com as faixas de controle e realizasse a emissão de relatórios identificando problemas e/ou possibilidade de ocorrência desses problemas, definindo assim, quais as ações corretivas deveriam ser realizadas no sistema. O objetivo era enviar esses relatórios à equipe de operação da usina para que as correções fossem realizadas.

Outras oportunidades de melhorias também ocorreram com a emissão, com o uso do software, dos parâmetros e faixas de controle para o sistema, com a finalidade de prevenir que problemas de corrosão, incrustação ou arraste pudessem ocorrer. Foram emitidos parâmetros e faixas de controle para a água de alimentação e para a água da caldeira em duas condições e operação diferentes, de acordo com as necessidades do sistema.

#### 4.8 ENVIO DOS RELATÓRIOS À TERMELÉTRICA

Os relatórios emitidos pelo software mediante uso dos resultados das análises físico-químicas na água do sistema foram enviados mensalmente à equipe de operação da usina para que as medidas corretivas fossem tomadas.

#### 4.9 REALIZAÇÃO DE MELHORIAS

Algumas melhorias e ações foram realizadas de acordo com as orientações contidas nos relatórios enviados à empresa, considerando também as orientações técnicas da empresa responsável pelo tratamento da água do sistema.

#### 4.10 VALIDAÇÃO DO SOFTWARE EM CAMPO

O software foi validado em campo enviando-se relatórios de orientação para a usina com orientações técnicas relacionadas ao pré-tratamento e ao tratamento interno adotados, considerando-se os parâmetros fora das faixas de controle, dosagens inadequadas de produtos químicos, correções nas descargas da caldeira e algumas outras manutenções no sistema.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE

O software desenvolvido foi nomeado BWT Solutions. Ao abri-lo, o usuário tem acesso a uma página de login, já configurada com um nome de usuário e uma senha. Essa página está representada pela Figura 18 a seguir, contando com a opção de acessar ou desfazer o acesso, caso tenha ocorrido algum erro no preenchimento de um dos campos. Uma terceira opção é a de fechar a página, utilizando para isso o botão *Fechar* no canto superior direito da página.

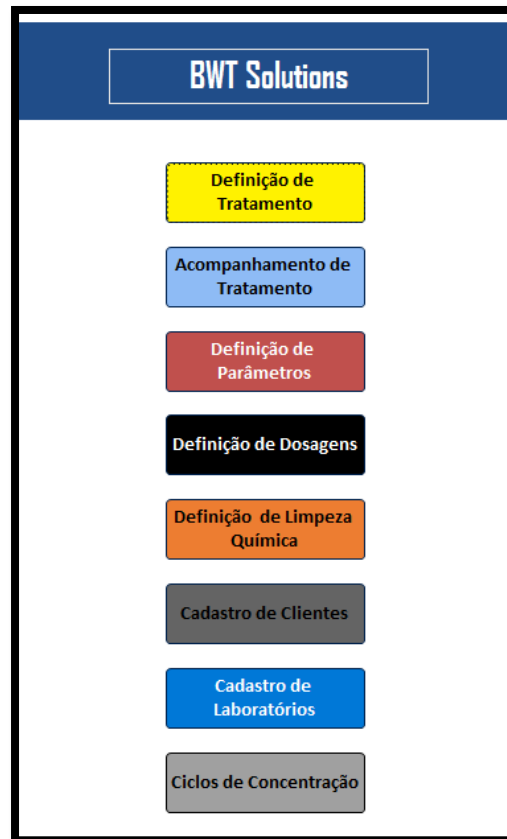
Figura 18 – Página de Login



Fonte: Do autor (2022)

Após realizar o acesso, o software exibe a página *Menu Inicial*, com as seguintes opções: Definição de Tratamento, Acompanhamento de Tratamento, Definição de Parâmetros, Definição de Dosagens, Definição de Limpeza Química, Cadastro de Usuários, Cadastro de Laboratórios e Ciclos de Concentração. Esta página está representada pela Figura 19:

Figura 19 – Menu Inicial



Fonte: Do autor (2022)

O software conta com as seguintes opções de Definição de Tratamento: Pré-tratamento e Tratamento Interno, ou seja, é possível definir o pré-tratamento e o tratamento interno mais adequados de acordo com as características do sistema. Esses menus estão representados pela Figura 20 a seguir:

Figura 20 – Menu Definição de Tratamento



Fonte: Do autor (2022)

A opção Pré-Tratamento dá acesso a um formulário que deve ser preenchido com resultados das análises físico-químicas da água bruta (reposição da caldeira) e deverão incluir os seguintes parâmetros de controle: Oxigênio Dissolvido, pH, Condutividade Específica, Turbidez, Ferro Total, Cobre Total, Sílica, Cloretos e Dureza Total.

Ao preencher o formulário, o usuário deverá salvar a análise, gerando uma identificação única (ID da Análise). A opção *salvar* encontra-se no canto inferior direito da página (segundo ícone), juntamente com as opções *desfazer*, *excluir*, *pesquisar* e *imprimir*.

O usuário também conta com as opções de avançar para o próximo laudo de análises, retornar ao laudo anterior, avançar para o último laudo ou retornar ao primeiro laudo, todos os laudos devidamente identificados. Para gerar um formulário em branco o usuário deverá escolher a opção *Novo Laudo*, no centro da página.

Após o preenchimento de todos os campos com os resultados das análises, o botão Gerar Relatório de Orientações, no canto inferior esquerdo da página, emite todas as orientações técnicas do pré-tratamento mais adequado para o sistema de acordo com os resultados das análises físico-químicas da água bruta, de modo que a caldeira opere com segurança, integridade e o melhor aproveitamento possível, gerando economia de combustível e de produtos químicos para tratamento. Essa página está representada pela Figura 21:



Figura 21 – Definição de Pré-Tratamento

Análises de Equipamentos Industriais	
Definição de Pré-Tratamento	
ID da Análise	<input type="text" value="(Novo)"/>
Oxigênio Dissolvido (ppm)	<input type="text" value="0,0000"/>
pH	<input type="text"/>
Condutividade Específica (uS/cm)	<input type="text"/>
Turbidez (NTU)	<input type="text" value="0"/>
Ferro (ppm de Fe)	<input type="text" value="0"/>
Cobre (ppm de Cu)	<input type="text" value="0"/>
Sílica (ppm de SiO <sub>2</sub> )	<input type="text" value="0"/>
Cloretos (ppm de Cl <sup>-</sup> )	<input type="text"/>
Dureza Total (ppm de CaCO <sub>3</sub> )	<input type="text"/>

Gerar Relatório de Orientações

Novo Laudo

BWT

Fonte: Do autor (2022)

A opção Tratamento Interno do menu *Definição de Tratamento* emite todas as orientações técnicas do tratamento interno mais adequado para o sistema, de modo que a caldeira opere com segurança, integridade e o melhor aproveitamento. Para isso, o usuário deve preencher o formulário da página Definição de Tratamento Interno, indicando a pressão de operação da caldeira (em kgf/cm<sup>2</sup>), temperatura do vapor (°C), metalurgia do sistema e também se o vapor entra ou não em contato com alimentos. Esse formulário está representado pela Figura 22:

Figura 22 – Definição de Tratamento Interno

The screenshot shows a web interface titled "Análises de Equipamentos Industriais" with a sub-header "Definição de Tratamento Interno". It features two input fields for "Pressão (kgf/cm2)" and "Temperatura do Vapor (°C)", both containing the value "0". Below these are two sections with radio button options: "Metalurgia do Sistema" (with options for "Aço Carbono (Total)" and "Presença de Cobre (Total ou Parcialmente)") and "Contato do Vapor" (with options for "Direto com Alimentos ou Bebidas" and "Indireto"). At the bottom, there are four navigation buttons (back, previous, next, forward) and a "Novo Registro" button.

Fonte: Do autor (2022)

A página de Acompanhamento de Tratamento (Figura 23) permite ao usuário realizar o acompanhamento do tratamento adotado para o sistema (Pré-Tratamento e Tratamento Interno).

Figura 23 – Acompanhamento de Tratamento

The screenshot shows a web interface titled "ACOMPANHAMENTO DE TRATAMENTO". It features two large, blue, rectangular buttons stacked vertically, labeled "PRÉ-TRATAMENTO" and "TRATAMENTO INTERNO".

Fonte: Do autor (2022)

A opção Pré-Tratamento (no menu representado pela Figura 23) conta com as seguintes possibilidades de Acompanhamento: Água Bruta (fonte de reposição), Abrandada (uso de abrandador), desmineralizada (uso de desmineralização por troca iônica), osmotizada (uso de desmineralização por osmose reversa) e Alimentação (Reposição + Retorno de Condensado). Essas opções estão evidenciadas na Figura 24.

As figuras de 25 a 29 contam com as opções de preenchimento com dados do cliente, sendo necessário o preenchimento de dados como Nome do Cliente, Cidade, Estado, data de realização da coleta, data de conclusão das análises, o laboratório e o analista responsável pelas análises, possibilitando o controle do acompanhamento e também o uso comercial, podendo ser utilizado por uma empresa com vários laboratórios e analistas.

O acompanhamento do tratamento permite a emissão de relatórios dos resultados analíticos, contendo também Observações realizadas durante a coleta (Exemplo: cor da água coletada) e Comentários (Exemplo: abrandador sem regeneração por falta de sal), além de relatórios com orientações técnicas e sugestões de melhorias no pré-tratamento, quando necessárias.

O que difere um formulário do outro são, principalmente, as faixas de controle, que são determinadas por especificações de fornecedores de cada equipamento. As faixas de controle da alimentação são determinadas pelo código ASME e, para isso, é preciso preencher um formulário (Figura 29) com a pressão de operação da caldeira ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ ), uma vez que a ASME classifica os limites de controle de acordo com a pressão de operação.

A figura 24 exibe uma aba na qual é possível selecionar o tipo de pré-tratamento que se deseja analisar e acompanhar (abrandada, desmineralizada, osmotizada), análise e acompanhamento de água bruta (sem tratamento) e alimentação.

Figura 24 – Acompanhamento de Pré-Tratamento



Fonte: Do autor (2022)

A figura 25 trata-se do formulário para emissão de relatórios de orientações com relação à água de reposição (água sem tratamento/água bruta), direcionado a partir dos menus da Figura 24.

Figura 25 – Análises de Água Bruta

Análises de Equipamentos Industriais			
Água Bruta/Reposição			
IDAnálise	<input type="text" value="(Novo)"/>	pH (6 a 9)	<input type="text"/>
Nome do Cliente	<input type="text"/>	Condutividade Específica (uS/cm) ND	<input type="text"/>
Cidade	<input type="text"/>	Turbidez (NTU) ND	<input type="text" value="0"/>
Estado	<input type="text"/>	Alcalinidade Total (ppm de CaCO <sub>3</sub> ) ND	<input type="text" value="0"/>
Realização da Coleta	<input type="text"/>	Alcalinidade Hidróxida (ppm) ND	<input type="text" value="0"/>
Análises Concluídas	<input type="text"/>	Ferro (ppm de Fe) ND	<input type="text" value="0"/>
Laboratório	<input type="text"/>	Sílica (ppm de SiO <sub>2</sub> ) ND	<input type="text" value="0"/>
Analista Responsável	<input type="text"/>	Cloretos (ppm de Cl <sup>-</sup> ) ND	<input type="text"/>
		Dureza Total (ppm de CaCO <sub>3</sub> ) ND	<input type="text"/>
Observações sobre a Coleta	<input type="text"/>		Comentários
			<input type="text"/>

Fonte: Do autor (2022)

A figura 26 trata-se do formulário para emissão de relatórios de orientações com relação à água abrandada, ou seja, quando se existe a utilização de um abrandador no pré-tratamento.

Figura 26 – Análises Abrandada

Análises de Equipamentos Industriais Abrandada			
ID Análise	<input type="text" value="(Novo)"/>	Condutividade Específica (uS/cm) ND	<input type="text"/>
Nome do Cliente	<input type="text"/>	pH (6,00 a 9,00)	<input type="text"/>
Cidade	<input type="text"/>	Turbidez (NTU) ND	<input type="text" value="0"/>
Estado	<input type="text"/>	Alcalinidade Hidróxida (ppm) ND	<input type="text" value="0"/>
Realização da Coleta	<input type="text"/>	Alcalinidade Total (ppm de CaCO <sub>3</sub> ) ND	<input type="text" value="0"/>
Análises Concluídas	<input type="text"/>	Ferro (ppm de Fe)ND	<input type="text" value="0"/>
Laboratório	<input type="text"/>	Silica (ppm de SiO <sub>2</sub> ) ND	<input type="text" value="0"/>
Analista Responsável	<input type="text"/>	Cloretos (ppm de Cl-) ND	<input type="text"/>
Observações sobre a coleta	<input type="text"/>		Dureza Total (0 - 0 ppm de CaCO <sub>3</sub> )
		Comentários	<input type="text"/>

\*ND: Limites Não Determinados

Fonte: Do autor (2022)

A figura 27 trata-se do formulário para emissão de relatórios de orientações com relação à água desmineralizada, ou seja, quando se existe a utilização de um desmineralizador no pré-tratamento.

Figura 27 – Análises Desmineralizada

Análises de Equipamentos Industriais Desmineralizada			
ID Análise	<input type="text" value="(Novo)"/>	Condutividade Especifica (0 - 0,5 uS/cm)	<input type="text"/>
Nome do Cliente	<input type="text"/>	pH (6,00 a 8,00)	<input type="text"/>
Cidade	<input type="text"/>	Turbidez (NTU) ND	<input type="text" value="0"/>
Estado	<input type="text"/>	Alcalinidade Hidróxida (ppm) ND	<input type="text" value="0"/>
Realização da Coleta	<input type="text"/>	Alcalinidade Total (ppm de CaCO <sub>3</sub> ) ND	<input type="text" value="0"/>
Análises Concluídas	<input type="text"/>	Ferro (ppm de Fe) <= 0,01	<input type="text" value="0"/>
Laboratório	<input type="text"/>	Silica (ppm de SiO <sub>2</sub> ) <= 0,01	<input type="text" value="0"/>
Analista Responsável	<input type="text"/>	Cloretos (ppm de Cl-) ND	<input type="text"/>
Observações sobre a coleta	<input type="text"/>	Dureza Total (ppm de CaCO <sub>3</sub> ) <= 0,01	<input type="text"/>
		Comentários	<input type="text"/>

\*ND: Limites Não Determinados

Fonte: Do autor (2022)

A figura 28 trata-se do formulário para emissão de relatórios de orientações com relação à água osmotizada, ou seja, quando se existe a utilização de um sistema de osmose reversa no pré-tratamento.

Figura 28 – Análises Osmotizada

Análises de Equipamentos Industriais Osmotizada			
ID Análise	<input type="text" value="(Novo)"/>	Condutividade Especifica (0 - 10 uS/cm)	<input type="text"/>
Nome do Cliente	<input type="text"/>	pH (6,00 a 9,00) ND	<input type="text"/>
Cidade	<input type="text"/>	Turbidez (NTU) ND	<input type="text" value="0"/>
Estado	<input type="text"/>	Alcalinidade Hidróxida (ppm) ND	<input type="text" value="0"/>
Realização da Coleta	<input type="text"/>	Alcalinidade Total (ppm de CaCO <sub>3</sub> ) ND	<input type="text" value="0"/>
Análises Concluídas	<input type="text"/>	Ferro (ppm de Fe) < 0,01	<input type="text" value="0"/>
Laboratório	<input type="text"/>	Silica (ppm de SiO <sub>2</sub> ) ND	<input type="text" value="0"/>
Analista Responsável	<input type="text"/>	Cloretos (ppm de Cl-) ND	<input type="text"/>
Observações sobre a coleta	<input type="text"/>	Dureza Total (ppm de CaCO <sub>3</sub> ) < 0,05	<input type="text"/>
		Comentários	<input type="text"/>

\*ND: Limites Não Determinados

Fonte: Do autor (2022)

Para emitir relatórios de orientações e realizar o acompanhamento e melhorias na alimentação é preciso, primeiramente, preencher um formulário (Figura 29) com a pressão de operação da caldeira ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ ), uma vez que a ASME classifica os limites de controle de acordo com a pressão de operação.

Figura 29 – Acompanhar Alimentação

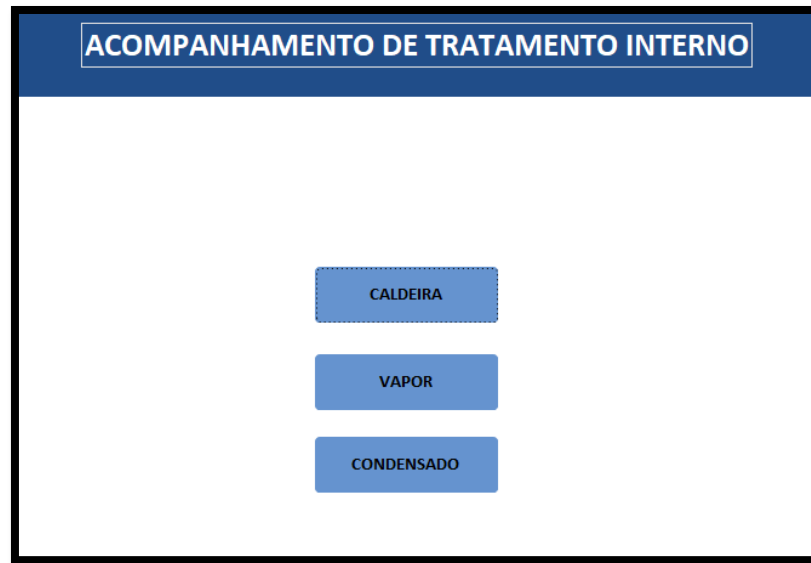


The image shows a software interface with a blue header containing the text "Análises de Equipamentos Industriais" and "ACOMPANHAR ALIMENTAÇÃO". Below the header, there are two input fields. The first is labeled "ID da Consulta" and contains the value "0". The second is labeled "Pressão de Operação (kgf/cm2)" and contains the value "0,00". Below these fields, there are four blue navigation buttons: a double left arrow, a single left arrow, a single right arrow, and a double right arrow. At the bottom center, there is a button labeled "Novo Registro" with a dashed border.

Fonte: Do autor (2022)

A opção Tratamento Interno, do menu Acompanhamento de Tratamento (disponível na Figura 23), leva o usuário às seguintes opções de acompanhamento: Caldeira, Vapor e Condensado, possibilitando o acompanhamento da qualidade da água na seção interna e também na seção pós-caldeira. Estas opções estão representadas pelo menu da Figura 30:

Figura 30 – Acompanhamento de Tratamento Interno



Fonte: Do autor (2022)

Para acompanhar a qualidade da água na seção interna da caldeira, é preciso ainda, definir a pressão da caldeira ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ ) e o tipo de sequestrante utilizado: sulfito de sódio, carbohidrazida ou ácido ascórbico, de acordo com o formulário da Figura 31; uma vez que os limites de controle são determinados de acordo com estas características.

Figura 31 – Acompanhar Tratamento Interno

Fonte: Do autor (2022)



Ainda, de acordo com os menus da Figura 19, é possível definir os parâmetros de controle e suas faixas (determinados de acordo com a ASME e a pressão de operação), definição de dosagens (sequestrante e fosfato, de acordo com a pressão de operação), definição da limpeza química pré-operacional, definição dos ciclos de concentração para melhor aproveitamento de combustível e produtos químicos e ainda, realizar o cadastro de laboratórios, analistas e clientes para lançamento de resultados.

A figura 42 exibe um formulário para cadastro com os dados dos clientes.

Figura 32 – Registro de Clientes



The image shows a web form titled "REGISTRO DE CLIENTES" with a blue header. The form contains the following fields and controls:

- Nome:
- Cidade:
- Estado:
- CEP:
- Telefone:
- CNPJ:

Below the fields are four blue navigation buttons: a double left arrow, a single left arrow, a single right arrow, and a double right arrow. At the bottom center is a button labeled "NOVO REGISTRO".

Fonte: Do autor (2022)

A figura 33 exibe um formulário para cadastro com os dados dos clientes.

Figura 33 – Registro de Laboratórios

The image shows a web interface for recording laboratory data. It features a blue header with the title 'REGISTRO DE LABORATÓRIOS'. Below the header, there are four input fields: 'Laboratório', 'Unidade', 'Cidade', and 'Estado'. The 'Estado' field is a dropdown menu. Underneath the input fields, there are four blue navigation buttons: a double left arrow, a single left arrow, a single right arrow, and a double right arrow. At the bottom center, there is a button labeled 'NOVO REGISTRO'.

Fonte: Do autor (2022)

## 5.2 ESTUDO DE CASO

### 5.2.1 Análise das condições operacionais, coletas de dados e amostras

Durante as visitas, foram coletados alguns dados, tais como as especificações técnicas do equipamento, condições operacionais e tipo de tratamento utilizado. Os dados encontram-se nos quadros 5 e 6, respectivamente.

Quadro 5 - Especificações do Sistema

Especificações do Sistema	
<b>Metalurgia do sistema</b>	Aço carbono
<b>Fabricante</b>	Icavi
<b>Pré-Tratamento</b>	Osmose
<b>Fabricante da osmose</b>	Alphenz
<b>Fonte de Reposição</b>	Poço
<b>Combustível</b>	Biomassa (Cavaco)
<b>Tipo de sistema</b>	Aquatubular/Monodrum
<b>Produção de Vapor (ton/h)</b>	30
<b>Pressão do Vapor (kgf/cm<sup>2</sup>)</b>	48,95
<b>Condição</b>	Operando
<b>Horas</b>	24
<b>Dias/semana</b>	7
<b>% de Retorno de Condensado</b>	90

Fonte: Dados da pesquisa (2022)

Quadro 6 – Tratamento Interno Adotado

<b>Sequestrante de Oxigênio</b>	Carbohidrazida
<b>Anticorrosivo da Linha de Vapor</b>	Blend: Morfolina + Ciclohexilamina
<b>Alcalinizante</b>	Fosfato Trissódico

Fonte: Dados da pesquisa (2022)

De acordo com o quadro 6, o tratamento interno em vigor faz uso de carbohidrazida como sequestrante de oxigênio, confirmando as indicações buscadas na literatura, dado que o vapor do sistema não entra em contato direto com alimentos e por se tratar de uma metalurgia de aço carbono. Se a metalurgia do sistema fosse composta por cobre e/ou houvesse contato direto do vapor com alimentos, o sequestrante mais indicado, de acordo com dados bibliográficos, para esta faixa de pressão, seria o ácido ascórbico. Para baixas pressões, a indicação seria o sulfito de sódio.

O tratamento neutralizante faz uso de uma mistura de aminas neutralizantes que garantem a permanência desses compostos em altas temperaturas e grandes comprimentos da tubulação da linha de vapor, devido à menor volatilidade desses componentes quando comparados com o Hidróxido de Amônio, que possui maior volatilidade, de acordo com os dados bibliográficos.

O sistema faz uso de fosfato trissódico apenas como alcalinizante, ou seja, faz uso do tratamento Fosfato Congruente. Esse tipo de tratamento não gera a formação de lamas e tem como pré-requisito zero dureza e sílica na alimentação, uma vez que o fosfato é dosado para controle do pH a uma proporção estequiométrica  $Na/PO_4$  estabelecida pelo Diagrama de Controle Fosfato Contínuo apresentado na pesquisa teórica.

A caldeira encontrava-se em uma fase de transição, passando a operar, a partir de maio de 2022, a  $68,32 \text{ kgf/cm}^2$ , 60 ton/h de produção de vapor e temperatura de  $495^\circ\text{C}$  para o vapor. Essa transição influencia diretamente nos limites de controle (parâmetros mais rígidos) e, conseqüentemente, no tipo de tratamento utilizado, tanto na seção pré-caldeira quanto na seção interna e pós-caldeira (tratamento mais rigoroso), pois os riscos de corrosão, incrustação e arraste são maiores para essa faixa de pressão. A fotografia 7 ilustra o resfriamento das amostras até à temperatura ambiente após a coleta.

Fotografia 7 – Resfriamento de amostras após a coleta



Fonte: Do autor (2022)

O estudo de caso foi realizado durante 7 meses, de outubro de 2021 a abril de 2022. A coleta de dados foi realizada na primeira visita, em outubro de 2021, através de entrevistas com operadores da planta. O objetivo dessa visita foi levantar dados do tipo de pré-tratamento e tratamento interno realizados no sistema.

Todas as visitas (sete, no total) foram realizadas junto à equipe técnica da empresa responsável pelo tratamento da água da usina, que também nos auxiliou no fornecimento de dados do tratamento e monitoramento do sistema. Essa empresa é especializada no tratamento de águas industriais e está localizada em São João da Boa Vista – SP.

Durante a visita realizada em fevereiro de 2022, foi-nos relatado que o sistema teria passado por uma limpeza na membrana da osmose, conforme orientações enviadas, utilizando-se, para isso, solução de ácido cítrico e solução de hidróxido de sódio, produtos definidos pelo fornecedor da osmose para este fim.

Durante as visitas de dezembro de 2021 e março de 2022 foi-nos relatado que teria havido uma correção nas dosagens de fosfato trissódico, conforme orientações enviadas.

### 5.2.2 Definição de pré-tratamento para o sistema em estudo

Com os resultados obtidos pelas análises da água bruta (poço) realizada em dezembro de 2021, foi definido, através do uso do software, o pré-tratamento mais adequado para esse sistema. Os resultados obtidos nas análises da água bruta (Poço/Reposição) e que foram lançados no software, encontram-se na Figura 34, que ilustra a análise de ID número 79 para determinação do sistema de Pré-tratamento:

Figura 34 – Formulário para determinação de pré-tratamento do sistema

Análises de Equipamentos Industriais Definição de Pré-Tratamento	
ID da Análise	79
Oxigênio Dissolvido (ppm)	0,5000
pH	5,55
Condutividade Específica (uS/cm)	465
Turbidez (NTU)	2
Ferro (ppm de Fe)	0,3
Cobre (ppm de Cu)	0
Silica (ppm de SiO <sub>2</sub> )	20
Cloretos (ppm de Cl <sup>-</sup> )	46
Dureza Total (ppm de CaCO <sub>3</sub> )	82

Navigation buttons: ⏪ ⏩ ⏴ ⏵

Novo Laudo

BWT

Fonte: Do autor (2022)

As orientações emitidas no relatório encontram-se no quadro 7 a seguir. O relatório completo emitido pelo software pode ser analisado no Apêndice A – Sugestões de Pré-Tratamento.

Quadro 7 – Definição de Pré-Tratamento

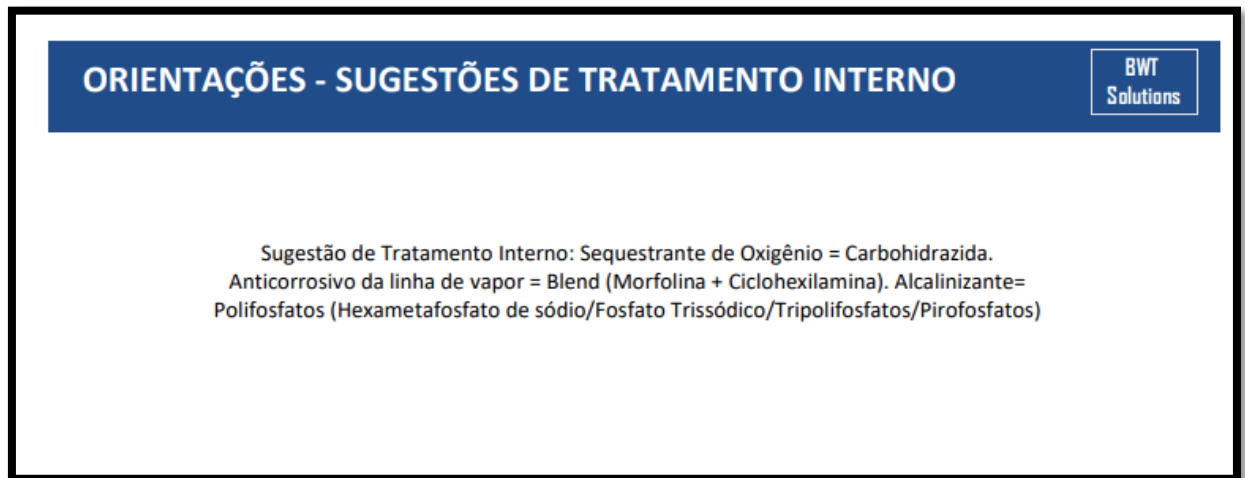
<b>Orientação 1</b>	Necessidade de Etapa de Clarificação por ETA Convencional ou Ultrafiltração para redução da turbidez.
<b>Orientação 2</b>	Necessidade de Etapa de Oxidação ou Filtro de Zeólita para remoção do ferro presente na água de reposição.
<b>Orientação 3</b>	Necessidade de Desmineralização por troca iônica ou osmose reversa para remoção dos sais dissolvidos.
<b>Orientação 4</b>	Necessidade de Abrandamento para redução da dureza presente na água de reposição.
<b>Orientação 5</b>	Necessidade de Desmineralização por troca iônica ou osmose reversa para remoção de sílica e/ou cloretos presentes na água.
<b>Orientação 6</b>	Necessidade de Desaeração mecânica com desaerador operando em temperatura de 100°C a 105°C para redução do oxigênio dissolvido.

Fonte: Do autor (2022)

Todas essas orientações foram enviadas à usina. Das orientações emitidas pelo software, apenas a desmineralização por osmose reversa e o desaerador mecânico encontram-se em operação, ficando pendentes as etapas de clarificação da água, oxidação e abrandamento.

Com o uso do software e com os dados de pressão de operação ( $48,95 \text{ kgf/cm}^2$ ), metalurgia do sistema (aço carbono), tipo de contato do vapor (contato indireto com alimentos) e temperatura do vapor ( $170^\circ\text{C}$ ), foi possível determinar o tratamento interno mais adequado para essa caldeira, conforme Figura 35, que é o relatório de orientações de tratamento interno definido pelo software para essas condições:

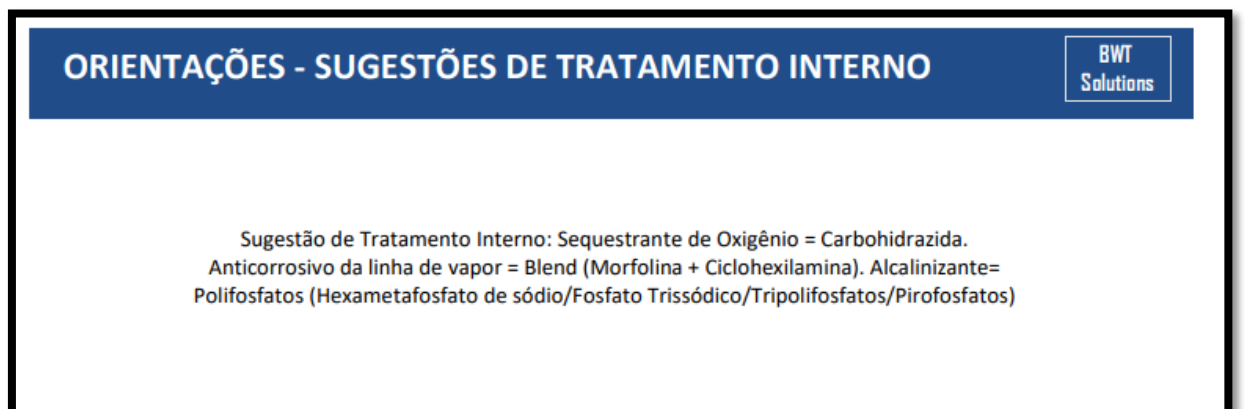
Figura 35 – Definição de Tratamento Interno para as condições de operação atuais



Fonte: Do autor (2022)

O mesmo tratamento interno foi determinado para as novas condições de operação: pressão de  $68,32 \text{ kgf/cm}^2$  e temperatura de  $495^\circ\text{C}$  para o vapor, mantendo-se a mesma metalurgia (aço carbono) e o mesmo tipo de contato com alimentos (contato indireto), de acordo com a figura 36:

Figura 36 – Definição de Tratamento Interno para as novas condições de operação



Fonte: Do autor (2022)

De acordo com as orientações emitidas, o tratamento interno utilizado hoje pode ser mantido para as novas condições de operação. Da mesma forma, foram definidos os parâmetros (limites de controle) para a alimentação e para a caldeira em ambas as condições de operação,

conforme figuras de 37 a 40 a seguir. A figura 37 exibe o relatório das faixas de controle sugeridas pelo software para a alimentação operando a 48,95 kgf/cm<sup>2</sup> e 170°C

Figura 37 – Faixas de Controle para a alimentação determinadas para a caldeira operando a 48,95 kgf/cm<sup>2</sup> e 170°C

Parâmetros - Alimentação	
Faixas de Controle	
Oxigênio Dissolvido (ppm)	< 0,007
Ferro Total (ppm)	<= 0,025
Cobre Total (ppm)	<= 0,02
Dureza Total (ppm)	<= 0,2
pH	8,3 - 10,0

Observação: as faixas de controle acima são os parâmetros de controle determinados pela ASME.

Fonte: Do autor (2022)

A figura 38 exibe o relatório das faixas de controle sugeridas pelo software para a alimentação operando a 68,32 kgf/cm<sup>2</sup> e 495°C

Figura 38 – Faixas de Controle para a alimentação determinadas para as novas condições de operação (68,32 kgf/cm<sup>2</sup> e 495°C)

Parâmetros - Alimentação	
Faixas de Controle	
Oxigênio Dissolvido (ppm)	< 0,007
Ferro Total (ppm)	<= 0,02
Cobre Total (ppm)	<= 0,01
Dureza Total (ppm)	<= 0,05
pH	8,8 - 9,6

Observação: as faixas de controle acima são os parâmetros de controle determinados pela ASME.

Fonte: Do autor (2022)



A figura 39 exibe o relatório das faixas de controle sugeridas pelo software para a água da caldeira operando a  $48,95 \text{ kgf/cm}^2$  e  $170^\circ\text{C}$

Figura 39 – Faixas de Controle determinadas para a água da caldeira operando a  $48,95 \text{ kgf/cm}^2$  e  $170^\circ\text{C}$

Parâmetros - Caldeira	
Faixas de Controle	
Silica (ppm de SiO <sub>2</sub> )	$\leq 30$
Alcalinidade Total (ppm)	$< 200$
Alcalinidade OH (ppm)	$= 0$
Condutividade Específica (uS/cm)	$300 - 1500$
Ferro Total (ppm)	$< 0,5$
Cloreto (ppm)	$< 300$
pH	$9,5 - 10,5$

Fonte: Do autor (2022)

A figura 40 exibe o relatório das faixas de controle sugeridas pelo software, de acordo com a ASME e a ABMA para a caldeira operando a  $68,32 \text{ kgf/cm}^2$  e  $495^\circ\text{C}$

Figura 40 – Faixas de Controle para a caldeira determinadas para as novas condições de operação ( $68,32 \text{ kgf/cm}^2$  e  $495^\circ\text{C}$ )

Parâmetros - Caldeira	
Faixas de Controle	
Silica (ppm de SiO <sub>2</sub> )	$\leq 8$
Alcalinidade Total (ppm)	$< 100$
Alcalinidade OH (ppm)	$= 0$
Condutividade Específica (uS/cm)	$200 - 1000$
Ferro Total (ppm)	$< 0,1$
Cloreto (ppm)	$< 300$
pH	$9,5 - 10,5$

Fonte: Do autor (2022)

De acordo com as orientações emitidas pelo software para as novas condições de operação, os parâmetros tornam-se mais rígidos e o tratamento mais rigoroso, com faixas mais restritas, tanto para a alimentação quanto para a caldeira (conforme orientações das figuras 38 e 40 acima). Assim, definiu-se também, com o auxílio do software, qual seria a limpeza química pré-operacional indicada para a caldeira operando tanto nas condições atuais quanto nas novas condições de operação. As orientações encontram-se no relatório número 20 representado pela Figura 41 a seguir:

Figura 41 – Orientações de Limpeza Química Pré-operacional para ambas as condições de operação

ORIENTAÇÕES TÉCNICAS - LIMPEZA QUÍMICA PRÉ-OPERACIONAL

ID do Relatório	<input style="width: 80%;" type="text" value="20"/>
Etapas Sugeridas	<input style="width: 95%;" type="text" value="Etapas: Ácida, Alcalina e Passivante. Limpeza à base de Ácido Cítrico, Hidróxido de Sódio e Gluconato de Sódio. Dosagens a serem definidas."/>

Atenção! Os compostos químicos sugeridos são os ativos principais e, não são, necessariamente, aplicados de forma individual. Outros compostos químicos poderão compor a formulação do produto indicado para cada etapa de acordo com o fornecedor/fabricante e as condições de aplicação.

Fonte: Do autor (2022)

Durante a visita à planta, foi-nos informado que a limpeza química pré-operacional para a caldeira seguiu exatamente as etapas acima, utilizando-se as mesmas etapas e os mesmos compostos químicos sugeridos pelo software. A empresa responsável pelo tratamento da água foi a empresa contratada para realizar a limpeza química. Não foi fornecida nenhuma evidência, por ter sido realizada há bastante tempo.

Os relatórios completos das faixas de controle para a água de alimentação e água da caldeira foram enviados à empresa. Verificou-se que as faixas coincidiam com aquelas adotadas pela empresa de tratamento da água da caldeira.

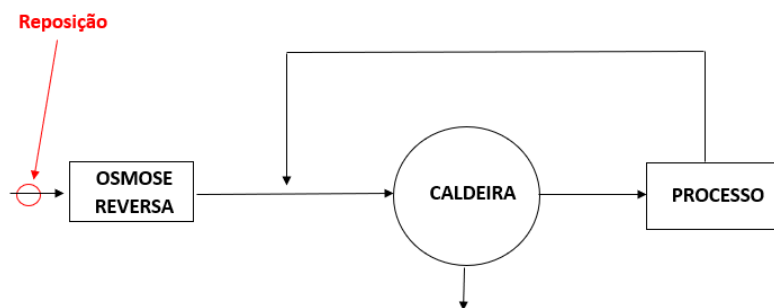
### 5.2.3 Acompanhamento do tratamento

Tanto as análises físico-químicas quanto as coletas das amostras foram realizadas pela empresa responsável pelo tratamento da água da usina. As coletas foram realizadas mediante procedimentos internos e as análises foram realizadas de acordo com as metodologias do Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.

#### 5.2.3.1 Resultados analíticos da água do poço (fonte de reposição)

Durante o período de estudo e acompanhamento, foram realizadas apenas duas análises na água de reposição (poço subterrâneo), que ocorreram em dezembro de 2021 e fevereiro de 2022. A Figura 42 a seguir indica o ponto de coleta e análise.

Figura 42 – Coleta e análise da água de reposição



Fonte: Do autor (2022)

De acordo com a empresa responsável pelo tratamento e monitoramento da água, a justificativa para um espaçamento maior no intervalo entre as análises para esse ponto é a de que a qualidade da água subterrânea tende a se manter constante em um período maior de tempo. Os resultados das análises físico-químicas para esse ponto encontram-se na Tabela 5 a seguir:

Tabela 5 - Resultados analíticos da água do poço

Poço/Fonte de Reposição			
Propriedades	Limites	Dezembro de 2021	Fevereiro de 2022
pH	6 a 9	5,55	7,3
Condutividade Específica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	ND	465	283
Sílica ( $\text{mg}/\text{L SiO}_2$ )	ND	20	22
Ferro Total ( $\text{mg}/\text{L Fe}$ )	ND	0,3	0,1
Dureza Total ( $\text{mg}/\text{L CaCO}_3$ )	ND	82	50
Alcalinidade Total ( $\text{mg}/\text{L CaCO}_3$ )	ND	143	130
Alcalinidade Hidróxida ( $\text{mg}/\text{L CaCO}_3$ )	ND	0	0
Turbidez (NTU)	ND	2	0
Cloretos ( $\text{mg}/\text{L Cl}^-$ )	ND	46	12

Fonte: Dados da pesquisa (2022)

As análises evidenciam uma água com alto teor de sais dissolvidos, conforme evidenciados pelo alto valor de condutividade específica desta água. A água de reposição também apresenta teores elevados de sílica, dureza, cloretos e ferro, possibilitando a formação de incrustações e corrosão no sistema, além da ocorrência de arrastes para a linha de vapor. Os relatórios completos emitidos pelo software para ambas as análises encontram-se no Apêndice B.

Segue, através do quadro 8, um compilado das orientações emitidas pelo software para ambas as análises, mediante os resultados apresentados pela tabela 5. As orientações para ambas as análises são idênticas, devido à semelhança na faixa dos resultados nos meses de janeiro e fevereiro. Os relatórios completos de orientações e resultados encontram-se no Apêndice B (relatórios 52 e 55).

Quadro 8 – Orientações para a Água Bruta

Orientações	Dezembro de 2021	Fevereiro de 2022
<b>Orientação 1</b>	Turbidez elevada. Água com alto teor de materiais em suspensão. Necessária etapa de clarificação: ETA convencional ou Ultrafiltração.	-
<b>Orientação 2</b>	Água com alto teor de sílica, ferro ou cloretos. Possibilidade de incrustação ou corrosão. Necessária desmineralização (Troca iônica ou Osmose reversa)	Água com alto teor de sílica, ferro ou cloretos. Possibilidade de incrustação ou corrosão. Necessária desmineralização (Troca iônica ou Osmose reversa)
<b>Orientação 3</b>	Condutividade elevada. Água com alto teor de sais dissolvidos. Trabalhar com desmineralização por Troca Iônica ou Osmose Reversa	Condutividade elevada. Água com alto teor de sais dissolvidos. Trabalhar com desmineralização por Troca Iônica ou Osmose Reversa
<b>Orientação 4</b>	Dureza elevada. Possibilidade de incrustação por sais de cálcio e magnésio. Necessidade de etapa de abrandamento.	Dureza elevada. Possibilidade de incrustação por sais de cálcio e magnésio. Necessidade de etapa de abrandamento.

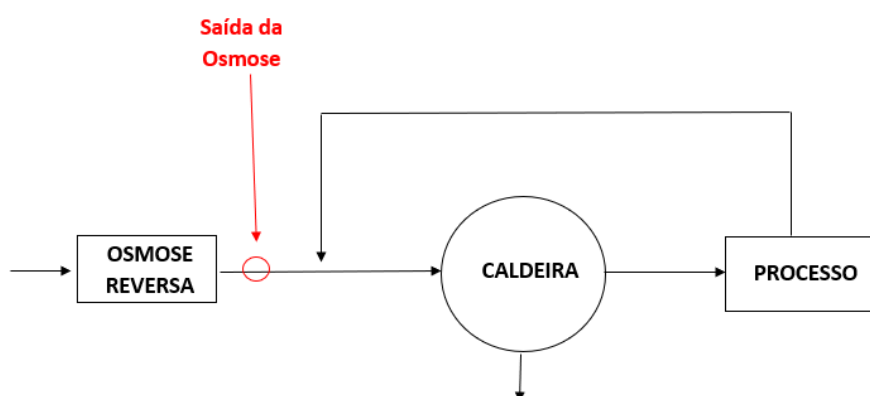
Fonte: Do autor (2022)

Nota-se, através dos resultados e das orientações, que houve uma variação no teor de sais e da turbidez entre os meses de dezembro e fevereiro, reduzindo-se o valor da condutividade. Entretanto, a água se mantém com altos teores de ferro, sílica, cloretos e dureza, fazendo-se necessárias as etapas de oxidação, abrandamento e desmineralização, confirmando as sugestões emitidas pelo software para o pré-tratamento (quadro 7).

### 5.2.3.2 Resultados analíticos da água osmotizada (saída da osmose)

Os resultados das análises na água na saída da osmose (pré-tratamento) no período de estudo encontram-se na tabela 6. A Figura 43 a seguir indica o ponto de coleta e análise.

Figura 43 – Coleta e análise da água na saída da osmose



Fonte: Do autor (2022)

Tabela 6 - Resultados analíticos da saída da osmose

Osmotizada (Saída da Osmose)								
Propriedades	Limites	07/10/2021	22/11/2021	11/12/2021	21/01/2022	14/02/2022	25/03/2022	06/04/2022
pH	6,0 - 9,0	7,46	7,36	7,54	6,69	7,89	6,7	6,92
Condutividade Especifica (µS/cm)	0 a 10	22	21	18	18	7	8	11
Sílica (mg/L SiO <sub>2</sub> )	ND	1,44	1,34	1,28	1,43	0,39	0,52	0,84
Ferro (mg/L Fe)	< 0,01	0,033	0,029	0,022	0,028	0,008	0	0,029
Dureza Total (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	< 0,05	2	1,87	0,89	1	0,37	0,49	0,58
Alcalinidade Total (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	ND	10	15	10	10	5	5	5
Alcalinidade Hidroxida (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	ND	0	0	0	0	0	0	0
Turbidez (NTU)	ND	0	0	0	1	0	1	0
Cloretos (mg/L Cl)	ND	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: Dados da pesquisa (2022)

Legenda: \*ND = Não Determinado

Constata-se, através dos resultados apresentados, que a água na saída da osmose apresenta valores de Condutividade Específica, Ferro e Dureza Total acima das faixas de controle.

Os resultados analíticos de 21/01 e 14/02 da Tabela 6 foram inseridos no software utilizando-se o menu *Osmotizada em Acompanhamento de Pré-Tratamento* com o objetivo de se obter orientações técnicas de melhorias antes e após a limpeza da osmose reversa. As orientações emitidas pelo software encontram-se no quadro 9 abaixo. Os relatórios completos emitidos pelo software encontram-se no Apêndice C (relatórios 41 e 42).

Quadro 9 – Orientações de Melhorias para o Pré-Tratamento em janeiro de 2021 e fevereiro de 2022

Orientações	Análises do dia 21/01/2022	Análises do dia 14/02/2022
<b>Orientação 1</b>	Condutividade elevada. Operação com baixos ciclos. Verificar operação da osmose, by pass, manutenção das membranas ou adequar etapa de polimento.	Dureza elevada. Possibilidade de incrustação. Verificar escape de dureza, by pass, manutenção das membranas ou utilizar abrandador.
<b>Orientação 2</b>	Teor de ferro elevado. Possibilidade de deposição. Adequar etapa de Oxidação na Clarificação.	
<b>Orientação 3</b>	Dureza elevada. Possibilidade de incrustação. Verificar escape de dureza, by pass, manutenção das membranas ou utilizar abrandador.	

Fonte: Do autor (2022)

Os relatórios de orientações foram enviados à empresa e, de acordo com a equipe de operação, na primeira semana de fevereiro de 2022 a usina realizou uma limpeza nas membranas da osmose, utilizando-se, para isso, solução de ácido cítrico (etapa ácida) e solução de hidróxido de sódio (etapa alcalina).

Os resultados dessa limpeza podem ser verificados nas análises com redução expressiva nos teores da sais (Condutividade dentro dos limites de controle) e redução nos teores de sílica, ferro (dentro da faixa de controle) e dureza a partir da primeira semana de fevereiro, quando foi realizada a limpeza.

As melhorias decorrentes da limpeza nas membranas estão refletidas nos resultados dos meses de fevereiro, março e abril da tabela 6. Esses resultados confirmam as sugestões

propostas na pesquisa teórica, que propõe limpeza de membranas à base de componentes ácidos e alcalinos para melhorar a eficiência do processo.

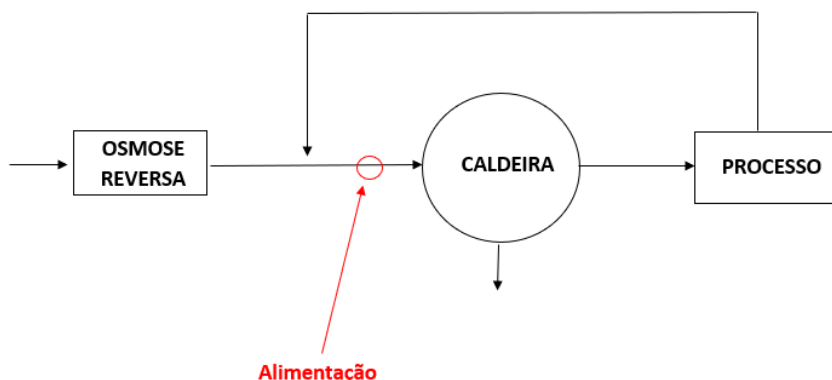
Com as orientações emitidas pelo software e que estão presentes na tabela acima, pode-se afirmar que a limpeza da osmose atendeu às orientações do software no que diz respeito à “manutenção das membranas”, citada na Orientação 3 das análises do dia 21/01 e resolveu parte dos problemas do pré-tratamento, entretanto, a água de reposição continua com teor elevado de dureza, podendo ocasionar sérios problemas de incrustação, uma vez que o tratamento adotado não prevê a formação de lama (hidroxiapatita de cálcio e hidroxilicato de magnésio) conforme verificado na literatura, e requer, para isso, dureza zero na alimentação.

Os íons ainda presentes na água podem ser constatados também na água de alimentação, conforme os resultados que serão apresentados no tópico 5.2.3.3 a seguir. Esse resultado já era esperado, uma vez que a alimentação é um ponto de intersecção da reposição com o retorno de condensado e que reforça a necessidade de melhorias no pré-tratamento, que só é possível através de acompanhamento constante e com resultados e orientações imediatas, para que se garantam economias e estabilidade no sistema.

#### 5.2.3.3 Resultados analíticos da água de alimentação, vapor e condensado

Nas tabelas 16 e 17 encontram-se os resultados das análises físico-químicas realizadas na alimentação da caldeira, que é o desaerador do equipamento, onde encontram-se a água da saída da osmose (reposição) e o retorno de condensado. A tabela 7 fornece os resultados e as faixas de controle referentes aos limites estabelecidos para a caldeira operando a  $48,95 \text{ kgf/cm}^2$  e a tabela 8 fornece os resultados e as faixas de controle referentes aos limites estabelecidos para a caldeira operando a  $68,32 \text{ kgf/cm}^2$ . A Figura 44 a seguir indica o ponto de coleta e análise.

Figura 44 – Coleta e análise da água na alimentação



Fonte: Do autor (2022)

Tabela 7 - Resultados analíticos da água de alimentação (osmotizada + retorno de condensado) para a caldeira operando a 48 (48,95 kgf/cm<sup>2</sup>) bar e 170°C

Alimentação/Desaerador							
Propriedades	Limites	07/10/2021	22/11/2021	11/12/2021	21/01/2022	14/02/2022	25/03/2022
Oxigênio Dissolvido (mg/L)	0 - 0,007	0,006	0,006	0,005	0,004	0,005	0,006
pH	8,3 - 10,0	8,47	7,98	8,37	7,68	9,28	6,54
Condutividade Específica (µS/cm)	0 a 10	9	7	8	9	7	5
Sílica (mg/L SiO <sub>2</sub> )	ND	0,72	0,58	0,68	0,68	0,44	0,28
Ferro (mg/L Fe)	0 - 0,025	0,5	0,4	0,6	0,7	0,4	0,3
Cobre (mg/L Cu)	0 - 0,020	0	0	0	0	0	0
Dureza Total (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	0 - 0,2	0,72	0,58	0,68	0,68	0,44	0,28

Fonte: Dados da pesquisa (2022)

Legenda: \*ND = Não Determinado

Tabela 8 - Resultados analíticos da água de alimentação (osmotizada + retorno de condensado) para a caldeira operando a 67 bar (68,32 kgf/cm<sup>2</sup>) e 495°C

Alimentação/Desaerador		
Propriedades	Limites	06/04/2022
Oxigênio Dissolvido (mg/L)	0 - 0,007	0
pH	8,8 - 9,6	7,03
Condutividade Específica (µS/cm)	0 a 10	7
Sílica (mg/L SiO <sub>2</sub> )	ND	0,7
Ferro (mg/L Fe)	0 - 0,02	0,4
Cobre (mg/L Cu)	0 - 0,01	0
Dureza Total (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	0 - 0,05	0,7

Fonte: Dados da pesquisa (2022)

Legenda: \*ND = Não Determinado

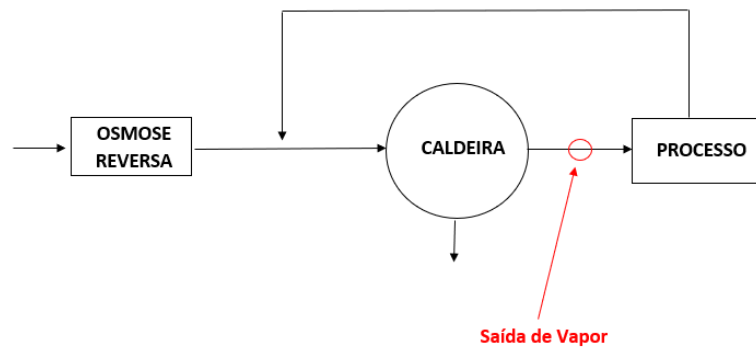


Constata-se, através dos resultados contidos nas tabelas 7 e 8, que o processo possui uma qualidade de água de alimentação com valores de pH, ferro e dureza que não condizem com a qualidade requerida para a alimentação de caldeiras operando nas mesmas condições de operação. Uma qualidade de água de alimentação com teor de ferro e dureza elevados já era esperada para esse sistema, devido aos valores apresentados na tabela 6.

Verifica-se também que, apesar de a limpeza nas membranas da osmose ter reduzido o teor de contaminantes, a água de alimentação continua com valores acima do permitido para ferro total e dureza total, além dos valores de pH abaixo da faixa de controle.

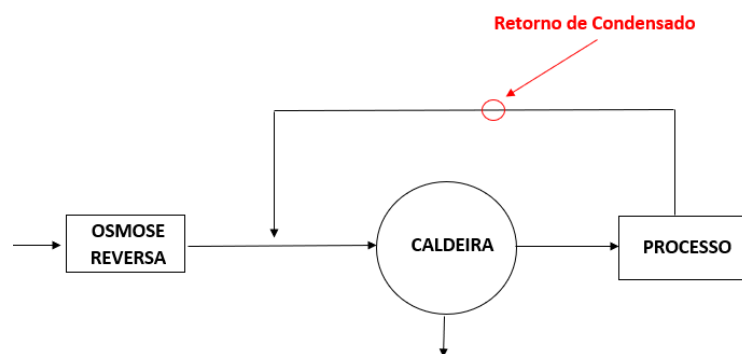
As tabelas 9 e 10 apresentam os resultados analíticos da linha de vapor e de condensado no período de estudo e acompanhamento. A faixa de pH e condutividade para a linha de vapor e condensado foram definidas por engenheiros e analistas químicos especializados em tratamento de água de caldeira e que prestam serviço à empresa responsável pelo tratamento da água da usina. Os limites foram definidos de acordo com as especificações do fornecedor da caldeira, às quais não tivemos acesso durante o acompanhamento da planta. As Figuras 45 e 46 a seguir indicam os pontos de coleta e análise.

Figura 45 – Coleta e análise da saída de vapor



Fonte: Do autor (2022)

Figura 46 – Coleta e análise do retorno de condensado



Fonte: Do autor (2022)

Tabela 9 - Resultados analíticos da água na saída de vapor da cogeração

Propriedades	Limites	Saída de Vapor						
		07/10/2021	22/11/2021	11/12/2021	21/01/2022	14/02/2022	25/03/2022	06/04/2022
pH	9,2 - 9,6	7,9	8,19	9,18	9,14	8,39	7,41	6,95
Condutividade Específica (µS/cm)	0 a 10	2	2	2	4	2	3	3
Silica (mg/L SiO <sub>2</sub> )	ND	0,3	0,1	0	0,1	0,1	0,1	0
Ferro (mg/L Fe)	ND	0,1	0	0,1	0	0,1	0	0
Dureza Total (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	ND	0	0	0	0	0	0	0
Alcalinidade Total (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	ND	0	0	0	0	0	0	0
Alcalinidade Hidróxida (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	ND	0	0	0	0	0	0	0
Turbidez (NTU)	ND	0	0	0	0	0	0	0
Cloretos (mg/L Cl <sup>-</sup> )	ND	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: Dados da pesquisa (2022)

Legenda: \*ND = Não Determinado

Tabela 10 - Resultados analíticos do retorno de condensado

Propriedades	Limites	Condensado						
		07/10/2021	22/11/2021	11/12/2021	21/01/2022	14/02/2022	25/03/2022	06/04/2022
pH	9,2 - 9,6	7,95	7,95	9,54	6,58	8	6,46	6,45
Condutividade Específica (µS/cm)	0 a 10	3	4	2	6	3	6	5
Silica (mg/L SiO <sub>2</sub> )	ND	0,1	0,2	0,1	0,2	0,2	0,1	0,3
Ferro (mg/L Fe)	ND	0	0	0	0	0	0	0
Dureza Total (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	ND	0	0	0	0	0	0	0
Alcalinidade Total (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	ND	0	0	0	0	0	0	0
Alcalinidade Hidróxida (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	ND	0	0	0	0	0	0	0
Turbidez (NTU)	ND	0	0	0	0	0	0	0
Cloretos (mg/L Cl <sup>-</sup> )	ND	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: Dados da pesquisa (2022)

Legenda: \*ND = Não Determinado

Os resultados das tabelas 9 e 10 evidenciam valores de pH abaixo dos limites determinados pela equipe responsável pelo tratamento da água do sistema e que já eram esperados devido aos teores de carbonato e bicarbonato comumente presentes nessas correntes. Os teores de sais iguais a zero nesse período podem ser explicados pela alta pureza característica do vapor e do condensado.

Dado que, entre janeiro e fevereiro, houve uma significativa mudança na qualidade de alimentação devido à limpeza nas membranas da osmose e, em abril, houve uma mudança significativa nos limites de controle para a alimentação e para a caldeira devido às novas condições de operação, os resultados analíticos da alimentação, do vapor e do condensado dos meses de janeiro, fevereiro e abril, para fins comparativos, foram lançados no software.

Os quadros 10, 11 e 12 a seguir apresentam as orientações emitidas para a alimentação, para o vapor e para o condensado, respectivamente. Os relatórios completos emitidos pelo software encontram-se no Apêndice D.

Quadro 10 – Orientações de acompanhamento da água de alimentação nos meses de janeiro, fevereiro e abril de 2022

Orientações	Janeiro de 2022	Fevereiro de 2022	Abril de 2022
<b>Orientação 1</b>	Água de reposição com características ácidas. Verificar pré-tratamento, possíveis contaminações e corrigir pH do make up.	-	Água de reposição com características ácidas. Verificar pré-tratamento, possíveis contaminações e corrigir pH do make up.
<b>Orientação 2</b>	Água de reposição com alto teor de dureza. Possibilidade de incrustação. Verificar pré-tratamento.	Água de reposição com alto teor de dureza. Possibilidade de incrustação. Verificar pré-tratamento.	Água de reposição com alto teor de dureza. Possibilidade de incrustação. Verificar pré-tratamento.
<b>Orientação 3</b>	Teor de ferro elevado. Verificar oxidação no pré-tratamento ou corrosão na linha. Possibilidade de deposição na caldeira.	Teor de ferro elevado. Verificar oxidação no pré-tratamento ou corrosão na linha. Possibilidade de deposição na caldeira.	Teor de ferro elevado. Verificar oxidação no pré-tratamento ou corrosão na linha. Possibilidade de deposição na caldeira.
<b>Orientação 4</b>	Alto teor de sais. Possibilidade de incrustação e/ou corrosão. Verificar manutenção ou adequar sistema de desmineralização	Alto teor de sais. Possibilidade de incrustação e/ou corrosão. Verificar manutenção ou adequar sistema de desmineralização	-

Fonte: Do autor (2022)

Quadro 11 – Orientações de acompanhamento da saída de vapor nos meses de janeiro, fevereiro e abril de 2022

Orientações	Janeiro de 2022	Fevereiro de 2022	Abril de 2022
<b>Orientação 1</b>	pH baixo. Possibilidade de corrosão. Aumentar a dosagem de aminas e verificar possíveis fontes de contaminação ácida.	pH baixo. Possibilidade de corrosão. Aumentar a dosagem de aminas e verificar possíveis fontes de contaminação ácida.	pH baixo. Possibilidade de corrosão. Aumentar a dosagem de aminas e verificar possíveis fontes de contaminação ácida.

Fonte: Do autor (2022)

Quadro 12 – Orientações de acompanhamento do retorno de condensado nos meses de janeiro, fevereiro e abril de 2022

Orientações	Janeiro de 2022	Fevereiro de 2022	Abril de 2022
Orientação 1	pH baixo. Possibilidade de corrosão. Aumentar a dosagem de aminas e verificar possíveis fontes de contaminação ácida.	pH baixo. Possibilidade de corrosão. Aumentar a dosagem de aminas e verificar possíveis fontes de contaminação ácida.	pH baixo. Possibilidade de corrosão. Aumentar a dosagem de aminas e verificar possíveis fontes de contaminação ácida.

Fonte: Do autor (2022)

Os resultados apresentados e as orientações emitidos pelo software para a alimentação, para a saída de vapor e para o retorno de condensado indicam a necessidade de correção do pH dessas linhas. Os resultados com valores baixos de pH já eram esperados devido às características ácidas da água de reposição e do retorno de condensado, sendo que, no caso do retorno de condensado, isso se deve ao teor de carbonatos e bicarbonatos que se convertem em subprodutos ácidos em altas temperaturas. Os relatórios completos foram enviados à usina para a realização de correções e melhorias.

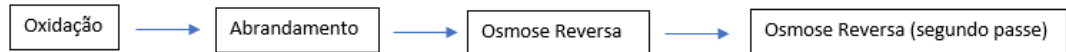
De acordo com as informações fornecidas pela empresa responsável pelo tratamento, houve várias inspeções na empresa que utiliza esse vapor e não foi encontrada qualquer fonte de contaminação nessas linhas no período acompanhado. Houve também inspeções nessas linhas sem que fossem constatados sinais de corrosão ou incrustação. Assim, sugere-se uma correção nas dosagens de amina na linha de vapor, para que o pH seja corrigido nas linhas de vapor e condensado. Essa correção interferirá diretamente no pH da água de alimentação, podendo corrigi-lo.

Os resultados apresentados e as orientações emitidos pelo software evidenciam também uma água de alimentação com alto teor de dureza e com necessidade de uma etapa de abrandamento, e ainda, uma água de alimentação com alto teor de sais e com necessidade de desmineralização. As necessidades de etapa de abrandamento e desmineralização já confirmam as sugestões de pré-tratamento, acompanhamento da água bruta/reposição e acompanhamento do pré-tratamento/osmose reversa.

Tanto as sugestões de pré-tratamento, quanto o acompanhamento da água bruta e da água de alimentação sugerem uma etapa de oxidação para remoção do ferro. O acompanhamento da alimentação, mesmo após as limpezas realizadas nas membranas da osmose, continua orientando para que sejam realizadas melhorias no pré-tratamento. Dado que o sistema já possui uma etapa de desmineralização, sugerem-se melhorias de acordo com as possibilidades representadas a seguir:

**Possibilidade 1)** Instalação de uma etapa de oxidação, seguida de uma etapa de abrandamento seguida de osmose reversa (já existente), que antecede uma nova etapa de osmose reversa (segundo passe, ainda não existente). Possibilidade representada pela figura 47 a seguir:

Figura 47 – Fluxograma representativo da primeira possibilidade de melhorias no pré-tratamento



Fonte: Do autor (2022)

**Possibilidade 2)** Instalação de uma etapa de oxidação, antecedendo uma etapa de abrandamento seguida de osmose reversa (já existente), que antecede uma nova etapa de desmineralização por troca iônica (leito misto de resinas, ainda não existente). Possibilidade representada pela figura 48 a seguir:

Figura 48 – Fluxograma representativo da segunda possibilidade de melhorias no pré-tratamento



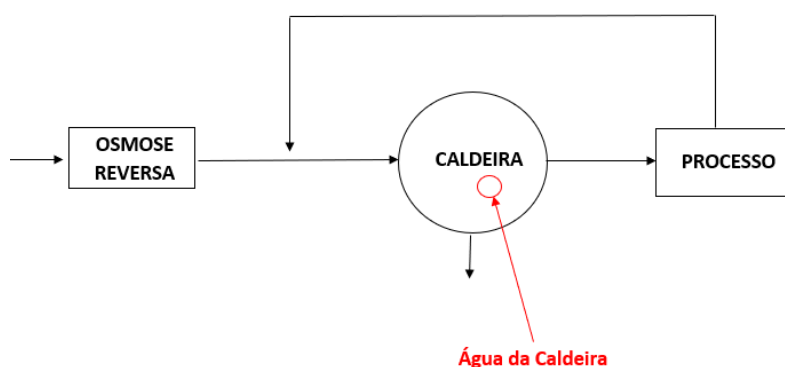
Fonte: Do autor (2022)

Ambas as hipóteses (Figura 47 e figura 48) atendem às orientações emitidas pelo software e embasadas pelo levantamento teórico. A escolha deve ser realizada pelo cliente, levando em conta primeiramente, as necessidades, se serão atendidas ou não; e os custos-benefícios de cada sistema.

### 5.2.3.4 Resultados analíticos da água da caldeira

Os resultados das análises físico-químicas realizadas na água da caldeira no período de outubro de 2021 a março de 2022, período em que o equipamento encontrava-se operando a 48 bar, encontram-se na Tabela 11 a seguir. A Figura 49 indica o ponto de coleta e análise.

Figura 49 – Coleta e análise da água da caldeira



Fonte: Do autor (2022)

Tabela 11 - Resultados analíticos da água da caldeira operando a 48 bar

Caldeira							
Propriedades	Limites	07/10/2021	22/11/2021	11/12/2021	21/01/2022	14/02/2022	25/03/2022
pH	9,5 - 10,5	10,81	10,72	10,47	10,74	10,89	10,47
Condutividade Específica (µS/cm)	300 a 1500	111	102	65	89	59	62
Sílica (mg/L SiO <sub>2</sub> )	0 a 30	4	7	3	3	4	5
Ferro (mg/L Fe)	<0,5	0	0	0	0	0	0
Dureza Total (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	0	3	6	3	3	1	0
Alcalinidade Total (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	<200	20	30	26	20	20	15
Alcalinidade Hidróxida (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	0	0	10	4	10	10	5
Turbidez (NTU)	ND	0	0	0	0	0	0
Cloretos (mg/L Cl <sup>-</sup> )	<300	2	2	1,2	1,6	0,5	0,7
Fosfato (mg/L)	5 a 15	8	7	5	7	8	5
Carboidrazida (mg/L)	0,1 a 0,2	0,091	0,073	0,04	0	0,035	0,069

Fonte: Dados da pesquisa (2022)

Legenda: \*ND = Não Determinado

Os resultados das análises físico-químicas realizadas na água da caldeira no mês de abril de 2022, período em que o equipamento iniciava sua operação a 67 bar, encontram-se na Tabela 12 a seguir.

Tabela 12 - Resultados analíticos da água da caldeira operando a 67 bar

<b>Caldeira</b>		
<b>Propriedades</b>	<b>Limites</b>	<b>06/04/2022</b>
pH	<b>9,5 a 10,5</b>	10,89
Condutividade Específica ( $\mu\text{S/cm}$ )	<b>200 a 1000</b>	142
Sílica ( $\text{mg/L SiO}_2$ )	<b>0 a 8</b>	3
Ferro ( $\text{mg/L Fe}$ )	<b>&lt;0,1 ppm</b>	0
Dureza Total ( $\text{mg/L CaCO}_3$ )	<b>0</b>	0
Alcalinidade Total ( $\text{mg/L CaCO}_3$ )	<b>&lt;100</b>	35
Alcalinidade Hidróxida ( $\text{mg/L CaCO}_3$ )	<b>0</b>	15
Turbidez (NTU)	<b>ND</b>	0
Cloretos ( $\text{mg/L Cl}^-$ )	<b>&lt;300</b>	2,5
Fosfato ( $\text{mg/L}$ )	<b>3,5 a 10</b>	8
Carbohidrazida ( $\text{mg/L}$ )	<b>0,05 a 0,1</b>	0,027

Fonte: Dados da pesquisa (2022)

Legenda: \*ND = Não Determinado

É possível observar, através dos resultados das tabelas 11 e 12 que o sistema se encontra com dificuldade em estabilizar o pH e a Alcalinidade Hidróxida dentro da faixa de controle, aumentando-se os riscos de corrosão no sistema. O produto dosado para controle do pH possui como componente principal o Fosfato trissódico. Assim, de acordo com os resultados, verifica-se a necessidade de se reduzir a dosagem desse composto para correção do pH da água da caldeira.

Observa-se também que a caldeira se encontra com alto teor de dureza, que é proveniente das condições de dureza na alimentação (conforme resultados apresentados anteriormente), o que não condiz com as condições do tratamento adotado (Fosfato Contínuo), que requer condição de 0 (zero) dureza na caldeira.

De acordo com os resultados apresentados pelas tabelas 11 e 12, verifica-se que o residual de carbohidrazida encontra-se abaixo das faixas especificadas, aumentando-se as chances de corrosão no sistema.

Constata-se também que o teor de sais dissolvidos se encontra baixo, uma vez que os resultados de condutividade estão abaixo dos limites de controle.

Pode-se verificar que o sistema poderia operar por mais tempo utilizando esta mesma água, aumentando o intervalo entre as purgas, uma vez que os limites de controle permitem que esses sais se concentrem até uma condutividade de 1500 uS/cm (para a caldeira operando a 48 bar) e 1000 uS/cm (para a caldeira operando a 67 bar), ou seja, o sistema poderia trabalhar com mais ciclos de concentração, gerando economias de combustível e de produtos químicos.

O quadro 13 a seguir apresenta as orientações emitidas pelo software para os resultados das análises dos meses de janeiro, fevereiro e abril. Os relatórios completos emitidos pelo software encontram-se no apêndice E.

Quadro 13 – Orientações de acompanhamento da água da caldeira nos meses de janeiro, fevereiro e abril de 2022

Orientações	Janeiro de 2022	Fevereiro de 2022	Abril de 2022
<b>Orientação 1</b>	Caldeira altamente desconcentrada. Aumentar o intervalo entre as descargas para concentrar a caldeira.	Caldeira altamente desconcentrada. Aumentar o intervalo entre as descargas para concentrar a caldeira.	Caldeira altamente desconcentrada. Aumentar o intervalo entre as descargas para concentrar a caldeira.
<b>Orientação 2</b>	Subdosagem de sequestrante de oxigênio. Possibilidade de corrosão. Dosar produto em caráter de choque para corrigir residual.	Subdosagem de sequestrante de oxigênio. Possibilidade de corrosão. Dosar produto em caráter de choque para corrigir residual.	Subdosagem de sequestrante de oxigênio. Possibilidade de corrosão. Dosar produto em caráter de choque para corrigir residual.
<b>Orientação 3</b>	pH e OH <sup>-</sup> elevados por sobredosagem de alcalinizante. Possibilidade de corrosão. Reduzir dosagem para correção	pH e OH <sup>-</sup> elevados por sobredosagem de alcalinizante. Possibilidade de corrosão. Reduzir dosagem para correção	pH e OH <sup>-</sup> elevados por sobredosagem de alcalinizante. Possibilidade de corrosão. Reduzir dosagem para correção
<b>Orientação 4</b>	Dureza elevada. Possibilidade de incrustação. Adequar abrandamento na seção pré-caldeira.	Dureza elevada. Possibilidade de incrustação. Adequar abrandamento na seção pré-caldeira.	-
<b>Orientação 5</b>	Sobredosagem de alcalinizante. Possibilidade de corrosão. Reduzir a dosagem de alcalinizante.	Sobredosagem de alcalinizante. Possibilidade de corrosão. Reduzir a dosagem de alcalinizante.	Sobredosagem de alcalinizante. Possibilidade de corrosão. Reduzir a dosagem de alcalinizante.
<b>Orientação 6</b>	Residual de fosfato com resultados satisfatórios. Manter procedimento.	Residual de fosfato com resultados satisfatórios. Manter procedimento.	Residual de fosfato com resultados satisfatórios. Manter procedimento.

Fonte: Do autor (2022)

As orientações emitidas pelo software são para adequação de um sistema de abrandamento no pré-tratamento da água do sistema, correção na dosagem de alcalinizante, que se encontra elevada; correção da dosagem de sequestrante de oxigênio, que se encontra baixa; correção do sistema de purgas, devido à baixa concentração da caldeira e baixo aproveitamento da água e combustível.

A correção da dosagem de alcalinizante (Orientação 3) é confirmada pela Orientação 5. Entretanto, para esse sistema, utiliza-se como alcalinizante o fosfato, que apresenta resultados satisfatórios, de acordo com a Orientação 6 do quadro 13, contradizendo as orientações 3 e 5. Pode-se verificar, dessa forma, que é necessária uma adequação na dosagem de fosfato, reduzindo assim o seu teor e para que seja possível a redução do pH da água da caldeira.



Os relatórios completos com as orientações de dosagens foram enviados à usina, que realizou a correção nas dosagens de fosfato (alcalinizante) nos meses de dezembro de 2021 e de março de 2022, cuja concentração de fosfato foi reduzida de, de 7ppm para 5ppm entre os meses de novembro e dezembro de 2021, e de 8ppm para 5ppm de fosfato entre os meses de fevereiro e março de 2022. Como consequência, o pH nos meses de correção estiveram dentro da faixa de controle, conforme os resultados apresentados na tabela 11.

Com o intuito de verificar o aproveitamento da água, do combustível e dos produtos utilizados no sistema, foram calculados, com o auxílio do software, os ciclos de concentração da caldeira. A figura abaixo exibe um relatório identificado como ID 28 e gerado pelo software com os resultados do mês de janeiro (caldeira operando a 48 bar de pressão), evidenciando os ciclos de concentração permitidos e os ciclos de concentração de trabalho/operação, de acordo com a figura 50 a seguir:

Figura 50 – Relatório de ciclos de concentração da operação no mês de janeiro de 2022 a 48 bar de pressão

ORIENTAÇÕES TÉCNICAS - CICLOS DE CONCENTRAÇÃO		BWT Solutions	
ID Análise	28		
Resultados dos Parâmetros Analíticos			
Alcalinidade Total Permitida (ppm)	200	Cloretos na Caldeira (ppm)	1,6
Alcalinidade na Caldeira (ppm)	20	Condutividade na Alimentação (uS/cm)	9
Dureza Total na Caldeira (ppm)	3	Silica na Alimentação (ppm)	0,68
Silica Permitida na Caldeira (ppm)	30	Cloretos na Alimentação (ppm)	0
Condutividade (uS/cm)	89	Magnésio na Caldeira (ppm)	0,6
Silica na Caldeira (ppm)	3		
Ciclos de Concentração da Caldeira			
Ciclos Permitidos pela Silica	10	Ciclos pela Condutividade	10
Ciclo Permitido pela Alcalinidade	11,00	Ciclos pelos Cloretos	
		Ciclos pela Silica	4
Orientações Técnicas			
<p>Considera-se apenas o ciclo de menor valor ou aquele com menor probabilidade de interferências e erros nos resultados. Se Ciclo = Ciclo Permitido, então o equipamento está operando na sua capacidade máxima. Se Ciclo &lt; Ciclo Permitido, então o equipamento está operando ABAIXO da sua capacidade máxima e o intervalo entre as descargas pode ser aumentado. Se Ciclo &gt; Ciclo Permitido, então o equipamento está operando ACIMA da sua capacidade máxima e o intervalo entre as descargas deve ser reduzido para que não ocorram problemas de incrustação, arraste e corrosão.</p>			

Fonte: Do autor (2022)

O relatório evidencia o baixo aproveitamento do sistema, uma vez que a caldeira pode operar, de acordo com os resultados emitidos, com até 10 ciclos de concentração. Considera-se como ciclo permitido o menor ciclo (ciclos permitidos pela sílica, neste caso), uma vez que o teor de sílica está limitando o sistema, pelo seu alto teor.

O sistema está operando com um número de 10 ciclos de concentração (verificado pelos ciclos da condutividade), ou seja, em janeiro, o sistema encontrava-se operando no seu limite.

Pelos resultados analíticos do mês de janeiro, a caldeira estava operando com condutividade de 89 uS/cm, ou seja, o sistema estava abaixo dos limites de controle para a condutividade (limites de controle: 300 a 1500 uS/cm), evidenciando um sistema altamente desconcentrado e baixo aproveitamento de insumos (combustível, água e produtos químicos). Entretanto, de acordo com os resultados emitidos pelo software para os ciclos de concentração e que constam no relatório 28, o sistema encontra-se limitado pela qualidade da água de alimentação.

O teor de sílica na alimentação não possui uma faixa especificada, porém, pode-se constatar que esse parâmetro encontra-se elevado, dado que ele limita os ciclos de concentração da caldeira, conforme verificado na fundamentação teórica (Equação 23), e que, quanto maior o teor de sílica na alimentação, menores os ciclos permitidos e menor o aproveitamento dos insumos disponíveis.

O relatório 29 (Figura 51) gerado pelo software apresenta os resultados de ciclos de concentração do mês de abril, com a caldeira operando a 67 bar de pressão, elencando os ciclos de concentração permitidos e os ciclos de concentração de trabalho/operação.

Figura 51 – Relatório de ciclos de concentração da operação no mês de abril de 2022 a 67 bar de pressão

ORIENTAÇÕES TÉCNICAS - CICLOS DE CONCENTRAÇÃO		BWT Solutions	
IDAnálise	<input type="text" value="29"/>		
Resultados dos Parâmetros Analíticos			
Alcalinidade Total Permitida (ppm)	<input type="text" value="100"/>	Cloretos na Caldeira (ppm)	<input type="text" value="2,5"/>
Alcalinidade na Caldeira (ppm)	<input type="text" value="35"/>	Condutividade na Alimentação (uS/cm)	<input type="text" value="7"/>
Dureza Total na Caldeira (ppm)	<input type="text" value="0"/>	Silica na Alimentação (ppm)	<input type="text" value="0,7"/>
Silica Permitida na Caldeira (ppm)	<input type="text" value="8"/>	Cloretos na Alimentação (ppm)	<input type="text" value="0"/>
Condutividade (uS/cm)	<input type="text" value="142"/>	Magnésio na Caldeira (ppm)	<input type="text" value="0"/>
Silica na Caldeira (ppm)	<input type="text" value="3"/>		
Ciclos de Concentração da Caldeira			
Ciclos Permitidos pela Silica	<input type="text" value="3"/>	Ciclos pela Condutividade	<input type="text" value="20"/>
Ciclo Permitido pela Alcalinidade	<input type="text" value="3,00"/>	Ciclos pelos Cloretos	<input type="text" value=""/>
		Ciclos pela Silica	<input type="text" value="4"/>
Orientações Técnicas			
<p>Considera-se apenas o ciclo de menor valor ou aquele com menor probabilidade de interferências e erros nos resultados. Se Ciclo = Ciclo Permitido, então o equipamento está operando na sua capacidade máxima. Se Ciclo &lt; Ciclo Permitido, então o equipamento está operando ABAIXO da sua capacidade máxima e o intervalo entre as descargas pode ser aumentado. Se Ciclo &gt; Ciclo Permitido, então o equipamento está operando ACIMA da sua capacidade máxima e o intervalo entre as descargas deve ser reduzido para que não ocorram problemas de incrustação, arraste e corrosão.</p>			

Fonte: Do autor (2022)

Os resultados do relatório acima deixam evidente, conforme verificado na literatura, quanto maior a pressão do sistema, mais rigoroso se torna o tratamento. Isso se deve ao estreitamento das faixas de controle. Esta constatação pode ser realizada tendo por base os ciclos de concentração permitidos que, no mês de janeiro, a uma pressão de 48 bar, era possível operar com até 10 ciclos de concentração e o sistema encontrava-se operando com 10 ciclos, ou seja, na sua capacidade máxima. Essa possibilidade de se trabalhar com mais ciclos garantia o uso da água do sistema por mais tempo, gerando economias. O sistema poderia trabalhar com até 11 ciclos caso o teor de sílica na alimentação não fosse tão elevado.

Através do relatório 29 verifica-se que, nas condições atuais, ou seja, com a caldeira operando a 67 bar para gerar energia elétrica, é possível trabalhar com apenas 3 ciclos de concentração com a atual qualidade da água de alimentação, triplicando os gastos de água, combustível e produtos químicos. Ainda assim, o sistema encontra-se operando, de acordo com o parâmetro sílica, com 4 ciclos, e, de acordo com o parâmetro condutividade, com 20 ciclos.

Constata-se que, no mês de abril, nas novas condições de operação, o sistema encontra-se acima das faixas determinadas para os ciclos de concentração e, caso sejam mantidas as atuais condições de pré-tratamento, faz-se necessário reduzir os intervalos de descarga para evitar problemas de corrosão, incrustação e arraste, tanto na caldeira quanto na turbina.

Vamos agora, imaginar uma situação hipotética na qualidade da água de alimentação em que os teores das impurezas seriam reduzidos em 50%, representando uma melhoria de 50% no pré-tratamento. Conseqüentemente, os teores das impurezas na caldeira também seriam reduzidos pela metade do seu valor.

As tabelas 13 e 14 abaixo estabelecem um comparativo entre os resultados do mês de abril e os valores estipulados considerando a situação hipotética mencionada acima, tanto para a alimentação quanto para a caldeira.

Tabela 13 - Comparativo entre os resultados reais e os resultados hipotéticos de melhorias no pré-tratamento para da água de alimentação

Alimentação			
Propriedades	Limites	06/04/2022	Situação Hipotética
Condutividade Específica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	<b>0 a 10</b>	7	3,5
Sílica ( $\text{mg}/\text{L SiO}_2$ )	<b>ND</b>	0,7	0,35
Dureza Total ( $\text{mg}/\text{L CaCO}_3$ )	<b>0 - 0,05</b>	0	0
Cloretos ( $\text{mg}/\text{L Cl}^-$ )	<b>ND</b>	0	0

Fonte: Dados da pesquisa (2022)

Tabela 14 - Comparativo entre os resultados reais e os resultados hipotéticos de melhorias no pré-tratamento para da água da caldeira


Caldeira			
Propriedades	Limites	06/04/2022	Situação Hipotética
Condutividade Específica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	<b>200 a 1000</b>	142	71
Sílica ( $\text{mg}/\text{L SiO}_2$ )	<b>0 a 8</b>	3	1,5
Dureza Total ( $\text{mg}/\text{L CaCO}_3$ )	<b>0</b>	0	0
Cloretos ( $\text{mg}/\text{L Cl}^-$ )	<b>&lt;300</b>	2,5	1,25
Alcalinidade Total ( $\text{mg}/\text{L CaCO}_3$ )	<b>0 a 100</b>	35	17,5

Fonte: Dados da pesquisa (2022)

A Figura 52 abaixo exibe um relatório identificado como ID 30 e gerado pelo software com os resultados dos ciclos de concentração para a situação hipotética mencionada acima com a caldeira operando a 67 bar.

Figura 52 – Relatório de ciclos de concentração da caldeira operando com uma situação hipotética de melhoria de eficiência de 50% no pré-tratamento

### ORIENTAÇÕES TÉCNICAS - CICLOS DE CONCENTRAÇÃO



ID Análise

Resultados dos Parâmetros Analíticos

Alcalinidade Total Permitida (ppm) <input style="width: 50px;" type="text" value="100"/>	Cloretos na Caldeira (ppm) <input style="width: 50px;" type="text" value="1,25"/>
Alcalinidade na Caldeira (ppm) <input style="width: 50px;" type="text" value="17,5"/>	Condutividade na Alimentação ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) <input style="width: 50px;" type="text" value="3,5"/>
Dureza Total na Caldeira (ppm) <input style="width: 50px;" type="text" value="0"/>	Sílica na Alimentação (ppm) <input style="width: 50px;" type="text" value="0,35"/>
Sílica Permitida na Caldeira (ppm) <input style="width: 50px;" type="text" value="8"/>	Cloretos na Alimentação (ppm) <input style="width: 50px;" type="text" value="0"/>
Condutividade ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) <input style="width: 50px;" type="text" value="71"/>	Magnésio na Caldeira (ppm) <input style="width: 50px;" type="text" value="0"/>
Sílica na Caldeira (ppm) <input style="width: 50px;" type="text" value="0,35"/>	

Ciclos de Concentração da Caldeira

Ciclos Permitidos pela Sílica <input style="width: 50px;" type="text" value="23"/>	Ciclos pela Condutividade <input style="width: 50px;" type="text" value="20"/>
Ciclo Permitido pela Alcalinidade <input style="width: 50px;" type="text" value="6,00"/>	Ciclos pelos Cloretos <input style="width: 50px;" type="text" value=""/>
	Ciclos pela Sílica <input style="width: 50px;" type="text" value="1"/>

Orientações Técnicas

Considera-se apenas o ciclo de menor valor ou aquele com menor probabilidade de interferências e erros nos resultados. Se Ciclo = Ciclo Permitido, então o equipamento está operando na sua capacidade máxima. Se Ciclo < Ciclo Permitido, então o equipamento está operando ABAIXO da sua capacidade máxima e o intervalo entre as descargas pode ser aumentado. Se Ciclo > Ciclo Permitido, então o equipamento está operando ACIMA da sua capacidade máxima e o intervalo entre as descargas deve ser reduzido para que não ocorram problemas de incrustação, arraste e corrosão.

Fonte: Do autor (2022)

Comparando-se o relatório 29 com o relatório 30, verifica-se que, com uma melhoria de 50% no pré-tratamento, considerando-se os parâmetros Alcalinidade Total, Dureza Total, Sílica e Cloretos, que são os parâmetros utilizados para o cálculo dos Ciclos de Concentração, nota-se que é possível, com essa adequação, aumentar o número de ciclos permitidos de 3 para 6 para a os ciclos calculados pela Alcalinidade e de 3 para 23 para os ciclos calculados pela sílica nas condições atuais de operação, ou seja, realizando uma melhoria de 50% na performance do pré-tratamento, é possível dobrar os ciclos permitidos pela alcalinidade e setuplicar o número de ciclos permitidos pela sílica.

#### **5.2.4 Validação do software**

Foi possível realizar a validação do software enviando-se os relatórios de orientações técnicas emitidos pelo software à usina e comparando-se os resultados das ações corretivas com aqueles previstos na literatura.

A limpeza nas membranas na osmose realizada no início do mês de fevereiro de 2022, conforme orientações do relatório enviado no mês de janeiro à empresa, reduziu o teor de sais dissolvidos e de dureza na saída da osmose e, conseqüentemente, na alimentação e no interior da caldeira, reduzindo-se a possibilidade de incrustação e corrosão, conforme apontado na literatura.

A dosagem de fosfato trissódico, que é utilizado como alcalinizante nesse sistema, foi reduzida nos meses de dezembro de 2021 e março de 2022, conforme as orientações enviadas à empresa. Essas alterações corrigiram os valores de pH da caldeira para dentro da faixa de controle, conforme previsto na revisão bibliográfica.

Resultados como esses, obtidos através de melhorias no pré-tratamento e no tratamento interno, permitem um maior aproveitamento dos insumos presentes, conforme os resultados apresentados no relatório n° 30 (figura 52), resultando em maior número de ciclos permitidos, conforme também foi previsto na literatura.

Foi possível também, comparar as faixas de controle da alimentação e da água da caldeira com as faixas adotadas pela empresa de tratamento da água da usina e assim, verificar que os valores coincidiam com aqueles previstos na literatura, assim como o tratamento interno sugerido quando comparado com aquele utilizado na usina.

Verificou-se também que a limpeza química pré-operacional da caldeira realizada e sugerida pela empresa que realiza o tratamento da água seguiu exatamente as mesmas etapas e os mesmos compostos químicos sugeridos pelo software, confirmando o que foi encontrado na literatura.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através dessa pesquisa, foi possível verificar, conforme proposto nesse trabalho, as vantagens em se utilizar um software na indicação e no acompanhamento do tratamento de água de caldeiras, com resultados e orientações sendo emitidos imediatamente após o lançamento dos resultados das análises físico-químicas. O uso do software nessa pesquisa possibilitou comparar o tratamento adotado com o tratamento sugerido no levantamento teórico, tanto para o sistema pré-caldeira quanto para a seção interna.

Durante o período de estudo, verificou-se que a empresa faz uso de um sistema de tratamento interno que está de acordo com as orientações emitidas pelo software e que condizem com o levantamento teórico, entretanto, a empresa carece de melhorias no seu pré-tratamento para que os parâmetros físico-químicos estejam dentro das faixas pré-estabelecidas pelo software e determinadas pelo levantamento realizado e também para que haja melhor aproveitamento de insumos, reduzindo custos e reduzindo a possibilidade de danos ao sistema.

As orientações no acompanhamento do pré-tratamento e da alimentação sugerem, como complemento, uma etapa de abrandamento, devido ao teor elevado de dureza alimentando a caldeira e uma nova etapa de desmineralização, devido ao alto teor de sais na água de alimentação, além de uma etapa de oxidação para remoção do ferro presente nessa água, que pode gerar deposição na caldeira ou envenenamento das resinas.

Verificou-se que, apesar de a água de reposição (poço) apresentar alguma variação no período de estudo, ela ainda apresenta um teor elevado de dureza total, ferro total, sílica, cloretos e sais dissolvidos, ou seja, esses resultados reforçam a necessidade de complementos no pré-tratamento para que sejam evitados problemas de incrustação, corrosão, arraste e para melhor aproveitamento dos recursos utilizados.

O sistema que alimenta a caldeira ainda não possui etapas de oxidação e abrandamento, fazendo-se necessária a instalação dessas etapas através de um filtro de zeólita seguido de um abrandador, antecedendo o sistema de desmineralização.

Dado que o pré-tratamento da usina já possui um sistema de desmineralização por osmose reversa, verifica-se que podem ser realizadas melhorias nesse sistema, tais como a troca das membranas por membranas mais seletivas e instalação de uma nova etapa, conhecida como



polimento, que pode ser realizada por meio da desmineralização por leito misto (resinas de troca iônica) ou por osmose reversa (segundo passe).

Através desse estudo, foi possível confirmar a contribuição da linha de reposição na qualidade da água de alimentação e água interna da caldeira, de acordo com os resultados com teores elevados de contaminantes (principalmente a dureza total) na alimentação e na seção interna, reforçando a necessidade de investimentos em pré-tratamento para maior economia e estabilidade do sistema.

Seguindo as orientações emitidas pelo software e análise dos resultados, foi notória a redução no teor de contaminantes na alimentação da caldeira após a limpeza nas membranas da osmose, possibilitando que muitos dos parâmetros se adequassem aos limites de controle, confirmando a necessidade de melhorias no pré-tratamento e necessidade de acompanhamento constante e imediato nas condições do sistema, que é possibilitado com o uso desse software.

O acompanhamento também permitiu verificar uma necessidade de correção nas dosagens de amins na linha de vapor para correção do pH nas linhas de vapor, condensado e alimentação de acordo com as faixas de controle pré-estabelecidas.

Quanto à dosagem de alcalinizante (fosfato trissódico), para que sejam mantidas as faixas de controle indicadas pelo levantamento teórico, as orientações são de redução nas dosagens, reduzindo, dessa forma, o pH da água da caldeira. Sugere-se também um aumento no teor de sequestrante (carbohidrazida) para correção desse composto de acordo com os limites pré-estabelecidos.

De acordo com os resultados da pesquisa, foi possível também verificar um baixo aproveitamento dos insumos da planta (combustível, água e produtos químicos) e também a consequente orientação de melhorias nesse quesito. As melhorias são indicadas para o pré-tratamento, uma vez que ele influencia diretamente no aproveitamento e rendimento do sistema.

Diante dos resultados apresentados, pode-se concluir que o pré-tratamento influencia diretamente na qualidade da água de alimentação e da seção interna da caldeira, uma vez que melhorias e adequações nesse ponto, favorecem o sistema, não somente na redução de danos, como também na redução de custos com água, produtos químicos e combustível.

Foi possível também realizar a validação do software em campo enviando-se relatórios de orientação para a usina com orientações técnicas relacionadas ao pré-tratamento e ao

tratamento interno adotados para que fosse possível comparar os resultados das ações corretivas sugeridas com aquelas previstas na literatura.

Conclui-se também que o software possibilita que essas melhorias sejam realizadas de forma contínua e imediata, reduzindo custos desnecessários e possíveis danos no sistema, garantindo-lhe eficiência e estabilidade.

## 7 TRABALHOS FUTUROS

O tratamento de água em caldeiras é um tema vasto e que permite diversas possibilidades de estudos, das quais, como sugestão, podem ser citadas:

- Testes envolvendo outros polifosfatos como anti-incrustantes: pirofosfatos e tripolifosfatos;
- Testes envolvendo outros tipos de aminas como alcalinizantes: Monoetanolamina (MEA) e Metoxipropilamina (MOPA);
- Desenvolvimento de uma função no software em que seja possível comprovar a eficiência do tratamento através do consumo de combustível, envolvendo variáveis como: tipo de combustível, quantidade de combustível utilizado de acordo com o tipo de tratamento adotado, custo do combustível, poder calorífico e economia gerada.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Parâmetros da água para caldeiras de baixa, média e alta pressão.** [S. l.]. 2009. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br>. Acesso em: 13 out. 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Indicadores de Qualidade -Índice de Qualidade das Águas (IQA).** [S. l.]. Disponível em: <http://pnqa.ana.gov.br/indicadores-indice-aguas.aspx>. Acesso em: 18 mar. 2022.

ALPHENZ. **Osrose Reversa.** [S. l.]. Disponível em: <https://www.alphenz.com.br/produtos/osrose-reversa/>. Acesso em: 15 de maio de 2022.

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

ASME: **Consensus on operating practices for control of feed water and boiler water quality in modern industrial boilers.** American Society of Mechanical Engineers. 1979.

BACCAN, N. *et al.* **Química analítica quantitativa elementar.** 3ª ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2001.

BAZZO, E. **Geração de Vapor.** 1ª ed. Florianópolis, 571 p., Editora da UFSC, 1992.

BEBER, A. **Congruent phosphate water treatment control for recovery and power boilers based on knowledge.** O Papel, vol. 76, num. 5, pp. 55 – 57, Mai. 2015. Disponível em: [http://revistaopapel.org.br/noticia-anexos/1431699329\\_1157a048d3d01ef813cf8039e8cfb1ff\\_2009624624.pdf](http://revistaopapel.org.br/noticia-anexos/1431699329_1157a048d3d01ef813cf8039e8cfb1ff_2009624624.pdf). Acesso em: 15 dez. 2021.

BEGA, E. A. **Instrumentação aplicada ao controle de caldeiras.** 3.ed. Rio de Janeiro, 179 p., Interciência, 2003.

BOTARI, A.; BOTARI, J. C. GREATTI, G. **Análise da eficiência da coagulação e da floculação em estações de tratamento de água em ciclo completo no Brasil.** XIV International Conference on Engineering and Technology Education. Salvador, 2016.

BRASIL. **Ministério da Saúde. Portaria nº 2914/MS de 2011.** [S. l.]. Disponível em: [https://bvsmis.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914\\_12\\_12\\_2011.html](https://bvsmis.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914_12_12_2011.html) Acesso em: 15 de maio de 2022.

BRASIL. **Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 357, de 15 de junho de 2005.** Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Disponível em: [http://pnqa.ana.gov.br/Publicacao/RESOLUCAO\\_CONAMA\\_n\\_357.pdf](http://pnqa.ana.gov.br/Publicacao/RESOLUCAO_CONAMA_n_357.pdf). Acesso em: 25 jan 2022.

BRASIL. **Ministério do Trabalho e Previdência. NR 13 – Caldeiras, vasos de pressão, tubulações e tanques metálicos de armazenamento.** Brasília: Ministério do Trabalho e Previdência, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-previdencia/pt-br/composicao/orgaos-especificos/secretaria-de-trabalho/inspecao/seguranca-e-saude-no-trabalho/normas-regulamentadoras/nr-13.pdf>. Acesso em: 11 out. 2021.

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

BRUNHARA. **Desaerador.** 2021. Brunhara Water. Carapicuíba-SP. Disponível em: <https://brunharawater.com.br/desaeracao/>. Acesso em: 12 nov. 2021.

BRUNHARA. **Custo do tratamento de água da caldeira.** . Carapicuíba-SP. Brunhara Water. Disponível em: <https://www.digitalwater.com.br/custo-do-tratamento-da-agua-da-caldeira/>. Acesso em: 12 nov. 2021.

BRUNHARA. **Qual o limite seguro para cloretos? E para sistemas com aço inoxidável?** Carapicuíba-SP, 2021. Brunhara Water. Disponível em: [https://www.digitalwater.com.br/cloretos-sistema-de-resfriamento/#:~:text=Normalmente%2C%20o%20limite%20deve%20ser,sulfatos%20\(SO4%2E2%80%93\)](https://www.digitalwater.com.br/cloretos-sistema-de-resfriamento/#:~:text=Normalmente%2C%20o%20limite%20deve%20ser,sulfatos%20(SO4%2E2%80%93).). Acesso em: 12 nov. 2021.

BRUNHARA. **Qual o melhor sequestrante de oxigênio para sua caldeira?** Carapicuíba-SP, 2021. Brunhara Water. Disponível em: <https://brunharawater.com.br/qual-o-melhor-sequestrante-de-oxigenio-para-sua-caldeira/>. Acesso em: 12 nov. 2021.

BLUMBERG, E.; AZEVEDO NETTO, J.M. **Alcalinidade e dureza das águas naturais.** *Revista DAE*, [S. l.], v. 28, n. 1033, p. 63-79, 1956.

CARVALHO, A. R. P.; **Sequestrantes de Oxigênio para Caldeiras: Sulfito**. São Paulo, 2021. Disponível em: <https://kurita.com.br/index.php/artigos-tecnicos/sequestrante-de-oxigenio-para-caldeiras-sulfito/>. Acesso em: 11 dez. 2021.

CARVALHO, A. R. P.; SILVA D. O. **Abrandamento**. São Paulo, 2021. Disponível em: <https://kurita.com.br/index.php/artigos-tecnicos/abrandamento/>. Acesso em: 24 nov. 2021.

CETESB. **Produtos Químicos. Ficha de Resposta a Emergência Química Hidróxido de Amônio**. São Paulo, 2021. Disponível em:

<https://produtosquimicos.cetesb.sp.gov.br/ficha/produto/762>. Acesso em: 15 de maio de 2022.

CETESB. **Produtos Químicos. Ficha de Resposta a Emergência Química.**

**Ciclohexilamin**. São Paulo, 2021. Disponível em:

[https://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/produtos/ficha\\_completa1.asp?consulta=CICLOHEXILAMINA](https://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/produtos/ficha_completa1.asp?consulta=CICLOHEXILAMINA). Acesso em: 15 de maio de 2022.

CETESB. **Produtos Químicos. Ficha de Resposta a Emergência Química. Morfolina**. São Paulo. Disponível em:

[https://licenciamento.cetesb.sp.gov.br/produtos/ficha\\_completa1.asp?consulta=MORFOLINA](https://licenciamento.cetesb.sp.gov.br/produtos/ficha_completa1.asp?consulta=MORFOLINA). Acesso em: 15 de maio de 2022.

CHAUHAN, J. **Type of impurities into boiler feed water**. [S. l.]. 2019. Disponível em: <https://www.askpowerplant.com/type-of-impurities-into-boiler-feed-water/> Acesso em: 01 nov. 2021.

FUSATI: **O que é ultrafiltração e seus benefícios**. Piracicaba – SP, 2020. FUSATI Ambiental. Disponível em: < <https://www.fusati.com.br/o-que-e-ultrafiltracao-e-seus-beneficios/> > Acesso em: 24 nov. 2021.

GOUVÊA, C. A. K.; HURTADO, A. L. B.; BORZIO, R. F.; FOLLETO, M. A. USO DE ÁGUA TRATADA POR OSMOSE REVERSA PARA A GERAÇÃO DE VAPOR EM INDÚSTRIA DE TABACO. [S. l.]. **Revista Produção Online**. V. 12, páginas 522 – 536, 2012. Disponível em: <file:///C:/Users/carlo/Downloads/941-Texto%20do%20Artigo-5247-4179-10-20120613.pdf>. Acesso em 15 Mai. 2022.

HELLER, L.; PÁDUA, V. L. **Abastecimento de água para consumo humano**. [S. l.]. 1º Ed. Minas Gerais: UFMG, 2006.

KEMMER, F. N.; “**The Nalco Water Handbook**” 2nd Edition, McGraw-Hill Book Company, New York, 1988.

KURITA: **Água de geradores de vapor**. São Paulo-SP, 2021. Kurita do Brasil Ltda. Disponível em: <https://kurita.com.br/index.php/atuacao/produtos-e-servicos/agua-de-geradores-de-vapor-caldeiras/>. Acesso em: 12 dez. 2021.

LEITE, N. R.; MILITÃO, R. A. **Tipos e aplicações de caldeiras**. [S. l.], 2008. Disponível em: < <https://docplayer.com.br/596699-Tipos-e-aplicacoes-de-caldeiras.html> >. Acesso em: 11 out. 2021.

LENNTECH: **Boiler Feed Water**. 2021. South Miami. USA. Lenntech USA LLC. Disponível em: <https://www.lenntech.com/applications/process/boiler/boiler-feed-water.htm> Acesso em: 01 nov. 2021.

LISAUSKAS, José Luis Soriano. **Objeto de aprendizagem para apoio ao processo ensino aprendizagem de seleção de tecnologias para tratamento de água em Caldeiras**. Dissertação (mestrado) - Universidade de Ribeirão Preto (UNAERP), Tecnologia Ambiental. Ribeirão Preto, 2017.

MCGOWAN, W. **Water processing: residential, commercial, light-industrial**. [S. l.], 3rd ed. *Lisle, IL, 2000*. Water Quality Association.

MIERZWA, J.C. *et al.* **Tratamento de água para abastecimento público por ultrafiltração: avaliação comparativa através dos custos diretos de implantação e operação com os sistemas convencional e convencional com carvão ativado**. Engenharia Sanitária Ambiental, v. 13, n. 1, p.78-87, Rio de Janeiro/RJ, 2008.

MOURA, J.P. de; URTIGA FILHO, S.L. **Prevenção de corrosão em caldeiras. 2011**. Artigo em Hipertexto. Disponível em: [http://www.infobibos.com/Artigos/2011\\_2/caldeiras/index.htm](http://www.infobibos.com/Artigos/2011_2/caldeiras/index.htm). Acesso em: 18 de maio de 2022.

PACE , L. W. B. **Introdução ao Tratamento de Águas Industriais**. Buckman Laboratórios Ltda. Campinas/SP, 1997.

PETROCHEM. **O que faz e como funciona uma osmose inversa**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://www.petrochem.pt/pt/area-de-negocio/tratamento-de-aguas/equipamentos/filtracao/o-que-faz-e-como-funciona-uma-osmose-inversa.html>. Acesso em: 14. Jul. 2021.

RAMOS, M. H. C. **Remoção de Cor, Ferro e Manganês de Água com Matéria Orgânica Dissolvida por Pré-Oxidação com Dióxido de Cloro, Coagulação e Filtração**. 129f. 112 Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) Centro de Ciências Exatas, Naturais e Tecnologias - Universidade De Ribeirão Preto/UNAERP, Ribeirão Preto, 2010.

RUBIM, C. **Perfil do tratamento de água para caldeiras**. *Revista TAE*, Santo André, 2017. Disponível em: <https://www.revistatae.com.br/Artigo/43/perfil-do-tratamento-de-agua-para-caldeiras>. Acesso em: 3 nov. 2021.

SATHISH, T. et al. **Advancement of steam generation process in water tube boiler using Taguchi design of experiments**. ELSEVIER, [S. l.], 2021. Disponível em: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2214157X2100410X?token=CB461373BA4B26CB8275E50CF3AF272B81FD3D7342830D9DD76A7AD7AAAACDB51EB5E713B051D28098BBA58CC70F863&originRegion=us-east-1&originCreation=20220824001416>. Acesso em 23 ago, 2022.

SELBY, A. **Caustic Treatment of Electric Utility Drum Boilers**. *Mater. Perform.* [S. l.], 2009. 39–43. Disponível em: <https://www.materialsperformance.com/uploads/documents/Magazine/2009/OCT%202009%20Selby.pdf>. Acesso em 15 mar. 2022.

SILVA, J. O. M. **Tratamento químico de água de caldeiras**. 74p., [S. l.], 2008. Disponível em < [https://www.crq4.org.br/sms/files/file/mini\\_caldeiras\\_2008.pdf](https://www.crq4.org.br/sms/files/file/mini_caldeiras_2008.pdf)>. Acesso em: 13 dez. 2021.

TOGAWA, V. **Ciclo de concentração e purgas de caldeiras**. São Paulo – SP, 2018. Togawa Engenharia. Disponível em: <http://togawaengenharia.com.br/ciclo-de-concentracao-e-purga-de-caldeiras/>. Acesso em: 13 dez. 2021.

TOGAWA, V. **Quatro razões para utilizar um desaerador**. São Paulo – SP, 2018. Togawa Engenharia. Disponível em: <https://togawaengenharia.com.br/blog/4-razoes-para-utilizar-um-desaerador/>. Acesso em: 13 dez. 2021.

TOGAWA, V. **Tratamento de água para caldeiras**. São Paulo – SP, 2018. Togawa Engenharia. Disponível em: <http://togawaengenharia.com.br/tratamento-de-agua-para-caldeiras/>. Acesso em: 13 dez. 2021.

TROVATI, J. **Tratamento de Água para Geração de Vapor: Caldeiras**. [S. l.], 2009. Disponível em: [http://www.snatural.com.br/PDF\\_arquivos/Torre-Caldeira-Tratamento-Agua-Caldeira.pdf](http://www.snatural.com.br/PDF_arquivos/Torre-Caldeira-Tratamento-Agua-Caldeira.pdf). Acesso em: 12 out. 2021



## APÊNDICES

### APÊNDICE A – Pré-tratamento sugerido pelo software

Figura A1 – Sugestões de Pré – Tratamento (continua)

The screenshot displays a software interface with a blue header bar containing the title "Sugestões de Pré-Tratamento" and the "BWT Solutions" logo. The main content area lists three orientation suggestions:

- Orientação**      Necessidade de Etapa de Clarificação por ETA Convencional ou Ultrafiltração para redução da turbidez.
- Orientação**      Necessidade de Etapa de Oxidação ou Filtro de Zeólita para remoção do ferro presente na água de reposição.
- Orientação**      Necessidade de Abrandamento para redução da dureza presente na água de reposição.

The footer of the interface includes the date "sexta-feira, 10 de junho de 2022", the "BWT" logo, and the page number "Página 1 de 2".

Fonte: Do autor (2022)

Figura A1 – Sugestões de Pré – Tratamento (conclusão)

Orientação      Necessidade de Desmineralização por troca iônica ou osmose reversa para remoção dos sais dissolvidos.

Orientação      Necessidade de Desmineralização por troca iônica ou osmose reversa para remoção de sílica e/ou cloretos presentes na água.

Orientação      Necessidade de Desaeração mecânica com desaerador operando em temperatura de 100°C a 105°C para redução do oxigênio dissolvido.

sexta-feira, 10 de junho de 2022      BWT      Página 2 de 2

Fonte: Do autor (2022)

## APÊNDICE B – Acompanhamento da água bruta

Os resultados obtidos nas análises físico-químicas da água de reposição da caldeira (poço) nos meses de dezembro de 2021 e fevereiro de 2022, fornecidos pela empresa que realiza o tratamento dessa água foram lançados no software, que emitiu dois relatórios: relatório de resultados das análises físico-químicas e relatório de orientações técnicas com as sugestões de melhorias no sistema. Os relatórios estão representados pelas figuras de B1 a B4.

Figura B1 – Relatório nº52 de resultados da água bruta referente ao mês de dezembro de 2021

Relatório Técnico			
ÁGUA BRUTA/REPOSIÇÃO			
ID da Análise	Nome do Cliente	Cidade	Estado
52	CLIENTE COGERAÇÃO	RIBEIRÃO PRETO	SP
INFORMAÇÕES SOBRE COLETA E ANÁLISES			
Realização da Coleta	Análises Concluídas	Observações sobre a Coleta	
27/12/2021	04/01/2021		
Analista Responsável			
Ana Carolina - CRQ: 04577786			
Laboratório			
Laboratório Teste PPGEQ			
RESULTADOS DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS			
pH (6 a 9)	Dureza Total (0 - 0 ppm de CaCO <sub>3</sub> ) ND		
5,55	82		
Condutividade Específica (ND)	Alcalinidade Total (ppm de CaCO <sub>3</sub> ) ND		
465	143		
Ferro (ppm de Fe) ND	Alcalinidade Hidroxida (ppm de CaCO <sub>3</sub> ) ND		
0,3	0		
Silica (ppm de SiO <sub>2</sub> ) ND	Turbidez (NTU)		
20	2		
Cloretos (ppm de Cl-) ND			
46			
*ND: limites Não Determinados			
Comentários			
quinta-feira, 9 de junho de 2022			
BWT			
Página 1 de 6			

Fonte: Do autor (2022)


Figura B2 – Relatório nº55 de resultados da água bruta referente ao mês de fevereiro de 2022

Relatório Técnico			
ÁGUA BRUTA/ REPOSIÇÃO			
<b>BWT Solutions</b>			
ID da Análise	Nome do Cliente	Cidade	Estado
55	CLIENTE COGERAÇÃO	RIBEIRÃO PRETO	SP
INFORMAÇÕES SOBRE COLETA E ANÁLISES			
Realização da Coleta	Análises Concluídas	Observações sobre a Coleta	
10/02/2022	14/02/2022		
Analista Responsável			
Maria Ângela - CRQ: 04865789			
Laboratório			
Laboratório Teste PPGEQ			
RESULTADOS DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS			
pH (6 a 9)	Dureza Total (0 - 0 ppm de CaCO <sub>3</sub> ) ND		
7,3	50		
Condutividade Específica (ND)	Alcalinidade Total (ppm de CaCO <sub>3</sub> ) ND		
283	130		
Ferro (ppm de Fe) ND	Alcalinidade Hidróxida (ppm de CaCO <sub>3</sub> ) ND		
0,1	0		
Silica (ppm de SiO <sub>2</sub> ) ND	Turbidez (NTU)		
22	0		
Cloretos (ppm de Cl-) ND			
12			
*ND: Limites Não Determinados			
Comentários			
quinta-feira, 9 de junho de 2022		<b>BWT</b>	
		Página 1 de 5	

Fonte: Do autor (2022)

Figura B3 – Relatório nº 52 de orientações para a água bruta em dezembro de 2021 (continua)

## ORIENTAÇÕES TÉCNICAS - ÁGUA BRUTA/REPOSIÇÃO




ID Análise

Orientações Turbidez elevada. Água com alto teor de material em suspensão. Necessária etapa de clarificação: ETA convencional ou Ultrafiltração.

Orientações Água com alto teor de sílica, ferro ou cloretos. Possibilidade de incrustação/corrosão. Necessária Desmineralização (Troca iônica ou Osmose Reversa).

Orientações Condutividade elevada. Água de reposição com alto teor de sais dissolvidos. Trabalhar com Desmineralização por Troca Iônica ou Osmose Reversa.

quinta-feira, 9 de junho de 2022  Página 1 de 2

Fonte: Do autor (2022)

Figura B3 – Relatório nº 52 de orientações para a água bruta em dezembro de 2021 (conclusão)

ID Análise	52
Orientações	Dureza elevada. Possibilidade de incrustação por sais de cálcio e magnésio no sistema. Necessidade de etapa de Abrandamento.

quinta-feira, 9 de junho de 2022

BWT

Página 2 de 2

Fonte: Do autor (2022)

Figura B4 – Relatório nº 55 de orientações para a água bruta em fevereiro de 2022

ORIENTAÇÕES TÉCNICAS - ÁGUA BRUTA/REPOSIÇÃO		BWT Solutions
ID Análise	<input type="text" value="55"/>	
Orientações	Água com presença de sílica, ferro ou cloretos. Possibilidade de incrustação/corrosão. Necessária Desmineralização (Troca iônica ou Osmose Reversa).	
Orientações	Condutividade elevada. Água de reposição com alto teor de sais dissolvidos. Trabalhar com Desmineralização por Troca Iônica ou Osmose Reversa.	
Orientações	Água com presença de Ferro. Necessária Oxidação/Pré-doração para oxidação do Fe. Possibilidade de envenenamento de resinas e deposição.	
<hr/>		
quinta-feira, 9 de junho de 2022		BWT Página 1 de 1

Fonte: Do autor (2022)





2022  
 Figura C2 – Relatório nº 42 de resultados da osmotizada referente ao mês de fevereiro de

Relatório Técnico			
OSMOTIZADA			
ID da Análise	Nome do Cliente	Cidade	Estado
42	CLIENTE COGERAÇÃO	RIBEIRÃO PRETO	SP
INFORMAÇÕES SOBRE COLETA E ANÁLISES			
Realização da Coleta	Análises Concluídas	Observações sobre a coleta	
10/02/2022	14/02/2022		
Analista Responsável			
Maria Ângela - CRQ: 04865789			
Laboratório			
Laboratório Teste PPGEQ			
RESULTADOS DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS			
pH (6,00 a 9,00)	Dureza Total (ppm de CaCO <sub>3</sub> ) <0,05		
7,89	0,37		
Condutividade Específica (0 - 10 µS/cm)	Alcalinidade Total (ppm de CaCO <sub>3</sub> ) ND		
7	5		
Ferro (ppm de Fe) <0,01	Alcalinidade Hidroxida (ppm) ND		
0,008	0		
Silica (ppm de SiO <sub>2</sub> ) ND	Turbidez (NTU) ND		
0,39	0		
Cloretos (ppm de Cl-) ND	*ND: Limites Não Determinados		
0			
Comentários			
sexta-feira, 10 de junho de 2022			
BWT			
Página 1 de 2			

Fonte: Do autor (2022)

2021

Figura C3 – Relatório nº 41 de orientações da osmotizada referente ao mês de dezembro de

## ORIENTAÇÕES TÉCNICAS - OSMOTIZADA

BWT Solutions

ID da Análise

Orientação Condutividade elevada. Operação com baixos ciclos. Verificar operação da osmose, by pass, manutenção das membranas ou adequar polimento.

Orientação Teor elevado de ferro. Possibilidade de deposição. Adequar etapa de Oxidação na Clarificação.

Orientação Dureza elevada. Possibilidade de incrustação. Verificar escape de dureza, by pass, manutenção das membranas ou utilizar abrandador.

sexta-feira, 10 de junho de 2022 BWT Página 1 de 1

Fonte: Do autor (2022)

2022  
Figura C4 – Relatório nº 42 de orientações da osmotizada referente ao mês de janeiro de

**ORIENTAÇÕES TÉCNICAS - OSMOTIZADA** BWT Solutions

ID da Análise

Orientação Dureza elevada. Possibilidade de incrustação. Verificar escape de dureza, by pass, manutenção das membranas ou utilizar abrandador.

---

sexta-feira, 10 de junho de 2022 BWT Página 1 de 1

Fonte: Do autor (2022)

**APÊNDICE D – Acompanhamento da água de alimentação, saída de vapor e retorno de condensado**

Os resultados obtidos nas análises físico-químicas da alimentação (desaerador), da saída de vapor e do retorno de condensado nos meses de janeiro, fevereiro e abril de 2022 e que foram fornecidos pela empresa que realiza o tratamento dessa água foram lançados no software, que emitiu dois relatórios para cada ponto: relatório de resultados das análises físico-químicas e relatório de orientações técnicas com as sugestões de melhorias no sistema. Os relatórios estão representados pelas figuras de D1 a D18.

Figura D1 – Relatório nº 59 de resultados da alimentação referente ao mês de janeiro de 2022

Relatório Técnico			
ALIMENTAÇÃO/DESAERADOR - CALDEIRA			
ID da Análise	Nome do Cliente	Cidade	Estado
59	CLIENTE COGERAÇÃO	RIBEIRÃO PRETO	SP
INFORMAÇÕES SOBRE COLETA E ANÁLISES			
Realização da Coleta	Análises Concluídas	Observações sobre a coleta	
20/01/2022	21/01/2021		
Analista Responsável			
Wellington - CRQ: 04577786			
Laboratório			
Laboratório Teste PPGEQ			
RESULTADOS DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS			
pH (8,30 a 10,00)	7,68	Alcalinidade Total (ppm de CaCO3) ND	0
Condutividade Específica (0 - 10 uS/cm)	9	Alcalinidade Hidroxida (ppm) ND	0
Ferro (0 - 0,025 ppm de Fe)	0,1	Turbidez (NTU) ND	0
Cobre Total (0 - 0,020 ppm)	0	Oxigênio Dissolvido (0,000 - 0,007 ppm)	0,004
Silica (ppm de SiO2) ND	0,7	Dureza Total (0 - 0,2 ppm de CaCO3)	0,68
Claretos (ppm de Cl-) ND	0	*ND: Limites Não Determinadas	
Comentários			
terça-feira, 14 de junho de 2022		BWT	
		Página 1 de 2	

Fonte: Do autor (2022)

Figura D2 – Relatório nº 59 de orientações da alimentação referente ao mês de janeiro de 2022 (continua)

ORIENTAÇÕES TÉCNICAS - ALIMENTAÇÃO - CALDEIRA		BWT Solutions
ID da Análise	<input type="text" value="59"/>	
Orientação	Água de reposição com características ácidas. Verificar pré-tratamento, possíveis contaminações e corrigir pH do make up.	
Orientação	Água de reposição com alto teor de dureza. Possibilidade de incrustação. Verificar pré-tratamento.	
Orientação	Teor de ferro elevado. Verificar Oxidação no pré-tratamento ou corrosão na linha. Possibilidade de deposição na caldeira	

terça-feira, 14 de junho de 2022

BWT

Página 1 de 2

Fonte: Do autor (2022)

Figura D2 – Relatório n° 59 de orientações da alimentação referente ao mês de janeiro de 2022 (conclusão)

ID da Análise	<input type="text" value="59"/>
Orientação	Alto teor de sais. Possibilidade de incrustação/corrosão. Verificar manutenção ou adequar sistema de desmineralização.

terça-feira, 14 de junho de 2022

EWT

Página 2 de 2

Fonte: Do autor (2022)

2022

Figura D3 – Relatório nº 60 de resultados da alimentação referente ao mês de fevereiro de

Relatório Técnico
BWT  
Solutions

ALIMENTAÇÃO/DESAERADOR - CALDEIRA

ID da Análise 60	Nome do Cliente CLIENTE COGERAÇÃO	Cidade RIBEIRÃO PRETO	Estado SP
---------------------	--------------------------------------	--------------------------	--------------

INFORMAÇÕES SOBRE COLETA E ANÁLISES

Realização da Coleta 10/02/2022	Análises Concluídas 14/02/2022	Observações sobre a coleta
------------------------------------	-----------------------------------	----------------------------

Analista Responsável Maria Ângela - CRQ: 04865789
Laboratório Laboratório Teste PPGEQ

RESULTADOS DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

pH (8,30 a 10,00) 9,28	Alcalinidade Total (ppm de CaCO3) ND 0
Condutividade Específica (0 - 10 uS/cm) 7	Alcalinidade Hidróxida (ppm) ND 0
Ferro (0 - 0,025 ppm de Fe) 0,1	Turbidez (NTU) ND 0
Cobre Total (0 - 0,020 ppm) 0	Oxigênio Dissolvido (0,000 - 0,007 ppm) 0,005
Sílica (ppm de SiO2) ND 0,4	Dureza Total (0 - 0,2 ppm de CaCO3) 0,44
Cloretos (ppm de Cl-) ND 0	*ND: Limites Não Determinados

Comentários

terça-feira, 14 de junho de 2022
BWT
Página 1 de 2

Fonte: Do autor (2022)

2022

Figura D4 – Relatório n° 60 de orientações da alimentação referente ao mês de fevereiro

**ORIENTAÇÕES TÉCNICAS - ALIMENTAÇÃO - CALDEIRA** BWT Solutions

ID da Análise

Orientação Água de reposição com alto teor de dureza. Possibilidade de incrustação. Verificar pré-tratamento.

Orientação Teor de ferro elevado. Verificar Oxidação no pré-tratamento ou corrosão na linha. Possibilidade de deposição na caldeira

Orientação Alto teor de sais. Possibilidade de incrustação/corrosão. Verificar manutenção ou adequar sistema de desmineralização.

terça-feira, 14 de junho de 2022 BWT Página 1 de 1

Fonte: Do autor (2022)



Figura D5 – Relatório nº 65 de resultados da alimentação referente ao mês de abril de 2022

Relatório Técnico			
ALIMENTAÇÃO/DESAERADOR - CALDEIRA			
ID da Análise	Nome do Cliente	Cidade	Estado
65	CLIENTE COGERAÇÃO	RIBEIRÃO PRETO	SP
INFORMAÇÕES SOBRE COLETA E ANÁLISES			
Realização da Coleta	Análises Concluídas	Observações sobre a coleta	
05/04/2022	06/04/2022		
Analista Responsável			
Maria Ângela - CRQ: 04865789			
Laboratório			
Laboratório Teste PPGEQ			
RESULTADOS DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS			
pH (8,30 a 10,00)	7,03	Alcalinidade Total (ppm de CaCO <sub>3</sub> ) ND	0
Condutividade Específica (0 - 10 uS/cm)	7	Alcalinidade Hidroxida (ppm) ND	0
Ferro (0 - 0,025 ppm de Fe)	0,4	Turbidez (NTU) ND	0
Cobre Total (0 - 0,020 ppm)	0	Oxigênio Dissolvido (0,000 - 0,007 ppm)	0,000
Silica (ppm de SiO <sub>2</sub> ) ND	0,7	Dureza Total (0 - 0,2 ppm de CaCO <sub>3</sub> )	0,70
Cloretos (ppm de Cl-) ND	0	*ND: Limites Não Determinados	
Comentários			
Caldeira operando a 67 bar e 495°C.			
terça-feira, 14 de junho de 2022			
BWT			
Página 1 de 2			

Fonte: Do autor (2022)

Figura D6 – Relatório n° 65 de orientações da alimentação referente ao mês de abril 2022

ORIENTAÇÕES TÉCNICAS - ALIMENTAÇÃO - CALDEIRA		BWT Solutions
ID da Análise	<input type="text" value="65"/>	
Orientação	Água de reposição com características ácidas. Verificar pré-tratamento, possíveis contaminações e corrigir pH do make up.	
Orientação	Teor de ferro elevado. Verificar Oxidação no pré-tratamento ou corrosão na linha. Possibilidade de deposição na caldeira	
Orientação	Água de reposição com alto teor de dureza. Possibilidade de incrustação. Verificar pré-tratamento.	

terça-feira, 14 de junho de 2022

BWT

Página 1 de 2

Fonte: Do autor (2022)

2022

Figura D7 – Relatório n° 43 de resultados da saída do vapor referente ao mês de janeiro de

Relatório Técnico			
Saída de Vapor			
ID da Análise	Nome do Cliente	Cidade	Estado
43	CLIENTE COGERAÇÃO	RIBEIRÃO PRETO	SP
INFORMAÇÕES SOBRE COLETA E ANÁLISES			
Realização da Coleta	Análises Concluídas	Observações sobre a coleta	
20/01/2022	21/01/2022		
Analista Responsável			
Wellington - CRQ: 045.77.786			
Laboratório			
Laboratório Teste PPGEQ			
RESULTADOS DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS			
pH (9,2 a 9,60)	Dureza Total (ppm de CaCO <sub>3</sub> ) ND		
9,14	0		
Condutividade Específica (0 - 10 uS/cm)	Alcalinidade Total (ppm de CaCO <sub>3</sub> ) ND		
4	0		
Ferro (ppm de Fe) ND	Alcalinidade Hidróxida (ppm) ND		
0	0		
Silica (ppm de SiO <sub>2</sub> ) ND	Turbidez (NTU) ND		
0,1	0		
Cloretos (ppm de Cl-) ND	Cobre (ppm) ND		
0	0		
*ND: Limites Não Determinados			
Comentários			
terça-feira, 14 de junho de 2022		BWT	
		Página 1 de 2	

Fonte: Do autor (2022)





Figura D12 – Relatório nº 46 de orientações da saída do vapor referente ao mês de abril de 2022

**ORIENTAÇÕES TÉCNICAS - SAÍDA DE VAPOR** BWT Solutions

ID da Análise:

Orientação: pH baixo. Possibilidade de corrosão. Aumentar a dosagem de aminas e verificar possíveis fontes de contaminação ácida.

Fonte: Do autor (2022)

Figura D13 – Relatório nº 42 de resultados do retorno de condensado referente ao mês de janeiro de 2022

**Relatório Técnico** BWT Solutions

CONDENSADO

ID da Análise: 42	Nome do Cliente: CLIENTE COGERAÇÃO	Cidade: RIBEIRÃO PRETO	Estado: SP
-------------------	------------------------------------	------------------------	------------

**INFORMAÇÕES SOBRE COLETA E ANÁLISES**

Realização da Coleta: 20/01/2022	Análises Concluídas: 21/01/2022	Observações sobre a coleta:
Analista Responsável: Ana Carolina - CRQ: 04577786		
Laboratório: Laboratório Teste PPGEQ		

**RESULTADOS DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS**

pH (9,20 a 9,60): 6,58	Dureza Total (ppm de CaCO3) ND: 0
Condutividade Específica (0 - 10 µS/cm): 6	Alcalinidade Total (ppm de CaCO3) ND: 0
Ferro (ppm de Fe) ND: 0	Alcalinidade Hidróxida (ppm) ND: 0
Silica (ppm de SiO2) ND: 0,2	Turbidez (NTU) ND: 0
Cloretos (ppm de Cl-) ND: 0	Cobre (ppm) ND: 0

\*ND: Limites Não Determinados

**Comentários**

terça-feira, 14 de junho de 2022 BWT Página 1 de 2

Fonte: Do autor (2022)

Figura D14 – Relatório n° 42 de orientações do retorno de condensado referente ao mês de janeiro de 2022

ORIENTAÇÕES TÉCNICAS - CONDENSADO		BWT Solutions
ID da Análise	42	
Orientação	pH baixo. Possibilidade de corrosão. Aumentar a dosagem de aminas e verificar possíveis fontes de contaminação ácida.	

Fonte: Do autor (2022)

Figura D15 – Relatório n° 43 de resultados do retorno de condensado referente ao mês de fevereiro de 2022

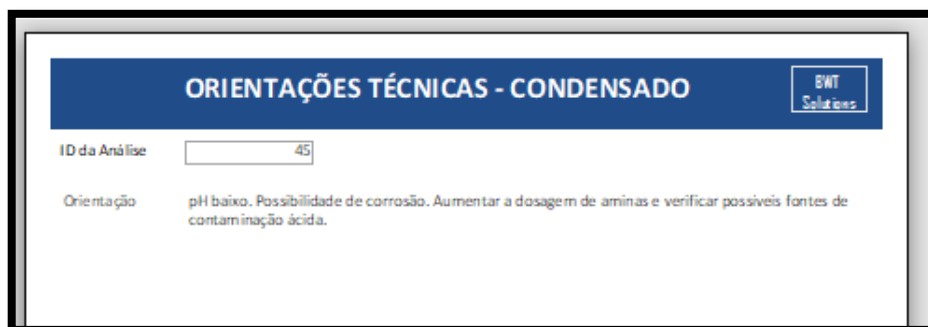
Relatório Técnico				BWT Solutions
CONDENSADO				
ID da Análise	Nome do Cliente	Cidade	Estado	
43	CLIENTE COGERAÇÃO	RIBERÃO PRETO	SP	
INFORMAÇÕES SOBRE COLETA E ANÁLISES				
Realização da Coleta	Análises Concluídas	Observações sobre a coleta		
10/02/2022	14/02/2022			
Analista Responsável				
Ana Carolina - CRQ: 04577786				
Laboratório				
Laboratório Teste PPGEQ				
RESULTADOS DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS				
pH (9,20 a 9,60)	8	Dureza Total (ppm de CaCO <sub>3</sub> ) ND	0	
Condutividade Específica (0 - 10 $\mu$ S/cm)	3	Alcalinidade Total (ppm de CaCO <sub>3</sub> ) ND	0	
Ferro (ppm de Fe) ND	0	Alcalinidade Hidróxida (ppm) ND	0	
Silica (ppm de SiO <sub>2</sub> ) ND	0,2	Turbidez (NTU) ND	0	
Cloretos (ppm de Cl-) ND	0	Cobre (ppm) ND	0	
*ND: Limites Não Determinadas				
Comentários				
terça-feira, 14 de junho de 2022		BWT		Página 1 de 2

Fonte: Do autor (2022)





Figura D18 – Relatório nº 45 de orientações do retorno de condensado referente ao mês de abril de 2022



ORIENTAÇÕES TÉCNICAS - CONDENSADO		BWT Solutions
ID da Análise	45	
Orientação	pH baixo. Possibilidade de corrosão. Aumentar a dosagem de aminas e verificar possíveis fontes de contaminação ácida.	

Fonte: Do autor (2022)

## APÊNDICE E – Acompanhamento da água da caldeira

Os resultados obtidos nas análises físico-químicas da caldeira referentes aos meses de janeiro, fevereiro e abril de 2022 e que foram fornecidos pela empresa que realiza o tratamento dessa água foram lançados no software, que emitiu dois relatórios para esse ponto: relatório de resultados das análises físico-químicas e relatório de orientações técnicas com as sugestões de melhorias no sistema. Os relatórios estão representados pelas figuras a seguir:

Figura E1 – Relatório nº 113 de resultados da água da caldeira referente ao mês de janeiro de 2022

Relatório Técnico			
CALDEIRA			
ID da Análise	Nome do Cliente	Cidade	Estado
113	CLIENTE COGERAÇÃO	RIBEIRÃO PRETO	SP
INFORMAÇÕES SOBRE COLETA E ANÁLISES			
Realização da Coleta	Análises Conduídas	Observações sobre a Coleta	
20/01/2022	21/01/2022		
Analista Responsável			
Maria Ângela - CRQ: 04865789			
Laboratório			
Laboratório Teste PPGEQ			
RESULTADOS DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS			
pH (9,5 a 10,5)	Alcalinidade Total (0 a 200 ppm de CaCO <sub>3</sub> )		
10,74	20		
Condutividade Específica (300 a 1500 µS/cm)	Alcalinidade Hidróxida (0 a 0 ppm)		
89	10		
Ferro (0 a 1 ppm de Fe)	Turbidez (NTU)		
0	0		
Silica (0 a 30 ppm de SiO <sub>2</sub> )	Carboidrizada (0,1 a 0,2 ppm)		
3	0		
Cloretos (0 a 10 ppm de Cl <sup>-</sup> )	Fosfato (5 a 15 ppm de (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> <sup>-</sup> )		
1,6	7		
Dureza Total (0 a 0 ppm de CaCO <sub>3</sub> )			
3			
Comentários			
Caldeira operando a 48 bar.			
quarta-feira, 22 de junho de 2022			
BWT			
Página 1 de 2			

Fonte: Do autor (2022)

Figura E2 – Relatório nº 113 de orientações da água da caldeira referente ao mês de janeiro de 2022 (continua)

ORIENTAÇÕES TÉCNICAS - CALDEIRA		BWT Solutions
ID da Análise	<input type="text" value="113"/>	
Orientação	Caldeira altamente desconcentrada. Aumentar o intervalo entre as descargas para concentrar a caldeira.	
Orientação	Subdosagem de Sequestrante de oxigênio. Possibilidade de corrosão. Dosar produto em caráter de choque para corrigir residual.	
Orientação	pH e OH <sup>-</sup> elevados por sobredosagem de Alcalinizante. Possibilidade de corrosão. Reduzir dosagem para correção.	

quarta-feira, 22 de junho de 2022

BWT

Página 1 de 2

Figura E2 – Relatório n° 113 de orientações da água da caldeira referente ao mês de janeiro de 2022 (conclusão)

ID da Análise	<input type="text" value="113"/>
Orientação	Dureza elevada. Possibilidade de incrustação. Adequar abrandamento na seção pré-caldeira.
Orientação	Sobredosagem de alcalinizante. Possibilidade de corrosão. Reduzir a dosagem de alcalinizante.
Orientação	Residual de Fosfato com resultados satisfatórios. Manter procedimentos.

quarta-feira, 22 de junho de 2022 **BWT** Página 2 de 2

Fonte: Do autor (2022)



Figura E4 – Relatório n° 114 de orientações da água da caldeira referente ao mês de fevereiro de 2022 (continua)

ORIENTAÇÕES TÉCNICAS - CALDEIRA		BWT Solutions
ID da Análise	<input type="text" value="114"/>	
Orientação	Caldeira altamente desconcentrada. Aumentar o intervalo entre as descargas para concentrar a caldeira.	
Orientação	Subdosagem de Sequestrante de oxigênio. Possibilidade de corrosão. Dosar produto em caráter de choque para corrigir residual.	
Orientação	pH e OH- elevados por sobredosagem de Alcalinizante. Possibilidade de corrosão. Reduzir dosagem para correção.	

quarta-feira, 22 de junho de 2022

BWT

Página 1 de 2

Figura E4 – Relatório n° 114 de orientações da água da caldeira referente ao mês de fevereiro de 2022 (conclusão)

ID da Análise	114
Orientação	Dureza elevada. Possibilidade de incrustação. Adequar abrandamento na seção pré-caldeira.
Orientação	Sobredosagem de alcalinizante. Possibilidade de corrosão. Reduzir a dosagem de alcalinizante.
Orientação	Residual de Fosfato com resultados satisfatórios. Manter procedimentos.

quarta-feira, 22 de junho de 2022

BWT

Página 2 de 2

Fonte: Do autor (2022)





Figura E6 – Relatório n° 103 de orientações da água da caldeira referente ao mês de abril de 2022 (continua)

BWT  
Solutions

## ORIENTAÇÕES TÉCNICAS - CALDEIRA

ID da Análise

Orientação Caldeira altamente desconcentrada. Aumentar o intervalo entre as descargas para concentrar a caldeira.

Orientação Subdosagem de Sequestrante de oxigênio. Possibilidade de corrosão. Dosar produto em caráter de choque para corrigir residual.

Orientação pH e OH<sup>-</sup> elevados por sobredosagem de Alcalinizante. Possibilidade de corrosão. Reduzir dosagem para correção.

quarta-feira, 22 de junho de 2022BWTPágina 1 de 2

Figura E6 – Relatório nº 103 de orientações da água da caldeira referente ao mês de abril de 2022 (conclusão)

ID da Análise	<input type="text" value="103"/>
Orientação	Sobredosagem de alcalinizante. Possibilidade de corrosão. Reduzir dosagem alcalinizante.
Orientação	Residual de Fosfato com resultados satisfatórios. Manter procedimentos.

quarta-feira, 22 de junho de 2022

EWT

Página 2 de 2

Fonte: Do autor (2022)