



GEYSSE HELLEN FONTE ROCHA

**ESTUDO DOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DA ÁGUA
DE CALDEIRA EM UMA INDÚSTRIA CERVEJEIRA.**

São Luís
2024

GEYSSE HELLEN FONTES ROCHA

**ESTUDO DOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DA ÁGUA
DE CALDEIRA EM UMA INDÚSTRIA CERVEJEIRA.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Colegiado de Curso da Engenharia Química do
Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da
Universidade Federal do Maranhão, como parte
dos requisitos para obtenção do diploma de
Graduação em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. José Roberto Pereira Rodrigues

São Luís
2024

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a)
autor(a).

Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Rocha, Geysse Hellen Fontes.

Estudo dos parâmetros físico-químicos da água de caldeira em
uma indústria cervejeira / Geysse Hellen Fontes Rocha. - 2024.

47 f.

Orientador(a): José Roberto Pereira Rodrigues.

Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Maranhão,
Forma remota utilizando o Google Meet, 2024.

1. Água. 2. Análise físico-química. 3. Caldeira. 4.
Cerveja. 5. Geração de vapor. I. Rodrigues, José Roberto
Pereira. II. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. JOSÉ ROBERTO PEREIRA RODRIGUES
Orientador – COEQ/CCET/UFMA

Prof. Dr. FABIO ALEJANDRO CARVAJAL FLORES
COEQ/CCET/UFMA

Prof. Dr. JEAN ROBERT P. RODRIGUES
CEM/CCET/UFMA

11 de Abril de 2024

DADOS CURRICULARES**Geysse Hellen Fontes Rocha**

NASCIMENTO	14/02/1999 – SÃO LUIS / MA
FILIAÇÃO	Jerzonita Gomes Fontes Geonildes Cardoso Pereira Rocha
2017/2024	Curso de Graduação Engenharia Química - Universidade Federal do Maranhão

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, que sempre acreditaram no poder transformador da educação.

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo e em primeiro lugar agradeço a Deus, razão de tudo e de todos nós.

Ao meu orientador, Prof. José Roberto Pereira Rodrigues, pelo incentivo, orientação e auxílio.

A minha mãe, Jerzonita, e ao meu pai, Geonildes, por sempre estarem presentes e dando apoio na minha caminhada durante o curso.

Ao meu namorado e parceiro de curso, Felipe Eduardo Fernandes Pacheco, por sempre estar presente na minha vida acadêmica e pessoal.

Por fim, agradeço aqueles que de maneira direta ou indireta contribuíram para o desenvolvimento e realização deste trabalho.

EPIÍGRAFE

*“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor,
mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou
o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o
que era antes”.*

(Martin Luther King)

ROCHA, G. H. F. **Estudo de caso de parâmetros físico químicos da água de caldeiras de uma indústria produtora de cerveja**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2023.

RESUMO

O uso de vapor em indústrias alimentícias é crucial para a higiene e a qualidade dos produtos. A correta preparação da água utilizada nas caldeiras para gerar esse vapor é essencial para manter a qualidade dos produtos e garantir a segurança operacional, protegendo a integridade das máquinas. Este estudo foca na análise físico-química da água das caldeiras de uma fábrica de cerveja em São Luís, Maranhão. Ao longo de cinco meses, foram acompanhados os relatórios de análise da água das caldeiras, comparando os custos do tratamento atual com despesas adicionais possíveis devido a tratamentos inadequados. Os resultados mostram valores alterados em parâmetros como pH, alcalinidade hidróxida, alcalinidade total, sólidos dissolvidos e sulfitos na água de alimentação. Isso causa problemas como impurezas, incrustações e corrosão no equipamento de vapor e tubulações, afetando a qualidade dos alimentos, reduzindo a produção e exigindo paradas para manutenção, resultando em perda de tempo e recursos. Logo, o tratamento prévio da água nas caldeiras é fundamental para um processo seguro e de qualidade. Recomenda-se adotar um desaerador no processo de geração de vapor, aplicar métodos de preservação do equipamento e coletar amostras de água em diferentes pontos para melhorar o desempenho das caldeiras.

Palavras-chaves: Geração de vapor. Caldeira. Água. Cerveja. Análise físico-química. Tratamento.

ROCHA, G. H. F. **Case study of physicochemical parameters of boiler water in a beer-producing industry**. 2023. Undergraduate thesis in Chemical Engineering, Center for Exact Sciences and Technology, Federal University of Maranhão, São Luís, 2023.

ABSTRACT

The use of steam in food industries is crucial for hygiene and the quality of final products. Proper preparation of water used in boilers to generate this steam is essential to maintain product quality and ensure operational safety, protecting the integrity of the machinery. This study focuses on the physicochemical analysis of boiler water in a beer factory in São Luís, Maranhão. Over five months, reports on boiler water analysis were monitored, comparing current treatment costs with possible additional expenses due to inadequate treatments. The results show altered values in parameters such as pH, hydroxide alkalinity, total alkalinity, dissolved solids, and sulfites in the feedwater. This leads to issues like impurities, scaling, and corrosion in steam equipment and pipelines, affecting food quality, reducing production, and requiring shutdowns for maintenance, resulting in time and resource losses. Hence, prior treatment of water in boilers is fundamental for a safe and quality process. It is recommended to implement a deaerator in the steam generation process, apply equipment preservation methods, and collect water samples from different points to enhance boiler performance.

Keywords: Steam generation. Boiler. Water. Beer. Physicochemical analysis. Treatment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de funcionamento de uma caldeira flamotubular.....	5
Figura 2 - Esquema de funcionamento de uma caldeira aquatubular.....	6
Figura 3 - Esquema de funcionamento de uma caldeira mista.....	7
Figura 4 - Esquema de funcionamento de uma caldeira elétrica.....	8
Figura 5 - Escala do potencial hidrogeniônico.....	10
Figura 6 - Caldeira com deterioração por corrosão.....	14
Figura 7 - Antes e depois de tratamento de incrustação em caldeira.....	15
Figura 8 - Tubo de superaquecedor completamente obstruído por material originado de arrastes.....	16
Figura 9 - Caldeira da indústria cervejeira utilizada nesse estudo de caso.....	17
Figura 10 - Local de instalação das caldeiras.....	18
Figura 11 - Análise do pH da água de alimentação da caldeira.....	21
Figura 12 - Análise do pH da água da caldeira.....	21
Figura 13 - Análise da dureza total na água de alimentação da caldeira.....	22
Figura 14 - Análise da dureza total na água da caldeira.....	23
Figura 15 - Análise de Ferro total na água de alimentação da caldeira.....	24
Figura 16 - Análise de Ferro total na água da caldeira.....	24
Figura 17 - Valores de alcalinidade hidróxido na água da caldeira.....	25
Figura 18 - Valores de Sulfito (ppm SO_3) na água da caldeira.....	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação entre pH e as diversas formas de alcalinidade.....	11
Tabela 2. Classificação das águas de acordo com o nível de dureza.....	11
Tabela 3 - Parâmetros necessários para água de uma caldeira flamotubular com pressão de operação 0-300 psig (0 – 21 kgf/cm ²)	12
Tabela 4 - Parâmetros recomendados para controle físico-químico de águas de caldeira.....	12
Tabela 5 – Ficha técnica da caldeira do tipo mista.....	20
Tabela 6 - Valores das multas conforme a infração.....	28

SUMÁRIO

FOLHA DE APROVAÇÃO	III
DADOS CURRICULARES	IV
DEDICATÓRIA	V
AGRADECIMENTOS	VI
EPÍGRAFE	VII
RESUMO	VIII
ABSTRACT	IX
LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABELAS	XI
SUMÁRIO	XII
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	3
2.1 OBJETIVO GERAL	3
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 CALDEIRAS	4
3.1.1 Definição	4
3.1.2 Princípio de funcionamento	4
3.1.3 Tipos de caldeiras	4
3.1.3.1 Caldeiras flamotubulares	5
3.1.3.2 Caldeiras aquatubulares	6
3.1.3.3 Caldeira mista	7
3.1.3.4 Caldeiras elétricas	8
3.1.4 Processo de produção de vapor na caldeira	8
3.2 ÁGUA E SUAS IMPUREZAS	9
3.2.1 Aspectos físicos	9
3.2.2 Aspectos químicos	10
3.2.3 Água para caldeira - padrão de qualidade	12
3.2.4 Consequências das impurezas da água	13
3.2.4.1 Corrosão em caldeiras	13
3.2.4.2 Incrustação	15
3.2.4.3 Arraste	16
4 MÉTODOLOGIA	17
4.1 CALDEIRA	17
4.2 ÁGUA DA CALDEIRA:	19
4.2.1 Análise da água	19

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	20
5.1 ANÁLISE DO pH DA ÁGUA DE CALDEIRA.....	20
5.2 ANÁLISE DA DUREZA TOTAL	22
5.3 ANÁLISE DO TEOR DE FERRO TOTAL.....	23
5.4 ANÁLISE DE ALCALINIDADE HIDRÓXIDO E SULFITOS.....	25
5.5 ANÁLISE FINANCEIRA.....	26
5.5.1 Manutenção do equipamento.....	27
5.5.2 Multas	28
6 CONCLUSÃO.....	29
6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	30
REFERÊNCIAS.....	31

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural essencial para a existência, a manutenção da vida, o bem-estar social e o desenvolvimento econômico. No setor industrial, seu uso se manifesta de várias formas e dimensões, desde ser insumo no processo produtivo e resfriamento de produtos e máquinas até sua utilização para fins sanitários (Lisboa, 2010).

Dentre do grupo de indústria de transformação com maior consumo de água, alimentos e bebidas, as cervejarias têm grande destaque. Para além da água que incorpora o produto existem, nesta atividade, muitos outros processos dependentes do uso da água. Processos de limpeza (manuais e automatizados), produção de água quente e vapor, sistemas de refrigeração, entre outros, são processos indispensáveis ao funcionamento deste tipo de indústria, mas que em muito aumentam a dependência em termos de recursos hídricos (Fonseca, 2020).

A Revolução Industrial impulsionou a geração em larga escala de vapor, mudando nosso mundo. Com a necessidade de substituir o carvão fóssil, surgiram geradores de vapor para distribuir energia a diversos pontos. O vapor d'água se tornou essencial em vários setores industriais devido ao seu alto calor específico e à abundância de água. Sua preferência como fluido de trabalho em caldeiras vem da sua utilidade para aquecimento e acionamento mecânico em grande escala (Mareti, 2021).

Atualmente, depois de ter se desenvolvido e se ajustado para suprir várias demandas de energia, propósitos, áreas e eficácia, a caldeira a vapor é agora um componente essencial e indispensável nas atividades industriais, mesmo diante da existência da tecnologia e das indústrias contemporâneas (Filho; Emidio, 2022).

As águas de alimentação de caldeiras provêm de diversas fontes naturais distintas, como minas, rios, lagos, córregos, poços artesianos e vários outros mananciais que contêm reservas consideráveis deste fluido, o qual pode ser encontrado com características bastante distintas. As águas, dependendo de sua origem, podem conter diferentes substâncias dissolvidas ou em suspensão, resultando em composições variadas. Quando usadas diretamente, através da evaporação, liberam concentrações de minerais dissolvidos. Isso pode incluir gases prejudiciais para a vida útil do equipamento, originados da fonte ou da decomposição de materiais orgânicos presentes (Junior, 2019).

Na indústria alimentícia, a qualidade do vapor é vital para o produto final seguro. A água tratada nas caldeiras, usada para gerar vapor, é essencial para manter a qualidade do produto, evitando contaminações que possam afetar o processo de produção (Mareti, 2021)

Diante da importância crucial da água nas indústrias, especialmente no contexto da produção de vapor e na fabricação de produtos alimentícios, torna-se essencial compreender a qualidade da água utilizada nas caldeiras. Este estudo propõe-se a realizar uma análise físico-química da água das caldeiras em uma fábrica de cerveja em São Luís, Maranhão. O objetivo primordial é identificar e avaliar os possíveis impactos decorrentes do tratamento inadequado da água, tanto no funcionamento do equipamento quanto na qualidade do processo produtivo. Além disso, busca-se compreender os custos associados a esses possíveis problemas e sua repercussão na indústria cervejeira. Esta análise se mostra relevante para otimizar os processos industriais, assegurando não apenas a eficiência na produção, mas também a garantia da qualidade do produto final, o que impacta diretamente a satisfação do consumidor e a competitividade no mercado.

2 OBJETIVOS

Diante da importância crucial da água nas indústrias, especialmente no contexto da produção de vapor e na fabricação de produtos alimentícios, torna-se essencial compreender a qualidade da água utilizada nas caldeiras. Esta análise se mostra relevante para otimizar os processos industriais, assegurando não apenas a eficiência na produção, mas também a garantia da qualidade do produto final, o que impacta diretamente a satisfação do consumidor e a competitividade no mercado. O estudo visa analisar a água das caldeiras de uma fábrica de cerveja para identificar e avaliar os impactos do tratamento inadequado, incluindo seus custos e repercussões na indústria.

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar o estudo de caso referente aos parâmetros de produção importantes da água utilizada em caldeiras de uma indústria cervejeira.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar o controle de qualidade e ambiental da água nas caldeiras para verificar sua eficiência;
- Analisar os parâmetros químicos e físico-químicos durante as avaliações de qualidade;
- Realizar levantamento dos custos relacionados aos produtos químicos utilizados no tratamento da água nas caldeiras e custos relacionados ao processo (multas e tempo parado de equipamento).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 CALDEIRAS

3.1.1 Definição

O termo caldeira refere-se ao aparelho que aquece a água, produzindo vapor em um ambiente fechado (com pressão), e encaminha esse vapor, com uma temperatura de aproximadamente 150 °C, por meio de tubos para diversos locais de uso (Botelho; Bifano, 2015).

3.1.2 Princípio de funcionamento

O principal componente de uma caldeira, conhecido como tambor de vapor, é um recipiente construído com placas de aço e isolado internamente usando camadas de lã de vidro para reter o calor, assegurando uma eficiência energética superior. Para operar, requer uma fonte de energia que aquece as partes metálicas da caldeira, permitindo a transferência de calor para a água e sua conversão em vapor (Mareti, 2021).

3.1.3 Tipos de caldeiras

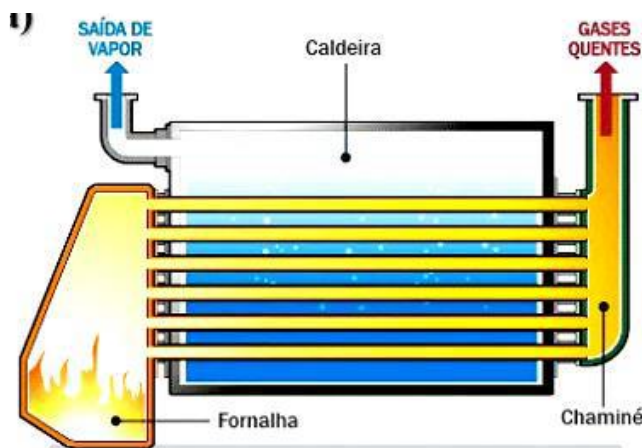
A construção da caldeira é influenciada pelo processo produtivo a que será destinada, considerando fatores como tipo de combustível, geometria, pressão e capacidade de produção de vapor. A eficiência na geração de vapor determina a escolha construtiva, destacando a importância da disposição dos tubos para a troca térmica. Existem diferentes tipos, como flamatubulares, aquatubulares, mistas e as elétricas, estas últimas dispensando a queima de combustíveis. Além disso, medidas de segurança, indicadores de pressão, sistemas de alimentação e controle de água são essenciais em todas as caldeiras. (Mareti, 2021).

3.1.3.1 Caldeiras flamotubulares

A caldeira possui duas configurações principais. Uma delas é a caldeira flamotubular (também chamada de fogotubular) (Figura 1), na qual os produtos da combustão passam pelos tubos imersos na água destinada à vaporização. Esse sistema é alimentado por combustível e ar para a queima, resultando na saída de gases da combustão e cinzas. Caldeiras flamotubulares são comuns em produções de vapor com capacidade reduzida (até 10 ton/h) e baixas pressões (até 10 bar, eventualmente 20 bar) (Santos, 2021).

Este tipo de caldeira é o mais empregado em sistemas de aquecimento. Segundo alguns fabricantes, corresponde a mais de 90% da produção nacional de caldeiras e é utilizado em hospitais, lavanderias, hotéis, indústria alimentícia, entre outros (Botelho; Bifano, 2015).

Figura 1 – Esquema de funcionamento de uma caldeira flamotubular.



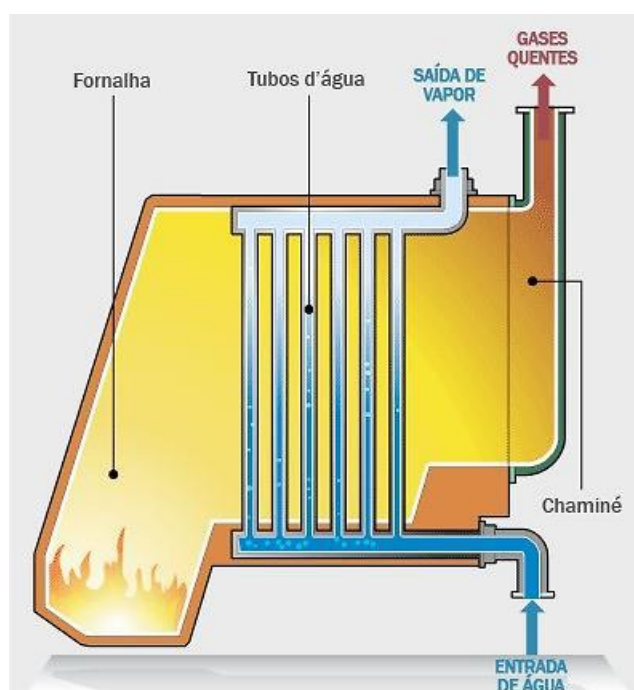
Fonte: DEQWiki, 2019.

A água designada para vaporização é armazenada no tambor de vapor, que é um corpo cilíndrico. Dentro dele, os tubos estão dispostos em orientação horizontal ou vertical. Nos extremos do tambor, há espelhos que constituem um conjunto tubular, transferindo o calor da chama para o interior do cilindro. Esse processo impulsiona o movimento dos gases nos tubos, permitindo a troca térmica necessária para aquecer e vaporizar a água (Mareti, 2021).

3.1.3.2 Caldeiras aquatubulares

O outro sistema é representado pela caldeira aquatubular (Figura 2), na qual a água é introduzida nos tubos e aquecida pela transferência de calor dos produtos da combustão que passam externamente, convertendo-a em vapor. Geralmente, essas caldeiras possuem uma grande quantidade de tubos com diâmetros menores e são utilizadas em usinas de energia térmica e para alimentar turbinas em navios (Santos, 2021).

Figura 2 - Esquema de funcionamento de uma caldeira aquatubular.



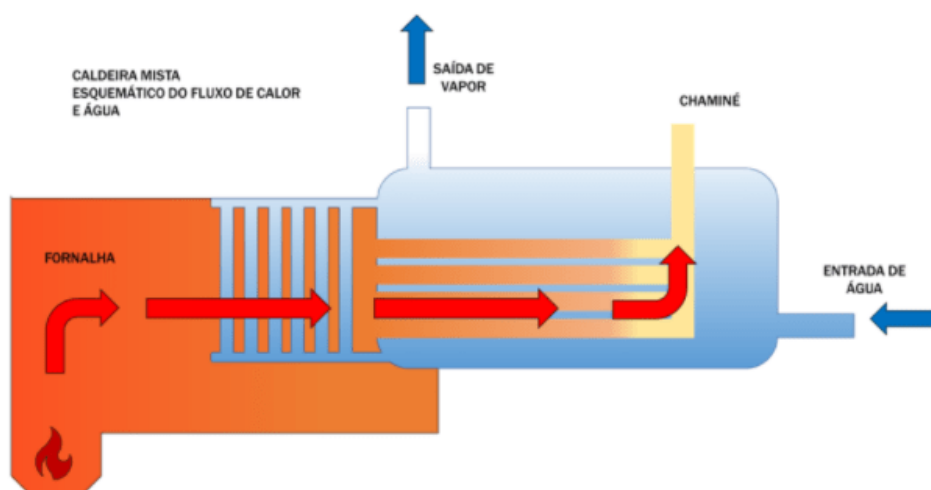
Fonte: Silva, 2014.

Caldeiras aquatubulares têm água circulando em tubos aquecidos externamente por gases da queima de combustível, gerando vapor através da troca térmica. Desenvolvidas para processos industriais que exigem pressões e rendimentos mais altos que as caldeiras flamotubulares, substituíram os tubos de combustão por tubos de água, aumentando a área de aquecimento. O objetivo é elevar a capacidade produtiva industrial, sendo caldeiras maiores em comparação com outros tipos (Mareti, 2021).

3.1.3.3 Caldeira mista

Caldeiras mistas (Figura 3) surgiram para usar combustíveis sólidos, como biomassa. São como caldeiras flamotubulares, com um sistema que aproveita tubos de água na antecâmara de combustão para capturar calor dos gases da fornalha. Elas usam a radiação da queima do combustível para troca térmica, usando combustíveis acessíveis. A eficiência depende das características do material e da umidade, sendo crucial controlar esses parâmetros para alto desempenho térmico (Santos, 2021)

Figura 3 - Esquema de funcionamento de uma caldeira mista.



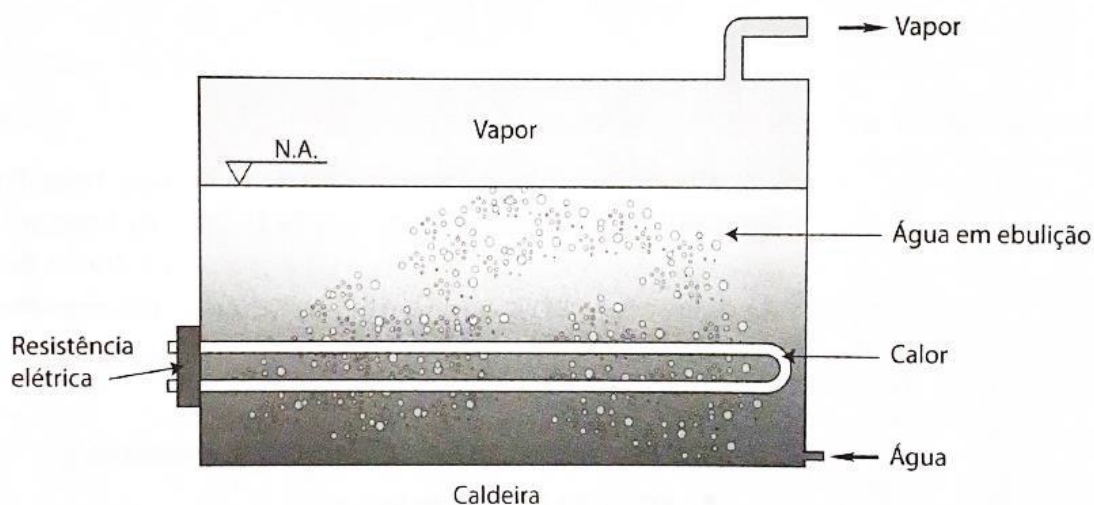
Fonte: Burntech, 2021.

Esse tipo de caldeira tem uma fornalha onde a água circula nos tubos internos (aquatubular) e os gases da combustão passam por tubos internos após sair da fornalha (flamotubular). Caldeiras mistas costumam produzir até 50 toneladas de vapor por hora, a pressões de até 30 kgf/cm², combinando a agilidade das caldeiras flamotubulares com a eficiência das aquatubulares (Burntech, 2021).

3.1.3.4 Caldeiras elétricas

Caldeiras elétricas (Figura 4) têm montagem diferente, mas a mesma finalidade de transformar água em vapor, utilizando energia elétrica convertida em térmica pela passagem de corrente em uma resistência imersa na água (Bazzo, 1995).

Figura 4 - Esquema de funcionamento de uma caldeira elétrica.



Fonte: Botelho; Bifano, 2015.

As caldeiras elétricas, projetadas para menor demanda, são menores e mais acessíveis, alimentadas por eletricidade para evitar poluentes do combustível. Apesar da eficiência alta (95-99,5%), o custo elevado da energia pode ser um desafio econômico (Botelho; Bifano, 2015).

3.1.4 Processo de produção de vapor na caldeira

O calor da queima do combustível aquece a água na caldeira, transformando-a em vapor a 100 °C e pressão constante. Esse calor latente gera o vapor ao mudar o estado da água. À medida que a água recebe calor, a pressão e temperatura aumentam. O confinamento na caldeira acumula energia térmica, elevando a pressão além da atmosférica e as temperaturas internas (Altafini, 2002).

A caldeira opera com segurança até sua pressão máxima. Se essa pressão for excedida, o pressostato desliga o exaustor, reduzindo a troca de calor e baixando a temperatura e a pressão.

Se a pressão persistir, a válvula de segurança atua para evitar ultrapassar o limite seguro de operação (Mareti, 2021).

3.2 ÁGUA E SUAS IMPUREZAS

A água é essencial na produção de vapor, já que sua transformação de líquido para gasoso é fundamental. A qualidade da água é crucial dentro das caldeiras devido ao contato direto com os componentes metálicos. Impurezas acumuladas podem diminuir a eficiência na transferência de calor, resultando em problemas de segurança, integridade e distribuição de vapor (Beltrami; Souza, 2011).

A água para as caldeiras geralmente vem de fontes naturais, podendo ser do subsolo ou da superfície. A água do subsolo, extraída de poços e poços artesianos, tende a ser de boa qualidade, com muitos minerais dissolvidos. Por outro lado, a água superficial, vinda de rios e lagos, varia em qualidade durante o ano, em transparência e quantidade de partículas suspensas. Mesmo sendo potável, a água, seja natural ou da rede urbana, pode conter elementos que a tornam imprópria para uso direto nas caldeiras. Assim, é necessário um tratamento prévio para garantir a operação segura e eficaz das caldeiras (Mareti, 2021).

O tratamento químico da água é crucial para estender a vida útil e assegurar a segurança operacional. Por isso, as caldeiras têm dispositivos de drenagem para eliminar impurezas como sulfatos, carbonatos, silicatos, lodo e sólidos suspensos (Bazzo, 1995). Na caldeira, vida útil é o tempo desde a fabricação até ser considerada inadequada para uso (Mareti, 2021)

3.2.1 Aspectos físicos

A percepção humana da qualidade da água busca transparência, ausência de cor e odor, embora a água naturalmente possua características opostas. A coloração da água vem, principalmente, de processos de decomposição, sendo mais comum em águas superficiais devido a íons metálicos, plâncton, plantas aquáticas e poluição industrial. A cor aparente se deve a partículas em suspensão que causam turbidez, enquanto a cor verdadeira é resultado de materiais dissolvidos e coloidais, especialmente ácidos húmicos. A turbidez, causada por

partículas em suspensão, afeta a penetração da luz na água, diminuindo a área onde a fotossíntese pode ocorrer (Macêdo, 2001).

O potencial hidrogeniônico é uma representação da concentração de íons de hidrogênio em uma escala logarítmica, fornecendo informações sobre se a água é ácida, neutra ou alcalina (Figura 5) (Botelho, 2001).

Figura 5 - Escala do potencial hidrogeniônico.



Fonte: Mundo Educação, 2023.

Os componentes responsáveis são sólidos dissolvidos e gases dissolvidos. Eles têm origem natural, derivando da dissolução de rochas, absorção de gases da atmosfera, decomposição de matéria orgânica e processo de fotossíntese. Sua origem humana inclui descargas domésticas e industriais. Os sólidos totais dissolvidos representam a soma dos níveis de todos os minerais presentes na água (Botelho, 2001).

3.2.2 Aspectos químicos

Os parâmetros químicos são os índices mais importantes para se caracterizar a qualidade de uma água.

Estes parâmetros permitem:

- Classificar a água por seu conteúdo mineral, através de íons presentes;
- Determinar o grau de contaminação, permitindo determinar a origem dos poluentes;
- Caracterizar picos de concentração de poluentes tóxicos e as possíveis fontes;
- Avaliar o equilíbrio bioquímico que é necessário para a manutenção da vida aquática, permitindo avaliar as necessidades de nutrientes (Macêdo, 2001).

A alcalinidade é a habilidade da água para neutralizar ácidos. Geralmente, é determinada pela presença de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos na água, sendo um indicativo da concentração desses componentes (Von Sperling, 1996).

Nas águas superficiais, a alcalinidade pode ser resultante da presença abundante de algas, que retiram o dióxido de carbono da água, aumentando seu pH. Em águas de caldeira e aquelas tratadas quimicamente, a alcalinidade é devido à presença de hidróxidos e carbonatos (Macêdo, 2001).

Esse indicador não tem relevância sanitária para a água potável, porém, em concentrações altas, pode conferir um sabor amargo à água. É um parâmetro essencial no controle do tratamento da água, ligado à coagulação, redução da dureza e proteção contra corrosão nas tubulações (Von Sperling, 1996).

A relação entre pH e as diversas formas de alcalinidade é apresentada na tabela 1.

Tabela 1 - Relação entre pH e as diversas formas de alcalinidade.

Faixa de pH	Alcalinidade
> 9,4	Hidróxidos e carbonatos
8,3 – 9,4	Carbonatos e bicarbonatos
4,4 – 8,3	Bicarbonatos

Fonte: Veiga, 2005.

A avaliação da qualidade da água é crucial, e a dureza, soma das durezas de cálcio e magnésio, é vital nesse processo. Outros cátions como ferro, alumínio, cobre e zinco são geralmente removidos antes da medição. A composição química da água, influenciada pelo tipo de solo, determina sua dureza: solos basálticos, arenosos e graníticos produzem águas com baixa dureza, enquanto solos calcários resultam em águas com dureza elevada (Baccan; Andrade, 2004).

Tabela 2. Classificação das águas de acordo com o nível de dureza.

Águas moles	< 50 mg CaCO ₃ /L
Águas de dureza moderada	Entre 50 e 150 mg CaCO ₃ /L
Águas duras	Entre 150 e 300 mg CaCO ₃ /L

Águas muito duras>300 mg CaCO₃/L

Fonte: Veiga, 2005

3.2.3 Água para caldeira - padrão de qualidade

A capacidade da caldeira para lidar com impurezas na água depende do projeto, pressão operacional, tratamento interno da água e requisitos de qualidade do vapor necessários para o processo (Kitto; Stultz, 2005). De acordo com o item 13.4.3 da NR-13, a qualidade da água deve ser controlada e tratamentos devem ser implementados, quando necessários, para compatibilizar suas propriedades físico-químicas com os parâmetros de operação da caldeira definidos pelo fabricante.

Para escolher o tratamento ideal da água, é crucial considerar vários aspectos: tipo de caldeira (ferro ou aço, vapor ou água quente), características da água inicial (dureza, corrosão), tratamento inicial (como amaciamento e pré-aquecimento), quantidade de água substituída, uso do vapor e disponibilidade de testes de supervisão. Esses parâmetros (Tabela 3) variam conforme o tipo e pressão da caldeira, impactando a qualidade do vapor e a longevidade do equipamento (Asme, 2015).

Tabela 3 - Parâmetros necessários para água de uma caldeira flamotubular com pressão de operação 0-300 psig (0 – 21 kgf/cm²).

Água de alimentação	
Oxigênio dissolvido antes da adição de oxigênio químico na água (mg/L O)	<0,04
Oxigênio dissolvido depois da adição de oxigênio químico na água (mg/L O)	<0,007
Ferro total (mg/L Fe)	<0,1
Cobre total (mg/L CaCO ₃)	<0,05
Dureza total (mg/L CaCO ₃)	<1,0
pH à 25 °C	8,3 – 10,5
Carbono orgânico total (TOC) não-volátil (mg/L C)	<10
Matéria oleosa (mg/L)	<1,0
Água da Caldeira	
Sílica (mg/L SiO ₂)	<150
Alcalinidade total (mg/L CaCO ₃)	<700
Alcalinidade de hidróxido livre (mg/L CaCO ₃)	Não especificado
Condutividade não neutralizada (µmho/cm a 25 °C)	<7000

Fonte: Asme, 2015.

Na tabela 4, são mostradas faixas de controle sugeridas para cada classe de pressão de caldeiras.

Tabela 4 - Parâmetros recomendados para controle físico-químico de águas de caldeira.

ITEM DE CONTROLE	Faixa de Pressão (Kgf/ cm ²)						
	< 10	10 a 20	20 a 40	40 a 60	60 a 80	80 a 100	< 100
pH	10,5 a 11,5		10 a 11	9,5 a 10,5		9 a 10	8,5 a 9,8
Condutividade (µS/cm, 25°C)	< 4000	< 3000	< 2000	< 800	< 500	< 150	< 60
Alcalinidade Total (ppm CaCO ₃)	< 800	< 600	< 400	< 150	< 50	---	
Alcalinidade Hidróxida (ppm CaCO ₃)	150 a 350	100 a 300	80 a 150	Depende do Tratamento			
Sólidos Totais Dissolvidos (ppm STD)	< 3500	< 2500	< 1800	< 1000	< 400	< 50	< 20
Dureza Total (ppm CaCO ₃)	< 2,0	< 1,0	ZERO				
Cloretos (ppm CaCO ₃)	< 400	< 300	< 150	< 80	< 30	< 10	< 2,0
Sílica Solúvel (ppm SiO ₂)	< 150	< 120	< 50	< 20	< 5,0	< 1,0	< 0,2
Ferro (ppm Fe)	< 5	< 3	< 1	< 0,5	< 0,1	---	
Sólidos Suspensos (ppm SS)	< 300	< 150	< 50	< 5	< 1,0	---	
Sulfito (ppm SO ₃ ²⁻)	30 a 50	20 a 40	10 a 30	10 a 20	Não Recomendado		
Hidrazina (ppm N ₂ H ₄)	Não Recomendado		0,1 a 0,5	0,1 a 0,2	0,05 a 0,1		
Fosfato (ppm PO ₄ ³⁻)	30 a 50	20 a 40	10 a 30	5 a 15	---		

Fonte: Snatural,2023.

3.2.4 Consequências das impurezas da água

A qualidade da água é crucial para o bom funcionamento e longevidade das caldeiras. É essencial realizar análises químicas mensais na água de alimentação e dentro da caldeira. Se necessário, é importante tratar a água para adequá-la aos padrões do código ASME, já que impurezas como matéria orgânica e compostos minerais podem causar corrosão e afetar a eficiência do equipamento (Mareti, 2021).

3.2.4.1 Corrosão em caldeiras

A corrosão (Figura 6) é a deterioração de materiais metálicos causada por substâncias na água. Isso causa desgaste nos tubos, podendo levá-los a se romper. Também impacta aspectos

do design, como a vazão, ao modificar a rugosidade e a perda de pressão do fluxo (Oliveira, 2014).

Figura 6 – Caldeira com deterioração por corrosão.



Fonte: NCH, 2022.

Água não tratada possui impurezas como gases dissolvidos, oxigênio e dióxido de carbono. Se essa água tiver baixa dureza, torna-se ácida e corrosiva, danificando as linhas metálicas da caldeira. Isso pode resultar em corrosão generalizada ou localizada, assim como rachaduras no metal (Asme, 2015).

A corrosão em caldeiras pode ser interna ou externa. A interna ocorre na área em contato com a água, influenciada por suas características, impurezas e comportamento em relação ao material metálico, especialmente em diferentes temperaturas. Já a externa acontece na superfície em contato com os gases de combustão, afetada pelo tipo de combustível e pela temperatura desses gases (Beltrami; Souza, 2011).

3.2.4.2 Incrustação

A incrustação (Figura 7) é a formação de cristais nos tubos devido a substâncias na água. Se não forem removidos, esses depósitos diminuem a eficiência na transferência de calor, agindo como um isolante térmico (Oliveira, 2014).

Figura 7 – Tratamento de incrustação em caldeira: Antes e depois.



Fonte: Filho, 2020.

A incrustação, além de isolar termicamente, pode afetar a resistência dos componentes metálicos ao serem expostos ao calor, podendo ultrapassar seu limite de resistência. A porosidade da incrustação também pode permitir que substâncias corrosivas migrem para a interface com o metal, criando áreas favoráveis para corrosão (Altafini, 2002).

Os depósitos nos canos surgem devido à presença de diversos compostos na água, como carbonato de cálcio, sulfato de cálcio, silicato de magnésio, silicatos complexos com ferro e óxidos de ferro. Para prevenir esses depósitos, é viável usar produtos que provoquem precipitação e dispersão, além de controlar a concentração de sílica e sólidos dissolvidos (Beltrami; Souza, 2011).

3.2.4.3 Arraste

O arraste (Figura 8) é quando a água da caldeira, com impurezas e matéria orgânica, é carregada junto com o vapor em forma líquida para o sistema de distribuição de vapor (Oliveira, 2014).

Figura 8 – Tubo de superaquecedor completamente obstruído por material originado de arrastes.



Fonte: Snatural, 2023.

Esse fenômeno afeta a pureza do vapor na indústria, podendo causar o golpe de aríete nas tubulações, representando riscos à segurança e à integridade do sistema. A medição dos sólidos no vapor é um método eficaz para identificar e medir o arraste, que pode ser de origem química ou mecânica. A origem química envolve excesso de sólidos e alcalinidade na água, enquanto o arraste mecânico resulta de operação inadequada e falhas no sistema. O tratamento da água e a manutenção correta previnem esses tipos de arraste (Mareti, 2021).

4 MÉTODOLOGIA

4.1 CALDEIRA

A caldeira escolhida para o estudo (Figura 9), pertence a uma indústria cervejeira situada no município de São Luís, no estado do Maranhão (MA). Ela opera praticamente 24 horas por dia, dependendo da demanda de produção da cervejaria.

Figura 9 – Caldeira da indústria cervejeira utilizada nesse estudo de caso.



Fonte: Própria autora, 2023.

A caldeira está localizada na central de caldeiras, um espaço destinado exclusivamente para seu uso, como mostrado na Figura 10. Vale ressaltar que a regulamentação referente à instalação de caldeiras é a NR-13. No entanto, há diversos outros padrões adotados pelas indústrias para garantir a correta adaptação das caldeiras.

Figura 10 – Local de instalação das caldeiras.



Fonte: Própria autora, 2023.

Os detalhes referentes aos dados da caldeira analisada são apresentados na tabela 5.

Tabela 5 – Ficha técnica da caldeira do tipo mista.

Caldeira	
Fabricante	Aalborg industries s/a
Modelo	---
Pressão de operação	8 Kgf/cm ²
Pressão máx. De trabalho	11,95 Kgf/cm ²
Produção de vapor	---
Combustível	Coco-babaçu
Categoria	B
Superfície de aquecimento	686 m ²

Fonte: Própria autora, 2023.

4.2 ÁGUA DA CALDEIRA:

A água de alimentação da caldeira é proveniente da estação de tratamento de água (ETA), que por sua vez, pega essa água de poços artesianos.

4.2.1 Análise da água

Um técnico coleta semanalmente amostras de água de alimentação e da própria caldeira.

As amostras coletadas são encaminhadas à um laboratório especializado, onde são realizadas as análises químicas. Os parâmetros que são analisados na água são pH, alcalinidade hidróxido, dureza total, ferro total e sulfitos.

Após a divulgação dos resultados, o técnico elabora um laudo analítico com a proposta de ajustes necessários a serem realizados na água para uma melhor qualidade da mesma.

Para o estudo de caso da caldeira, foi realizado um acompanhamento durante 05 meses consecutivos, sendo analisados e estudados os laudos semanais de análise de água da caldeira.

Com base no tratamento da água realizado na caldeira, foi feito um comparativo entre os valores de referência para cada parâmetro bem como os valores que são gastos com o tratamento atual e as possíveis despesas adicionais que podem surgir em consequência ao tratamento inadequado ou ausente. Foi analisado, principalmente, os custos com manutenção, as multas e os possíveis gastos no processo de produção.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A manutenção da água dentro de uma caldeira é fundamental para preservar sua integridade, prolongando sua vida útil e garantindo um padrão de qualidade no processo industrial. Isso se deve à necessidade de vapor puro na indústria de alimentos. Portanto, é preciso fazer análises e aplicar tratamentos químicos na água para que suas características atendam aos padrões técnicos estabelecidos.

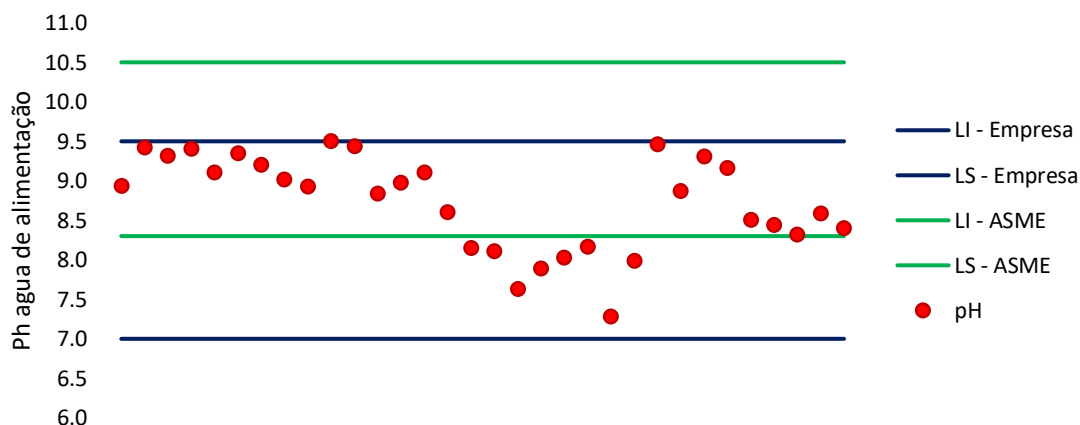
Com base nos relatórios do laboratório especializado, foram obtidos os resultados das análises das amostras de água coletadas tanto na entrada da caldeira quanto na água nela contida, ao longo de um período de cinco meses.

De acordo com os resultados das análises e de acordo com valores de referência adotados pela empresa, nota-se que em sua maioria a água está inadequada para utilização, por apresentar algumas alterações em seus resultados, principalmente parâmetros de dureza e ferro totais.

5.1 ANÁLISE DO pH DA ÁGUA DE CALDEIRA

A água ao sair do poço artesiano possui um pH de aproximadamente 5,5 e em seguida passa pela ETA, que deveria aumentar seu valor para 7 a 9,5. Na Figura 11, pode-se observar a diferença entre os valores de pH usados pela empresa e os valores de referência pela ASME, bem como os valores das análises para água de alimentação, já na Figura 12, observa-se os parâmetros agora para a água da caldeira em comparação com os valores de referência da Snatural. O pH recomendado para a água da caldeira é alcalino, pois se este for ácido pode causar corrosão na tubulação. Para controlar o pH, utiliza-se um alcalinizante. Com isso, além de aumentar o valor do pH, aumenta-se a alcalinidade hidróxido da água.

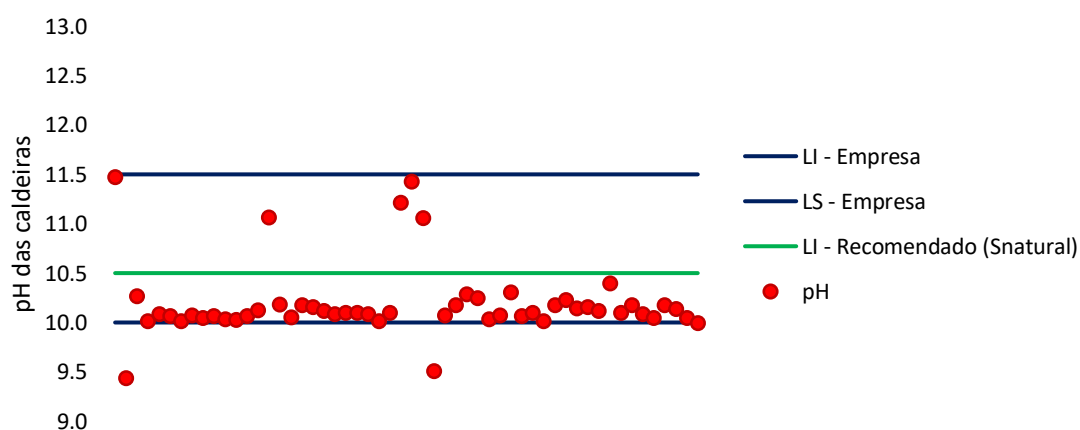
Figura 11 – Análise do pH da água de alimentação da caldeira.



LI: Limite inferior, LS: Limite superior.

Fonte: Própria autora, 2023.

Figura 12 – Análise do pH da água da caldeira.



LI: Limite inferior, LS: Limite superior.

Fonte: Própria autora, 2023.

Observa-se que os valores de pH para água de alimentação estão dentro da faixa considerada pela empresa, porém, alguns desses valores não estão dentro da faixa considerada pela ASME, portanto gerando a necessidade de adição de alcalinizantes para aumentar o pH. Em relação a água das caldeiras, os valores do pH em sua maioria estão dentro da faixa considerada pela empresa, porém, a maioria deles está abaixo da faixa considerada pela Snatural.

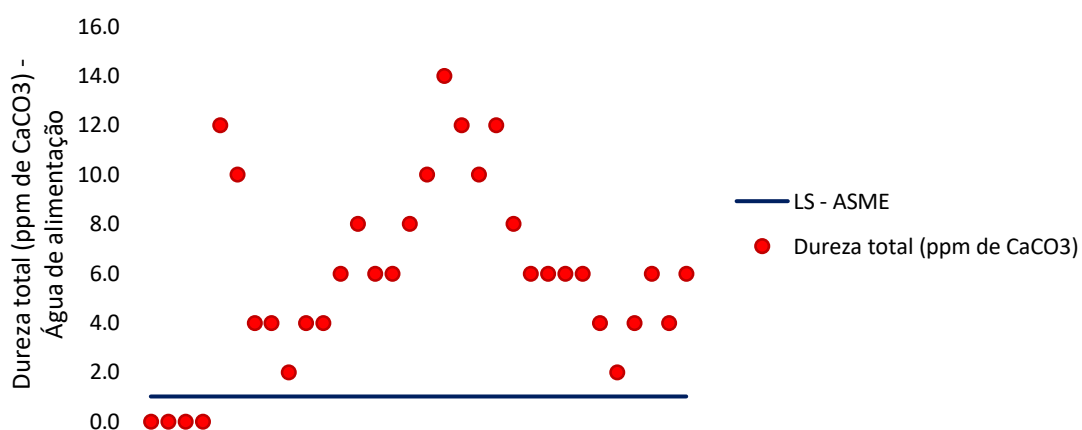
Quando o pH da água está fora da faixa recomendada em uma caldeira, pode causar diversos problemas: Corrosão excessiva, formação de incrustações, redução da eficiência, danos ao equipamento e aumento dos custos de manutenção, por isso, recomendou-se junto a

empresa, o aumento do uso de alcalinizantes na água da caldeira para estabilizar o pH em uma faixa superior a usada atualmente.

5.2 ANÁLISE DA DUREZA TOTAL

Para facilitar a remoção dos sólidos, sais dissolvidos, matéria orgânica e outros contaminantes que podem conter na água, é adicionado à água um dispersante, que faz com que todas essas partículas fiquem dispersas, espalhadas na água, de modo que possam ser removidas pelo sistema de descarga da caldeira. Na Figura 13 e 14 pode-se observar os valores da dureza total da água.

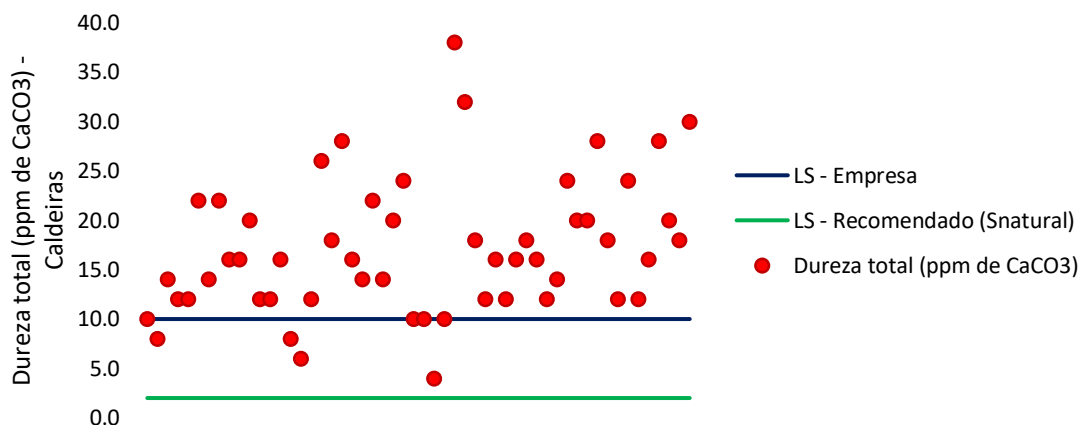
Figura 13 – Análise da dureza total na água de alimentação da caldeira.



LI: Limite inferior, LS: Limite superior.

Fonte: Própria autora, 2023.

Figura 14 – Análise da dureza total na água da caldeira.



LI: Limite inferior, LS: Limite superior.

Fonte: Própria autora, 2023.

Pode-se notar que a descarga está sendo feita em quantidades inadequadas durante o funcionamento, ou até mesmo de maneira incorreta, uma vez que tanto na água de alimentação como na própria caldeira, os valores de dureza estão acima dos valores de referência da empresa, ASME e Snatural. Assim, pode estar ocorrendo na caldeira problemas de incrustação devido aos sólidos que podem estar sobrando na água, além de arraste químico da água da caldeira para a linha de distribuição de vapor, ou seja, pode estar levando sólidos indesejados para o vapor que será utilizado no processo. Esses problemas podem gerar diminuição da eficiência da caldeira, visto que a troca térmica será menor devido a camada grossa de incrustação, isolando o fluxo de calor.

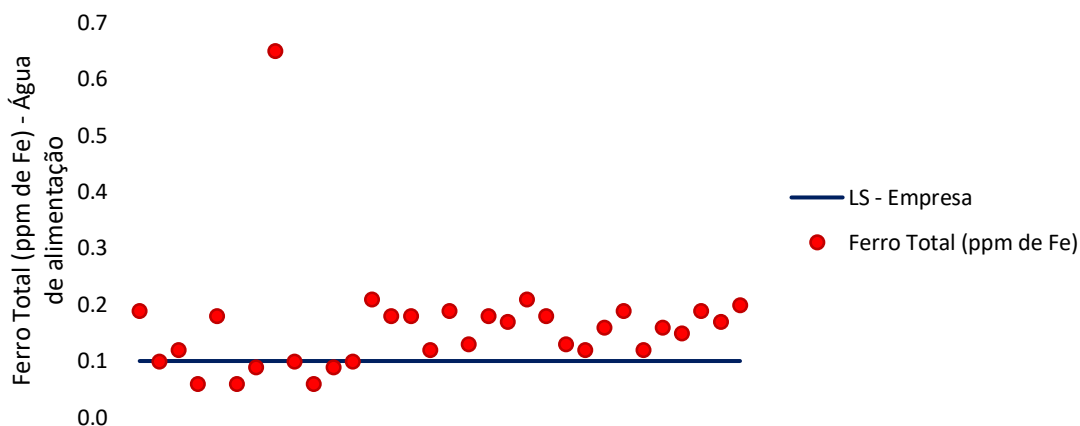
Devido isso, recomendou-se junto a empresa, o aumento do uso de dispersantes na água da caldeira e alimentação e o correto fluxo de descarga dessas partículas.

5.3 ANÁLISE DO TEOR DE FERRO TOTAL

O ferro em excesso pode levar à formação de depósitos sólidos, como ferrugem e óxidos metálicos, nos tubos e superfícies de aquecimento da caldeira. Isso pode reduzir a eficiência do sistema, diminuir a transferência de calor e aumentar o consumo de energia, em resumo, o excesso de ferro na água da caldeira pode resultar em perda de eficiência, danos ao equipamento e redução da vida útil do sistema.

Nas Figuras 15 e 16 pode-se observar os valores de ferro total para água de alimentação e a água da caldeira analisados pelo laboratório.

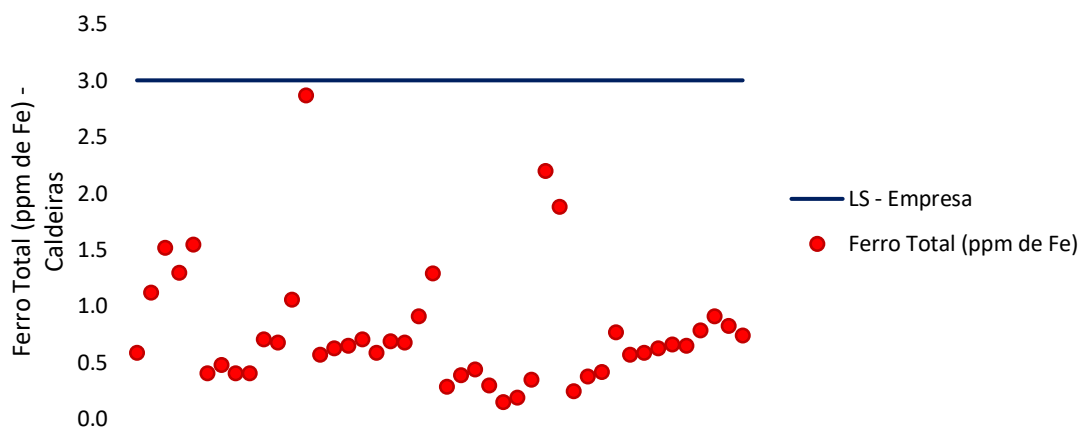
Figura 15 – Análise de ferro total na água de alimentação da caldeira.



LI: Limite inferior, LS: Limite superior.

Fonte: Própria autora, 2023.

Figura 16 – Análise de ferro total na água da caldeira.



LI: Limite inferior, LS: Limite superior.

Fonte: Própria autora, 2023.

A partir dos dados das análises, verifica-se que o ferro está com valores acima da faixa de referência da empresa, evidenciando um problema no tratamento da água de alimentação. Já na água da caldeira, os valores se apresentam em conformidade com a faixa de referência.

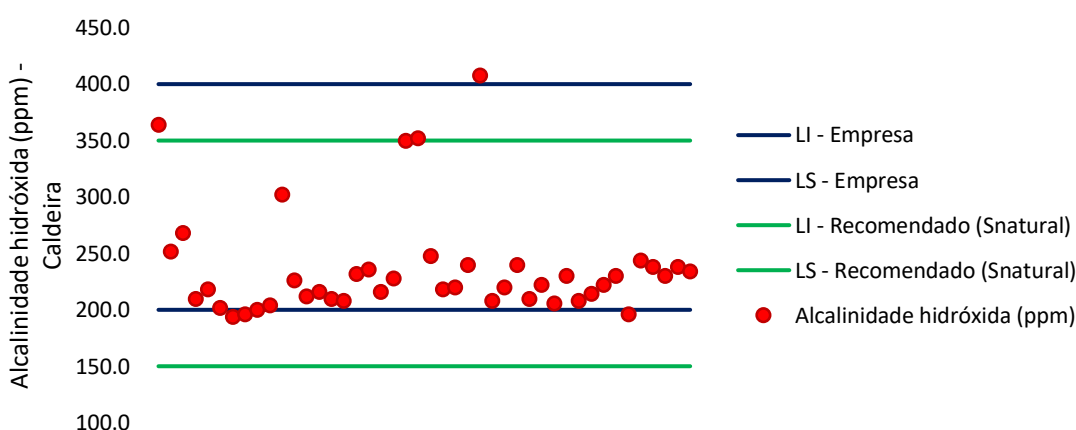
Valores de ferro fora de faixa na água de alimentação e valores em conformidade na caldeira evidenciam a necessidade e o uso de tratamento químico nas caldeiras com uso de produtos químicos específicos, como agentes sequestrantes de ferro ou dispersantes, para

controlar e remover o ferro presente na água. Esses produtos ajudam a evitar a formação de depósitos e a reduzir a corrosão.

5.4 ANÁLISE DE ALCALINIDADE HIDRÓXIDO E SULFITOS

Na figura 17, pode-se observar os valores de alcalinidade hidróxido de acordo com os relatórios do laboratório. Valores muito elevados de alcalinidade hidróxido também podem causar corrosão, sendo está por ataque cáustico.

Figura 17 - Valores de alcalinidade hidróxido na água da caldeira.



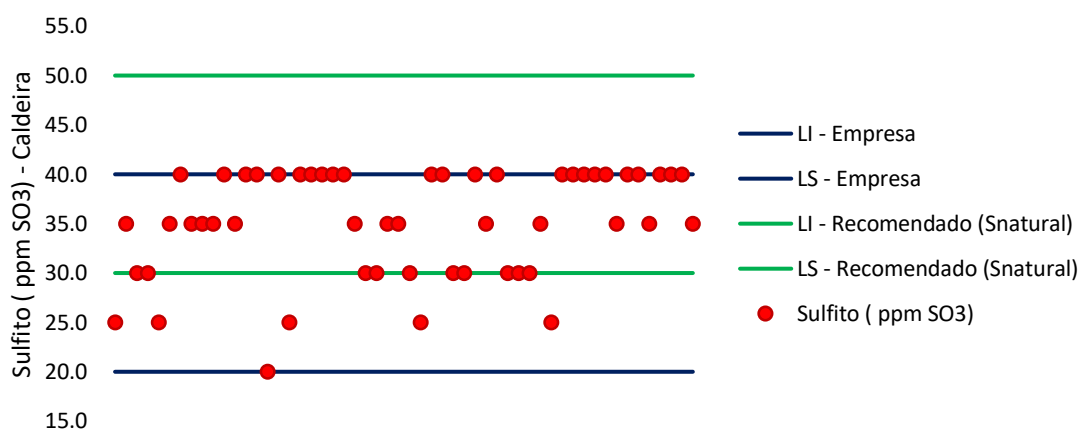
LI: Limite inferior, LS: Limite superior.

Fonte: Própria autora, 2023.

Observa-se que em sua maioria, os valores de alcalinidade hidróxido na caldeira estão dentro da faixa considerada pela empresa e pela recomendação da Snatural.

O contato direto da caldeira e suas tubulações com a água torna essencial lidar com a corrosão, uma vez que esta é a deterioração dos materiais metálicos causada pelos contaminantes presentes nela. Nesse contexto, é crucial eliminar o oxigênio presente na água da caldeira. Para essa finalidade, introduz-se um sequestrante de O_2 na água, sendo o sulfito de sódio comumente utilizado para essa função. A reação entre o sulfito e o oxigênio resulta na formação de sulfatos, aumentando a concentração de sólidos dissolvidos na água. A velocidade dessa reação é amplificada com o aumento da temperatura. Portanto, é imperativo regular com cautela a quantidade de sulfito utilizada no tratamento. Na figura 18 pode-se observar os valores de sulfito presente na caldeira.

Figura 18 – Valores de sulfito (ppm SO₃) na água da caldeira.



LI: Limite inferior, LS: Limite superior.

Fonte: Própria autora, 2023.

Observa-se que em sua maioria, os valores de sulfitos na caldeira também estão dentro da faixa considerada pela empresa, porém, alguns poucos valores aparecem abaixo do recomendado pela Snatural.

Uma dosagem insuficiente pode não permitir que o sulfito elimine todo o oxigênio presente na água. Por outro lado, doses excessivas, além de gerar uma quantidade elevada de sólidos dissolvidos, podem levar à decomposição do sulfito, resultando na formação de sulfeto de hidrogênio (H₂S), um composto químico altamente corrosivo. Ao empregar o sequestrante de O₂, é crucial equilibrar a dosagem de forma a eliminar o oxigênio da água e ainda manter um residual de sulfito na mesma.

5.5 ANÁLISE FINANCEIRA

Quando não há o devido tratamento da água ou quando este é inadequado, a indústria fica sujeita a custos adicionais relacionados à manutenção dos equipamentos, muitas associadas às condições dos mesmos ou a ocorrência de acidentes. Isso acarreta, consequentemente, em custos adicionais decorrentes de períodos em que a fábrica fica inoperacional, correspondendo ao tempo sem produção em andamento.

Em média, o custo que a indústria tem com o tratamento da água da caldeira em estudo é de R\$ 8.000,00 por mês em produtos químicos.

Conforme indicado nos relatórios do laboratório, alguns parâmetros estão fora das especificações definidas pela empresa. Isso resulta na exigência de ajustes por meio da adição de produtos químicos. De acordo com informações fornecidas pela empresa, essa correção, baseada nos dados coletados pelo laboratório, aumentaria em 50% o custo mensal do tratamento da água, implicando em uma despesa adicional de R\$ 4.000,00 por mês com produtos químicos.

Com isso, por meio dos dados fornecidos pela indústria, a seguir, estão detalhados alguns dos problemas e custos extras que um tratamento ausente ou de má qualidade pode causar.

5.5.1 Manutenção do equipamento

Levando em consideração que a indústria cervejeira funciona 24h por dia, caso não seja realizado o tratamento da água ou este seja inadequado e, a caldeira necessite de uma manutenção não planejada, a indústria terá que parar o seu processo nessa caldeira e funcionar com as outras duas para produção durante o período em que a manutenção do equipamento será realizada, ou seja, haverá uma diminuição da produção devido a parada para a manutenção, além do esforço a mais no uso das outras duas caldeiras com o intuito de compensar a parada da outra caldeira.

Conforme as informações fornecidas pela empresa, operar a produção por um dia com apenas duas caldeiras, em vez de três, resultaria em aproximadamente R\$ 50.000,00 de prejuízo.

Assim, caso seja necessário parar a caldeira para manutenção, mesmo que, supostamente, por um dia, a empresa terá um prejuízo de aproximadamente R\$ 50.000,00. Este valor é levando em consideração apenas um dos processos da indústria, que é o de produção da cerveja. Sem contar que atrasos no fornecimento do material para os distribuidores pode gerar outros problemas relacionados ao setor comercial.

5.5.2 Multas

Outro aspecto relevante é que, conforme estipulado pela NR-13, se for constatado que o equipamento não está em condições adequadas de operação, ou seja, apresenta risco grave e iminente (RGI), a empresa está passível de penalidades. Conforme previsto pela NR-28, os montantes das multas decorrentes da condição do equipamento estão especificados na Tabela 6.

Tabela 6 - Valores das multas conforme a infração.

Item da NR-13	Descrição	Valor da multa
13.3.1 alínea “e”	Operando com deterioração atestada	R\$ 4.125,52
13.3.3.4	Operando sem projeto de alteração e reparo (PAR)	R\$ 4.125,52
13.4.4.12	Ausência de inspeção extraordinária	R\$ 4.125,52

Fonte: GOVERNO DO BRASIL, 2020.

Outra informação importante é que, nos cálculos para determinar esses valores, levou-se em consideração apenas a documentação associada ao equipamento. Em situações mais críticas, caso o equipamento falhe, a empresa pode enfrentar perdas patrimoniais, resultando em despesas adicionais para adquirir um novo equipamento. Além disso, com a perda do equipamento, a indústria também estará sujeita a uma paralisação da produção, já que depende do vapor para seus processos.

Além disso, em casos de acidentes, é necessário destacar alguns pontos. Se não houver óbito de funcionários, a empresa terá que arcar com despesas médicas, bem como indenizações. Contudo, se ocorrer o falecimento do funcionário, além das despesas médicas e indenizações para a família da vítima, a empresa enfrentará a perda irreparável de vidas, uma variável impossível de ser quantificada. Outro aspecto é que a reputação da empresa pode ser prejudicada, levando a uma redução nos contratos e vendas, podendo até mesmo levar à falência.

6 CONCLUSÃO

Os resultados analisados e discutidos indicam que a qualidade da água não se relaciona aos produtos usados, mas sim à falta de controle na dosagem bem como o tratamento inadequado. A caldeira enfrenta corrosão e incrustação devido ao tratamento ineficiente, possivelmente requerendo reparos adicionais.

A avaliação dos níveis de pH tanto na água de entrada quanto nas caldeiras apontou a necessidade de realizar ajustes para assegurar a aderência às normas estabelecidas pela ASME e pela Snatural. Foi sugerido incrementar o emprego de alcalinizantes na água das caldeiras, com o intuito de manter o pH estável e prevenir problemas futuros.

A análise dos valores de dureza indicou a possibilidade de descarga inadequada, com concentrações acima dos limites estabelecidos pela empresa, ASME e Snatural. Recomendou-se aumentar o uso de dispersantes na água e ajustar o fluxo de descarga para corrigir essa situação.

Os teores de ferro na água de entrada ultrapassam as normas da empresa, indicando uma deficiência no tratamento, ao passo que na água da caldeira estão dentro dos parâmetros aceitáveis. Recomendou-se o uso de produtos químicos específicos para controlar e remover o ferro presente na água, evitando a formação de depósitos e reduzindo a corrosão.

A análise de hidróxidos e sulfitos revelou que a maior parte dos valores na caldeira estão dentro dos limites estabelecidos pela empresa e Snatural. No entanto, alguns valores de sulfitos estão abaixo do padrão recomendado pela Snatural. Como ação corretiva, foi sugerido o uso equilibrado de um sequestrante de oxigênio para remover o oxigênio da água e manter uma quantidade adequada de sulfito residual.

Diante dessas análises, a qualidade da água impacta muito na durabilidade da caldeira. Inspeções regulares são cruciais para garantir a conformidade com os padrões de segurança, identificando danos que possam comprometer sua integridade.

Finalmente, essa pesquisa e a aplicação dos métodos permitiram identificar os problemas da caldeira, tornando mais fácil ajustar o método de tratamento para torná-lo mais eficaz.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, propõe-se outras análises relacionadas a qualidade da água utilizada por caldeiras, como:

- ✓ Condutividade ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
- ✓ Cloreto (ppm)
- ✓ Sílica (ppm)

REFERÊNCIAS

FLUIDCONTROLS. ALTAFINI, C. R. Apostila sobre caldeiras. Caxias do Sul. 2002. Disponível em: <<https://fluidcontrols.com.br/apostila-sobre-caldeiras-profo-carlos-alberto-altafini/>>. Acesso em: 04/03/2024.

ASME VI Boiler & Pressure Vessel Code - Recommended Rules for the Care and Operation of Heating Boilers. 2015. Disponível em: <https://m.facebook.com/pipingforbeginner/posts/2211586519058187/?_se_imp=0zLXYkcafGNxvfBKQ>. Acesso em: 04/12/2023.

BACCAN, NIVALDO., ANDRADE, J.C., Química Analítica Quantitativa Elementar. 3ª ed. São Paulo: Edgard Blücher. 2004.

BAZZO, E. Geração de vapor. 2ª. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1995.

BOTELHO, CLÁUDIO GOUVÊA., Recursos Naturais Renováveis e Impacto Ambiental: Água. 1ª ed. Lavras: UFLA/FAEPE, 2001.

BOTELHO, Manoel Henrique Campos; BIFANO, Hercules Marcello. Operação de caldeiras: gerenciamento, controle e manutenção. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2015.

BURNTECH. Saiba quais são os principais tipos de caldeiras industriais. 2021. Disponível em: <<https://blog.burntech.ind.br/caldeiras-industriais/>>. Acesso em: 04/12/2023.

DEQWiki. Caldeiras flamotubulares. 2019. Disponível em: <https://wiki.eq.uc.pt/mediawiki/index.php/Caldeiras_flamotubulares>. Acesso em: 04/12/2023

FILHO, Eder Douglas de Moraes. Incrustações em Caldeiras. 2020. Disponível em: <<https://www.linkedin.com/pulse/incrusta%C3%A7%C3%B5es-em-caldeiras-eder-douglas-de-moraes-filho/?originalSubdomain=pt>>. Acesso em: 12/12/2023.

FILHO, Maurício Ribeiro da Cunha; EMIDIO, Wanielly Pereira. Condições de Segurança em Operações de Máquinas Térmicas. 2022. Disponível em: <<https://repositorio-api.animaeducacao.com.br/server/api/core/bitstreams/0d548d65-de8d-4bcc-a492-82c0faa64683/content>>. Acesso em: 12/09/2023.

FONSECA, Christiana Maria Andrade da. CONSERVAÇÃO E REUSO DE ÁGUA EM INDÚSTRIA DE FABRICAÇÃO DE BEBIDA – ESTUDO DE CASO. 2020. Disponível em: <
<https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/42419/1/DISSERTA%C3%87%C3%83O%20Christiana%20Maria%20Andrade%20da%20Fonseca.pdf>>. Acesso em: 12/09/2023.

JUNIOR, Walter José de Azevedo. ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DA ÁGUA DE MINA NA GERAÇÃO DE VAPOR EM CALDEIRA MISTA PARA BENEFICIAMENTO DE CAFÉ NO MUNICÍPIO DE TRÊS PONTAS – MG. 2019. Disponível em: <
<http://repositorio.unis.edu.br/bitstream/prefix/1232/1/TCC%20-%20WALTER%20AZEVEDO%20FINAL.pdf>>. Acesso em: 12/09/2023.

KITTO, J. B.; STULTZ, S. C. Steam: its generation and use. 41^a. ed. Barberton: The Babcock & Wilcox Company, 2005.

LISBOA, Luana. Matriz de coeficientes técnicos de recursos hídricos para o setor industrial brasileiro. 2010. Disponível em: <
<https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/3627/1/texto%20completo.pdf>>. Acesso em: 12/09/2023.

MACÊDO, Jorge Antônio Barros de., Águas & Águas. São Paulo: Livraria Varela, 2001.

MARETI, Karina Garcia. ESTUDO DE CASO SOBRE A INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO DE ÁGUA DE UMA CALDEIRA FLAMOTUBULAR MISTA EM UMA INDÚSTRIA NO SETOR ALIMENTÍCIO. 2021. Disponível em: <
https://bdm.ufmt.br/bitstream/1/1854/1/TCC_Karina___VERSAO_FINAL.pdf>. Acesso em: 12/09/2023.

MUNDOEDUCACAO. Você sabe o que é pH?. 2023. Disponível em: <
<https://mundoeducacao.uol.com.br/quimica/voce-sabe-que-significa-ph-.htm>>. Acesso em: 12/12/2023.

NCH. Tratamento de água de caldeiras. 2022. Disponível em: <
<https://www.la.nch.com/tratamento-de-aacutegua-de-caldeiras/tratamento-de-agua-de-caldeiras>>. Acesso em: 12/12/2023.

OLIVEIRA, Diego Júnior de. ANÁLISE DE OPERAÇÃO DE CALDEIRAS DE ACORDO COM A NR-13. 2014. Disponível em: <
<https://www.unirv.edu.br/conteudos/fckfiles/files/An%C3%A1lise%20de%20opera%C3%A>

7%C3%A3o%20de%20caldeiras%20de%20acordo%20com%20a%20NR-13.pdf>. Acesso em: 12/12/2023.

SANTOS, Pedro Henrique Carvalho. Estudo de caso: Readequação do sistema de geração de vapor em uma empresa automotiva. 2021. Disponível em: <https://www.monografias.ufop.br/bitstream/35400000/3091/6/MONOGRAFIA_EstudoCasoReadequa%C3%A7%C3%A3o.pdf>. Acesso em: 12/12/2023.

SANTOS. Erick Breno Azevedo dos. ANÁLISE ENERGÉTICA DE UMA CALDEIRA MISTA UTILIZANDO CAVACO DE BAMBU COMO COMBUSTÍVEL. 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/42923/1/AnaliseEnergeticaCaldeira_Santos_2021.pdf>. Acesso em: 04/12/2023.

BELTRAMI, Monica; SOUZA, Gismar Schilive de. Princípios de Tecnologia Industrial. Curitiba. 2012. Disponível em: <<https://vivendoseguranca.files.wordpress.com/2017/07/princc3adpios-de-tecnologia-industrial.pdf>>. Acesso em: 04/03/2024.

SILVA, Sauro Pereira da. A IMPORTÂNCIA DE UM PLANO DE INSPEÇÃO DE SEGURANÇA NA OPERAÇÃO DE CALDEIRAS AQUATUBULARES. 2014. Disponível em: <<http://repositorio.unitau.br/jspui/bitstream/20.500.11874/4267/1/Mografia%20Sauro%20Pereira%20da%20Silva.pdf>>. Acesso em: 04/12/2023.

SNATURAL. Torre Caldeira Tratamento Agua Caldeira. Disponível em: <https://www.snatural.com.br/PDF_arquivos/Torre-Caldeira-Tratamento-Agua-Caldeira.pdf>. Acesso em: 12/12/2023.

VEIGA, Graziella da Veiga. ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS E MICROBIOLÓGICAS DE ÁGUA DE POÇOS DE DIFERENTES CIDADES DA REGIÃO SUL DE SANTA CATARINA E EFLUENTES LÍQUIDOS INDUSTRIAIS DE ALGUMAS EMPRESAS DA GRANDE FLORIANÓPOLIS. 2005. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/105056>>. Acesso em: 12/12/2023.

VON SPERLING, M., Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 2º ed. Belo Horizonte:DESA-UFMG, 1996.