



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ISABELLY PAZ PEREIRA TAVARES**

**USO DE UMA CALDEIRA A BIOMASSA PARA ANÁLISE E PROPOSTAS DE  
SOLUÇÕES PARA MELHORIA NA EFICIÊNCIA**

**FORTALEZA**

**2023**

ISABELLY PAZ PEREIRA TAVARES

USO DE UMA CALDEIRA A BIOMASSA PARA ANÁLISE E PROPOSTAS DE  
SOLUÇÕES PARA MELHORIA NA EFICIÊNCIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao Curso de Engenharia de Energia Renovável da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energias Renováveis.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dra. Maria Alexandra de Sousa Rios

FORTALEZA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

T23u Tavares, Isabelly Paz Pereira.  
Uso de uma caldeira a biomassa para análise e propostas de soluções para melhoria na eficiência /  
Isabelly Paz Pereira Tavares. – 2023.  
42 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,  
Curso de Engenharia de Energias Renováveis, Fortaleza, 2023.  
Orientação: Profa. Dra. Maria Aleksandra de Sousa Rios.

1. Caldeira. 2. Biomassa. 3. Eficiência. I. Título.

CDD 621.042

---

ISABELLY PAZ PEREIRA TAVARES

CALDEIRA A BIOMASSA: ANÁLISE DE DESEMPENHO E PROPOSTAS DE  
SOLUÇÕES PARA MELHORIA DA EFICIÊNCIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao Curso de Engenharia de Energia Renovável da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energias Renováveis.

Aprovada em: 29/06/2023.

BANCA EXAMINADORA

---

Profa. Dra. Maria Aleksandra de Sousa Rios (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dra. Ana Fabíola Leite Almeida  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dra Maria Alexandra de Sousa Rios pela paciência e excelente orientação.

A minha família pelo apoio incondicional.

Aos meus amigos de trabalho, pelas conversas construtivas, risadas e apoio.

Aos meus amigos de curso pela companhia, saídas, conversas e risadas que tornaram esses anos menos difíceis.

“O que prevemos raramente ocorre; o que menos esperamos geralmente acontece.”  
Benjamin Disraeli.

## RESUMO

Esse estudo aborda a produção de energia renovável e limpa, com foco na utilização de biomassa como fonte de energia em caldeiras. Dentre as tecnologias disponíveis, as caldeiras de biomassa têm se destacado como uma das opções mais viáveis, mas é necessário controlar a emissão de gases poluentes. Para uma análise completa do desempenho das caldeiras de biomassa, é fundamental considerar diversos aspectos que podem influenciar seu funcionamento e impacto ambiental. Nesse contexto, o objetivo do estudo é identificar e propor soluções para os problemas encontrados no sistema de queima de biomassa em uma caldeira, como baixo consumo de vapor, superaquecimento dos dutos e formação de pedras de sílica. O estudo foi realizado em uma caldeira de biomassa com capacidade de vazão de 10 ton/h a 15 ton/h de vapor saturado, com uma pressão de trabalho de 10 kgf/cm<sup>2</sup>, utilizando o cavaco de madeira e o bagaço de cana como fonte de energia. O sistema de transporte de combustível também foi analisado e dividido em sistema de armazenamento e alimentação. O estudo visou identificar e propor soluções para os problemas encontrados no sistema de queima de biomassa, além da avaliação e planejamento adequado da eficiência de queima e a melhoria do sistema de transporte do combustível. Conclui-se a necessidade de medidas preventivas como inspeções rotineiras, maior frequência de limpeza, além de que foi necessário a realização de intervenções corretivas.

**Palavras-chave:** caldeira; biomassa; eficiência.

## ABSTRACT

This study addresses the production of renewable and clean energy, with a focus on the use of biomass as a source of energy in boilers. Among the available technologies, biomass boilers have stood out as one of the most viable options, but it is necessary to control the emission of polluting gases. For a comprehensive analysis of the performance of biomass boilers, it is essential to consider various aspects that can influence their operation and environmental impact. In this context, the objective of the study is to identify and propose solutions to the problems encountered in the biomass combustion system in a boiler, such as low steam consumption, duct overheating, and formation of silica stones. The study was conducted on a biomass boiler with a capacity of 10 to 15 tons/h of saturated steam, with a working pressure of 10 kgf/cm<sup>2</sup>, using wood chips and sugarcane bagasse as energy sources. The fuel transport system was also analyzed and divided into storage and feeding systems. The study aimed to identify and propose solutions to the problems encountered in the biomass combustion system, as well as evaluate and properly plan the burning efficiency and improve the fuel transport system. It is concluded that preventive measures such as routine inspections and more frequent cleaning are necessary, in addition to the need for corrective interventions.

**Keywords:** Boiler; Biomass; Efficiency.

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 1 – Ciclo de Carnot.....	32
Figura 2 – Ciclo de Rankine.....	33
Figura 3 – Caldeira Flamotubular.....	35
Figura 4 – Caldeira Aquatubular.....	36
Figura 5 – Componentes de uma Caldeira.....	37
Figura 6 – Esquema da Caldeira Estudada.....	44
Figura 7 – Caldeira de Biomassa.....	45
Figura 8 – Esquema do Sistema de Alimentação.....	46
Figura 9 – Sistema de Extração de Cinzas.....	47
Figura 10 – Fornecimento de Vapor.....	48
Figura 11 – Impactos no Aquecedor –Boiler.....	49
Figura 12 – Esquema Duto de Alimentação/Redler.....	50
Figura 13 – Tubulão.....	51

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

NR - 13 Norma Regulamentadora No. 13

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>25</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>29</b>
<b>2.1</b>	<b>Objetivos Gerais.....</b>	<b>29</b>
<b>2.2</b>	<b>Objetivos Específicos.....</b>	<b>28</b>
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>30</b>
<b>3.1</b>	<b>Primeira Lei da Termodinâmica.....</b>	<b>30</b>
<b>3.2</b>	<b>Segunda Lei da Termodinâmica.....</b>	<b>30</b>
<b>3.3</b>	<b>Ciclo de Carnot.....</b>	<b>31</b>
<b>3.4</b>	<b>Ciclo de Rankine.....</b>	<b>32</b>
<b>3.5</b>	<b>Caldeiras.....</b>	<b>33</b>
<b>3.5.1</b>	<b><i>Caldeiras Flamotubulares.....</i></b>	<b>34</b>
<b>3.5.2</b>	<b><i>Caldeiras Aquatubulares.....</i></b>	<b>35</b>
<b>3.5.3</b>	<b><i>Componentes.....</i></b>	<b>36</b>
<b>3.5.4</b>	<b><i>Sistema de Alimentação.....</i></b>	<b>37</b>
<b>3.5.5</b>	<b><i>Aquecedor-Boiler.....</i></b>	<b>38</b>
<b>3.5.6</b>	<b><i>Sistema de Extração de Cinzas.....</i></b>	<b>39</b>
<b>3.5.7</b>	<b><i>Manutenção.....</i></b>	<b>40</b>
<b>3.5.8</b>	<b><i>Análise de Eficiência Energética.....</i></b>	<b>41</b>
<b>3.6</b>	<b>Biomassa como Fonte de Energia.....</b>	<b>41</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>44</b>
<b>4.1</b>	<b>Entendendo o Funcionamento da Caldeira.....</b>	<b>44</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>48</b>
<b>5.1</b>	<b>Histórico de Operação.....</b>	<b>48</b>
<b>5.2</b>	<b>Aquecedor-Boiler.....</b>	<b>49</b>
<b>5.2.1</b>	<b><i>Duto de Alimentação/Redler.....</i></b>	<b>51</b>
<b>5.2.2</b>	<b><i>Duto de Alimentação/Grelhado.....</i></b>	<b>52</b>
<b>5.2.3</b>	<b><i>Tubulão.....</i></b>	<b>52</b>
<b>5.3</b>	<b>Transportadores.....</b>	<b>53</b>
<b>5.4</b>	<b>Extração de Cinzas.....</b>	<b>53</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>54</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>55</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A produção de energia é um dos principais pilares do desenvolvimento econômico e social de um país. No entanto, com o crescente aumento da demanda de energia, a utilização de fontes fósseis tem gerado impactos negativos ao meio ambiente, como a emissão de gases poluentes e o aquecimento global. Por isso, a busca por fontes de energia renovável e limpa tem se tornado cada vez mais importante.

Dentre as fontes de energia renovável, a biomassa tem se destacado como uma opção viável e sustentável para a produção de energia. Segundo Gomes (2019), a biomassa é definida como toda matéria orgânica de origem vegetal ou animal, utilizada para produzir energia. A utilização de biomassa como fonte de energia tem crescido mundialmente, principalmente devido às vantagens ambientais e econômicas que ela oferece.

Entre as tecnologias para a produção de energia a partir de biomassa, as caldeiras de biomassa têm se destacado como uma das opções mais viáveis. As caldeiras de biomassa são equipamentos que utilizam a queima de biomassa para produzir vapor e, conseqüentemente, gerar energia. Segundo Araújo et al. (2018), a utilização de caldeiras de biomassa é uma alternativa viável para a produção de energia renovável, com a vantagem de reduzir a dependência de combustíveis fósseis e, conseqüentemente, reduzir as emissões de gases do efeito estufa. São equipamentos utilizados para gerar vapor a partir da queima de um combustível, que pode ser gás, óleo, carvão ou biomassa. Esse vapor pode ser utilizado em diversos processos industriais, como geração de energia elétrica, aquecimento de fluidos e vaporização de líquidos. Existem diferentes tipos de caldeiras, cada uma com características próprias e vantagens específicas.

Assim, podemos destacar as caldeiras aquatubulares, flamotubulares e mistas. Segundo Pinto (2014), as caldeiras aquatubulares são aquelas em que a água circula dentro dos tubos e os gases quentes da combustão passam por fora desses tubos. Já as caldeiras flamotubulares são aquelas em que os gases quentes da combustão passam por dentro dos tubos e a água circula por fora desses tubos. Por fim, as caldeiras mistas são aquelas que combinam os dois tipos de tubos, proporcionando vantagens de ambos os sistemas.

Uma das principais vantagens das caldeiras aquatubulares é a sua maior capacidade de produção de vapor, devido à maior área de superfície de aquecimento. Segundo

Silva et al. (2018), as caldeiras aquatubulares possuem maior capacidade de produção de vapor e maior segurança operacional, devido ao fato de a água estar contida nos tubos, evitando o risco de explosão. Já as caldeiras flamotubulares são mais compactas e possuem menor tempo de resposta para produção de vapor, o que pode ser vantajoso em aplicações que exigem maior flexibilidade de operação.

As caldeiras mistas, por sua vez, combinam as vantagens das caldeiras aquatubulares e flamotubulares, proporcionando maior eficiência energética e menor emissão de gases poluentes. Segundo Sodré (2015), as caldeiras mistas permitem uma maior recupera o de calor dos gases de combustão, proporcionando um aumento na eficiência energética e reduzindo as emissões de gases poluentes.

De acordo com Moraes (2017), as caldeiras de biomassa possuem alta eficiência energética, o que contribui para a redu o de custos de produ o. Além disso, elas são capazes de queimar diversos tipos de biomassa, como bagaço de cana, cavaco de madeira e casca de arroz, o que aumenta a versatilidade desse equipamento.

No entanto,   importante destacar que a utiliza o de caldeiras de biomassa deve ser acompanhada por medidas de controle de emissão de gases poluentes. Segundo Andrade et al. (2019), a utiliza o de caldeiras de biomassa pode gerar emissões de gases como o CO<sub>2</sub>, o NO<sub>x</sub> e o SO<sub>x</sub>, que são prejudiciais ao meio ambiente e   saúde humana. Por isso,   fundamental que sejam adotadas medidas de controle de emissão de gases para garantir a sustentabilidade e a eficiência do uso da biomassa como fonte de energia.

Para realizar uma análise completa do desempenho de caldeiras de biomassa,   importante considerar diversos aspectos que podem influenciar o seu funcionamento e impacto ambiental. Entre eles, destacam-se a qualidade da biomassa utilizada, a tecnologia empregada na queima, o sistema de controle de emissões de gases, a eficiência energética do equipamento e a viabilidade econ mica do projeto.

Segundo Rezende et al. (2019), a qualidade da biomassa utilizada   um fator fundamental para garantir o bom desempenho da caldeira e a redu o de emissões de gases poluentes. A biomassa deve ser selecionada de acordo com as características do equipamento e do processo de combustão, levando em considera o o teor de umidade, o poder calorífico e a composi o química do material.

Além disso, a tecnologia empregada na queima da biomassa pode influenciar significativamente o desempenho da caldeira. De acordo com Carvalho et al. (2018), existem diferentes tecnologias disponíveis para a queima de biomassa, como grelhas fixas, grelhas

móveis, leitos fluidizados e queimadores especiais. Cada tecnologia apresenta vantagens e desvantagens, que devem ser consideradas na escolha do sistema mais adequado para cada aplicação.

Para garantir a sustentabilidade ambiental da produção de energia a partir de biomassa, é fundamental adotar medidas de controle de emissões de gases poluentes. Segundo Salles et al. (2020), existem diversas tecnologias disponíveis para o controle de emissões, como filtros de mangas, lavadores de gases e sistemas de injeção de ureia. A escolha do sistema mais adequado deve levar em consideração o tipo de biomassa utilizada, a capacidade da caldeira e os requisitos legais de emissão de gases.

Ademais, a eficiência energética da caldeira é um fator determinante para a viabilidade econômica do projeto. Segundo Castro et al. (2017), a eficiência energética da caldeira pode ser melhorada através da adoção de tecnologias como recuperação de calor, cogeração e sistemas de controle automatizado. Essas tecnologias podem reduzir o consumo de energia e aumentar a eficiência do processo de produção.

Em uma indústria, a escolha do tipo de caldeira a ser utilizada dependerá das necessidades específicas do processo produtivo e dos recursos disponíveis. Deve-se considerar aspectos como capacidade de produção de vapor, flexibilidade de operação, segurança, eficiência energética e controle de emissões. A escolha correta da caldeira pode trazer benefícios como redução de custos operacionais, aumento da eficiência energética e melhoria do desempenho ambiental da empresa. Sendo assim, a indústria cervejeira é uma das que mais consome energia em todo o mundo, sendo responsável por uma grande emissão de gases de efeito estufa. A utilização de caldeiras de biomassa nessas indústrias tem se tornado uma prática cada vez mais comum e relevante nos dias atuais, devido aos benefícios ambientais e econômicos que essa prática oferece.

A geração de energia a partir de biomassa é uma alternativa limpa e renovável que pode reduzir significativamente as emissões de gases de efeito estufa e melhorar a eficiência energética das indústrias (Kambo et al., 2017; Zhang et al., 2020). Nesse contexto, as caldeiras de biomassa podem ser utilizadas para gerar vapor e água quente para as diversas etapas do processo produtivo da cerveja, como a esterilização dos equipamentos e a pasteurização da bebida (Pang et al., 2020).

A escolha da biomassa a ser utilizada nas caldeiras é um dos principais desafios enfrentados pelas indústrias cervejeiras que optam por essa prática. A biomassa deve ser selecionada de acordo com aspectos como a disponibilidade, o custo, a densidade, o teor de umidade e o poder calorífico, além de considerar a possibilidade de produção local da

biomassa e a preservação da biodiversidade (Chen et al., 2019; Yin et al., 2021). Adicionalmente, é importante adotar boas práticas de gestão da biomassa e das caldeiras para garantir a eficiência e a sustentabilidade do processo produtivo. A aplicação de geradores de vapor que utilizam biomassa como combustível em fábricas de produção de cerveja não só traz benefícios ambientais, mas também pode contribuir para o desenvolvimento econômico e social das regiões onde as indústrias estão localizadas. Segundo Vargas et al. (2020), a utilização de biomassa como fonte de energia pode gerar empregos e renda nas comunidades locais, além de reduzir a dependência de combustíveis fósseis importados.

Outrossim, outro aspecto importante a ser considerado na utilização de caldeiras de biomassa é a sua manutenção. Segundo Rocha et al. (2019), a manutenção preventiva é fundamental para garantir o bom funcionamento das caldeiras de biomassa, evitando paradas não programadas e reduzindo os custos de manutenção corretiva. Ademais, a manutenção adequada pode contribuir para a redução das emissões de gases poluentes e aumentar a vida útil do equipamento.

Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho da utilização de uma caldeira de biomassa em uma cervejaria, analisando o seu funcionamento e o seu desempenho. Os resultados obtidos têm o intuito de contribuir para a compreensão dos benefícios e limitações da utilização de biomassa como fonte de energia em caldeiras industriais, assim como para a identificação de possíveis melhorias no processo produtivo da cervejaria.

## **2 OBJETIVOS**

### **Objetivo Geral**

O objetivo deste trabalho é identificar e propor soluções para os problemas encontrados no sistema de queima de biomassa em uma caldeira.

### **Objetivos Específicos**

- Analisar os problemas relacionados ao baixo consumo de vapor, superaquecimento dos dutos e transportadores e formação de pedras de sílica que afetam o desempenho e a eficiência do equipamento.
- Avaliar a baixa eficiência de queima de biomassa e seu impacto na geração de material particulado não queimado, afetando o sistema de extração de cinzas e a estação de tratamento de efluentes.
- Elaborar um planejamento adequado do sistema de queima de biomassa, considerando a faixa de trabalho de vapor e operando dentro dos limites recomendados pelos fabricantes.
- Garantir a eficiência do processo e a segurança operacional por meio do estudo e aplicação de medidas corretivas e preventivas.
- Aprimorar a forma de relatar os acontecimentos do equipamento, fornecendo informações mais concisas para futuros trabalhos.

### **3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

O propósito deste capítulo é introduzir uma análise da literatura referente às duas primeiras leis da termodinâmica, bem como destacar a sua relevância para a compreensão de temas como o ciclo de Carnot, o ciclo Rankine e o funcionamento de caldeiras e seus equipamentos. Além disso, também serão abordadas as normas regulamentadoras de caldeiras, conforme estabelecido na NR 13, e análise da biomassa como uma forma de obtenção de energia.

#### **Primeira Lei da Termodinâmica**

A Primeira Lei da Termodinâmica, também conhecida como princípio da conservação da energia, é uma das leis fundamentais da física que estuda a relação entre calor e outras formas de energia. De acordo com esta lei, a energia não pode ser criada nem destruída, apenas transformada de uma forma em outra. Essa lei é amplamente estudada por diversos autores na área, como por exemplo, Callen (1985), que afirma que a energia total de um sistema termodinâmico é constante.

Essa lei é de fundamental importância para o estudo da física e da química, além de ter diversas aplicações na indústria e tecnologia. Segundo Cengel e Boles (2012), ela é a base para o estudo de máquinas térmicas e processos de transferência de calor, além de ser essencial para o entendimento de processos bioquímicos, como a fotossíntese e a respiração celular.

#### **Segunda Lei da Termodinâmica**

A Segunda Lei da Termodinâmica é uma lei fundamental da física que descreve o comportamento de sistemas termodinâmicos em relação à entropia. De acordo com esta lei, a entropia de um sistema isolado tende a aumentar com o tempo, levando a uma perda de energia útil e a um aumento da desordem do sistema. Segundo Moran e Shapiro (2007), essa lei diz que é impossível construir uma máquina térmica que opere em um ciclo e produza trabalho útil sem transferir calor de uma fonte quente para uma fonte fria.

Assim, a Segunda Lei da Termodinâmica é frequentemente representada pela desigualdade de Clausius, que estabelece que o calor não pode fluir de uma região fria para

uma região quente sem a aplicação de trabalho externo. Essa desigualdade é matematicamente expressa por  $\oint dQ/T \leq 0$ , onde  $dQ$  representa a quantidade de calor transferida e  $T$  representa a temperatura do sistema. Segundo Callen (1985), essa desigualdade expressa a impossibilidade de certos processos reversíveis, uma vez que um processo reversível implicaria em uma variação da entropia igual a zero.

Essa lei é um princípio fundamental da física e da química, e tem diversas implicações na ciência e na tecnologia. Segundo Atkins (1998), ela tem importantes consequências para a compreensão dos processos bioquímicos e para a evolução da vida na Terra, uma vez que a entropia é um indicador da ordem dos sistemas biológicos. Além disso, a lei aqui comentada é essencial para o estudo de máquinas térmicas e processos de transferência de calor, como destaca Cengel e Boles (2012).

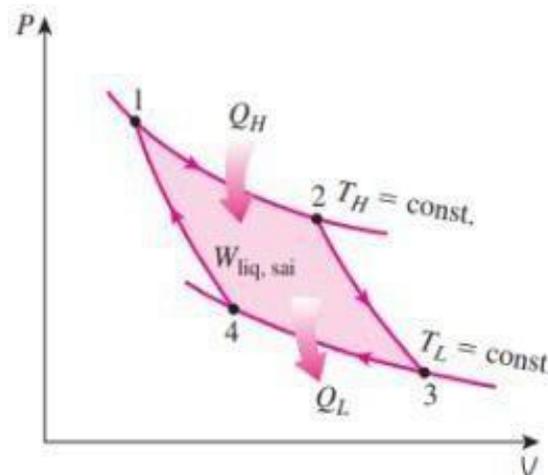
Além de que a Segunda Lei da Termodinâmica é uma lei fundamental que se aplica a todos os sistemas termodinâmicos, sejam eles naturais ou artificiais. Segundo Smith e Van Ness (1996), não há exceções a essa lei, pois ela é uma lei universal que se aplica a todos os sistemas termodinâmicos, independentemente de sua complexidade ou escala. Por isso, é fundamental compreender as implicações dessa lei para que seja possível desenvolver tecnologias mais eficientes e sustentáveis.

### **Ciclo de Carnot**

O ciclo de Carnot é um dos fundamentos da Termodinâmica e representa o processo ideal para a operação de uma máquina térmica. Essa máquina converte energia térmica em trabalho mecânico, por meio da realização de um ciclo termodinâmico que consiste em quatro etapas. Segundo Callen (1998), a máquina térmica é um dispositivo que extrai energia de uma fonte quente e a utiliza para realizar um trabalho, transferindo o restante para uma fonte fria.

Esse ciclo é composto por duas transformações adiabáticas e duas isotérmicas, como destacam Cengel e Boles (2012). A primeira etapa consiste na compressão adiabática de um gás, seguida da transferência de calor para uma fonte quente à temperatura constante. Em seguida, ocorre a expansão adiabática do gás e a transferência de calor para uma fonte fria à temperatura constante. O processo é completado com a reversão da primeira etapa, a expansão isotérmica do gás e a transferência de calor para a fonte quente. Assim como mostra a figura 1.

Figura 1: Ciclo de Carnot



Fonte: Çengel e Boles (2005)

O objetivo do ciclo é obter a máxima eficiência possível para a máquina térmica. Conforme explica Moran et al. (2008), a eficiência térmica é determinada pela razão entre o trabalho realizado e a energia térmica fornecida, ou seja, quanto maior a eficiência, menor a quantidade de calor rejeitada para a fonte fria. Segundo Van Ness et al. (1996), o ciclo de Carnot é o ciclo mais eficiente possível para qualquer máquina térmica que opere entre duas temperaturas fixas.

Por isso, ele é um conceito fundamental na Termodinâmica e tem implicações importantes em diversas áreas da engenharia, como a produção de energia, o projeto de motores e a análise de processos industriais. Para Atkins (1998), o esse ciclo é a chave para entender a Termodinâmica, uma vez que se trata do processo ideal para a conversão de calor em trabalho mecânico.

### Ciclo de Rankine

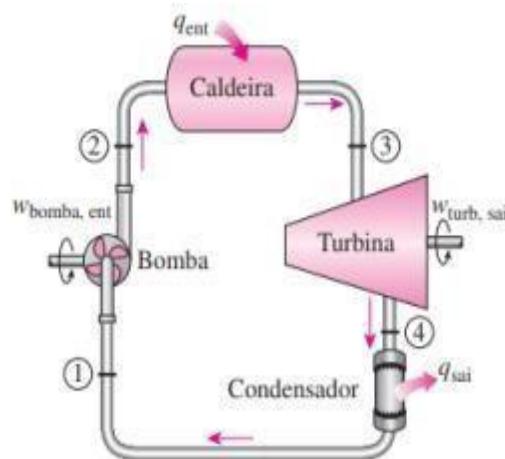
O ciclo de Rankine é um ciclo termodinâmico utilizado em sistemas de geração de energia elétrica por meio da conversão de calor em trabalho mecânico. De acordo com Çengel e Boles (2012), esse ciclo é um dos mais utilizados em plantas termelétricas, tendo como base a utilização de vapor d'água como fluido de trabalho. O ciclo é composto por quatro etapas:

aquecimento isobárico, expansão adiabática, resfriamento isobárico e compressão adiabática.

A etapa de aquecimento isobárico consiste na adição de calor a uma pressão constante, gerando vapor d'água superaquecido. Em seguida, ocorre a expansão adiabática do vapor em uma turbina, convertendo parte da energia térmica em energia mecânica. De acordo com Moran et al. (2008), a etapa de expansão adiabática é a responsável por gerar o trabalho mecânico do ciclo.

Na terceira etapa, o vapor é resfriado a pressão constante, permitindo a condensação e a liberação de calor para a fonte fria. Por fim, o ciclo é completado com a compressão adiabática do líquido condensado, retornando-o ao estado inicial, apresentado na figura 2. Segundo Bejan e Kraus (2003), a compressão adiabática é realizada em uma bomba, que fornece a energia necessária para iniciar o ciclo novamente.

Figura 2: Ciclo de Rankine



Fonte: Çengel e Boles (2005)

O ciclo de Rankine tem sido amplamente utilizado na geração de energia elétrica, apresentando diversas variações em sua configuração básica. De acordo com Çengel e Boles (2012), a eficiência térmica do ciclo pode ser melhorada com a utilização de reaquecimento, regeneração e aumento da pressão de operação. Já Bejan e Kraus (2003) destacam a importância desse ciclo na produção de energia, tendo em vista sua eficiência e confiabilidade.

Moran e Shapiro (2013) explicam que o esse ciclo é amplamente utilizado em sistemas de geração de energia, pois é altamente eficiente. Em uma usina de energia, a água é

bombeada da fonte para a caldeira, onde é aquecida e transformada em vapor. O vapor, então, é enviado para a turbina, onde é expandido, produzindo energia mecânica. Esse processo é repetido várias vezes até que o vapor seja finalmente condensado de volta à água na forma líquida. A energia mecânica produzida é convertida em energia elétrica por meio de um gerador.

### **Caldeiras**

Caldeiras são equipamentos utilizados para a produção de vapor a partir da queima de combustíveis, como carvão, óleo ou gás. Elas são amplamente utilizadas em diversas indústrias, como a química, petroquímica, alimentícia, entre outras. Segundo Rocha (2012), elas funcionam a partir do princípio da transferência de calor, onde o combustível é queimado em um ambiente controlado, aquecendo a água que circula em seu interior. O vapor gerado é então utilizado para diversas finalidades, como o aquecimento de fluidos, geração de energia elétrica ou movimentação de equipamentos.

O funcionamento de uma caldeira pode ser descrito em quatro etapas, como descrito por Moran e Shapiro (2013). Na primeira etapa, a água é alimentada na caldeira e aquecida pelo combustível, ocorrendo a mudança de fase do líquido para vapor. Na segunda etapa, o vapor gerado é expandido na turbina, produzindo trabalho mecânico. Na terceira etapa, o vapor é condensado em um condensador, onde ocorre a troca de calor com a água de refrigeração. Por fim, na quarta etapa, a água condensada é bombeada de volta para a caldeira, reiniciando o ciclo.

De acordo com Leal (2018), as caldeiras podem ser classificadas de acordo com diversos critérios, como o tipo de combustível utilizado, a pressão de operação, o tipo de circulação de água, entre outros. Cada tipo de caldeira possui suas vantagens e desvantagens, sendo importante escolher a mais adequada para cada aplicação. Além disso, é importante destacar a importância da manutenção preventiva das caldeiras, garantindo sua segurança e eficiência operacional.

Segundo os autores Bazzo e Pereira (2012), a utilização de caldeiras na indústria é regida por normas e regulamentações, visando a segurança dos trabalhadores e a proteção ambiental. É fundamental que os operadores de caldeiras sejam capacitados e treinados para a operação segura desses equipamentos, seguindo as normas estabelecidas. A fiscalização e inspeção periódica das caldeiras também são obrigatórias, garantindo a segurança das

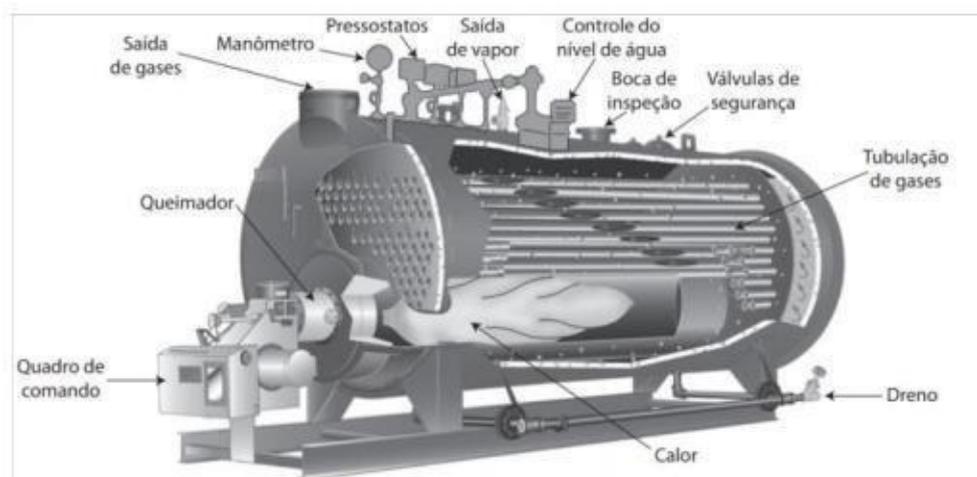
instalações e a integridade dos trabalhadores.

### • *Caldeiras Flamotubulares*

As caldeiras flamotubulares, figura 3, são equipamentos bastante comuns na indústria e possuem uma grande variedade de aplicações. Sua principal característica é a presença de tubos por onde passam os gases de combustão, que são responsáveis por aquecer a água que se encontra ao redor desses tubos. Segundo Maia e Mendonça (2007), o uso desse tipo de caldeira tem crescido em virtude do aumento na demanda por processos térmicos em indústrias de diversos setores.

Os tubos presentes nas caldeiras flamotubulares podem ser retos, curvos ou em forma de U, e sua disposição e quantidade podem variar bastante de acordo com as necessidades do processo. Segundo Lazzaretto (2004), o controle das emissões de poluentes é um aspecto importante no uso de caldeiras flamotubulares, visto que elas podem gerar altas concentrações de  $\text{NO}_x$  e CO.

Figura 3: Cadeira Flamotubular



Fonte: Botelho e Bifanol (2015)

Outra questão importante na operação de caldeiras flamotubulares é o controle da temperatura dos gases de combustão. Conforme destaca Feldmann (2015), altas temperaturas podem causar danos aos tubos e reduzir a vida útil do equipamento, enquanto temperaturas

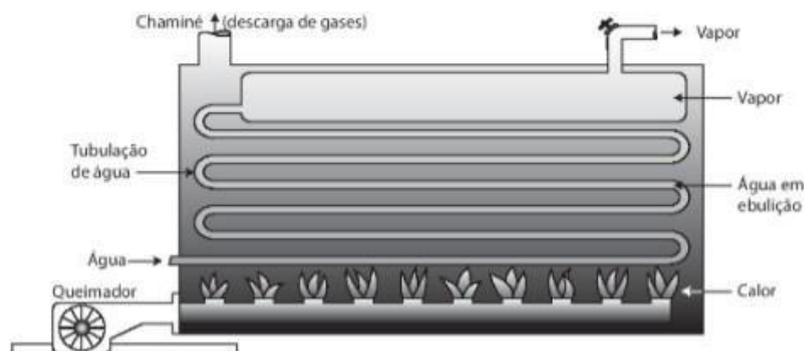
muito baixas podem afetar a eficiência da combustão e gerar acúmulo de fuligem nos tubos. Por isso, é fundamental o uso de sistemas de controle que possam garantir que a temperatura dos gases de combustão esteja dentro dos limites ideais.

#### • *Caldeiras Aquatubulares*

As caldeiras aquatubulares, figura 4, são equipamentos utilizados em diversos processos industriais para a geração de vapor. Sua principal característica é a presença de tubos por onde circula a água que será aquecida pelos gases de combustão. Conforme destacado por Incropera e DeWitt (2014), esse tipo de caldeira é bastante utilizado em processos que requerem altas temperaturas e pressões, como em refinarias de petróleo e usinas termelétricas.

Os tubos presentes nas caldeiras aquatubulares podem ser retos ou curvos e sua disposição pode variar de acordo com as necessidades do processo. Além disso, a circulação da água pode ocorrer de forma natural ou forçada, com o uso de bombas para garantir uma maior eficiência na transferência de calor. Segundo Smith e Van Ness (1996), essas caldeiras são mais eficientes que as flamatubulares em virtude de sua maior superfície de transferência de calor.

Figura 4: Caldeira Aquatubular



Fonte: Botelho e Bifanol (2015)

Conforme destacado por Moran e Shapiro (2007), falhas na operação desses equipamentos podem gerar acidentes graves, como explosões e vazamentos de vapor. Além disso, a corrosão dos tubos é um problema comum nesse tipo de caldeiras, o que pode comprometer a integridade do equipamento e reduzir sua vida útil.

## Componentes

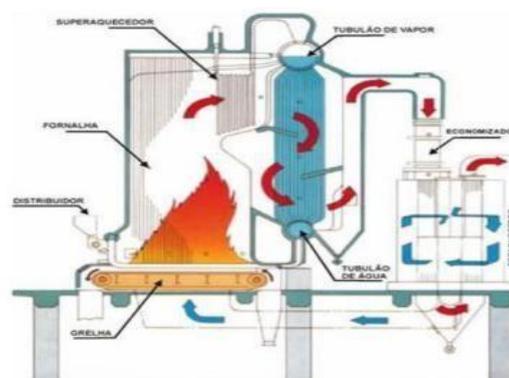
De acordo com Botelho e Bifano (2015), a caldeira é composta por diversos componentes que são essenciais para o seu funcionamento. Entre eles, está o corpo de caldeira de aço, que é um reservatório no qual a água alimentada é transformada em vapor. Além disso, a caldeira também conta com tubos internos feitos de aço, que permitem a passagem de gases muito quentes, provenientes da combustão (flamotubular), ou água que sofre o aquecimento, envolvida pelos gases que circundam os tubos cheios de água (aquatubular).

Outro componente importante da caldeira é o alimentador de combustível, que pode ser manual ou automático, e é responsável por fornecer o combustível necessário para a queima. A queima, por sua vez, ocorre no queimador de combustível ou na fornalha com grelha, onde é gerado o calor que aquecerá a água e produzirá o vapor.

Além disso, a caldeira também conta com tubulações de saída de vapor e de gases queimados, além de válvulas de descarga para esvaziamento, descarte de resíduos e lodo criado pelo tratamento de água. Outras válvulas importantes são as de segurança contra excesso de pressão, que garantem que a pressão não ultrapasse o limite estabelecido.

Por fim, a caldeira também é equipada com dispositivos de controle, que são responsáveis por controlar a entrada de gases combustíveis, a ligação do acendedor da queima dos gases e o acionamento do motor da bomba de água que alimenta a caldeira, ilustrada na figura 5. Alguns dispositivos extras podem ser integrados à caldeira para aumentar sua eficiência, como o superaquecedor, economizador e pré-aquecedor.

Figura 5: Componentes de uma caldeira



Fonte: Oliveira (2014)

### • ***Sistema de Alimentação***

O sistema de alimentação de uma caldeira de biomassa é responsável por garantir a alimentação constante e adequada do combustível para a combustão. Um dos componentes essenciais desse sistema são os transportadores de biomassa, que podem ser do tipo rosca sem fim, corrente ou pneumático. Conforme destacado por Oliveira et al. (2019), o tipo de transportador utilizado depende do tipo de biomassa, da distância entre o local de armazenamento e a caldeira, da capacidade da caldeira e da disponibilidade de energia elétrica.

Além dos transportadores, o sistema de alimentação também inclui a moega, que é responsável por armazenar a biomassa antes de ser transportada para a caldeira. Conforme destacado por Torres e Cerqueira (2019), a moega deve ter capacidade adequada para garantir um estoque suficiente de biomassa, além de ser projetada de forma a evitar o acúmulo de umidade e o entupimento do sistema.

Outro componente importante do sistema de alimentação é o redler, que é responsável por alimentar a biomassa para a caldeira. Conforme destacado por Oliveira et al. (2019), ele é composto por uma série de roscas que transportam a biomassa para a caldeira. É importante que o mesmo seja dimensionado de forma adequada para garantir uma alimentação uniforme da biomassa, evitando oscilações na temperatura da caldeira e a formação de gases poluentes.

A eficiência do sistema de alimentação de uma caldeira de biomassa é fundamental para a garantia do desempenho e da segurança da caldeira. Segundo Torres e Cerqueira (2019), a falta de cuidado na escolha dos componentes e no dimensionamento do sistema de alimentação pode levar a problemas como a obstrução dos dutos de combustão, o aumento de emissões de gases poluentes e até mesmo o risco de incêndios na caldeira.

### • ***Aquecedor-Boiler***

O sistema de aquecedor-boiler é uma das partes mais importantes de uma caldeira de biomassa, responsável por gerar vapor a partir da queima da biomassa. De acordo com Silva et al. (2021), a eficiência do aquecedor-boiler pode ser influenciada por diversos fatores, como a qualidade da biomassa, a geometria do sistema e a temperatura de operação.

O tubulão é a primeira parte do aquecedor-boiler, responsável por receber o

combustível e conduzi-lo para a grelha de combustão. Segundo Chauhan e Joshi (2014), o projeto do tubulão deve ser cuidadosamente planejado para garantir uma alimentação uniforme da biomassa, evitando obstruções e desequilíbrios na queima.

A grelha de combustão é a parte do aquecedor-boiler onde ocorre a queima da biomassa, gerando calor para aquecer a água e gerar vapor. De acordo com Ferreira et al. (2020), a geometria da grelha pode influenciar a eficiência da combustão, devendo ser escolhida de acordo com as características da biomassa utilizada e a taxa de alimentação da caldeira.

O duto de alimentação é responsável por levar a biomassa do tubulão até a grelha de combustão. Conforme destacado por Chauhan e Joshi (2014), a velocidade de alimentação da biomassa deve ser controlada para garantir uma queima eficiente e uniforme, evitando o acúmulo de resíduos no sistema.

Além disso, o duto de alimentação também pode ser equipado com sistemas de controle de emissão de gases poluentes, como destacado por Vargas et al. (2017). Estes sistemas permitem a injeção de ar ou outros gases no duto, reduzindo a formação de poluentes na combustão da biomassa.

#### • ***Sistema de Extração de Cinzas***

A extração de cinzas em uma caldeira de biomassa é um processo importante para manter a eficiência energética do sistema, bem como reduzir os impactos ambientais. Segundo Guimaraes et al. (2009), a presença de cinzas pode reduzir o poder calorífico da biomassa, além de causar problemas na operação da caldeira, como a obstrução dos dutos de combustão. Por isso, é fundamental que o sistema de extração de cinzas seja eficiente e confiável.

O primeiro passo no processo de extração de cinzas é a lavagem dos gases, que é feita por meio de um lavador de gases. Conforme destacado por Leite et al. (2018), esse sistema é responsável por remover as partículas sólidas dos gases de combustão, como cinzas e outros poluentes, evitando que eles sejam lançados na atmosfera. O lavador de gases consiste em um conjunto de equipamentos que incluem um absorvedor, um pré-lavador e um filtro, que trabalham em conjunto para remover as partículas sólidas dos gases.

Após a lavagem dos gases, as cinzas são coletadas em um taque de coleta, como

destacado por Oliveira et al. (2019). Esse taque é geralmente feito de material resistente à corrosão e tem capacidade suficiente para armazenar as cinzas produzidas pela caldeira durante um determinado período de tempo. Além disso, o taque de coleta deve ser projetado de forma a permitir a fácil remoção das cinzas, sem causar interferência na operação da caldeira.

Uma vez coletadas, as cinzas são transportadas para um separador de cinzas, que é responsável por separar as cinzas finas das grossas, conforme destacado por Guimaraes et al. (2009). Esse processo é importante porque as cinzas finas podem causar problemas na operação da caldeira, como a obstrução dos dutos de combustão. O separador de cinzas consiste em um equipamento que usa diferentes métodos para separar as cinzas finas das grossas, como a gravidade, a inércia e a força centrífuga.

Além disso, é importante destacar que o sistema de extração de cinzas deve ser projetado de forma a permitir a fácil remoção das cinzas, sem causar interferência na operação da caldeira. Conforme destacado por Oliveira et al. (2019), a remoção adequada das cinzas é fundamental para manter a eficiência energética da caldeira e reduzir os impactos ambientais.

#### • *Manutenção*

A manutenção de caldeiras é essencial para garantir a segurança operacional e prolongar a vida útil do equipamento. A NR 13, regulamentada em 1978, estabelece os requisitos mínimos para a segurança na operação de caldeiras e vasos de pressão. Entre as exigências estão a realização de inspeções periódicas, manutenção preventiva e corretiva, treinamento dos operadores e documentação técnica atualizada.

De acordo com Botelho e Bifano (2015), a manutenção preventiva deve ser realizada em intervalos regulares e incluir a limpeza dos tubos, inspeção dos queimadores e troca de peças desgastadas. Já a manutenção corretiva deve ser acionada em caso de falhas no equipamento, como vazamentos de água ou de gás, por exemplo.

Além da NR 13, é importante seguir as recomendações dos fabricantes e normas técnicas específicas, como a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 8373, que trata da inspeção de caldeiras e vasos de pressão. Segundo Rangel (2008), a inspeção deve ser realizada por profissionais habilitados e capacitados, seguindo os procedimentos

previstos na norma.

Outro aspecto relevante na manutenção de caldeiras é o tratamento de água, que deve ser realizado de forma adequada para evitar a formação de depósitos e incrustações nos tubos e outros componentes do equipamento. Conforme destacado por Sodré (2008), o tratamento envolve a utilização de produtos químicos e a monitoração constante dos parâmetros da água, como pH e condutividade.

Além disso, é importante que os operadores estejam capacitados para identificar e corrigir pequenas falhas no equipamento antes que elas se tornem problemas mais graves. Segundo Batista et al. (2013), o treinamento deve abordar temas como segurança na operação, leitura e interpretação de manuais, identificação de defeitos e técnicas de manutenção preventiva.

Por fim, é fundamental que todos os procedimentos de manutenção e inspeção sejam documentados de forma clara e precisa. A NR 13 exige a elaboração de um prontuário da caldeira, contendo informações como projeto, fabricação, inspeções realizadas, resultados das inspeções e laudos técnicos. Segundo a norma, o prontuário deve estar sempre atualizado e à disposição dos órgãos fiscalizadores.

#### • *Análise da Eficiência Energética*

A análise de eficiência energética em caldeiras é essencial para a otimização do processo de geração de vapor, permitindo o uso racional de combustíveis e a redução de custos energéticos. Segundo Stassen (2003), a eficiência energética pode ser definida como a relação entre a energia útil gerada pela caldeira e a energia total consumida. Portanto, a análise da eficiência energética é importante para avaliar o desempenho da caldeira e identificar possíveis oportunidades de melhoria.

Dentre as principais formas de avaliação da eficiência energética, pode-se destacar a medição do teor de umidade do combustível, o controle da relação ar/combustível e a verificação da temperatura dos gases de combustão. Conforme ressaltado por Javed e Saidur (2011), o excesso de ar na queima do combustível pode reduzir a eficiência da caldeira, enquanto que a combustão incompleta pode gerar resíduos poluentes.

Outro parâmetro importante na análise de eficiência energética é a recuperação de calor dos gases de combustão, que podem ser aproveitados para pré-aquecer a água de

alimentação da caldeira. De acordo com Kim e Park (2013), o uso de economizadores e superaquecedores pode aumentar a eficiência energética em até 5%, enquanto que a utilização de sistemas de cogeração pode elevar essa taxa para mais de 80%.

Além disso, é fundamental que a caldeira esteja adequadamente dimensionada para a carga térmica requerida, evitando desperdícios de energia e minimizando o tempo de parada para manutenção. Como destacado por Scavarda e Baldissarelli (2015), a escolha correta do tipo de caldeira e dos equipamentos auxiliares pode contribuir significativamente para a eficiência energética.

A análise de eficiência energética também envolve a avaliação do ciclo de água da caldeira, que pode ser afetado por fatores como incrustações, corrosão e formação de espuma. Segundo Bonvini e Fontes (2012), a manutenção regular da caldeira e o controle da qualidade da água são importantes para garantir a eficiência energética e prolongar a vida útil dos equipamentos.

### **Biomassa como Fonte de Energia**

A utilização de biomassa como fonte de energia tem se mostrado uma opção viável e sustentável para a geração de energia térmica em caldeiras. Dentre as opções de biomassa, duas das mais utilizadas são o cavaco de madeira e o bagaço de cana. Segundo Silva et al. (2014), o cavaco de madeira é um resíduo da indústria madeireira que pode ser utilizado como combustível em caldeiras, apresentando vantagens como baixo teor de enxofre e alta disponibilidade no mercado. Já o bagaço de cana é um subproduto da indústria sucroenergética e tem grande potencial energético, conforme destacado por Grillo et al. (2018).

A umidade é um fator importante a ser considerado na utilização de biomassa como combustível em caldeiras. De acordo com Gonçalves et al. (2019), a presença de umidade na biomassa pode afetar negativamente a eficiência energética da caldeira, uma vez que parte da energia é utilizada para evaporar a água presente na biomassa. Portanto, é importante realizar a secagem da biomassa antes de utilizá-la como combustível em caldeiras, a fim de reduzir o teor de umidade e aumentar o poder calorífico.

Para a utilização de cavaco de madeira em caldeiras, é necessário realizar um processo de trituração da madeira em pequenos pedaços, de acordo com Cunha et al. (2016).

Já no caso do bagaço de cana, é importante que seja realizada uma limpeza para a retirada de impurezas antes da utilização como combustível, conforme destacado por Almeida et al. (2014).

Além disso, é importante considerar a qualidade da biomassa utilizada como combustível em caldeiras. De acordo com Delgado et al. (2017), a qualidade da biomassa pode afetar a eficiência energética da caldeira, sendo necessário considerar fatores como teor de umidade, poder calorífico e composição química da biomassa.

O teor de umidade da biomassa é um fator importante para a eficiência energética da caldeira. De acordo com Guimaraes et al. (2009), o excesso de umidade na biomassa pode levar a perdas de calor durante a combustão, além de diminuir o poder calorífico da mesma. Portanto, é importante realizar a secagem adequada da biomassa antes de utilizá-la como combustível na caldeira.

O poder calorífico da biomassa é um indicador da quantidade de energia que pode ser gerada pela sua combustão. Segundo Oliveira et al. (2019), o poder calorífico da biomassa do cavaco de madeira é influenciado por fatores como a espécie da madeira, a idade da árvore e as condições de armazenamento da biomassa. Já o poder calorífico do bagaço de cana pode variar de acordo com o teor de umidade da biomassa, bem como o processo de extração do caldo de cana.

A composição química da biomassa também pode afetar a eficiência energética da caldeira. Conforme destacado por Guimaraes et al. (2009), a presença de impurezas como cinzas e outros elementos químicos pode reduzir o poder calorífico da biomassa, além de causar problemas na operação da caldeira, como a obstrução dos dutos de combustão. Por isso, é importante realizar uma análise da composição química da biomassa antes de utilizá-la como combustível.

Além disso, a composição química da biomassa pode influenciar na formação de gases poluentes durante a combustão. Segundo Gómez-Barea e Leckner (2013), a biomassa do bagaço de cana possui um teor significativo de nitrogênio, que pode levar à formação de óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ) durante a combustão. Já a biomassa do cavaco de madeira tende a produzir menos poluentes, como destacado por Oliveira et al. (2019).

## 4 METODOLOGIA

Neste capítulo, serão abordados o funcionamento da caldeira estudada, sua matéria prima e a divisão de estudo.

### Entendendo o Funcionamento da Caldeira

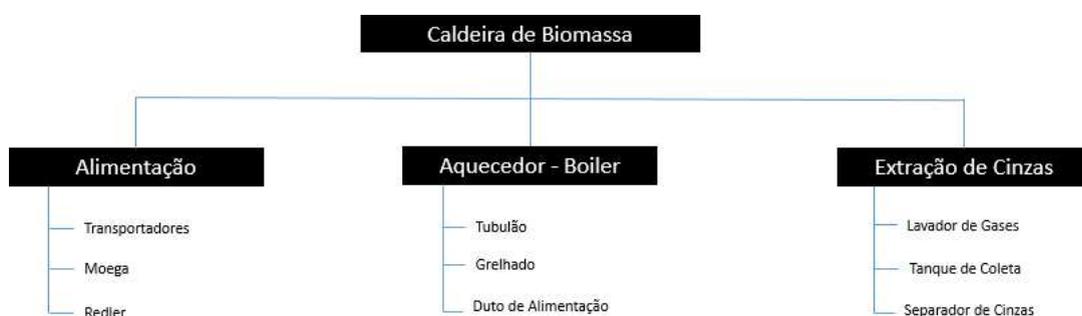
Segundo Perez-Navarro et al. (2020), a umidade da biomassa pode afetar diretamente a eficiência energética da caldeira, já que a água presente no material precisa ser vaporizada antes de iniciar a combustão.

A análise da demanda de vapor é outro fator importante no dimensionamento da caldeira de biomassa. De acordo com Azevedo et al. (2017), a demanda de vapor deve ser avaliada com base na necessidade de produção de cerveja, bem como em outras atividades que exijam o uso de vapor, como a limpeza de equipamentos e a esterilização de embalagens. A análise da demanda pode auxiliar na determinação da capacidade necessária da caldeira e na seleção do tipo mais adequado.

Por fim, a escolha do tipo de caldeira também deve ser avaliada com base nas características da biomassa e da demanda de vapor. Segundo Araújo et al. (2020), as caldeiras de leito fluidizado são bastante utilizadas em indústrias cervejeiras devido à sua flexibilidade em relação aos tipos de biomassa utilizados, além de oferecerem maior eficiência energética em comparação com outros modelos.

A caldeira de biomassa de uma indústria cervejeira, localizada no centro-oeste do país, estudada nesse trabalho é aquatubular e tem a composição representada no diagrama na figura 6, dividida em 3 partes principais, sistema de alimentação, aquecedor-boiler e o sistema de extração de cinzas.

Figura 6: Esquema da caldeira estudada



Fonte: Elaborada pelo autor (2023)

Para esse estudo, considerou-se uma caldeira de biomassa com capacidade de vazão de 22 ton/h de vapor saturado com uma pressão de trabalho de 10 kgf/cm<sup>2</sup> mas por recomendações do fabricante a faixa de operação da caldeira foi definida entre 10 ton/h a 15 ton/h de vapor e pressão entre 8 kgf/cm<sup>2</sup> a 10 kgf/cm<sup>2</sup>, figura 7

Figura 7: Caldeira de Biomassa.



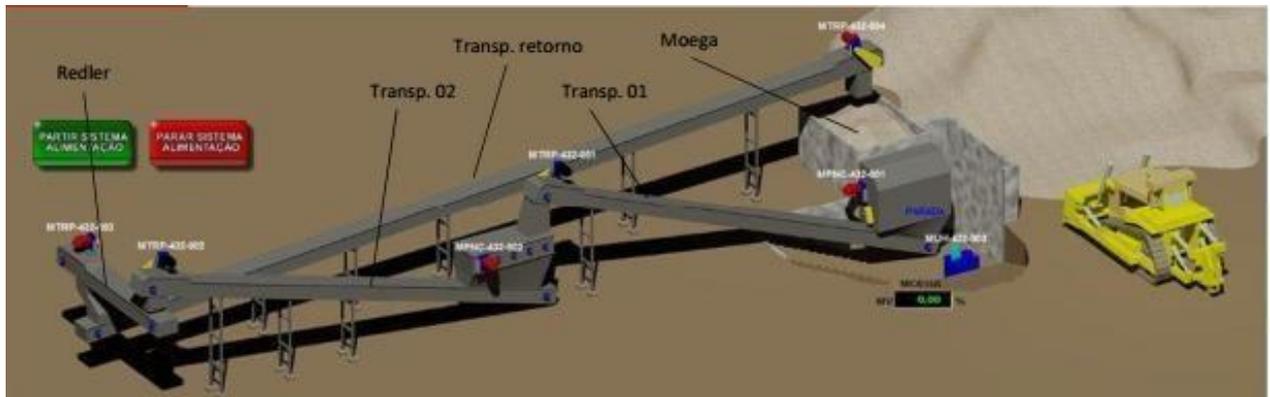
Fonte: Fornecida pela cervejaria estudada (2021)

Assim, para essa caldeira foram escolhidos dois tipos de biomassa como fonte de energia, o cavaco de madeira e o bagaço de cana. Para o cavaco de madeira a recomendação proposta do fornecedor da caldeira é utilizar o material com até 30% de umidade, enquanto o bagaço de cana recomendou-se uma umidade de até 35%. Na prática foram encontrados como matéria prima cavacos em média com 25% a 30% de umidade e bagaços com 50% a 65% de umidade.

Para que o cavaco possa ser utilizado como combustível em um sistema, é necessário que o teor de umidade seja inferior a 30% para que seja possível manter a eficiência de produção. Além da matéria prima e a tecnologia usada para a produção do cavaco influenciarem na sua qualidade (BILLO, 2019).

De acordo com Comin (2010), se a umidade do bagaço de cana variar 1% acarreta em 1% de variação no valor como combustível. Assim, a qualidade do bagaço e sua umidade correspondem aos fatores mais preponderantes. A maioria das caldeiras que usam bagaço de cana como combustível foram projetadas para queimar o bagaço com 50% de umidade, dessa forma se a umidade do bagaço for maior do que esse valor esperado ele não seca e não queima em suspensão, além de acumular na grelha.

Figura 8: Esquema do Sistema de Alimentação



Fonte: Fornecida pela cervejaria estudada (2021)

O sistema de transporte de uma caldeira de biomassa, demonstrado na figura 8, é responsável por alimentar a caldeira com o combustível necessário para a geração de vapor. De acordo com Camargo et al. (2018), pode ser dividido em duas partes principais: o sistema de armazenamento e o sistema de alimentação.

O sistema de armazenamento tem como objetivo garantir a disponibilidade de biomassa para alimentação da caldeira, mesmo em períodos de escassez ou indisponibilidade do material. Esse sistema pode ser composto por silos ou tanques, que armazenam a biomassa em quantidades suficientes para suprir a demanda da caldeira por um determinado período de tempo.

Já o sistema de alimentação é responsável por transportar a biomassa do sistema de armazenamento até a caldeira, de forma controlada e segura. Esse sistema pode ser composto por rosca transportadora, esteira transportadora, alimentadores pneumáticos ou hidráulicos, entre outros dispositivos.

Além disso, é importante destacar que a escolha do sistema de transporte adequado pode impactar diretamente na eficiência energética e na segurança do processo produtivo. Conforme mencionado por Camargo et al. (2018), esse sistema deve ser dimensionado de forma a garantir a alimentação contínua da caldeira, sem causar obstruções ou interrupções no fluxo de biomassa. Nele foi realizado todo o estudo e especificação da correia transportadora utilizada com um tempo de vida estimado de 5 anos para as condições de operações da caldeira.

O sistema de extração de cinzas é responsável por remover as cinzas geradas durante o processo de combustão da biomassa. De acordo com Santos e Oliveira (2014), a remoção eficiente das cinzas é importante para garantir o bom funcionamento da caldeira,

evitando obstruções e danos ao equipamento.

O sistema de extração de cinzas pode ser dividido em dois tipos principais: sistemas de extração por gravidade e sistemas de extração mecânica. No sistema de extração por gravidade, as cinzas são removidas da caldeira por meio da força da gravidade, sendo direcionadas para um depósito externo. Já no sistema de extração mecânica, as cinzas são removidas por meio de dispositivos mecânicos, como rosca transportadora ou transportador de correia.

Esse sistema é composto por um extrator de cinzas, um tanque de coleta de cinzas e descarga de fundo, um lavador de gases e um multi-ciclone como mostra a figura a seguir.

Figura 9: Sistema de Extração de cinzas



Fonte: Fornecida pela cervejaria estudada (2021)

Assim, foi possível observar o funcionamento da caldeira de biomassa em uma indústria cervejeira, abordando detalhes sobre o dimensionamento adequado do equipamento. Serão analisados os processos de combustão da biomassa e a geração de energia térmica para o processo produtivo da indústria, além da importância da escolha adequada do sistema de transporte e extração de cinzas para garantir a eficiência energética e a segurança do processo.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

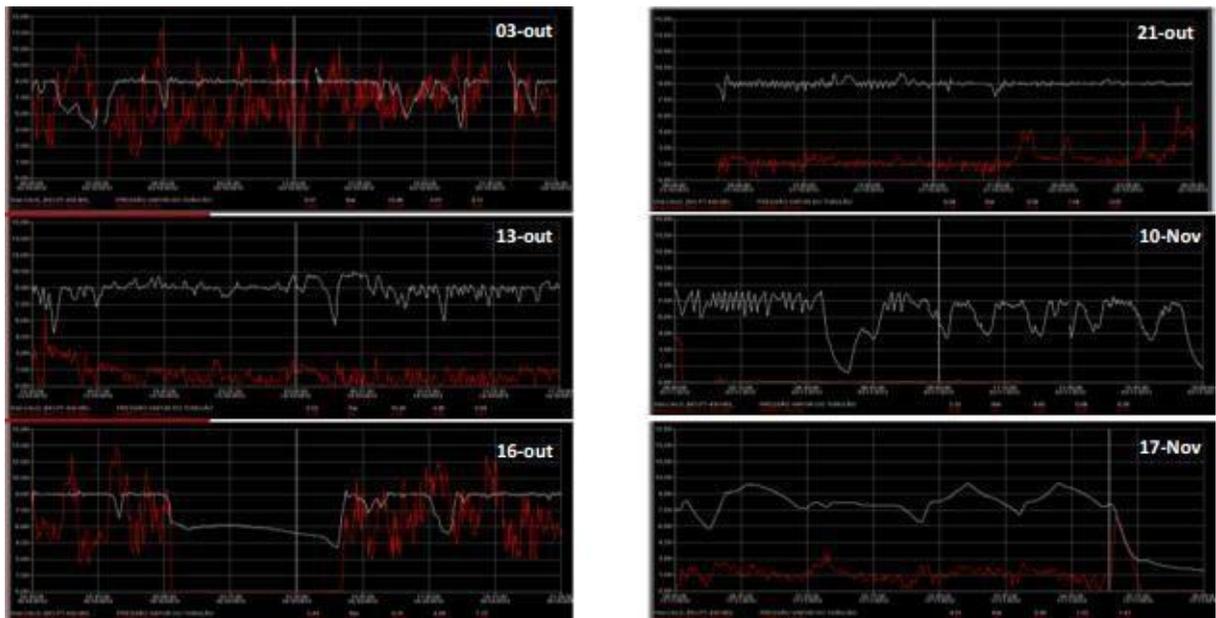
Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos durante o funcionamento da caldeira de biomassa na indústria cervejeira, bem como os impactos e consequências decorrentes desse processo.

### Histórico de Operação

Durante um período de estudo de 45 dias, foi possível observar na figura 10 que o fornecimento de vapor estava abaixo do nível recomendado pelo fabricante.

A imagem representa a pressão de trabalho em  $\text{kgf/cm}^2$ , linha branca, e o fornecimento de vapor em  $\text{ton/h}$ , linha vermelha. Foi notado que em apenas 17% do tempo o equipamento trabalha dentro da vazão de vapor recomenda que é em torno de 10  $\text{ton/h}$ . Ficando 38% do tempo entre 5  $\text{ton/h}$  a 10  $\text{ton/h}$ . E os outros 45% do tempo, o vapor ficou abaixo de 5  $\text{ton/h}$ .

Figura 10: Fornecimento de Vapor



Fonte: Fornecida pela cervejaria estudada (2021)

A observação de que a caldeira de biomassa trabalha dentro da vazão de vapor recomendada em apenas 17% do tempo indica que há uma baixa eficiência na operação do equipamento. Isso pode estar relacionado a vários fatores que vão ser relatados a seguir, como problemas na alimentação de biomassa, falhas mecânicas na caldeira, limitações de

capacidade, entre outros.

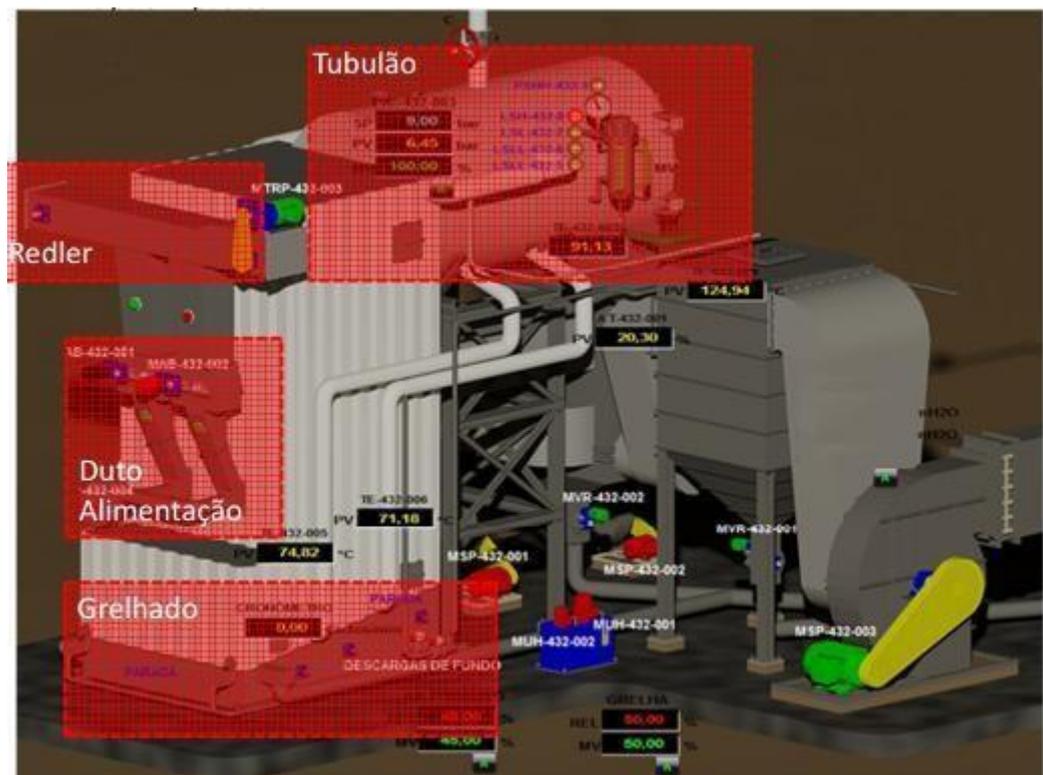
O fato de que 38% do tempo a caldeira opera entre 5 ton/h e 10 ton/h indica que, em alguns momentos, a caldeira é capaz de atingir a vazão de vapor recomendada, mas ainda assim fica aquém da capacidade máxima. Isso pode sugerir a necessidade de ajustes na operação da caldeira ou até mesmo a realização de melhorias na infraestrutura da instalação.

Os outros 45% do tempo em que o vapor ficou abaixo de 5 ton/h indicam que a caldeira não está sendo capaz de atender à demanda da instalação cervejeira em muitos momentos. O que pode afetar a produtividade da indústria e levar a perdas financeiras significativas.

### Aquecedor - Boiler

É importante falar dos impactos encontrados da caldeira estudada. Na imagem 11 a seguir podemos ver melhor a composição do aquecedor-boiler, que é composto por: tubulão, transportador redler, duto de alimentação e grelhado.

Figura 11: Impactos no Aquecedor-Boiler

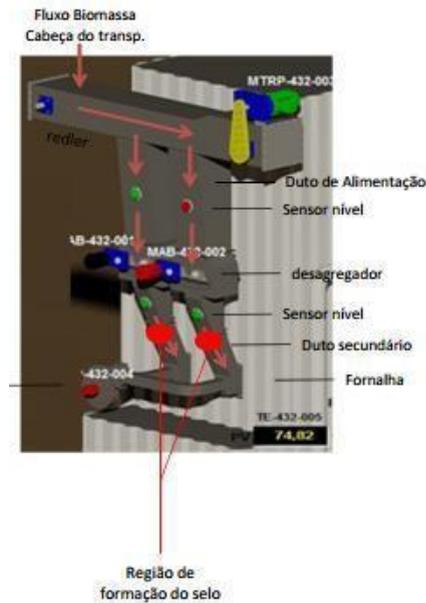


Fonte: Fornecida pela cervejaria estudada (2021)

### • *Duto de Alimentação / Redler*

Seguindo o fluxo da biomassa entre o transportador redler e duto de alimentação, figura 12, foi notado que devido ao baixo consumo de vapor não ocorreu a formação do selo de biomassa, pois foi necessário a diminuição constante do volume de biomassa dosado dentro da fornalha. Com isso não foi possível selar a saída de calor da fornalha para os dutos de alimentação, uma vez que o projeto foi concebido para a faixa de trabalho de vapor de 10 a 15 ton/h.

Figura 12: Esquema Duto de Alimentação/Redler



Fonte: Fornecida pela cervejaria estudada (2021)

Consequentemente, a perda térmica ocasionada pela dissipação de calor acarreta na entrada de ar ambiente frio na câmara de combustão, ocasionando uma série de problemas adicionais. Foi possível notar o superaquecimento dos dutos secundários e dos transportadores de alimentação redler e retorno. Isso porque quando a operação ocorre abaixo do recomendado ocorre uma passagem de calor direto através de redler, gerando o aquecimento e estiramento das correias, devido a temperaturas aproximadas de 80°C nos transportadores. Ocorreu também uma condensação na correia, o que agravou a questão do escorregamento da correia durante o seu tracionamento, sendo esse um dos fatores para sua quebra.

### • *Duto de Alimentação / Grelhado*

Nessa seção, foi visto que na queima do bagaço de cana quando se tem uma queda na vazão de vapor para abaixo de 7 ton/h acontece uma transferência de material particulado não queimado para o sistema de extração de cinzas, devido à baixa eficiência de queima. Além de que foi possível notar a diminuição da pressão interna da câmara da fornalha e a variação da temperatura devido a não formação do selo, por consequência temos a quebra do cimento de isolamento da caldeira, que sai juntamente com as cinzas.

Como consequência, é necessário um volume superior de biomassa para operação. Assim, quando temos a maior permanência de combustível dentro da câmara em função de volume de vapor, temos a formação de pedras de sílicas. O que ocasiona a parada da caldeira para limpeza da caldeira e extração das pedras.

### • *Tubulão*

Com o consumo de vapor abaixo do esperado e a geração de material não queimado existe a possibilidade de incrustação de material nos dutos do tubulão, possibilitado o seu entupimento. Assim, foi necessário como medidas iniciais a abertura do tubulão, representado na figura 13, para ser inspecionado seu nível de sujeidade e deverá ser estabelecida uma frequência de limpeza, que será relacionada diretamente ao volume de vapor produzido.

Figura 13: Tubulão



Fonte: Fornecida pela cervejaria estudada (2021)

## **Transportadores**

Nos transportadores foi observado o desgaste prematuro e quebra das correias antes do tempo previsto, visto que no estudo realizado o tempo de vida da correia para as condições de operação seria de 5 anos. Foi realizado o acompanhamento e feita a análise dos rompimentos ocorrido e percebeu-se que os mesmos se dão em função da fricção do rolete de tração sobre a superfície da correia.

Após algumas inspeções, foi visto que o problema citado anteriormente pode ter causas fatores tais quais: o aumento do comprimento da correia em função do calor; condensação ou umidade no rolo de tração; acúmulo de material entre a correia e os rolos de tração; desgaste excessivo devido a deslizamentos anteriores; e o não monitoramento e tensionamento da correia de forma rotineira e controlada.

## **Extração de Cinzas**

No sistema de extração de cinzas foi notado uma baixa eficiência na queima da biomassa e geração de particulado em excesso devido a vibração brusca do consumo de vapor. Esse material particulado sólido é transferido para o multi-ciclone e por sua vez atravessando para o taque de coleta juntamente com ar frio dentro da fornalha. Isso ocasiona problemas como: geração de material particulado não queimado; o entupimento dos dutos de drenagem de cinzas; a não eficiência do extrator de cinzas; necessidade da retirada manual do material não queimado no taque de coleta; transbordamento do tanque de coleta em função do número elevado de descargas de fundo da caldeira; o consumo maior de químicos para tratamento da água da caldeira; e o impacto a estação de tratamentos de efluentes.

## 6 CONCLUSÃO

Diante das análises realizadas no sistema de queima de biomassa em uma caldeira, é possível identificar diversos problemas que afetavam o desempenho e eficiência do equipamento. Observou-se que o baixo consumo de vapor resulta em problemas como o superaquecimento dos dutos e transportadores, além da formação de pedras de sílicas que podem causar entupimento dos dutos e interrupção da operação para limpeza. Além disso, a baixa eficiência de queima de biomassa gera material particulado não queimado, que acarreta em entupimentos e transbordamentos no sistema de extração de cinzas, aumentando o consumo de químicos para tratamento da água da caldeira e impactando a estação de tratamento de efluentes.

Para solucionar esses problemas, foram implementadas medidas preventivas e corretivas que possam garantir a eficiência do sistema. Dentre as ações preventivas, destacam-se a realização de inspeções rotineiras nos transportadores e dutos, o estabelecimento de frequência de limpeza do tubulão relacionada diretamente ao volume de vapor produzido e o monitoramento e tensionamento da correia de forma controlada. Já as ações corretivas incluem a retirada manual do material não queimado no taque de coleta, a limpeza da caldeira e a substituição das correias desgastadas.

Por fim, é importante destacar a necessidade de um planejamento adequado do sistema de queima de biomassa, considerando a faixa de trabalho de vapor, a fim de evitar problemas como os descritos anteriormente. É fundamental que o sistema seja projetado e operado dentro dos limites recomendados pelos fabricantes, garantindo a eficiência do processo e a segurança operacional. Como um ponto de aprimoramento, deve-se buscar uma forma mais concisa de relatar os acontecimentos do equipamento, buscando enriquecer as informações, além da necessidade da elaboração de um manual de boas práticas para o funcionamento da caldeira.

## REFERÊNCIAS

- ANDRADE, F.; SILVA, R.; SANTOS, L. **Estudo de controle de emissões de gases poluentes em caldeiras a biomassa.** In: Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2019, Natal. Anais do Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2019. p. 1-8.
- ARAÚJO, S.; OLIVEIRA, T.; SILVA, M.; SANTOS, L. (2018). **Utilização de caldeiras de biomassa como alternativa para produção de energia renovável.** In Anais do Congresso Brasileiro de Energia Solar (Vol. 10, No. 1, pp. 123-130).
- ATKINS, P. W. **The second law.** *Scientific American*, v. 278, n. 2, p. 50-55, 1998.
- BARROSO, J. M.; LEAL, G. S. **Biomass combustion in small-scale boilers: A review of modelling approaches.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 82, p. 2348-2369, 2018.
- BATISTA, J. S. **Treinamento de Operadores de Caldeiras: Um Estudo de Caso em uma Indústria de Papel.** *Revista Eletrônica Científica do CRA-PR*, v. 1, n. 1, p. 26-43, 2013
- BAZZO, E.; PEREIRA, L. T. **Manual de Aquecimento Global.** 2ª edição. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2012.
- BOTELHO, Manoel Henrique Campos; BIFANO, Hercules Marcelo. **Operação de caldeiras: Gerenciamento, controle e manutenção.** 2. ed. São Paulo: Blucher, 2015.
- CALLEN, H. B. **Termodinâmica e introdução à termostática.** Rio de Janeiro: LTC, 1998.
- CARVALHO, M. **Tecnologias de combustão de biomassa em caldeiras: vantagens e desvantagens.** *Revista de Energia e Meio Ambiente*, v. 6, n. 1, p. 54-71, 2018.
- CASTRO, A. R.; SILVA, V. C.; ZILLI, R. C. (2017). **Eficiência energética em caldeiras a biomassa.** *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, 6(1), 1-18.
- CENGEL, Y. A; BOLES, M. A. **Thermodynamics: An Engineering Approach.** 7ª ed. New York: McGraw-Hill Education, 2012.
- CHAUHAN, R. K.; JOSHI, J. B. (2014). **Design and development of a novel 22 kW th moving bed biomass combustor.** *Fuel Processing Technology*, 127, 9-20.
- CHEN, Q.; LIU, Z.; & CHEN, Y. (2019). **Biomass energy utilization in China: Status, problems, and countermeasures.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 103, 23-35.
- FERREIRA, T. A.; BELCHIOR, C. R. P.; DE SOUZA, S. N. M. (2020). **Design of a biomass-fired boiler for a steam turbine power plant.** *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, 43(1), 1-8.
- GOMES, C. A. **Biomassa: uma opção viável e sustentável para produção de energia.** *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, v. 9, n. 1, p. 25-31, 2019.

GÓMEZ-BAREA, A.; LECKNER, B. (2013). **Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies.** Fuel Processing Technology, 106, 72-80.

GUIMARÃES, J. R. (2009). **Biomassa: fundamentos, tecnologia e aplicações.** 1<sup>a</sup> ed. São Paulo: Editora LTC.

GUIMARÃES, F. C.; OLIVEIRA, T. F. S.; FARIAS, T. L. (2009). **Análise da utilização da biomassa como fonte de energia na indústria.** Revista Brasileira de Energia, 15(1), 1-10.

GUIMARAES, R. A.; FREITAS, M. B.; GOMIDE, R. (2009). **Cinzas de biomassa: produção, caracterização e utilização em concreto.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 13(6), 815-822.

KAMBO, H. S.; DUTTA, A.; RAY, A. K. (2017). **Biomass gasification: A review of its technology and current status.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, 71, 11-27.

LEAL, A. P. **Uma breve revisão da evolução das caldeiras.** In: Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 52., 2018, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: ABCM, 2018. p. 1-10.

LEITE, L. D.; CARVALHO, D. L.; SOUSA, A. L.; LIMA, S. L.; OLIVEIRA, M. J. (2018). **Avaliação da eficiência de sistemas de lavagem de gases em caldeiras de biomassa.** In Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (pp. 1-8).

MORAN, M.J.; SHAPIRO, H.N. **Fundamentals of Engineering Thermodynamics.** 5<sup>a</sup> ed. New York: John Wiley & Sons, 2007.

MORAES, F. **Estudo comparativo de caldeiras a biomassa e a gás natural para a geração de vapor em uma indústria de alimentos.** Revista Brasileira de Energias Renováveis, v. 6, n. 1, p. 110-123, 2017.

**NR-13 - Caldeiras, vasos de pressão e tubulações: norma regulamentadora nº 13, Segurança na Operação e Manutenção de Caldeiras, Vasos de Pressão e Tubulações de Qualquer Natureza.** Brasília, DF: Ministério do Trabalho e Emprego, 2017

OLIVEIRA, L. C. (2019). **Avaliação do poder calorífico superior da biomassa residual do cavaco de madeira.** Revista Energia na Agricultura, 34(4), 338-343.

OLIVEIRA, L. R.; QUEIROZ, J. T.; FERREIRA, A. R.; SOUZA, C. M. (2019). **Reutilização de cinzas de biomassa na construção civil.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 23(2), 121-128.

OLIVEIRA, T. F. S.; GUIMARÃES, F. C.; FARIAS, T. L. (2019). **Análise da viabilidade técnica e econômica do uso de biomassa como fonte energética em uma indústria de alimentos.** Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, 23(1), 126-134.

PANG, Y.; ZHU, X.; ZHANG, J.; CHEN, H.; LU, Y. (2020). **Energy and exergy analysis of a brewery industry using biomass steam boiler.** Journal of Cleaner Production, 242, 118473.

- PINTO, J. R. B. **Dimensionamento de caldeiras flamotubulares para queima de biomassa. Dissertação** (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2014.
- RANGEL, M. A. **Inspeção em Vasos de Pressão e Caldeiras**. São Paulo: Interciência, 2008.
- REZENDE, F. A. P. **Qualidade da biomassa utilizada em caldeiras para geração de vapor: estudo de caso em uma indústria de celulose e papel**. *Ciência Florestal*, v. 29, n. 2, p. 580-592, 2019.
- ROCHA, L. A.; SOUZA, L. A.; RIBEIRO, P. R. (2019). **Manutenção preventiva de caldeiras de biomassa em uma indústria madeireira**. *Revista Ciência e Tecnologia em Saúde*, 6(2), 47-56.
- SALLES, J. R. A. **Controle de emissões em caldeiras de biomassa: tecnologias e tendências**. *Revista Eletrônica de Engenharia Civil*, v. 20, n. 2, p. 137-148, 2020.
- SILVA, J. et al. **Caldeiras aquatubulares, flamotubulares e mistas: vantagens e desvantagens de cada tipo**. *Revista de Engenharia Térmica*, v. 17, n. 1, p. 28-35, 2018.
- SILVA, R. F.; MAIA, J. P.; RIBEIRO, C. S. S.; DELFINO, J. A. (2021). **Evaluation of a biomass-fired boiler using thermoeconomic analysis**. *Renewable Energy*, 166, 1206-1218.
- SMITH, J. M.; VAN NESS, H. C. **Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics**. 5<sup>a</sup> ed. New York: McGraw-Hill, 1996.
- SODRÉ, J. R. (2008). **Tratamento de água de alimentação de caldeiras: remoção de sílica por precipitação**. *Química Nova*, 31(3), 509-515.
- SODRÉ, P. **Eficiência energética e redução de emissões em caldeiras mistas**. Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 2015, São Paulo. Anais. São Paulo: ABCM, 2015.
- TORRES, A. S.; CERQUEIRA, P. H. R. (2019). **Estudo de caso sobre o uso de biomassa na geração de energia em uma indústria de papel e celulose**. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, 8(2), 115-129.
- VAN NESS, H. C.; ABBOTT, M. M.; GIBBS, B. M. F. **Termodinâmica Clássica de Soluções**. Rio de Janeiro: LTC, 1996.
- VARGAS, J. V. C.; FONTENELE, R. G.; SOUSA, F. M. L. G.; FERREIRA, R. T. S. (2017). **Modeling and simulation of a biomass-fired boiler for control and optimization**. *Energy Conversion and Management*, 143, 62-70.
- VARGAS, V. M.; OLIVEIRA, L. P. V.; ZAMBONI, A. (2020). **Análise dos custos de produção de energia elétrica a partir de biomassa em uma usina termelétrica no norte do Brasil**. *Cadernos de Engenharia de Biomassa e Meio Ambiente*, 9(3), 113-128.
- YIN, X.; LI, B.; LI, Y.; LI, J.; WANG, Z.; LI, R. (2021). **Overview of biomass energy development in China: Status quo, challenges and countermeasures**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110211.

ZHANG, J.; CHEN, H.; LU, Y. (2020). **Greenhouse gas emissions mitigation of biomass power generation industry in China: A comprehensive evaluation.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 118, 109532.