

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE VÁRZEA GRANDE - CUVG FACULDADE DE ENGENHARIA - FAENG ENGENHARIA QUÍMICA

ESTUDO DE CASO SOBRE A INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO DE ÁGUA DE UMA CALDEIRA FLAMOTUBULAR MISTA EM UMA INDÚSTRIA NO SETOR ALIMENTÍCIO

KARINA GARCIA MARETI

Cuiabá - MT

KARINA GARCIA MARETI

ESTUDO DE CASO SOBRE A INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO DE ÁGUA DE UMA CALDEIRA FLAMOTUBULAR MISTA EM UMA INDÚSTRIA NO SETOR ALIMENTÍCIO

Trabalho de conclusão de curso apresentado à FAENG – Faculdade de Engenharia, como prérequisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Murilo José Pereira de Macedo

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me abençoar e permitir chegar até esse momento. Agradeço aos meus pais, Valdir e Marina, ao meu irmão Eduardo e ao meu noivo Fernando por estarem ao meu lado e me apoiarem, com amor e carinho, sempre me incentivando a correr atrás dos meus sonhos e objetivos, nunca me deixando desistir. Eles são o motivo de eu estar concluindo mais essa etapa.

Agradeço aos amigos que fiz durante a faculdade, por toda a companhia e conselhos durante o curso, e por estarem ao meu lado enfrentando os momentos bons e ruins, me ajudando a amadurecer. Esses, com certeza, sempre levarei comigo.

Agradeço aos meus professores pelos ensinamentos, em especial ao meu orientador por contribuir e me auxiliar no desenvolvimento desse trabalho.

RESUMO

ESTUDO DE CASO SOBRE A INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO DE ÁGUA DE UMA CALDEIRA FLAMOTUBULAR MISTA EM UMA INDÚSTRIA NO SETOR ALIMENTÍCIO

O vapor utilizado em indústrias alimentícias pode influenciar diretamente a higiene e qualidade final do produto. O tratamento adequado da água de alimentação das caldeiras para geração do vapor, garante que a qualidade do produto seja mantida e que o equipamento opere em segurança, visando preservar sua integridade estrutural. Assim, o presente trabalho tem como objetivo o estudo de caso do tratamento de água de uma caldeira do tipo flamotubular mista de um laticínio, localizado no município de Colíder no estado de Mato Grosso (MT). Para esse estudo, foi realizado um acompanhamento durante o período de três meses consecutivos, sendo estudados três laudos de análise química da água da caldeira, e foi feito um comparativo entre os valores que são gastos com o tratamento atual e as possíveis despesas adicionais que podem surgir em consequência ao tratamento inadequado ou ausente. A partir dos três relatórios, observa-se que a água de alimentação apresenta valores alterados nos parâmetros adotados para análise, sendo eles pH, alcalinidade hidróxido, alcalinidade total, sólidos totais dissolvidos e sulfitos, que provocam problemas como arraste de impurezas, incrustação e corrosão no gerador de vapor e suas tubulações. Esses problemas podem causar a diminuição da qualidade do alimento, perda de lotes de produção e parada de fábrica para manutenção dos equipamentos danificados, perdendo assim tempo e recursos financeiros. Assim, o tratamento prévio da água de alimentação da caldeira é indispensável na garantia de um processo seguro e de qualidade. Por fim, algumas alterações foram sugeridas no sentido de promover o melhor funcionamento da caldeira, como acrescentar ao processo de geração de vapor um desaerador, adotar um método de conservação do equipamento, além de uma coleta de água para análise de diferentes níveis, garantindo assim um melhor desempenho da caldeira.

Palavras-chaves: Geração de vapor; Caldeira flamotubular mista; Água para caldeiras; Análise econômica de processos.

ABSTRACT

INFLUENCE OF WATER TREATMENT ON THE FIRETUBE BOILER IN A FOOD INDUSTRY: A CASE STUDY

Quality of products in food industry is deeply determined by the characteristics of the steam applied within the industrial process. In this sense, the adequate water treatment prior to feed a steam boiler may guarantee both the quality of the product and the operational security, once problems related to corrosion might occur unless the water be treated previously. Thus, this current work aims to develop a case study regarding to the water treatment for a Firetube boiler of a dairy industry, located in Colíder MT (Brazil). In order to carry out this study, a report containing chemical analysis of water was conducted during a period of three months, in which a comparative between costs regarding to current treatment and likely additional costs by consequence of a lack or an inadequate treatment. Theses reports indicated that the water contained some out-of-specification values. Thus, some problems in the steam boiler and piping, related to the use, can be found, such as drag of impurities, incrustation and corrosion of them. The identified problems were inadequate pH, alkeli hydroxide, total alkalinity and solids and sulfite index. These problems may provoque the loss of quality of the product, loss of entire bath and, in a critical situation, stop the industrial activities to repair damaged equipments, thus generating waste of time and of financial resources. In this way, the preliminary treatment of the water is imperative in order to make the process safe and of with a good quality. Ultimately, the applied process were not themselves sufficient to solve the problems, thus, some changes were proposed in order to improve the operation of the boiler, such as to add a deaerator to the stem generation process, and t include a suitable method for improve the equipment lifespan. In addition, an adequate method to water collect from boiler in different points, thus ensuring an optimal use of the boiler.

Keywords: Stem generation; Firetube boiler; Water for boilers; Economic Analysis of processes.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros necessários para água de uma caldeira Flamotubular com pr	ressão de
operação 0-300 psig (0 – 21 kgf/cm ²).	15
Tabela 2 - Dados da caldeira em estudo.	19
Tabela 3 - Resultados analíticos Relatório 1	24
Tahela 4 - Valores das multas conforme a infração	34

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Máquina de Hero - motor rotativo.	1
Figura 2 - Bomba d'água de Newcomen,	2
Figura 3 - Esquema de circulação dos gases em uma Caldeira Flamotubular. (a) 1 passa (b) 3 passagens.	-
Figura 4 - Caldeira Flamotubular. (a) horizontal. (b) vertical.	7
Figura 5 - Esquema de uma caldeira Aquatubular.	8
Figura 6 - Caldeira aquatubular.	9
Figura 7 - Caldeira Flamotubular mista.	10
Figura 8 - Esquema de caldeira elétrica.	11
Figura 9 - Caldeira elétrica.	11
Figura 10 - Corrosão interna na tubulação	17
Figura 11 - Incrustação na parte interna da tubulação.	18
Figura 12 - Vista geral da caldeira em estudo.	
Figura 13 - Vista interna (a) da fornalha e tubulão e (b) detalhe do tubulão	20
Figura 14 - Vista interna da fornalha – caldeira em operação	20
Figura 15 - Espelho e câmara de reversão. (a) traseira. (b) frontal	21
Figura 16 - Dutos de exaustão e chaminé	21
Figura 17 - Instrumentos para controle de nível da água. (a) garrafa de nível. (b) eletrod	os. 22
Figura 18 - Reparos: (a) na região inferior do casco; (b) na chapa metálica do domo	24
Figura 19 - Corrosão no interior do casco da caldeira.	27
Figura 20 - Incrustação na tubulação. (a) vista interna. (b) vista superior da boca de visi	ta28
Figura 21 - Impurezas depositadas no piso após limpeza do gerador de vapor	30
Figura 22 - Descarga de fundo. (a) casco da caldeira. (b) fornalha	31
Figura 23 - Local de descarte da descarga de fundo	31

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Comparativo entre os valores de pH.	25
Gráfico 2 - Valores de alcalinidade hidróxido	26
Gráfico 3 - Valores de sulfitos presentes na água.	27
Gráfico 4 - Valores de sólidos totais dissolvidos presentes na água	28
Gráfico 5 - Valores de ferro total com base nos relatórios	29
Gráfico 6 - Valores de ferro total com base no código ASME.	29
Gráfico 7 - Comparativo entre despesas com tratamento de água e prejuízo com manutenç	

LISTA DE ABREVIATURAS

TCC Trabalho de Conclusão de Curso

UFMT Universidade Federal do Mato Grosso

MT Mato Grosso

°C Graus Celsius

NR Norma regulamentadora

kg/h Quilograma por hora

kgf/cm² Quilograma força por centímetro quadrado

ton/h Tonelada por hora

P Pressão V Volume

T Temperatura

PMTA Pressão máxima de trabalho admissível

ASME Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos

STRAB Secretária do Trabalho

SIT Subsecretaria de Inspeção do Trabalho

SEPRT Secretaria Especial De Previdência e Trabalho

RGI Risco grave e iminente PH Profissional habilitado

mg/L Miligrama por litro

O Oxigênio

Fe Ferro

CaCO₃ Carbonato de cálcio

SiO₂ Sílica

TOC Carbono orgânico total

kgv/hora Quilograma de vapor por hora

H₂S Sulfeto de hidrogênio

SUMÁRIO

AGR	ADEC	IMENTOS	I
RESU	U MO. .		II
ABS	ΓRAC'	Γ	III
LIST	'A DE	TABELAS	IV
LIST	'A DE	FIGURAS	V
LIST	'A DE	GRÁFICOS	VI
LIST	'A DE	ABREVIATURAS	VI
1 IN	NTRO	DUÇÃO	1
1.1		ETIVOS	
2 F	UNDA	MENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1		DEIRAS	
2.	1.1	Definição	5
2.		Princípio de funcionamento	
2.	1.3	Tipos de caldeiras	6
	2.1.3.	1 Caldeiras Flamotubulares	6
	2.1.3.	2 Caldeiras Mistas	10
	2.1.3.		
2.2	PRO	CESSO DE PRODUÇÃO DE VAPOR NA CALDEIRA	12
2.3		TÃO DE SEGURANÇA E INTEGRIDADE DA CALDEIRA	
2.4	ÁGU	A E SUAS IMPUREZAS	14
2.	4.1	f Agua para caldeira - padr $f a$ o de qualidade	15
2.	4.2	Consequências das impurezas da água	
	2.4.2.		
	2.4.2.	5	
	2.4.2.		
		OOLOGIA	
4 R	ESUL'	TADO E DISCUSSÃO	23
		LISE FINANCEIRA	
		OMENDAÇÕES	
		USÃO	
REFI	ERÊN	CIAS	37

1 INTRODUÇÃO

Os geradores de vapor aos moldes que se conhece atualmente nas indústrias têm origem bastante remota. Esses equipamentos podem ser considerados como evolução dos protótipos e propostas de geração de energia. Em 200 a.C., Heron de Alexandria, matemático e mecânico grego, projetou uma máquina que usava vapor como fonte de energia e a rotulou como eolípila, que significa motor a vapor rotativo. Esta máquina consistia em uma esfera oca que possuía dois tubos presos e dobrados em ângulos diferentes, ligada a um caldeirão com água por meio de dois canos, como detalhado na Figura 1. O funcionamento consistia em levar o caldeirão com água ao fogo, até quando a água atingisse a temperatura de 100 °C, período no qual a água líquida mudava de fase e transformava-se em vapor, sendo conduzido pelos canos. Quando o vapor escapava pelos tubos presos à esfera, ela se movia, girando em seu eixo. A partir daí, surgiu a ideia de gerar vapor para realizar um trabalho útil e até hoje a ideia básica permanece a mesma – gerar calor, transferir para a água e produzir vapor (KITTO & STULTZ, 2005).



Figura 1 - Máquina de Hero - motor rotativo.

Fonte: (KITTO e STULTZ, 2005)

No século XVII, por volta de 1690, o físico francês Denis Papin usou esse princípio para criar uma bomba para drenagem de água de minas. O equipamento era composto por um cilindro localizado em cima de uma fonte de calor, onde colocava-se água em seu interior. Quando a água se transformava em vapor, um pistão localizado dentro do cilindro subia devido à pressão do vapor. Em seguida, removia-se a fonte de calor, o que fazia o vapor esfriar e se condensar. Assim, a pressão abaixava, ficando inferior a pressão atmosférica, o que fazia o pistão descer e, aspirar a água das minas. Em 1698, o inglês Thomas Savery patenteou o sistema de bombeamento de água, sendo quando se iniciou sua utilização efetiva (MANHONI, 2002).

Esta tecnologia foi aperfeiçoada em 1712 por Thomas Newcomen e John Calley. Foi desenvolvida uma máquina que possuía uma viga horizontal parecida à uma gangorra, onde ficava preso dois êmbolos, sendo um em cada extremidade. O vapor era gerado em uma caldeira e enviado para um cilindro, localizado sobre a caldeira. Com o aumento da pressão dentro deste cilindro, um dos pistões que ficava localizado em seu interior, era puxado para cima por um contrapeso. Em seguida, quando o cilindro se encontrava cheio de vapor, colocava-se água nele para que o vapor condensasse, reduzindo a pressão no interior do cilindro, o que fazia com que o pistão abaixasse. Um balancim era ligado a uma haste que levantava o embolo quando o pistão abaixava, assim retirando água de poços por meio do vácuo resultante, como pode-se notar na Figura 2 (MANHONI, 2002).

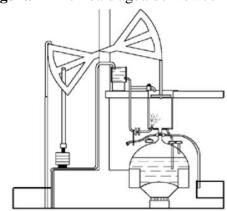


Figura 2 - Bomba d'água de Newcomen,

Fonte: (MANHONI, 2002).

Entretanto, James Watt notou que era desperdiçado combustível ao se utilizar a mesma câmara para alternar vapor aquecido e vapor resfriado condensado. Assim, em 1765, ele projetou uma máquina que reduziu o consumo de combustível em 75%. Este equipamento consistia em uma câmara condensadora separada, refrigerada a água, composta por uma bomba que mantinha o vácuo parcial e uma válvula que retirava periodicamente o vapor do cilindro. O invento de Watt deu início a revolução industrial e serve de princípio para a mecanização de toda a indústria. O modelo desenvolvido por Watt, corresponde aproximadamente à máquina de vapor atual (MANHONI, 2002).

A partir do desejo de gerar vapor em grande escala, a revolução industrial foi de grande importância para moldar o mundo que conhecemos hoje. Devido a necessidade de se encontrar fontes de calor que substituíssem a queima direta do carvão fóssil, foram desenvolvidas unidades geradoras de vapor. O objetivo principal era captar energia liberada pela queima de combustível em uma unidade central e distribuí-la a outros pontos de consumo. Com isso, o

vapor d'agua tornou-se indispensável em diversos setores industriais deste então (BAZZO, 1995).

A preferência pela utilização do vapor gerado em caldeiras como fluido de trabalho, se deve ao seu alto calor específico, aliado a grande disponibilidade de água no meio industrial, sendo utilizado em larga escala, tanto para serviços de aquecimento, quanto de acionamento mecânico (BAZZO, 1995).

O vapor que é produzido em uma caldeira pode ser utilizado de diversas maneiras como: (BIZZO, 2003)

- Processo de fabricação e beneficiamento: o vapor gerado por caldeiras pode ser utilizado
 em indústria de bebidas, madeireiras, indústria de papel e celulose, curtumes, indústria
 de laticínios, frigoríficos, indústria do setor alimentício em geral, indústria de
 vulcanização e recauchutagem, indústria química, indústria têxtil, indústria de petróleo,
 indústria metalúrgica e outras.
- Geração de energia elétrica: pode ser utilizado para movimentação de turbinas a vapor em usinas termoelétricas.
- Geração de trabalho mecânico: o vapor pode ser utilizado para a movimentação de equipamentos mecânicos.
- Além disso, também pode ser utilizado em hospitais, industrias de refeições, hotéis e similares.

Nas indústrias do estado de Mato Grosso (MT), o vapor gerado em unidades geradoras de vapor é utilizado principalmente em: frigoríficos, laticínios, curtumes, esmagadoras de cereais, usinas de etanol, fábrica de bebidas, fábrica de doces, recapadoras de pneus, madeireiras, hotéis, hospitais, algodoeiras, descontaminadoras de caminhão tanque e em industrias em geral. Na indústria alimentícia, a qualidade do vapor é de extrema importância, visto que pode influenciar diretamente no resultado do produto final. Os alimentos fornecidos pela indústria ao mercado devem ser seguros para consumo e não devem conter contaminantes que possam ameaçar a saúde humana. Com isso, o tratamento adequado da água de alimentação das caldeiras para geração do vapor, garante que a qualidade final do produto seja mantida, visto que a mesma deve estar livre de contaminantes que possam interferir no processo (MILL INDÚSTRIAS, 2019).

As caldeiras são equipamentos que operam, normalmente, sob altas pressões e, para que esse funcionamento seja executado de forma segura, há uma necessidade de controle constante e manutenções, visando a garantia da sua integridade estrutural. Com isso, a qualidade da água

utilizada no interior da caldeira é relevante, uma vez que esta entra em contato diretamente com os componentes metálicos. Nessa perspectiva, o trabalho tem como objetivo o estudo de caso do tratamento de água de uma caldeira do tipo flamotubular mista de uma indústria alimentícia de produtos derivados do leite, laticínio, localizada no munícipio de Colíder no estado de Mato Grosso. Dessa forma, foi possível avaliar as consequências resultantes do tratamento inadequado da água no equipamento e também no processo de produção da indústria.

1.1 OBJETIVOS

Geral: Avaliar o impacto de um tratamento de água inadequado no processo de otimização de funcionamento de uma caldeira e no processo de produção de um laticínio.

Específicos:

- Realizar a análise das caldeiras na condição atual sem um tratamento de água adequado;
- Fazer levantamento dos custos relacionados ao tratamento da água;
- Calcular os prejuízos diretos gerados pelo não tratamento da água para as caldeiras;
- Analisar os parâmetros químicos e físico-químicos durante as avaliações de qualidade;
- Propor alterações no processo de tratamento de água, visando à adequação da qualidade da água.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Caldeiras têm sido equipamentos de extrema importância no funcionamento de unidades industriais desde o passado até o presente. Apesar dos princípios de funcionamento por trás do uso de uma caldeira terem sido pouco alterados ao longo dos séculos, sua tecnologia de fabricação e utilização têm-se tornado avançado juntamente com o desenvolvimento de outros recursos industriais (BOTELHO e BIFANO, 2015).

2.1 CALDEIRAS

2.1.1 Definição

As caldeiras, também conhecidas como geradores de vapor, são equipamentos destinados a produzir e acumular vapor sob pressão superior à atmosférica, a partir de diversas fontes de energia, sendo projetados de acordo com a legislação vigente (GOVERNO DO BRASIL, 2020).

A energia térmica usada para produção de vapor, é obtida por meio da queima de combustíveis que podem ser sólidos, líquidos ou gasosos. Alguns combustíveis podem ser utilizados nas fornalhas para a queima como: lenha, cavacos de madeira, bagaço de cana; carvão; gás GLP; gás natural; óleo combustível e diesel. Há também a possibilidade de se utilizar eletricidade para aquecer a água da caldeira (BOTELHO e BIFANO, 2015; BIZZO, 2003).

2.1.2 Princípio de funcionamento

O componente principal de uma caldeira, conhecido como tambor de vapor, é um reservatório construído com chapas de aço e revestidos por camadas de lã de vidro para isolamento térmico do seu interior, proporcionando assim, um maior aproveitamento de energia. Para o seu funcionamento, utiliza-se uma fonte de energia com o propósito de aquecer os componentes metálicos da caldeira e, consequentemente, ocorrer uma troca térmica com a água, transformando-a em vapor (BOTELHO e BIFANO, 2015; INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO E GÁS, 2020).

2.1.3 Tipos de caldeiras

O processo produtivo no qual a caldeira será utilizada influencia no seu aspecto construtivo, como sua geometria; tipo; relação de gases e água na caldeira; pressão de trabalho; capacidade de produção de vapor; tipo de combustível e grau de automatização na sua operação (SENAI, 2001). A eficiência da capacidade produtiva de vapor da caldeira é o fator chave para determinar qual o melhor aspecto construtivo a ser adotado, ou seja, as configurações que proporcionem um melhor rendimento na troca térmica (BIZZO, 2003).

Como na grande maioria as unidades geradoras de vapor utilizam a queima de combustíveis, o seu rendimento está amplamente associado à localização dos gases e da água nos tubos onde ocorre a troca térmica, podendo ser do tipo Flamotubulares, Aquatubulares ou Mistas, os quais serão detalhados no item a seguir (BIZZO, 2003). Além desses tipos mais convencionais, há um outro tipo de caldeira, que são as caldeiras elétricas. Essas, por sua vez, são uma exceção em relação ao princípio de funcionamento, visto que são as únicas que não necessitam de queima de combustíveis para o seu funcionamento (BOTELHO e BIFANO, 2015).

As caldeiras também devem ser dotadas de válvulas de segurança contra excesso de pressão; instrumento que indique a pressão de vapor acumulada; injetor ou sistema de alimentação de água que evite superaquecimento; sistema dedicado de drenagem rápida de água, sistema automático de controle de nível de água e visor de nível (GOVERNO DO BRASIL, 2020).

2.1.3.1 Caldeiras Flamotubulares

As caldeiras Flamotubulares, também conhecidas de fogotubulares, são aquelas em que os gases quentes provenientes da combustão circulam no interior dos tubos que, estão submersos na água que será aquecida ou vaporizada. Esse tipo de caldeira pode possuir diversas passagens de gases nos tubos para melhor eficiência na troca térmica, como pode-se observar dois exemplos na Figura 3 (BOTELHO e BIFANO, 2015).

a) SAÍDA DE VAPOR Caldeira QUENTES DE Fornalha Chaminé

Figura 3 - Esquema de circulação dos gases em uma Caldeira Flamotubular. (a) 1 passagem. (b) 3 passagens.

Fonte: ((a) CAMPOS, 2011; (b) Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, 2020).

A água a ser vaporizada fica armazenada no tambor de vapor, que consiste em um corpo cilíndrico no qual, em seu interior, estão os tubos dispostos de maneira horizontal (Figura 4.a) ou vertical (Figura 4.b). Nas extremidades do tambor de vapor estão instalados os espelhos, que formam um feixe tubular com a função de conduzir o calor da chama para o interior do cilindro, fazendo com que os gases se movimentem nos tubos ocorrendo uma troca térmica, possibilitando o aquecimento e vaporização da água (BAZZO, 1995).



Fonte: Autoria própria.

As caldeiras flamotubulares, quando comparadas às aquatubulares, apresentam menores custos com manutenção por possuírem tamanhos mais reduzidos e, geralmente, necessitam de cuidados menos severos no tratamento da água por operarem em faixas de pressões mais baixas,

requerendo parâmetros de qualidade menos rígidos. São normalmente utilizadas para atender a faixa de produção de 500 a 5000 kg/h de vapor e médias pressões (0 – 21 kgf/cm²) e temperaturas (aproximadamente 213,5 °C) para o processo produtivo (BAZZO, 1995; BOTELHO e BIFANO, 2015).

No Brasil, de acordo com dados das três últimas décadas, mais de 90% das caldeiras utilizadas são do tipo flamotubulares. Porém, devido às suas limitações quanto à temperatura, à pressão de operação e à capacidade de produção de vapor, seu uso é voltado a instalações de pequeno e médio porte, como hospitais, hotéis, frigoríficos, laticínios, indústrias têxteis e indústrias em geral que necessitam de quantidades menores de vapor em seu processo produtivo (BAZZO, 1995; BOTELHO e BIFANO, 2015).

As caldeiras flamotubulares possuem como principais componentes a câmara de combustão (fornalha), o tambor de vapor (corpo da caldeira) que é onde ocorre a geração do vapor, os espelhos que são fixados nas extremidades do corpo da caldeira, a câmara de reversão frontal e traseira para que os gases retornem para a próxima passagem após percorrerem um ângulo de 180° na sua trajetória e a chaminé que é a tubulação destinada a promover a retirada dos gases quentes provenientes da combustão para a atmosfera (BAZZO, 1995). Caldeiras Aquatubulares

Caldeiras aquatubulares são aquelas nas quais a água circula no interior de um conjunto de tubos, os quais são aquecidos externamente pelos gases quentes provenientes da queima do combustível, ocorrendo, por conseguinte, uma troca térmica entre os tubos e a água, gerando vapor, como pode ser observado na Figura 5 (BAZZO, 1995).

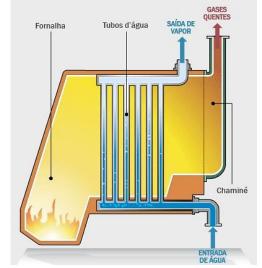


Figura 5 - Esquema de uma caldeira Aquatubular.

Fonte: (CAMPOS, 2011).

Este tipo de caldeira, como pode ser visto na Figura 6, surgiu com o propósito de suprir à demanda do processo industrial no qual as caldeiras flamotubulares não possuíam características técnicas para atender, sendo utilizadas, quando necessário no processo, a obtenção de pressões e rendimentos elevados. Assim, os tubos de fogo foram substituídos por tubos de água, o que aumenta a superfície de aquecimento. Portanto, caldeiras aquatubulares foram desenvolvidas com o objetivo de aumentar a capacidade produtiva de uma indústria, geralmente equipamentos de dimensões maiores que os outros tipos de caldeiras (KITTO e STULTZ, 2005).

Figura 6 - Caldeira aquatubular.

Fonte: Autoria própria.

As caldeiras aquatubulares são normalmente utilizadas para atender a projetos que operam com pressões elevadas, sendo estes valores entre 20 kgf/cm² e 400 kgf/cm², e com vazões elevadas (10 ton/h e 1800 ton/h), podendo o vapor ultrapassar 600 °C (INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO E GÁS, 2020). Uma caldeira aquatubular é composta principalmente por câmara de combustão (fornalha); tambor de vapor (corpo da caldeira); superaquecedor; economizador; aquecedor de gases; tubulação para saída de gases (chaminé); tubulação para alimentação de água e instrumentos de controle de pressão e nível. Nesta caldeira, a água deve passar continuamente ou circular através dos tubos para que o sistema gere vapor de maneira continua (KITTO e STULTZ, 2005).

Quando se trata de circulação, existem duas abordagens diferentes comumente utilizadas: circulação natural ou térmica e circulação forçada ou bombeada. A circulação natural pela tubulação ocorre devido à diferença de densidade entre a água e o vapor. O vapor mais leve sobe na forma de bolhas por meios dos tubos quentes, enquanto o vazio que é deixado é ocupado pelo líquido que desce pelas partes mais frias. Já na circulação forçada, a água é forçada a se movimentar na tubulação pela ação da própria bomba de alimentação de água da caldeira (BAZZO, 1995).

2.1.3.2 Caldeiras Mistas

Caldeiras mistas (Figura 7) possuem características similares tanto de caldeiras flamotubulares quanto de aquatubulares. O vapor começa a ser produzido já na fornalha que é revestida por tubos metálicos contendo água em seu interior, popularmente conhecidos por paredes d'água, que são aquecidos pelos gases do lado externo, sendo uma característica de caldeira aquatubular. O restante do processo, tem características de caldeiras flamotubulares, onde os gases vão passar no interior dos tubos aquecendo a tubulação, realizando uma troca térmica com a água. Este tipo de caldeiras é uma alternativa prática e eficiente para quando se tem disponibilidade de combustíveis sólidos a baixo custo (BIZZO, 2003).



Figura 7 - Caldeira Flamotubular mista.

Fonte: Autoria própria.

2.1.3.3 Caldeiras Elétricas

Caldeiras elétricas apresentam características de montagem diferente das anteriores. A finalidade dessas é a mesma que as caldeiras anteriormente descritas, ou seja, transformar água do estado líquido para o estado vapor. Entretanto, o seu princípio de funcionamento é baseado na conversão direta de energia elétrica em térmica, mediante a passagem de corrente elétrica em uma resistência imersa na própria água da caldeira, aquecendo, assim, a água até a transformar em vapor, como demonstrado na Figura 8 (BAZZO, 1995).

N.A.

Vapor

Agua em ebulição

Calor
elétrica

Caldeira

Figura 8 - Esquema de caldeira elétrica.

Fonte: (BOTELHO e BIFANO, 2015).

Dentre os outros tipos de geradores de vapor citados anteriormente, as caldeiras elétricas (Figura 9) surgiram para atender a uma demanda menor de produção. Por conta disso, elas possuem um tamanho reduzido, estando também atrelado a baixo custo de aquisição e instalação (BOTELHO e BIFANO, 2015).



Figura 9 - Caldeira elétrica.

Fonte: (BOTELHO e BIFANO, 2015)

Esse tipo de caldeira também apresenta como vantagens a não necessidade de estocar combustível, devido a sua fonte energética ser proveniente de cabos elétricos e, consequentemente, a ausência de poluição ambiental por não possuir produtos resultantes da combustão. Porém, apesar de possuir um rendimento elevado (de 95 a 99,5%), o alto custo da energia elétrica, associado à necessidade de uma grande quantidade de eletricidade, pode fazer com que se torne algo com uma certa desvantagem, do ponto de vista econômico, para a empresa (BOTELHO e BIFANO, 2015).

2.2 PROCESSO DE PRODUÇÃO DE VAPOR NA CALDEIRA

O calor liberado pela queima do combustível e gases provenientes da combustão é absorvido pela água contida no interior da caldeira, aumentando assim a sua temperatura. Ao atingir 100 °C e estando à pressão atmosférica, todo calor fornecido à água é utilizado para que ocorra sua mudança de estado físico, gerando assim o vapor em pressão e temperatura constantes. Esse calor, relacionado à mudança de estado físico, é chamado de calor latente (ALTAFINI, 2002).

À medida que o calor é fornecido à água, a pressão aumenta junto com a temperatura. Essa relação pressão versus temperatura é também avaliada por equações que relacionam pressão, volume e temperatura (PVT), nas quais é possível avaliar que pressão (P) é diretamente proporcional à temperatura (T). Assim, ao aumentar a pressão interna, a temperatura interna também aumentará. Como a caldeira é um equipamento que opera em um ambiente fechado, a energia térmica em seu interior é maior, visto que agora possui tanto o calor da água como o do vapor. Assim, a pressão no interior da caldeira ultrapassa a pressão atmosférica, fazendo com que ela atinja altas temperaturas (ALTAFINI, 2002).

A limitação da energia térmica no interior da caldeira está relacionada à pressão máxima de operação da caldeira, que consiste na máxima pressão que o equipamento suporta sem comprometer a sua integridade e a segurança operacional. Ao ultrapassar essa pressão, o pressostato envia um sinal para desligar o exaustor de tiragem, também chamado de ventilador mecânico, diminuindo assim a movimentação dos gases e, consequentemente, reduzindo a troca térmica (GOVERNO DO BRASIL, 2020).

Com a diminuição de temperatura, ocorre também uma diminuição da pressão, evitando assim uma sobrecarga do equipamento. Caso a pressão continue aumentando, a válvula de segurança, abre, aliviando a pressão no interior da caldeira, de maneira que não seja ultrapassada a pressão máxima de trabalho admissível (PMTA) que o equipamento pode operar com segurança (GOVERNO DO BRASIL, 2020).

2.3 GESTÃO DE SEGURANÇA E INTEGRIDADE DA CALDEIRA

A Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos (ASME) foi fundada em 1880 com a necessidade de garantir a segurança dos equipamentos utilizados na fabricação e construção, principalmente equipamentos que trabalham sob pressão. O código ASME é responsável por desenvolver padrões de engenharia em diversas áreas técnicas, sendo atualmente o código mais reconhecido em diversos países (ASME, 2015).

Para garantir a integridade e segurança operacional, os geradores de vapor são projetados conforme os requisitos de códigos construtivos nacionais e internacionais. Esses códigos de projeto são um conjunto de normas e regras que tem o objetivo de estabelecer os requisitos para o projeto, construção, montagem, controle de qualidade da fabricação e inspeção de equipamentos (GOVERNO DO BRASIL, 2020).

2.3.1 Norma Regulamentadora nº 13

No Brasil, o Ministério da Economia possui área de competência em diversos assuntos, estando entre eles a segurança e saúde no trabalho. Este ministério possui a Secretária do Trabalho (STRAB) que, por meio da Subsecretaria de Inspeção do Trabalho (SIT), é o órgão de âmbito nacional competente em matéria de segurança e saúde no trabalho. A SIT é responsável pela gestão de 37 normas regulamentadoras (NR), estando entre elas a Norma Regulamentadora de Segurança do Trabalho nº 13 (NR-13) - Caldeiras, vasos de pressão, tubulações e tanques metálicos de armazenamento, possuindo sua última modificação pela Portaria Secretaria Especial de Previdência e Trabalho do Ministério da Economia (SEPRT) 915 em 30 de julho de 2019 (GOVERNO DO BRASIL, 2020; GOVERNO DO BRASIL, 2021).

A NR-13 estabelece os requisitos mínimos necessários para gestão da integridade estrutural de caldeiras a vapor, nos aspectos relacionados à instalação, à inspeção, à operação e à manutenção. Entende-se por integridade estrutural o conjunto de propriedades e características necessárias para que o equipamento desempenhe com segurança as funções para as quais foi projetado (GOVERNO DO BRASIL, 2020).

Conforme item 13.3.1 da NR-13, o equipamento é considerado em estado de Risco Grave e Iminente (RGI) quando ocorre o não cumprimento de qualquer item previsto nesta norma que possa causar acidentes ou doenças relacionadas ao trabalho, principalmente:

- Atraso na inspeção periódica da caldeira, sendo que inspeção periódica é a executada durante a vida útil do equipamento, conforme critérios e periodicidade determina pelo profissional habilitado (PH).
- Operação do equipamento com deterioração atestada por meio da inspeção de segurança.

Todos os reparos ou alterações realizadas no equipamento devem respeitar os respectivos códigos de projeto e pós construção e as prescrições do fabricante no que se refere a material, procedimento de execução, procedimento de controle de qualidade e qualificação e certificação de pessoal (GOVERNO DO BRASIL, 2020).

Conforme item 13.4.4 da NR-13, as caldeiras devem ser submetidas a inspeções de segurança inicial, periódica e extraordinária. A inspeção periódica é constituída por exames internos e externos, devendo ser executadas no prazo máximo de 12 meses para caldeiras de categoria A e B. Ao completar 25 anos de uso, a caldeira deve ser submetida a uma avaliação de integridade com maior abrangência para determinar sua vida restante e novos prazos de inspeção, caso ainda esteja em condição de uso (GOVERNO DO BRASIL, 2020).

Toda caldeira deve possuir, em seu local de instalação, todos os seus documentos e estes devem ser mantidos durante toda vida útil do equipamento e disponíveis para consulta sempre que necessário. Estes documentos são: prontuário da caldeira, registro de segurança, projeto de instalação, projeto de alteração ou reparo, relatório de inspeção de segurança e certificados de calibração dos dispositivos de segurança (GOVERNO DO BRASIL, 2020).

2.4 ÁGUA E SUAS IMPUREZAS

A água é de extrema importância para a geração de vapor, uma vez que o vapor é a água que passou por uma mudança de estado físico, do líquido para o gasoso. Como a água é utilizada no interior da caldeira e está diretamente em contato com seus componentes metálicos, a sua qualidade é muito relevante para a produção de vapor. O acúmulo de impurezas pode promover uma diminuição na eficiência da troca térmica, além de acarretar uma série de problemas na segurança operacional, na integridade e nas linhas de distribuição de vapor (SENAI, 2001).

A água para alimentação de caldeiras geralmente provém de fontes naturais, podendo ser subterrânea ou de superfície. A água subterrânea é obtida por meio de poços e poços artesianos, sendo normalmente uma água de boa qualidade, que possui uma grande quantidade de minerais dissolvidos. Já a água de superfície é aquela que vem de rios e lagos, sendo que sua qualidade varia conforme a época do ano, podendo apresentar variações em relação à turbidez e à quantidade de sólidos suspensos (ZARPELON e AZZOLINI, 2015). A água, como é encontrada na natureza ou fornecida nas redes urbanas, ainda que potável, pode possuir sólidos e gases dissolvidos, os quais a torna inadequada para a alimentação direta de caldeiras. Com isso, para uma operação segura e eficiente das caldeiras, se faz necessário realizar um tratamento prévio desta água (BOTELHO e BIFANO, 2015).

Para aumento da vida útil e garantia de segurança operacional, o tratamento químico da água é indispensável. Assim, toda caldeira dispões de dispositivos de drenagem para eliminação de sulfatos, carbonatos, silicatos, lodo e sólidos em suspensão (BAZZO, 1995). Em caldeiras, entende-se por vida útil o tempo entre a data em que o equipamento foi fabricado e a data em que tenha sido considerado inadequado para utilização (GOVERNO DO BRASIL, 2020).

2.4.1 Água para caldeira - padrão de qualidade

A natureza e a quantidade de impurezas presentes na água de alimentação que pode ser suportada pela caldeira, dependem do projeto, da pressão operacional, do tipo de tratamento interno da água e dos requisitos de qualidade do vapor que será exigido pela caldeira, de acordo com o processo a utilizar (KITTO e STULTZ, 2005).

Conforme 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. De acordo com os critérios estabelecidos pelo ASME (2015), ao decidir o tipo de tratamento que se deve utilizar na água, os fatores que devem ser considerados são:

- Tipo de caldeira: ferro fundido ou aço, vapor ou água quente;
- Natureza da água bruta: dura ou mole, corrosiva ou formadora de incrustações;
- Tratamento preliminar da água: amaciadores, pré-aquecedores, desaeradores;
- Quantidade de água de reposição e descarga necessária;
- Uso do vapor;
- Quantidade de testes de supervisão e controle disponíveis.

De acordo com o ASME (2015), os parâmetros necessários para garantir a qualidade do vapor da caldeira e uma vida útil maior do equipamento, variam conforme o tipo e pressão de operação da caldeira. No Brasil, caldeiras Flamotubulares são as mais utilizadas. Existem alguns parâmetros definidos pelo código ASME que devem ser seguidos para um funcionamento seguro e eficiente da caldeira, como disposto na Tabela 1.

Tabela 1 - 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).

2.4.2 Consequências das impurezas da água

A qualidade da água de alimentação da caldeira é de extrema importância para um bom funcionamento e um longo tempo de vida útil do equipamento. Com isso, para uma geração de vapor segura e eficiente, deve-se realizar no mínimo uma vez no mês uma análise química da água de alimentação e da água presente no interior da caldeira e, se necessário, realizar seu tratamento a fim de coincidir suas propriedades físico-químicas com os parâmetros determinados pelo código ASME (BOTELHO e BIFANO, 2015).

A água pode possuir impurezas, como matéria orgânica, compostos minerais em suspensão ou compostos dissolvidos. Quando o tratamento desta água é ausente ou inadequado, pode resultar em diversos problemas no equipamento e na eficiência da geração de vapor, sendo os principais: corrosão, incrustação e arraste (TROVATI, 2004).

2.4.2.1 Corrosão

Corrosão é a deterioração de materiais, geralmente metálicos, que ocorre devido à ação química ou eletroquímica dos agentes contaminantes presentes na água. Sendo um desgaste progressivo, reduz a espessura dos tubos, podendo ocasionar sua ruptura, além de alterar questões de projeto, como vazão, já que interfere diretamente na característica de rugosidade/perda de carga do escoamento (OLIVEIRA, 2014).

A água sem tratamento prévio contém impurezas, como gás dissolvido, oxigênio e dióxido de carbono. Quando a água é de baixa dureza, essa se torna ácida e corrosiva, atacando as linhas de retorno de metal e condensado do sistema da caldeira. Isso pode causar corrosão geral ou localizada ou rachaduras no metal (ASME, 2015).

A corrosão nas caldeiras pode ocorrer tanto de forma interna quanto externa. A corrosão interna ocorre na parte em contato com a água, sendo consequência direta de suas características, suas impurezas e seu comportamento em contato com o material metálico, em diferentes temperaturas, como apresentado na Figura 10. Por outro lado, a corrosão externa ocorre na parede em contato com os gases de combustão, sendo dependentes do tipo de combustível utilizado na caldeira e de sua temperatura (SENAI, 2001).



Figura 10 - Corrosão interna na tubulação.

Fonte: (TROVATI, 2004)

2.4.2.2 Incrustação

Incrustação é o conjunto de cristais que se depositam no interior das tubulações, devido a compostos presentes na água que, quando não removidos, causam diminuição na taxa de transferência de calor destes locais porque a camada de incrustação formada atua como uma espécie de isolante térmico (OLIVEIRA, 2014).

Além de atuar como um isolante térmico, a incrustação pode afetar a resistência mecânica dos componentes metálicos, visto que o metal aumentará sua temperatura proporcionalmente ao calor que está recebendo, ficando fora do seu limite de resistência. Além disso, devido à porosidade da camada incrustante, pode haver migração de agentes corrosivos para sua interface com o metal, formando assim zonas favoráveis para a corrosão (ALTAFINI, 2002).

As incrustações na tubulação podem ser formadas, principalmente, pela presença de carbonato de cálcio na água, sulfato de cálcio, silicato de magnésio, silicatos complexos contendo ferro e óxidos de ferro não protetores. Com isso, as incrustações podem ser evitadas através do uso de produtos precipitantes, dispersantes e, pelo controle da concentração de sílica e sólidos dissolvidos (SENAI, 2001). A Figura 11 demonstra a incrustação de parte interna da tubulação de uma caldeira.



Figura 11 - Incrustação na parte interna da tubulação.

Fonte: Autoria própria.

2.4.2.3 Arraste

Arraste é o fenômeno caracterizado pelo transporte de água da caldeira na fase líquida acompanhado de suas impurezas, sólidos em suspensão e material orgânico, junto com o vapor para o sistema de distribuição de vapor (OLIVEIRA, 2014). Este fenômeno interfere na pureza do vapor podendo influenciar na qualidade do processo de fabricação da indústria. Além disso, o arraste pode gerar o golpe de aríete nas tubulações, que é causado pela água quando empurrada pelo vapor em alta velocidade, fazendo movimentos similares a marteladas no interior da tubulação, o que pode comprometer a integridade e segurança operacional. Assim, realizar a medição dos sólidos presentes no vapor é um método eficiente para a detecção de arrastes e quantificação intensidade (TROVATI, 2004; CENTRAIS ELÉTRICAS de sua BRASILEIRAS, 2005).

O arraste pode ocorrer por razões química e/ou mecânica. O arraste químico pode ser causado devido ao excesso de sólidos suspensos, excesso de sólidos dissolvidos, excesso de alcalinidade hidróxido e pela presença de contaminantes orgânicos. O arraste mecânico pode ser causado pela operação em nível elevado, falha de projeto da caldeira, danos no separador de vapor e pela demanda de vapor superior a produção nominal do sistema (TROVATI, 2004).

O arraste químico pode ser evitado por meio do tratamento da água, mantendo o pH, alcalinidade hidróxido, sólidos suspensos e sólidos totais dissolvidos de acordo com os parâmetros definidos por normas, enquanto o arraste mecânico pode ser evitado por meio de inspeções periódicas, operando a caldeira no nível especificado pelo fabricante, equilibrando a produção e demanda de vapor e, realizando os reparos necessários (TROVATI, 2004).

3 METODOLOGIA

A caldeira escolhida para o estudo pertence a um laticínio localizado no munícipio de Colíder no estado de Mato Grosso (MT), sendo utilizada apenas uma vez na semana, enquanto a outra caldeira existente na indústria para sua operação para limpeza e manutenção. Sua operação é realizada geralmente aos domingos na faixa de horário das 04:00 horas até as 16:00 horas sem intervalo. Os dados da caldeira estudada estão demonstrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Dados da caldeira em estudo.

Fabricante	ATA	
Data de fabricação	Não identificado	
Tipo	Flamotubular mista	
Fluido de trabalho	Vapor saturado	
Volume total interno	6800 litros	
Produção de vapor	3000 kgv/hora	
Superfície de aquecimento	100 m²	
Categoria da caldeira	В	
Combustível	Lenha	
Pressão de operação	7,0 kgf/cm ²	
Pressão máxima de trabalho admissível (PMTA)	7,5 kgf/cm ²	

Fonte: Autoria própria.

O equipamento está instalado na casa de caldeiras, que é um local especifico para sua utilização, conforme evidenciado na Figura 12. Há de se considerar que a norma que regula a instalação de caldeiras é a NR-13, entretanto, há outros padrões amplamente utilizados pelas indústrias para a correta adequação de caldeiras.

Figura 12 - Vista geral da caldeira em estudo.



Fonte: Autoria própria.

Há de se considerar que a norma que regula a instalação de caldeiras é a NR-13, entretanto, há outros padrões amplamente utilizados pelas indústrias para a correta adequação de caldeiras Figura 13a, a parede da fornalha é composta por tubos nos quais em seu interior passa a água, sendo esta característica de aquatubular. Ainda na fornalha está instalado o tubulão, conforme a Figura 13b, no qual os gases provenientes da combustão entram nesse tubo de diâmetro maior e seguem para os tubos de diâmetro menor que estão submersos na água presente no interior do casco da caldeira, caracterizando-se como do tipo flamotubular mista.

Figura 13 - Vista interna (a) da fornalha e tubulão e (b) detalhe do tubulão



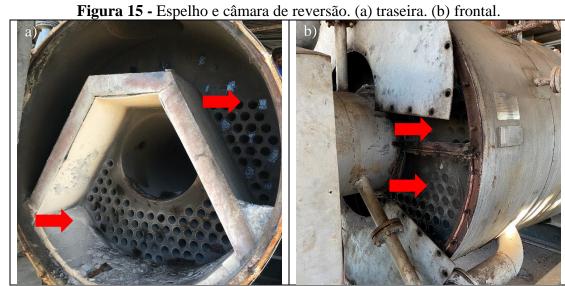
Fonte: Autoria própria.

A caldeira possui 3 passagens de gases, sendo a primeira passagem da fornalha pelo tubulão, conforme Figura 14, até a câmara de reversão traseira, Figura 15a. A segunda passagem ocorre com os gases que saem do tubulão e batem na tampa traseira, retornando pelos feixes tubulares até a câmara de reversão frontal, Figura 15b. A terceira e última passagem ocorre no trajeto dos tubos da câmara de reversão frontal até a chaminé, Figura 16.

Figura 14 - Vista interna da fornalha – caldeira em operação.



Fonte: Autoria própria.



Fonte: Autoria própria.

Figura 16 - Dutos de exaustão e chaminé.



Fonte: Autoria própria.

• ÁGUA DA CALDEIRA:

A água de alimentação da caldeira é proveniente de um poço artesiano, que possui em sua tubulação de saída uma barrilha de carbonato de sódio. Esta tem a finalidade de elevar o pH para auxiliar na etapa do tratamento da água da caldeira. Um técnico coleta mensalmente uma amostra de água da garrafa de nível da caldeira, componente responsável pelo controle automatizado do nível de água no interior da caldeira, equipamento mostrado na Figura 17a, que possui em seu interior eletrodos para controle de nível, visto na Figura 17b.



Figura 17 - Instrumentos para controle de nível da água. (a) garrafa de nível. (b) eletrodos.

Fonte: Autoria própria.

A amostra coletada é encaminhada à um laboratório especializado, onde é realizada sua análise química. Os parâmetros que são analisados na água são pH, alcalinidade hidróxido, alcalinidade total, dureza total, ferro total, sólidos totais dissolvidos, sílica solúvel 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.

A metodologia de análise do laboratório contratado pela indústria é baseada na bibliografia Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 21^a Edition.

Para o estudo de caso da caldeira, foi realizado um acompanhamento durante 03 meses consecutivos, sendo estudados três laudos de análise de água da caldeira, sendo:

- Relatório 1: Amostra coletada em 08/12/2020 e analisada em 21/12/2020.
- Relatório 2: Amostra coletada em 14/01/2021 e analisada em 01/02/2021.
- Relatório 3: Amostra coletada em 22/02/2021 e analisada em 04/03/2021.

Com base no tratamento da água realizado na caldeira, foi feito um comparativo entre 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.

4 RESULTADO E DISCUSSÃO

O tratamento de água do interior de uma caldeira é essencial para a preservação da integridade, aumentando assim sua vida útil, além de garantir um padrão de qualidade no processo industrial, visto que o vapor necessita ser puro para utilização na indústria de alimentos. Assim, é necessário realizar análises e tratamentos químicos na água para que suas propriedades coincidam com os parâmetros técnicos determinados.

O primeiro ponto de evidência sobre a importância do tratamento de água se deu pela análise do histórico de manutenção da caldeira, onde foi comprovado que há alguns anos sua integridade estrutural foi comprometida. Com isso, para garantir uma operação segura do equipamento, foi necessário a realização de um reparo e substituição da chapa da região inferior de seu casco, onde havia sido constatada diminuição significativa da espessura da chapa metálica. Essa alteração na estrutura foi causada por corrosão, devido a um tratamento inadequado da água. Desse modo, a caldeira não poderia operar com a mesma pressão para a qual foi projetada previamente.

Durante a visita técnica para coleta de dados, foram observados diversos reparos realizados na estrutura da caldeira. Esses reparos foram consequência de recomendações técnicas de inspeções anteriores, as quais orientavam a redução da pressão de operação da caldeira para que fosse mantida a segurança operacional. Com a redução da pressão de operação, por medidas de segurança, o processo de produção da indústria poderia ser afetado, já que a quantidade de vapor gerado seria menor. Nesse sentido, foram realizadas a substituição de algumas chapas com espessura comprometida, de maneira que fosse mantida a pressão operacional da caldeira e, assim, mantida a produção do projeto original. A Figura 18a evidencia um reparo na região inferior do casco, podendo ser verificado uma chapa de maior espessura. Já a Figura 18b evidencia a substituição de região da chapa metálica do domo, no qual houve redução da espessura, causado pelo fato do vapor conter impurezas, evidenciando, assim, que estas, quando presentes no vapor, também podem comprometer a integridade dos equipamentos.

Figura 18 - Reparos: (a) na região inferior do casco; (b) na chapa metálica do domo.





Fonte: Autoria própria.

Com base nos relatórios fornecidos pelo laboratório especializado, obteve-se os resultados das análises das três amostras de água coletadas na garrafa de nível da caldeira, em um intervalo de trinta dias. Na Tabela 3 são apresentados os resultados obtidos nos três relatórios.

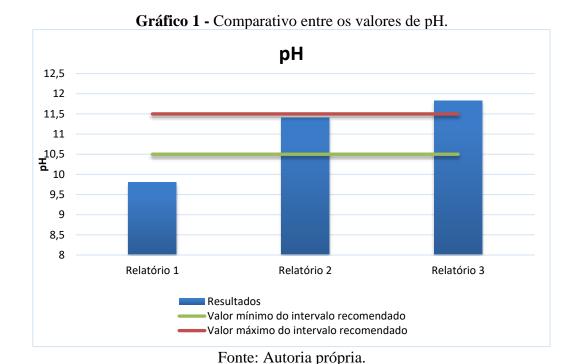
De acordo com o primeiro relatório e com base nos valores de referência adotados pelo laboratório, nota-se que a água está inadequada para utilização, por apresentar diversas alterações em seus resultados. O pH e a alcalinidade hidróxido estão em valores menores que o intervalo recomendado, enquanto alcalinidade total, sólidos totais dissolvidos e sulfitos estão acima dos valores permitidos. Os parâmetros da água no relatório 2 apresentam valores dentro da faixa de valores máximos permitidos, apresentando como exceção apenas uma alteração no valor dos sulfitos presentes na água, que está abaixo do intervalo recomendado. No terceiro relatório é possível observar que o pH, alcalinidade hidróxido e alcalinidade total estão acima do recomendado e, que os sulfitos continuam com valores abaixo do intervalo permitido.

Tabela 3 - Resultados analíticos Relatório 1.

Parâmetros	Valores de referência	Relatório 1	Relatório 2	Relatório 3
pН	10,5 – 11,5	9,80	11,41	11,83
Alcalinidade Hidróxido (mg/L)	200 – 400	0,0	250,0	550,0
Alcalinidade total (mg/L)	700	1400,0	420,0	850,0
Dureza total (mg/L)	180	0,0	0,00	0,00
Ferro total (mg/L)	3	2,39	0,86	1,98
Sólidos totais dissolvidos (mg/L)	3000	5710,0	909,0	2490,0
Sílica solúvel (mg/L)	180	80,9	79,4	151,7
Sulfitos (mg/L)	30 - 60	986,0	5,0	6,0

Fonte: Autoria própria.

A água ao sair do poço artesiano possui um pH de aproximadamente 5,5 e em seguida passa por uma barrilha, que aumenta seu valor para 6,5 a 7,5. Porém essa faixa ainda é inadequada para sua utilização na caldeira. No Gráfico 1, pode-se observar a diferença entre os valores de pH nos três relatórios. O pH recomendado para a água das caldeiras é alcalino, pois se este for ácido pode causar corrosão na tubulação. Para controlar o pH, utiliza-se um alcalinizante, geralmente soda cáustica. Com isso, além de aumentar o valor do pH, aumenta-se a alcalinidade hidróxido da água.



No Gráfico 2, pode-se observar os valores de alcalinidade hidróxido no decorrer dos três relatórios. Valores muito elevados de alcalinidade hidróxido também podem causar corrosão, sendo esta por ataque cáustico. Assim, percebe-se que estão utilizando dosagens inadequadas do produto, visto que no primeiro relatório tanto o pH quanto a alcalinidade hidróxido estavam baixas, apresentando assim dosagem baixa de produto na água. Enquanto no último relatório, percebe-se que ambos estão elevados, o que pode ter sido causado por excesso de produto no tratamento.

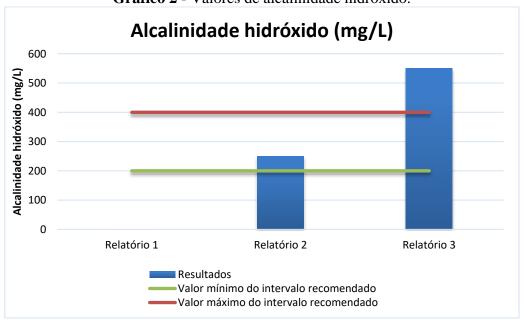


Gráfico 2 - Valores de alcalinidade hidróxido.

Fonte: Autoria própria.

Como o gerador de vapor e suas tubulações estão em contato direto com a água e a corrosão é a deterioração dos materiais metálicos por conta dos contaminantes presentes nesta, é necessário remover o oxigênio presente na água da caldeira. Para isso é adicionado à água um sequestrante de O2, sendo normalmente utilizado o sulfito de sódio. O sulfito, ao reagir com o oxigênio, forma sulfatos, aumentando assim a quantidade de sólidos dissolvidos na água. Essa reação aumenta sua velocidade conforme ocorre um aumento da temperatura. Dessa forma, é necessário ter cuidado com a dosagem de sulfito utilizado no tratamento. Se a dosagem for baixa, o sulfito pode não ter tempo de eliminar todo o oxigênio presente na água. Já em quantidades elevadas, além da formação de muito sólidos dissolvidos, o sulfito pode sofrer decomposição formando sulfeto de hidrogênio (H2S), que é um composto químico altamente corrosivo. Ao utilizar o sequestrante de O2, é necessário equilibrar a dosagem de maneira que elimine o oxigênio da água e ainda proporcione um residual de sulfito na água. No Gráfico 3 pode-se observar a comparação entre os valores de sulfitos presentes na água nos três relatórios.

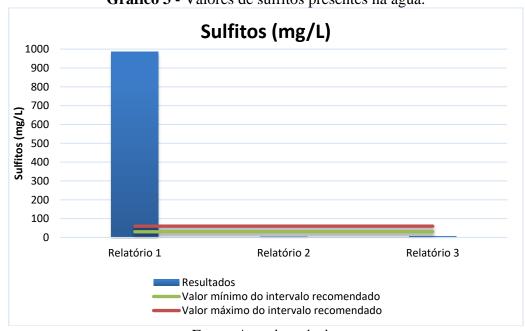


Gráfico 3 - Valores de sulfitos presentes na água.

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 19, podemos notar diversos pontos de corrosão na parede interna do casco da caldeira, comprovando que a água está em condições que proporcionam a corrosão.



Figura 19 - Corrosão no interior do casco da caldeira.

Fonte: Autoria própria.

Para facilitar a remoção dos sólidos suspensos, 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. No Gráfico 4 pode-se observar os valores de sólidos totais dissolvidos na água. Pela quantidade de sólidos que consta no primeiro relatório,

pode-se notar que a descarga está sendo feita em quantidades inadequadas durante o funcionamento, ou até mesmo de maneira incorreta. 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.

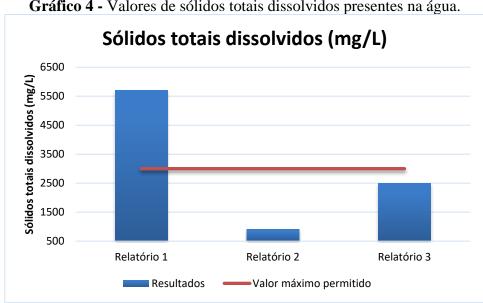


Gráfico 4 - Valores de sólidos totais dissolvidos presentes na água.

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 20, podemos notar que boa parte da tubulação do interior da caldeira está com incrustações na superfície, as quais estão diminuindo a eficiência da caldeira, visto que a troca térmica será menor devido a camada grossa de incrustação, isolando o fluxo de calor.



Figura 20 - Incrustação na tubulação. (a) vista interna. (b) vista superior da boca de visita.

Fonte: Autoria própria.

Outro ponto importante é que os parâmetros adotados pelo laboratório não são compatíveis com os exigidos pelo código ASME, deixando assim passar alguns parâmetros em quantidades incorretas. Ao realizar a comparação dos resultados com os valores estabelecidos pelo ASME, pode-se observar que as amostras de água coletadas para análise mostraram nos três relatórios valores elevados de ferro total. No Gráfico 5 pode-se observar os valores de ferro analisados pelo laboratório comparado ao valor máximo permitido adotado por este. Enquanto no Gráfico 6, pode-se observar que com base no código ASME, esses valores não atendem os padrões recomendados.



Gráfico 5 - Valores de ferro total com base nos relatórios.

Fonte: Autoria própria.

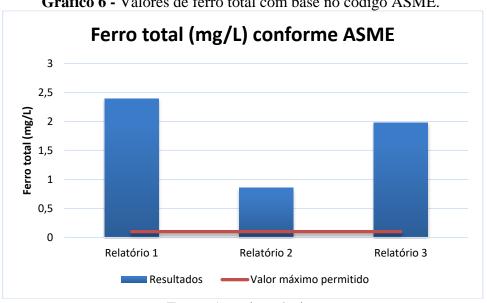


Gráfico 6 - Valores de ferro total com base no código ASME.

Fonte: Autoria própria.

A constatação desses valores elevados de ferro total pode ser consequência de oxidação do gerador de vapor e suas tubulações, que podem estar ocorrendo devido a presença de oxigênio na água. O fato de estar ocorrendo a corrosão prova que o tratamento da água está inadequado e que o equipamento está sofrendo danos que podem prejudicar o seu funcionamento a longo prazo.

Recentemente na indústria, durante um procedimento padrão no processo de fabricação de ricota, no qual o alimento entra em contato diretamente com o vapor, houve uma contaminação do produto após a abertura da válvula para liberar o vapor no alimento, sendo esta consequência do arraste de impurezas da caldeira da indústria para a linha de distribuição do vapor. Sendo assim, a equipe de manutenção da empresa decidiu parar a operação da caldeira e realizar uma inspeção visual no interior do gerador de vapor, com a finalidade de descobrir a causa do problema. Foi evidenciado excesso de impurezas depositadas no fundo da caldeira, sendo necessário realizar uma limpeza minuciosa no interior do equipamento e tubulações. Pode-se observar na Figura 21 as impurezas depositadas no piso após limpeza do equipamento.



Figura 21 - Impurezas depositadas no piso após limpeza do gerador de vapor.

Fonte: Autoria própria.

A causa do problema recente pode ter passado despercebido pelo laboratório especializado, devido ao fato da coleta da amostra de água para análise estar sendo realizada somente na garrafa de nível do gerador de vapor. Para melhores resultados, o correto é que sejam coletadas mais amostras, de preferência da água de descarga do fundo do casco (Figura 22a) e do fundo da fornalha (Figura 22b), visto que na parte inferior do equipamento a maior parte das impurezas estão decantadas.



Figura 22 - Descarga de fundo. (a) casco da caldeira. (b) fornalha.

Fonte: Autoria própria.

A água da descarga de fundo do casco e da fornalha é direcionada para uma caixa na parte externa da casa da caldeira, onde poderia estar sendo realizada esta coleta. Na Figura 23 pode-se observar a caixa de armazenamento da água.



Figura 23 - Local de descarte da descarga de fundo.

Fonte: Autoria própria.

Outra possível causa do problema ocorrido recentemente é a conservação incorreta da caldeira durante os dias em que esta não está em operação. Durante períodos não operacionais, a proteção da caldeira e dos sistemas auxiliares contra a corrosão é essencial por duas razões principais: o ataque da corrosão durante a parada pode causar perda direta de metal, e adicionalmente, os óxidos produzidos formam depósitos e podem causar ataque localizado e superaquecimento do metal dos tubos.

4.1 ANÁLISE FINANCEIRA

Quando o tratamento da água não é realizado ou é inadequado, a indústria fica sujeita a alguns custos adicionais com manutenção do equipamento, multas relacionadas à condição do equipamento ou acidentes e, consequentemente, o surgimento de custos adicionais com fábrica em intervalo inoperacional, que correspondem ao período sem produção em andamento.

Em média, o custo que a indústria tem com o tratamento da água da caldeira em estudo é de R\$ 3.500,00 por mês. 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.

• Manutenção do equipamento

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 de produção durante o período em que a manutenção do equipamento será realizada.

O laticínio trabalha com uma alimentação de 80.000 litros de leite por dia, sendo que, com essa quantidade de leite, é possível produzir 2.000 peças de queijo. Cada uma dessas peças pesa aproximadamente 4,2 kg. O laticínio cobra para a venda R\$ 21,00 por kg de queijo.

2000 peças de queijo
$$\times \frac{4,2 \ kg}{peça \ de \ queijo} = 8.400 \ kg \ de \ queijo$$

$$8.400 \ kg \ de \ queijo \times \frac{R\$\ 21,00}{kg \ de \ queijo} = R\$\ 176.400,00$$

Assim, caso seja necessário parar a caldeira para manutenção, mesmo que, supostamente, por um dia, a empresa terá um prejuízo de aproximadamente R\$ 176.400,00. Este valor é levando em consideração apenas um dos processos da indústria, que é o de produção de queijo em barra. Sem contar que atrasos no fornecimento do material para os distribuidores pode gerar outros problemas relacionados ao setor comercial. Além disso, a caldeira não movimenta apenas um setor da fábrica, mas a fábrica inteira, o que geraria outros custos não contabilizados nessa análise.

Ademais, com a ausência de tratamento a longo prazo, a caldeira pode se deteriorar ao ponto de necessitar de um projeto de alteração ou reparo (PAR). Considerando que para realização do PAR junto com a inspeção extraordinária, o equipamento irá necessitar ficar fora de funcionamento por aproximadamente 10 dias. Levando em consideração o custo com o PAR que é de aproximadamente R\$ 80.000,00 e o período que terá que ficar inativada, a empresa terá um custo adicional de:

$$\frac{R\$\ 176.400,00}{dia}\times 10\ dias = R\$\ 1.764.000,00$$

$$R\$\ 1.764.000,00\ (produção) + R\$\ 80.000,00\ (PAR) = R\$\ 1.844.000,00$$

Considerando que para chegar ao ponto de o equipamento estar deteriorado e necessitar do PAR leve um período de aproximadamente 5 anos e, como o tratamento mensal da água custa R\$ 3.500,00, se tivesse sendo realizado um tratamento adequado da água durante esse período, a indústria teria gasto:

$$\frac{R\$ \ 3.500,00}{m\$s} x \ 12 \ meses = R\$ \ 42.000,00$$
$$\frac{R\$ \ 42.000,00}{ano} x \ 5 \ anos = R\$ \ 210.000,00$$

No Gráfico 7 é possível notar o quanto o custo com tratamento de água mensalmente é mais viável do que ter que realizar uma manutenção não planejada.



Gráfico 7 - Comparativo entre despesas com tratamento de água e prejuízo com manutenção.

Fonte: Autoria própria.

Com o prejuízo que a empresa terá com PAR, inspeção extraordinária e período em que a fábrica ficará parada, seria possível pagar o tratamento da água por:

$$\frac{R\$\ 1.844.000,00\ preju\'izo}{R\$\ 3.500,00\ tratamento\ mensal}\cong 526\ meses\ de\ tratamento}$$

$$\frac{1\ ano}{12\ meses}x\ 526\ meses\cong 43,91\ anos$$

Multas

Outro ponto importante, é que de acordo com a NR-13 se for atestado que o equipamento não está em condições de operar, ou seja, se encontre em risco grave e iminente (RGI) a empresa está sujeita a penalidades. Segundo a NR-28, os valores das multas resultantes da situação em que o equipamento se encontra, estão demonstradas na Tabela 4.

Tabela 4 - 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).

Uma outra informação relevante é que nos cálculos para obter esses valores foi considerado apenas a parte documental do equipamento. Ou seja, multas geradas devido à ausência dos documentos necessários para a devida operação do equipamento.

Em casos mais graves, caso o equipamento entre em colapso, a empresa poderá observar um prejuízo de patrimônio, e assim terá o gasto adicional para a aquisição de um novo equipamento. Além de que, com a perda do equipamento, a indústria estará sujeira também a uma parada de produção, visto que necessita do vapor para seus processos.

Também, em caso de acidentes, há pontuações a serem feitas. Caso não ocorra o óbito de funcionários, a empresa terá de arcar com as despesas médicas, além de indenizações. Porém, caso o funcionário venha a óbito, além das despesas médicas e indenizações para a família da vítima, a empresa terá o prejuízo de vidas, sendo uma variável impossível de ser dimensionada. Outro ponto, é que a reputação da empresa poderá ficar prejudicada e, consequentemente, diminuindo seus contratos e vendas, podendo levar esta a falência.

Processo produtivo

Além dos custos com manutenção e multas, como visto anteriormente, pode ocorrer contaminações durante os processos produtivos da indústria. Em casos menos graves, a contaminação poderá ser notada e, como consequência terá apenas gastos com novas matérias primas e mão de obra, energia e uma nova parada de fábrica para manutenção para corrigir o problema. Em alguns casos, apenas a limpeza já resolve o problema, em outros é necessário realizar a troca de tubulações.

Em casos mais graves, quando houver contaminação de lotes de produtos e estes serem comercializado, poderá ocorrer contaminações em massa da população. Visto que é uma

empresa alimentícia e, que seus produtos serão consumidos, dependendo do grau de contaminação, várias pessoas podem ficar doentes ou até mesmo virem a óbito. Além disso terão os custos com indenizações, e a indústria ficará com sua reputação prejudicada, podendo até ser interditada.

4.2 RECOMENDAÇÕES

É recomendável que seja realizada uma análise da água de alimentação da caldeira, tomando por base o código ASME. Esse procedimento indica que seja feito um pré-tratamento na água presente, de modo que essa chegue ao interior da caldeira em condições físicas e químicas mais adequadas. Além disso, recomenda-se coletar amostras de água dos níveis superior, inferior e de retorno de condensado da caldeira, para que se faça a análise físico-química, ao menos uma vez ao mês e, dessa maneira, realizar os ajustes nas dosagens dos produtos químicos utilizados no tratamento da água do interior da caldeira.

Para reduzir a ocorrência de corrosão, incrustação e arraste na caldeira, aconselha-se complementar um desaerador ao processo de geração de vapor. Este equipamento auxilia na remoção do oxigênio presente na água, diminuindo, assim, a chance de ocorrer corrosão na caldeira. Além disso, devem-se promover descargas de fundo de forma periódica, preferencialmente a cada hora, tendo cada descarga duração de 8 segundos.

Por fim, para conservar a caldeira durante o período que não está em operação, é necessário encher a caldeira e sistemas auxiliares com água tratada aquecida e adicionar inibidores de corrosão. Para assegurar a efetividade dessas precauções, deve-se verificar as concentrações semanalmente, completando com os produtos adequados, quando necessário. O enchimento da caldeira deverá ser total. A aplicação de medidas de controle de corrosão efetiva na partida e nas paradas da unidade, combinada com o controle contínuo durante a operação, gera uma manutenção preventiva eficiente, protegendo o investimento e estendendo a vida útil do equipamento.

5 CONCLUSÃO

De acordo com os resultados observados, foi identificado que o problema na qualidade da água não é relacionado diretamente aos produtos utilizados no tratamento, mas sim no controle da dosagem de cada componente. Foi observado que a caldeira se encontra com problemas de corrosão, incrustação e arraste devido ao tratamento ineficiente que está sendo realizado e, provavelmente, será necessário passar por novos reparos em sua estrutura.

É importante realizar o tratamento adequado da água para a garantia de um processo seguro e de qualidade. Assim, evitando possíveis custos com manutenção de equipamentos, custos com fabrica parada, custos com eventuais multas trabalhista devido acidente de um eventual colapso do gerador de vapor, além de custos com percas de lotes de produtos devido a contaminação.

Com isso, fica comprovado que a qualidade da água se mostra como um fator determinante no tempo de vida útil da caldeira. Para certificar-se que a caldeira está operando dentro das condições de segurança estabelecidas no projeto, a sua inspeção é de extrema importância para verificar se possui alguma avaria ou deterioração, as quais possam afetar a integridade do equipamento. Com a aplicação das inspeções periódicas, o colapso das partes submetidas a pressão é evitado, promovendo um melhor funcionamento do equipamento, em termos de eficiência, assim como garante a saúde e a segurança dos colaboradores. Isso sem contar com os ganhos financeiros de médio e longo prazo, dada a estabilidade do processo. A inspeção garante a continuidade da operação com o menor número possível de paradas indesejadas, além de reduzir custos de manutenção e operação, preservando a segurança das instalações.

Vale salientar que o processo de reformulação do pré-tratamento da água para caldeira ainda está em andamento e, portanto, a implantação de um método definitivo ainda será analisada pela equipe responsável. Assim, de acordo com o que foi alcançado até este momento, o processo mostra-se com eficácia ainda baixa, no sentido de garantir a qualidade da água. Por fim, esse estudo e as aplicações dos métodos possibilitaram a identificação dos problemas da caldeira, facilitando, assim, a adequação do método de tratamento com uma maior eficiência.

REFERÊNCIAS

ALTAFINI, C. R. Apostila sobre caldeiras. Caxias do Sul. 2002.

ASME, T. A. S. O. M. E. **ASME VI Boiler & Pressure Vessel Code - Recommended Rules** for the Care and Operation of Heating Boilers. New York. 2015.

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

BIZZO, W. A. **Geração, utilização e distribuição de vapor.** UNICAMP. Campinas, p. 163. 2003.

BOTELHO, M. H. C.; BIFANO, H. M. Operação de caldeiras - gerenciamento, controle e manutenção. 2ª. ed. São Paulo: Blucher, 2015.

CAMPOS, M. A. Estudo das instalações e operação de caldeiras e vasos de pressão de uma instituição hospitalar, sob análise da NR 13. Universidade do Extremo Sul Catarinense. Criciúma, p. 81. 2011.

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS. **Eficiência Energética no Uso de Vapor**. Rio de Janeiro. 2005.

GOVERNO DO BRASIL. **NR-01 - Disposições gerais e gerenciamento de riscos**. Brasília. 2020.

GOVERNO DO BRASIL. **NR-13 - Caldeiras, vasos de pressão, tubulação e tanques metálicos de armazenamento**. Brasília. 2020.

GOVERNO DO BRASIL. NR-28 - Fiscalização e penalidades. Brasília. 2020.

GOVERNO DO BRASIL. Ministério da Economia. Governo do Brasil, 20 Fevereiro 2021.

Disponivel em: https://www.gov.br/economia/pt-br/acesso-a-informacao/institucional.

GOVERNO DO BRASIL. Normas Regulamentadoras. **Escola Nacional da Inspeção do Trabalho**, 20 Fevereiro 2021. Disponivel em:

"> Acesso em: Fevereiro 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO E GÁS. **Inspeção de caldeira**. Rio de Janeiro, p. 72. 2020.

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

MANHONI, I. J. Manual operador de caldeira. Maringá. 2002.

MILL INDÚSTRIAS. Produção de Vapor. **Mill Industrias**, 28 Junho 2019. Disponivel em: https://www.mill.com.br/producao-de-vapor-uma-solucao-tambem-para-o-mercado-frigorifico/.

OLIVEIRA, D. J. **Análise de operação de caldeiras de acordo com a NR-13**. Universidade de Rio Verde, p. 25. 2014.

SENAI. **Princípios de Tecnologia Industrial 2**. Curitiba, p. 109. 2001.

TROVATI, J. Tratamento de água para geração de vapor: caldeiras. São Paulo. 2004.

ZARPELON, W.; AZZOLINI, J. C. Caldeiras de alta pressão: Caracterização e avaliação da qualidade do tratamento das águas de abastecimento. **Unoesc & Ciência**, Joaçaba, 6, 1 julho/dezembro 2015. 141-154.