

**MARLONS LINO DA CRUZ**

**ESTUDO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UMA CALDEIRA  
FLAMOTUBULAR EM UMA INDÚSTRIA DE LATICÍNIOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Antônio Marcos de Oliveira Siqueira

Coorientador: Júlio César Costa Campos

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2022**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

C957e  
2022

Cruz, Marlons Lino da, 1993-  
Estudo da eficiência energética de uma caldeira  
flamotubular em uma indústria de laticínios / Marlons Lino da  
Cruz. – Viçosa, MG, 2022.

1 dissertação eletrônica (60 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Antônio Marcos de Oliveira Siqueira.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,  
Departamento de Química, 2022.

Referências bibliográficas: f.57-60.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2022.164>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Energia - Fontes alternativas. 2. Caldeiras. 3. Eficiência.  
4. Modelos matemáticos. I. Siqueira, Antônio Marcos de  
Oliveira, 1969-. II. Universidade Federal de Viçosa.  
Departamento de Química. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Química. III. Título.

CDD 22. ed. 333.79

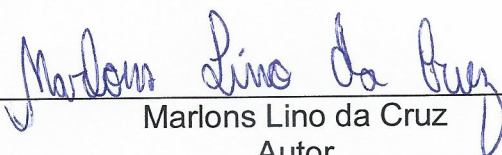
**MARLONS LINO DA CRUZ**


**ESTUDO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UMA CALDEIRA  
FLAMOTUBULAR EM UMA INDÚSTRIA DE LATICÍNIOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 02 de fevereiro de 2022.

Assentimento:

  
\_\_\_\_\_  
Marlons Lino da Cruz  
Autor

  
\_\_\_\_\_  
Antônio Marcos de Oliveira Siqueira  
Orientador

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus pela vida, saúde, esposa e familiares, por ter tomado os caminhos na minha vida e ter criado esse e ter me ajudado em todas as etapas desse curso de mestrado, realizando um sonho.

Agradeço minha esposa, por sempre ter me apoiado, incentivado e ter me ajudado a chegar até aqui, por ter acreditado que esse sonho pudesse ser realizado.

Agradeço aos meus pais, irmã, sogros e cunhados pelo apoio, incentivo e presença nessa etapa da minha vida.

Agradeço aos meus amigos e colegas que contribuíram e acrescentaram positivamente à minha formação humana e acadêmica.

Agradeço à Universidade Federal de Viçosa – UFV e ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Química – PPGEnq por ter me dado a oportunidade de conhecer profissionais dos mais altos níveis de acadêmicos, ter acesso às instalações da Universidade e ter acrescentado riquíssimos conhecimentos a mim.

Agradeço ao meu orientador e coorientador que não pouparam esforços pra me ajudar a chegar até aqui, pela dedicação independentemente do dia da semana e de horário. Aos senhores, meus agradecimentos especiais.

Agradeço ao coordenador do programa, demais professores e técnicos, e todos dos demais profissionais do DEQ por também ter contribuído consideravelmente para minha formação.

Agradeço aos meus ex-professores da graduação que desde esta época me direcionaram e me impulsionaram a cursar pós graduação stricto sensu.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, pelo apoio financeiro.

*“O Senhor é meu Pastor; nada me faltará”*

(Salmos 23: 1)

## RESUMO

CRUZ, Marlons Lino, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro, 2022. **Estudo da eficiência energética de uma caldeira flamotubular em uma indústria de laticínios**. Orientador: Antônio Marcos de Oliveira Siqueira. Coorientador: Júlio César Costa Campos.

O presente trabalho teve como base leituras de trabalhos científicos, apresentando as fontes renováveis e não renováveis de energia, da matriz energética brasileira. Aponta também a hidrelétrica como energia mais utilizada no país e a solar como a menos utilizada, a definição e caracterização de biomassa e os resíduos gerados da combustão da biomassa, assim como suas quatro fases, sendo ignição, secagem, pirólise e combustão do resíduo carbono. Além disso, também são apresentadas a caracterização e classificação dos tipos de caldeiras, quanto às classes de pressão, ao grau de automatização, a energia utilizada para o aquecimento, mobilidade, posição do costado ou corpo, e de acordo com a troca térmica. Em específico, foi feita uma análise da caldeira flamotubular horizontal, com ante fornalha e grelha aquatubular, de categoria B, movida a combustível sólido (toras de madeira). Essa caldeira possui capacidade de produção de 0,69 kgV/s, Pressão Máxima de Trabalho Admissível (PMTA) de 833,56 kPa e Pressão de teste Hidrostático (PTH) de 1.250,34 kPa e está instalada em uma fábrica de laticínios situada na cidade de São Geraldo – MG. Esse trabalho tem como objetivo principal estudo da eficiência térmica, levando em consideração os métodos diretos e indiretos, de propostas de melhoria dessa eficiência e uma apresentação dos procedimentos de operação e manutenção desse equipamento. No decorrer do trabalho foram investigados e analisados os dados técnicos desse equipamento, do combustível, além dos impactos ambientais causados pela queima desse combustível e de parâmetros que interferem na eficiência térmica da caldeira. Após o estudo, concluiu-se que rendimento térmico de 74,65%, ou seja, houve uma perda de 25,35%, referentes a 11,18% dos gases secos de combustão, 5,50% dos gases úmidos de combustão, 4,30 da umidade do combustível, 4,00% por radiação de convecção, 0,25% pela umidade do ar de alimentação, 0,08% pela queima incompleta do combustível e 0,04% pelas cinzas não queimadas.

Na referência do resumo, utiliza-se espaçamento simples e para o resumo recomenda-se o uso de parágrafo único e espaçamento 1,5 entre as linhas. Deve-se usar o verbo na voz ativa e na terceira pessoal do singular. A extensão deve ser de 150 a 500 palavras.

Palavras-chave: Caldeira flamotubular. Método direto. Método das perdas. Eficiência. Modelagem matemática.

## ABSTRACT

CRUZ, Marlons Lino, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2022. **Study the energy efficiency of a fire-tube boiler in a dairy industry.** Adviser: Antônio Marcos de Oliveira Siqueira. Co-adviser: Júlio César Costa Campos.

The present work was based on readings of scientific works, presenting renewable and non-renewable energy sources, of the Brazilian energy matrix. Also points out the hydroelectric as the most used energy in the country and solar as the least used, the definition and characterization of biomass and the residues generated from the combustion of biomass as well as its four phases, being ignition, drying, pyrolysis and combustion of carbon waste. In addition, the characterization and classification of the types of boilers are also presented, as for the pressure classes, the degree of automation, the energy used for heating, mobility, position of the side or body, and according to the thermal exchange. In particular, an analysis was made of the horizontal flamotubular boiler, with furnace and aquatubular grid, category B, powered by solid fuel (wood logs). This boiler has a production capacity of 0,69 kgV / hour, Maximum Allowable Working Pressure (PMTA) of 833,56 kPa and Hydrostatic Test Pressure (PTH) of 1.250,34 kPa and is installed in a dairy factory located in the city of São Geraldo – MG. This work its main objective is the study of thermal efficiency, taking into account the direct and indirect methods, proposals to improve this efficiency and a presentation of the operation and maintenance procedures for this equipment. During the work, technical data of this equipment, the fuel, and the environmental impacts caused by the burning of this fuel were noted and analyzed, and parameters that interfere with the thermal efficiency of the boiler were studied. After the study, it was concluded that the thermal efficiency of 74.65%, that is, there was a loss of 25.35%, referring to 11.18% of the dry combustion gases, 5.50% of the humid combustion gases, 4.30 for fuel moisture, 4.00% for convection radiation, 0.25% for feed air moisture, 0.08% for incomplete fuel combustion and 0.04% for unburned ash.

Keywords: Flamotubular boiler. Direct method. Loss method. Efficiency. Mathematical modeling.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte.....	19
Figura 2 – Analisador de Orsat.....	24
Figura 3 – Cromatógrafo a gás.....	25
Figura 4 – Analisador de gases infravermelho .....	25
Figura 5 – Detector de ionização de chama.....	25
Figura 7 – Classificação das caldeiras .....	32
Figura 8 – Casa da caldeira do Laticínios Lindo Vale São Geraldense.....	35
Figura 9 – Mapa da região da cidade de São Geraldo.....	36
Figura 10 – Produtos do Laticínios Lindo Vale São Geraldense .....	36
Figura 11 – Vista lateral da caldeira do Laticínios Lindo Vale São Geraldense .....	36
Figura 12 – Placa de identificação da caldeira .....	37
Figura 13 – Vista da ante fornalha da caldeira do Laticínios Lindo Vale São Geraldense.....	40
Figura 14 – Ante fornalha com grelha aquatubular .....	41
Figura 15 – Vista do corpo da caldeira do Laticínios Lindo Vale São Geraldense ....	41
Figura 16 – Abrandador .....	42
Figura 17 – Manômetro de saída de vapor .....	42
Figura 18 – Saída das cinzas resultantes da queima do combustível na ante fornalha .....	43
Figura 19 – Saída dos gases resultantes da combustão da biomassa .....	43
Figura 20 – Reservatório de água de alimentação da caldeira .....	46
Figura 21 – Tratamento de água de alimentação da caldeira .....	46
Figura 22 – Consumo diário de combustível .....	47

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais fontes de emissões poluentes na combustão da biomassa ....	21
Tabela 2 – Resíduos de biomassa produzidos diretamente das atividades florestal e agrícola .....	26
Tabela 3 – Composição Setorial do Consumo Final de Biomassa .....	27
Tabela 4 – Características da caldeira em estudo .....	38
Tabela 5 – Características do combustível .....	39
Tabela 6 – Parâmetros de operação da instalação .....	39
Tabela 7 – Características dos gases resultantes da combustão .....	49
Tabela 8 – Quantidades Usuais de Excesso de ar.....	53
Tabela 9 – Resultados obtidos através do cálculo de rendimento térmico pelo método indireto.....	55

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANA	Agência Nacional das Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEM	Balanço Energético Nacional
BTU	British Thermal Unit. – Unidade Térmica Britânica
ENIT	Escola Nacional da Inspeção do Trabalho
GLP	Gás liquefeito de Petróleo
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
NR	Norma Regulamentadora
PC	Poder Calorífico do Combustível
PMTA	Pressão Máxima de Trabalho Admissível
PTH	Pressão de Teste Hidrostático

## LISTA DE SÍMBOLOS

$G$	Aceleração da gravidade
$c_{Pa}$	Calor específico da água no estado líquido, em kJ/kg °C
$c_{pi}$	Calor específico médio entre as temperaturas TCH e T <sub>Ref.</sub> em kJ/kg.°C
$c_{pv}$	Calor específico médio do vapor entre TCH e T <sub>Ref</sub> em kJ/kg °C
$v''_i$	Coefficientes estequiométricos dos produtos
$v'_i$	Coefficientes estequiométricos dos reagentes
$Z_e$	Cota do fluxo mássico na entrada do volume de controle
$Z_s$	Cota do fluxo mássico na saída do volume de controle (m)
$\lambda$	Coefficiente de excesso de ar na combustão, relacionando o ar real que foi fornecido como o ar teórico que o combustível requereu
$n_{MD}$	Eficiência através do método direto
$n_{MI}$	Eficiência através do método indireto
$h_a$	Entalpia de água de entrada (kJ/kg)
$h_v$	Entalpia do vapor produzido (kJ/kg)
$h_e$	Entalpia específica na entrada do volume de controle
$h_s$	Entalpia específica na saída do volume de controle
$i$	Espécies químicas
$\dot{Q}_{v.c.}$	Fluxo de calor ao volume de controle
$m_i$	Massa do componente $i$ formado na combustão, em kg/kg de combustível
$m_{air}$	Massa do ar
$m_{fuel}$	Massa do combustível
$m_R$	Massa de cinza obtida pela massa de combustível em kg/kg de combustível
$m_C$	Massa do carbono presente nas cinzas, em kg/kg de combustível
$M_i$	Moléculas das espécies químicas
$N$	Número total de componentes envolvidos
$P_{TC}$	Perdas pelas cinzas que saem do equipamento
$P_{GS}$	Perdas por chaminé associadas a gases secos
$P_v$	Perdas por chaminé associadas ao vapor presente na chaminé
$P_p$	Perdas por purgas
$P_{CC}$	Perdas presente nas cinzas, em kg/kg de combustível
$MW_{air}$	Peso molecular do ar

$MW_{\text{fuel}}$	Peso molecular do combustível
PC	Poder calorífico do combustível (kJ/kg)
$\dot{W}_{v.c.}$	Potência mecânica ou elétrica transferida ao volume de controle
$\phi$	Razão de equivalência
K	Somatória de todas as perdas citadas anteriormente;
$\frac{dE_{vc}}{dt}$	Taxa de variação das energias interna, cinética e potencial com o tempo
$\dot{E}_e - \dot{E}_s$	Taxa líquida de entrada de energia por calor, trabalho e fluxo de massa
$T_R$	Temperatura de referência adotada, em °C
$T_p$	Temperatura de saturação da água na pressão da caldeira, em °C
$T_{CH}$	Temperatura dos gases na chaminé, em °C
tep	Tonelada equivalente de petróleo
$\dot{m}_c$	Vazão mássica de combustível (kg/s)
$\dot{m}_v$	Vazão mássica de vapor (kg/s)
$m'_v$	Vazão mássica de vapor formado na combustão e presente no
$m_p$	Vazão mássica total de vapor em kg/kg de combustível combustível em kg/kg de combustível
$m_p$	Vazão média de água purgada em kg/kg de combustível
$V_e$	Velocidade do fluxo de massa na entrada do volume de controle
$V_s$	Velocidade do fluxo de massa na saída do volume de controle

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	14
2. REVISÃO DE LITERATURA .....	16
2.1 FONTE DE ENERGIA.....	16
2.2 MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA .....	17
2.3 BIOMASSA .....	19
2.4 EMISSÕES .....	26
2.5 CALDEIRAS.....	29
2.5.1 Classificação das caldeiras.....	31
2.5.2 Operação e Manutenção de Caldeiras .....	33
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	34
3.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE GERAÇÃO DE VAPOR.....	34
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	44
4.1 OPERAÇÃO DA CALDEIRA EM ESTUDO.....	44
4.2 EFICIÊNCIA TÉRMICA.....	47
5. CONCLUSÕES .....	55
REFERÊNCIAS.....	57

## 1. INTRODUÇÃO

O crescente desenvolvimento tecnológico se dá através das crescentes necessidades humanas por saúde, alimentação, segurança, participação de grupos sociais, educação, crescimento pessoal, profissional, lazer, dentre outros, o que impulsiona o mercado a aumentar a oferta de produtos e serviços que atendam a essa demanda. Os consumidores, cada vez mais exigentes, estão à procura desses produtos e serviços com baixo custo, alta qualidade, com entrega no mínimo prazo possível, com serviços de assistência técnica de qualidade e rapidez e que sejam atendidos da melhor forma possível. Em resposta a essas necessidades e exigências, com o objetivo de superar as expectativas dos consumidores, as empresas se especializam cada vez mais, o que faz com que haja uma quantidade dessas empresas, o que contribui para a alta concorrência do mercado.

Para atender a essas novas demandas, as fábricas também precisam se adaptar a esse novo cenário socioeconômico, aumentando a produção, conseqüentemente, aumentando a poluição ambiental. Houve então uma preocupação com a preservação do meio ambiente através da diminuição dos impactos ambientais negativos e aumento dos positivos, criando leis e normas que controlam as fábricas nesse sentido ambiental. As principais leis são a Lei da Política Nacional do Meio Ambiente – nº 6.938 de 17/01/1981, a Lei dos Crimes Ambientais – nº 9.605 de 12/02/1998, a Lei da Política Nacional de Resíduos Sólidos – nº 12.365 de 02/08/2010, a Lei de Recursos Hídricos – nº 9.433 de 08/01/1997, a Lei dos Agrotóxicos – nº 7.802 de 11 de julho de 1989, a Lei 11.445/2007 – Política Nacional de Saneamento Básico, e o Novo Código Florestal Brasileiro – nº 12.651 de 25/05/2012.

Um das propostas dessas leis e normas é a substituição das fontes de energia não renováveis, como o petróleo, carvão mineral, gás natural e a energia nuclear pelas renováveis, como a eólica, solar, hidrelétrica e a biomassa, que é composta por matéria orgânica, advindas de plantas e animais. Esta é uma ótima alternativa para as fábricas, utilizada como combustíveis em caldeiras industriais, para alimentar máquinas térmicas, como motores a combustão, locomotiva a vapor e turbina a vapor, autoclaves para esterilização de materiais, cozimento de alimentos e outras situações.

A utilização da biomassa pelas fábricas faz com que se obtenha menor poluição e diminuição de impactos ambientais negativos, respeitando o meio ambiente e as normas e leis inerentes a ela. Também há diminuição dos custos de produção, diminuindo conseqüentemente custos finais de produtos, aumento da eficiência energética e aumento da competitividade mercadológica, à medida que se aumente a eficiência térmica das caldeiras. Essa eficiência depende de vários fatores como excesso de consumo de combustível, excesso ou falta de purgas, poder calorífico do combustível e isolamento térmico da caldeira, por exemplo.

Dentro desta ótica, o objetivo desse trabalho é o estudo da eficiência térmica e a proposição de possíveis melhorias ao funcionamento da caldeira flamotubular responsável pelo fornecimento do vapor necessário ao processo de produção de laticínios da empresa Laticínios Lindo Vale São Geraldense, localizada na região da Zona da Mata Mineira.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 FONTE DE ENERGIA

As máquinas e equipamentos de uma indústria somente funcionam porque existe uma energia envolvida nesse processo. Por exemplo, uma caldeira industrial pode ser movida a biomassa para produção de calor, ou seja, a fonte de energia é a biomassa e o funcionamento desse equipamento é a produção de vapor para os processos industriais. Essas fontes de energia podem ser classificadas como fontes de energia renovável, quando se renovam naturalmente, ou não renovável, quando não se renovam naturalmente. Lavezzo (2016) classifica essas fontes em fóssil e nuclear como não renováveis e hidráulica, elétrica, solar, eólica e geotérmica e gravitacional e biomassa como renováveis.

As fontes de energia não renováveis são representadas pela energia fóssil que é formada por acúmulo de materiais orgânicos no subsolo, causando poluição e agravamento do efeito estufa e o aquecimento global, tendo como principais exemplos o diesel, a gasolina e o carvão. A energia nuclear vem da desintegração do núcleo do urânio que libera altas quantidades de energia que, embora não produza poluentes, gera muito lixo nuclear e, em caso de acidentes, causam grandes prejuízos financeiros à saúde também, como no caso do acidente da usina de Chernobil, ocorrido em 1986 na Ucrânia.

Já alguns exemplos de fontes de energia renováveis são a energia hidráulica que é considerada uma fonte de energia limpa por não emitir poluentes ao meio ambiente em seu funcionamento natural. Entretanto, para sua instalação são necessárias ações como desmatamento da região onde a usina será construída, assoreamento de rios e outros prejuízos à fauna e flora, que são considerados impactos ambientais negativos, embora surjam somente no início de sua instalação ou em algum momento de desastre natural como o rompimento de alguma represa. Essa energia é a mais utilizada no Brasil devido à grande quantidade de rios no país, cujo funcionamento consiste em uma queda de água em uma usina hidrelétrica que coloca em funcionamento um gerador elétrico, produzindo energia, que será distribuída por redes elétricas até as residências e empresas.

Outro exemplo, é a energia elétrica é uma das energias mais utilizadas no mundo, que se baseia nas diferenças de potencial elétrico entre dois pontos, que cria

uma corrente elétrica entre esses pontos que gera luz, movimentam motores, funcionam eletrodomésticos e eletrônicos (refrigeradores, fogões, micro-ondas, chuveiro, computador, impressora, etc.) e é transmitida para o consumidor final através de uma rede elétrica composta por fios e torres de transmissão. Mas não é simples sua operação e manutenção, por isso é necessário profissionais habilitados para trabalhar essa energia, devido seu alto grau de periculosidade, podendo levar a graves danos físicos, incluindo a morte.

Ao contrário da energia elétrica, a energia solar está em expansão, mas ainda é pouco utilizada no mundo, devido seu alto custo de implantação e a dificuldade de armazenar a energia, que é muito utilizada em residências para aquecimento de água. Apresenta como vantagens o não agravamento do efeito estufa e a não poluição, entretanto, necessita de altos investimentos para sua implantação, operação e manutenção.

A energia eólica, fonte limpa e inesgotável, que não agride o meio ambiente, além de possuir um alto potencial de exploração é gerada através de grandes hélices que, ao se movimentarem através dos ventos, produzem energia.

A energia geotérmica é pouco utilizada sendo obtida através da utilização do calor que há em camadas profundas da crosta terrestre. Um cuidado especial deve ser tomado com relação à necessidade de tratamento da água vinda das camadas terrestres, por conter grande quantidade de minérios que prejudicam a saúde.

A energia gravitacional é gerada a partir do movimento das águas do oceano das marés e não é muito utilizada devido seu alto custo de implantação. A energia da biomassa é obtida através da decomposição de materiais orgânicos, como esterco, resto de alimentos e animais, que produzem o gás metano, responsável pela geração de energia.

## 2.2 MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

Pode-se comparar os combustíveis industriais carvão, óleo combustível e gás natural através das características, segundo Capehart, Turner e Kennedy (2012), através do Guide to Energy Management, como o preço da matéria-prima, disponibilidade independentemente do tipo de clima e política internacional climática, complexidade do equipamento no local para queimar o combustível, o armazenamento e transporte do combustível, emissões causadas pela combustão,

sucessos anteriores dessa tecnologia para caldeiras utilizando o combustível em análise. Após essa análise, a empresa pode optar por qual combustível utilizar. Segundo Madejski e Zymelka (2020) nos últimos anos foram observadas a necessidade de utilizar diferentes combustíveis sólidos e até mesmo da mistura de diferentes combustíveis.

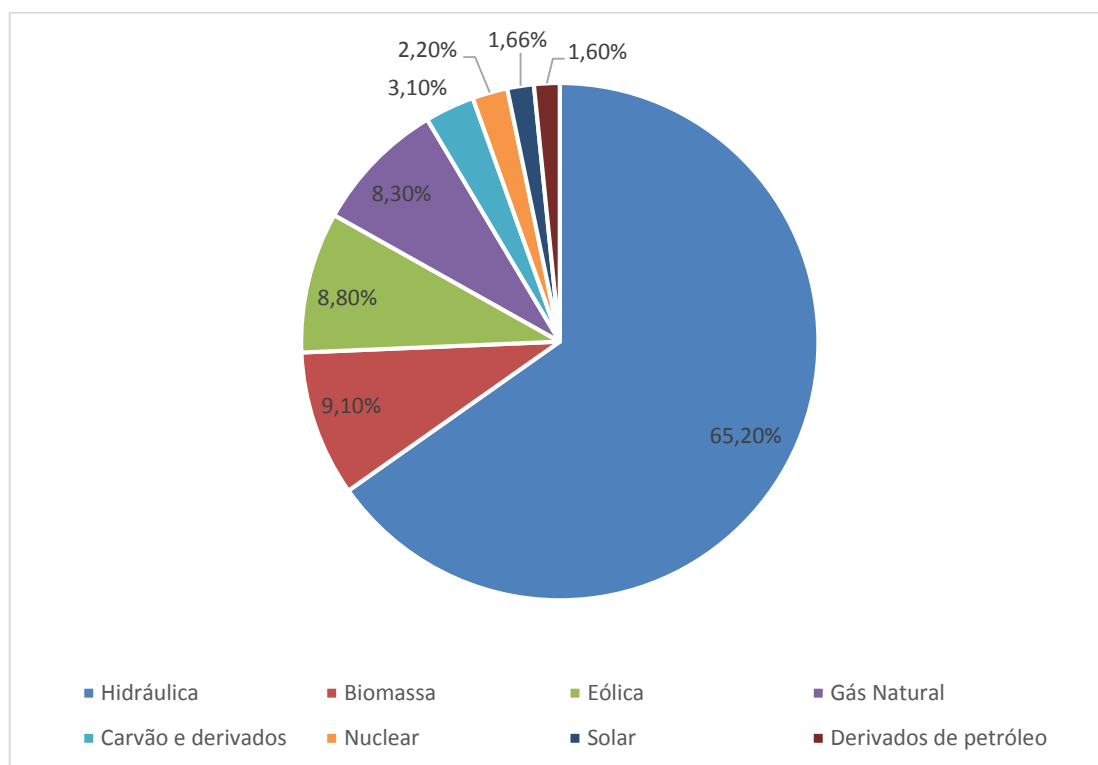
Para os combustíveis, há uma série de fontes de energia, na qual às diversas formas de produção de energia dá-se o nome de matriz energética, ou seja, é o conjunto de todas as fontes de energia que cada país tem. Alguns a principal fonte é hidráulica, outros é a derivada de petróleo e assim por diante, de acordo com a tecnologias e condições ambientais, financeiras e tecnológicas que possuem.

As tecnologias avançam em ritmo acelerado para o aumento da utilização de fontes renováveis, consideradas limpas e a substituição das não renováveis pelas renováveis. Com isso, houve o aperfeiçoamento e desenvolvimento de novas fontes de energia, que atualmente pode-se citar o petróleo, gás natural, energia elétrica, carvão mineral, energia eólica, biodiesel e produtos da cana.

A Empresa de Pesquisa Energética através do Balanço Energético Nacional – BEN de 2021, referente ao ano de 2020 traz algumas informações sobre essas fontes. Esse documento mostra que a capacidade instalada de energia elétrica total no Brasil saltou de 170.118 MW em 2019 para 174.737 MW, em 2020, o que representa um aumento de 2,64% no mesmo período. O uso do biodiesel passou de 5.923.868 m<sup>3</sup> em 2018 para 6.432.0089 m<sup>3</sup> em 2019, representando um aumento de 8,6%. O Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) aponta um aumento de 2,3% na produção de cana-de-açúcar no mesmo período, de 639 milhões de toneladas em 2019 para 662,1 milhões de toneladas em 2020. A energia eólica saltou de 55.986 GWh em 2019 para 57.051 GWh em 2020, o que representa um aumento de 1,9%. A produção de petróleo cresceu 5,7%, alcançando a média de 2,94 milhões de barris diários. Já o carvão metalúrgico diminuiu em 8,1% sua produção.

Além da capacidade instalada de energia elétrica total no Brasil, O BEN 2021 traz informações sobre a produção e o consumo energético brasileiro, no mesmo período de 2019 a 2020 que foi de 65,2% hidráulica, 9,10% biomassa, 8,8% eólica, 8,3% gás natural, 3,1% carvão e derivados, 2,2% nuclear, 1,66% solar e 1,6% derivados de petróleo, como mostra a Figura 1.

Figura 1 – Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte



Fonte: Adaptado de Balanço Energético Nacional (2021).

Percebe-se que no território brasileiro predomina o uso principal de energia hidráulica e em menor uso a solar, mas esse panorama está em transformação devido a conscientização ambiental, portanto a redução do uso das fontes nucleares, derivados de petróleo e carvão e ao incentivo às fontes solares, gás natural, eólica e a biomassa.

### 2.3 BIOMASSA

A biomassa é derivada de materiais de origem animal, vegetal, industrial e florestal, tendo como um dos principais combustíveis a cana-de-açúcar. Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (2020), biomassa é qualquer recurso renovável proveniente de matéria orgânica, seja de origem animal ou vegetal, para geração de energia que seja de fácil obtenção e reposição, diminuindo os impactos ambientais negativos. Outra definição de biomassa é trazida por Cereijo (2014), como sendo a biomassa composta por materiais orgânicos, ou seja, polímeros orgânicos, gorduras e proteínas com pequenas quantidades de materiais inorgânicos, como sódio, fósforo, cálcio, ferro, etc. Rabaçal (2010) complementa o conceito de biomassa

afirmando que esta tem algumas características como elevado teor de humidade, baixa densidade, baixas temperaturas de fusão das cinzas e elevado teor em voláteis. Esse autor aponta que a composição da biomassa consiste em celulose, hemicelulose, lenhina, lipídios, proteínas, açúcares simples, amido, água, hidrocarbonetos, cinzas e outros compostos e que os principais componentes dela são o carbono, hidrogênio e oxigênio, podendo ser caracterizada de acordo com a granulometria, em homogênea (pellets) ou heterogênea (casca de árvore não tratada).

O processo de combustão da biomassa envolve tanto processos físicos quanto químicos, altamente complexos, sendo caracterizadas por Rabaçal (2010), em ignição, secagem, pirólise e combustão do resíduo carbonoso. Na primeira fase, ignição, um fluxo mínimo de energia é gerado de uma fonte externa que pode ser uma chama piloto ou ar aquecido por uma resistência elétrica que é exposta a transferência de calor por convecção e, ao atingir uma temperatura elevada, misturando-se com o ar, inicia a ignição. Na fase de secagem e volatilização são necessárias temperaturas entre 323 K e 423 K para que então a pirólise, que é a degradação térmica na ausência de um agente oxidante externo, ocorra. Por último, a fase de combustão do resíduo carbonoso, que é um resíduo resultante de volatilização que possui carbono e cinzas além de pequenas quantidades de hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre.

Quando o processo de combustão completa essas 4 fases, têm-se como resultados os produtos finais, apontados por Cerejo (2014) como combustíveis sólidos (chips, briquetes, pellets), combustíveis líquidos (metanol, etanol, biodiesel, bio-óleo), combustíveis gasosos (gás sintético, biogás, hidrogênio), calor direto ou eletricidade. No entanto, para se obter esses produtos, assim como em qualquer outro processo de combustão, há a liberação de alguns poluentes para o ambiente, como aponta Rabaçal (2010), CO, HC (hidrocarbonetos), HCl, SO<sub>2</sub>, KCl, entre outros, conforme Tabela 1. Entretanto, segundo Saidur et al. (2011), a maioria dos resíduos da biomassa como, por exemplo, o gás de aterro sanitário, contém metais pesados e compostos orgânicos que causam vários problemas de saúde.

Tabela 1 – Principais fontes de emissões poluentes na combustão da biomassa

Combustível	Emissões
Todas as biomassas	CO, HC (hidrocarbonetos), óxidos de nitrogênio (NO <sub>x</sub> ), hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, condensados, fuligem e cinzas.
Madeiras urbanas, palha, ervas, culturas energéticas	HCl, SO <sub>2</sub> , KCl, K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , NH <sub>4</sub> Cl
Biomassas com metais pesados	Pb, Zn, Cd, Cu, Cr, Hg, etc.

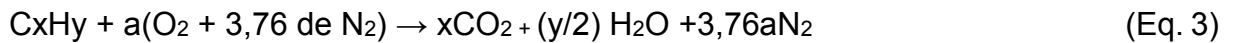
Fonte: Adaptado de Rabaçal (2010).

O processo de combustão, de acordo com Moran (2013) é um processo que consiste em uma série de reações que são muito complexas e rápidas. Barbieri et al. (2019) afirmam que esse processo influencia diretamente no rendimento térmico do equipamento e nos impactos ambientais causados. Esse rendimento térmico é influenciado pela escolha e uso do tipo de combustível, ao gerenciamento das perdas de calor no sistema, à confiabilidade da instrumentação e das manutenções periódicas realizadas no equipamento, segundo Senger (2015). Andres (2012) afirma que tratamento da água de alimentação da caldeira, que pode causar incrustações e corrosão, por exemplo, também interferem no rendimento térmico do equipamento. As perdas de calor podem ser reduzidas através de um eficiente isolamento térmico, que, segundo Kiesow (2015) são compostos por micro espaços capazes de formar uma barreira para impedir a saída de calor.

Para que o processo de combustão seja realizado são necessários dois elementos fundamentais, os reagentes, identificados como combustível, que segundo Moran (2013) é toda substância inflamável que será queimada produzindo energia em forma de calor, e o comburente que é o meio onde esse processo ocorre, conforme Equações 1 e 2. A Equação 3 expressa a relação estequiométrica para um combustível hidrocarboneto dado pela fórmula química genérica C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>, Turns (2013).

Na Equação 3 o oxigênio do ar reage com o carbono do combustível de forma a produzir somente CO<sub>2</sub> como produto. Isto caracteriza uma combustão

estequiométrica. Neste contexto a reação de combustão libera energia caracterizando uma reação exotérmica.



Em que  $a$ ,  $x$  e  $y$  são os coeficientes dos componentes da equação e que  $a$  pode ser calculado através da Equação 4, segundo Turns (2000).

$$a = x + y/4 \quad (\text{Eq. 4})$$

Uma análise que deve ser feita é em relação à proporção de ar com combustível, ou seja, a quantidade de ar em relação ao combustível em termos mássicos, ou molares, que pode ser entendida como a razão ar – combustível, de acordo com Turns (2000), mostrado na Equação 5.

$$(A/F) = \left( \frac{M_{\text{air}}}{M_{\text{fuel}}} \right)_{\text{stoic}} = \frac{4,76a}{1} \cdot \frac{MW_{\text{air}}}{MW_{\text{fuel}}} \quad (\text{Eq. 5})$$

onde:

$A = \textit{Air}$  (ar)

$F = \textit{Fuel}$  (combustível)

$m_{\text{air}}$  = Massa do ar

$m_{\text{fuel}}$  = Massa do combustível

$MW_{\text{air}}$  = Peso molecular do ar

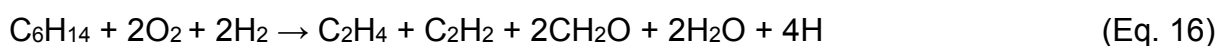
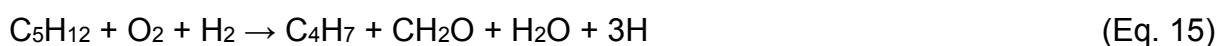
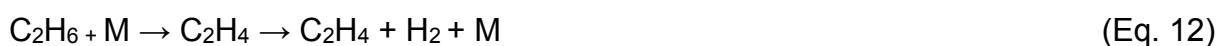
$MW_{\text{fuel}}$  = Peso molecular do combustível

A partir dessa razão entre ar e combustível, considera-se a razão de equivalência ( $\phi$ ), descrita na Equação 6, de acordo com Turns (2013), que serve para medir se a mistura ar –combustível é rica, pobre em combustível ou estequiométrica. Rica em combustível ( $1 < \phi < \infty$ ), é quando no fim da combustão todo ar é utilizado

restando apenas o combustível; pobre em combustível ( $0 < \phi < 1$ ) é quando ocorre o contrário, quando o combustível termina, há sobra de ar, e estequiométrica ( $\phi = 1$ ) quando ambos, ar e combustível são consumidos completamente no processo de combustão.

$$\phi = \frac{(A/F)_{stoic}}{A/F} = \frac{(F/A)}{(F/A)_{stoic}} \quad (\text{Eq. 6})$$

Para que as reações de combustão de hidrocarbonetos ocorram, são necessárias sequências de reações elementares, denominado de mecanismos de reação. Estes envolvem o hidrogênio (H), monóxido de carbono (CO), metano (CH<sub>4</sub>), acetileno (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>), etileno (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>), etano (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), propano (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>), butano (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>), pentano (C<sub>5</sub>H<sub>12</sub>), hexano (C<sub>6</sub>H<sub>14</sub>) e *n*-heptano (C<sub>7</sub>H<sub>16</sub>), expressas nas Equações 7 a 17, respectivamente, segundo Martins (2011).





Moran (2013) afirma que a combustão é completa quando todo o carbono presente no combustível é queimado para formar dióxido de carbono, que todo hidrogênio é queimado para formar água, que todo enxofre é queimado para formar dióxido de enxofre e os demais elementos todos completamente oxidados. Caso pelo menos alguma dessas condições não forem atendidas, pode-se caracterizar a combustão como incompleta. Mas para que a combustão seja completa, é necessária uma quantidade mínima de ar, denominada de ar teórico, que segundo Moran (2013) não contém nenhum átomo de oxigênio como produto da reação.

De acordo com Francisco (2012), para que a combustão ocorra de forma eficiente, deve-se atentar a alta temperatura para iniciar e manter a queima do combustível, uma mistura adequada de combustível e comburente e respeitar o tempo suficiente para que a combustão ocorra. O mesmo autor também afirma que a composição dos produtos de combustão pode ser aferida através de equipamentos como o analisador de *Orsat*, o cromatógrafo de gás, o analisador infravermelho e o detector de ionização de chama, respectivamente, apresentas as Figuras 2 a 5.

Figura 2 – Analisador de Orsat



Fonte: Loja Net Lab (2022).

Figura 3 – Cromatógrafo a gás



Fonte: Thermo Fisher (2022).

Figura 4 – Analisador de gases infravermelho



Fonte: Analyser Instrumentação Analítica (2021).

Figura 5 – Detector de ionização de chama



Fonte: Confor (2021).

## 2.4 EMISSÕES

Shirmer e Rudniak (2009) afirmam que as emissões de poluentes por parte das indústrias são materiais particulados, composta de poeira, neblina, aerossóis, fumaça, fuligem e quaisquer outros materiais suspensos no ar, compostos sulfurosos, ou seja, quem contém enxofre em sua composição, como dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), trióxido de enxofre (SO<sub>3</sub>), sulfatos (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S), compostos hidrogenados, como monóxido de nitrogênio (NO), o dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>) e o óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), além do dióxido de carbono CO, o dióxido de carbono CO<sub>2</sub> e compostos orgânicos voláteis (COV) representados pela maioria dos solventes, lubrificantes e combustíveis em geral. Mas para compensar a produção desses poluentes e dos resíduos, há a utilização desses resíduos gerados pelos processos e suas principais utilizações finais, como combustível, biocombustíveis sólidos, compostagem e incorporação no solo, indústria da madeira, rações e combustíveis, como apresentado por Rabaçal (2010) na Tabela 2.

Tabela 2 – Resíduos de biomassa produzidos diretamente das atividades florestal e agrícola

Processo Gerador	Resíduos Gerados	Principais Utilizações Finais
Tratamentos silvícolas (limpezas, cortes sanitários, podas e limpezas de matos)	Árvores e toros sem valor comercial, ramos, matos, etc.	Combustível, biocombustíveis sólidos, compostagem e incorporação no solo
Desbastes comerciais e cortes finais	Copas, ramos, troncos sem valor comercial, lenha, material contaminado	Combustível, biocombustíveis sólidos e indústria da madeira
Atividade agrícola	Podas de culturas permanentes, palhas, cascas, etc.	Rações e combustível

Fonte: Adaptado de Rabaçal (2010).

Essas utilizações finais desses resíduos gerados pelos processos geradores é uma das vantagens da biomassa como combustível além da possibilidade de

controlar a geração da energia, que em média e grande escala pode ser utilizada para produção de eletricidade devido ao seu alto rendimento, além disso, ela é de baixo custo e alta disponibilidade. Já uma grande desvantagem da utilização da biomassa como combustível é a forma de conversão de energia, que gera gases e partículas que prejudicam o meio ambiente, danificando o ar.

Com relação à água alguns cuidados devem ser tomados, conforme Santos e Fraga (2017) aponta que para se identificar as impurezas é necessária a realização de análise dessa água em laboratório para verificação das propriedades físicas, químicas, biológicas e até mesmo radioativas. A Agência Nacional das Águas – ANA, através da resolução número 903, de 22 de julho de 2013 (2013) elenca os parâmetros que cada categoria de propriedades que devem ser analisadas:

- Físico-químico: condutividade elétrica (S / m – Siemens por metro), temperatura de água (K), temperatura do ar (K), turbidez (UNT – Unidades Nefelométricas de Turbidez), oxigênio dissolvido ( $\text{kg/m}^3$  de  $\text{O}_2$ ), pH, sólidos totais dissolvidos ( $\text{kg/m}^3$ ), sólidos em suspensão ( $\text{kg/m}^3$ ), alcalinidade total ( $\text{kg/m}^3$  de  $\text{CaCO}_3$ ), cloreto total ( $\text{kg/m}^3$  de Cl), transparência da água, demanda bioquímica de oxigênio (DBO 5d, 293°C, mg/L de  $\text{O}_2$ ), demanda química de oxigênio ( $\text{kg/m}^3$  de  $\text{O}_2$ ), carbono orgânico total ( $\text{kg/m}^3$  como  $\text{O}_2$ );
- Microbiológicos: Coliformes Termotolerantes ( $n^\circ$  de CT/0,0001  $\text{m}^3$ );
- Biológico: Clorofila ( $\text{kg/m}^3$ ), fitoplâncton qualitativo e quantitativo ( $n^\circ$  de célula/ml);
- Nutrientes: Fósforo ( $\text{kg/m}^3$ ), nitrogênio amoniacal ( $\text{kg/m}^3$  de N) e nitrogênio total ( $\text{kg/m}^3$  de N).

Tabela 3 – Composição Setorial do Consumo Final de Biomassa

Setores	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Consumo Final Energético ( $10^3$ tep)	74.578	73.305	74.390	76.883	79.531	81.897
Setor Energético	17,6	16,7	16	18,6	19	17,1
Residencial	9,1	8,9	9,2	10,0	9,4	9,3
Comercial e Público	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Agropecuário	4,4	4,1	4,9	4,8	4,8	4,8

Setores	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Transportes	24,0	22,3	22,3	25,0	26,8	23,8
Industrial	44,6	47,8	47,3	41,5	39,7	44,8
Cimento	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,4
Ferro-Gusa e Aço	4,0	3,4	3,5	3,6	3,6	3,5
Ferro – Ligas	0,6	0,6	0,7	0,6	0,6	0,6
Mineração e Pelotização	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Não-Ferrosos e Outros da Metalurgia	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Química	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Alimentos e Bebidas	23,7	26,9	26,1	20,1	19,4	25,0
Têxtil	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Papel e Celulose	11,3	12,2	12,4	12,7	11,7	11,8
Cerâmica	3,2	2,9	2,9	2,7	2,7	2,3
Outros	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1	1,0
Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Fonte: Adaptado de Balanço Energético Nacional (2021).

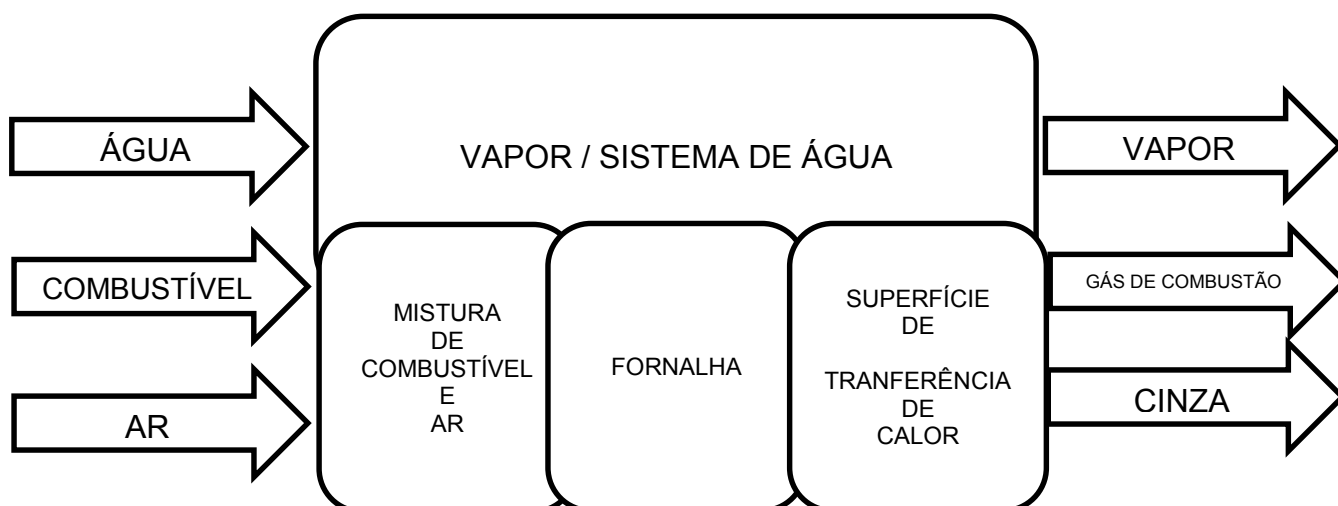
Cada setor da economia consome uma quantidade de biomassa em um determinado período, conforme apresentado na Tabela 3, observando que de 2015 a 2020 houve um aumento de  $7.319 \times 10^3$  tep, (tep = tonelada equivalente de petróleo) ou seja 8,93%, sendo os setores que mais a utilizam são industrial, de transportes e de alimentos e bebidas, portanto estes precisam de maior atenção, pois impactam em maior proporção no consumo da biomassa.

Para que esses setores da economia utilizem a biomassa como fonte de energia, os meios de transportes devem ser ágeis, com baixo custo e seguros, tanto para o condutor e os ocupantes dos veículos quanto para a própria biomassa. Searcy et al. (2007) aponta quatro modelos de transporte da biomassa, o transporte rodoviário, ferroviário, por oleoduto e marítimo. Na região onde se encontra a empresa que utiliza caldeira que está sendo analisado, o transporte rodoviário é o utilizado.

## 2.5 CALDEIRAS

A Norma Regulamentadora 13 (NR13), desenvolvida pelo Ministério do Trabalho e Previdência, define caldeiras como sendo equipamentos que produzem e acumulam vapor com pressão acima da atmosférica, conceito complementado por Rocco (2011) afirmando que caldeiras industriais queimam combustíveis e geram energia térmica, elevando a temperatura da água e transformando-a em vapor, conforme Figura 6. Esse vapor, quando produzido por caldeiras, podem ser utilizados para secagem, cozimento, lavagem de utensílios, geração de energia, aquecimento ambiental, desinfecção, pasteurização dentre outras aplicações, como afirma Bello (2018). Além disso, existem vários tipos de caldeiras e, por isso, possuem classificações quanto a classe de pressão, ao grau de automação, de acordo com a energia utilizada para o aquecimento, com a mobilidade, com a posição do costado e com a troca térmica.

Figura 6 – Diagrama básico de uma caldeira



Fonte: Adaptado de OYAMA (2017).

Os principais componentes das caldeiras são tubulão de água inferior, tubulão de água superior, tubos de alimentação de água, tubos de purga contínua, defletor, separadores de vapor, tubos de circulação, tubos geradores, parede d'água, superaquecedor, economizador, pré-aquecedor de ar, alimentação de bagaço,

queimadores e equipamentos auxiliares como sopradores de fuligem ou ramonadores, válvulas de segurança, indicadores de nível, sistemas de controle de água da alimentação, sensores de temperatura. Filho (2014) define tubulão como um equipamento localizado na parte superior da caldeira que recebe a água tratada para alimentação da caldeira e a direciona às paredes de água, que são tubos verticais que conectam o coletor superior com o inferior, e os tubos. O tubulão de água inferior liga os tubos para que ocorra a circulação de água na caldeira, acumulando lama que é gerada pela reação dos produtos química com a água da caldeira, a água que sai desse componente é enviada ao tratamento. Já o tubulão de água superior tem formato cilíndrico que contém em seu interior água e vapor gerados pela troca de temperatura entre a água que está circulando na caldeira e os gases gerados pela combustão, tem por função separar água de vapor.

Os tubos de alimentação de água são distribuídos pelo tubulão superior por furos em toda a extensão do tubulão. Os tubos de purga contínua se encontram abaixo do nível de água, com furos em toda sua parte que tem como função coletar a água para análise de sólidos, fosfatos, dispersantes, sílica para serem controlados quimicamente.

O defletor é feito de chapas que tem como função receber o vapor dos tubos geradores e os separadores são chicanas e filtros que retém água do vapor. Os tubos de circulação são tubos traseiros do feixe tubular que conduz a água do tubulão de vapor para o tubulão de água e os tubos geradores são tubos dianteiros do feixe tubular que leva a mistura de água e vapor saturado para o tubulão de vapor. A parede d'água é responsável pelo resfriamento da fornalha, que de acordo com Filho (2014) é o local onde acontece a queima do combustível, através do fluxo de água que circula nos tubos, o superaquecedor aumenta a temperatura do vapor saturado, o economizador aquece a água de alimentação da caldeira.

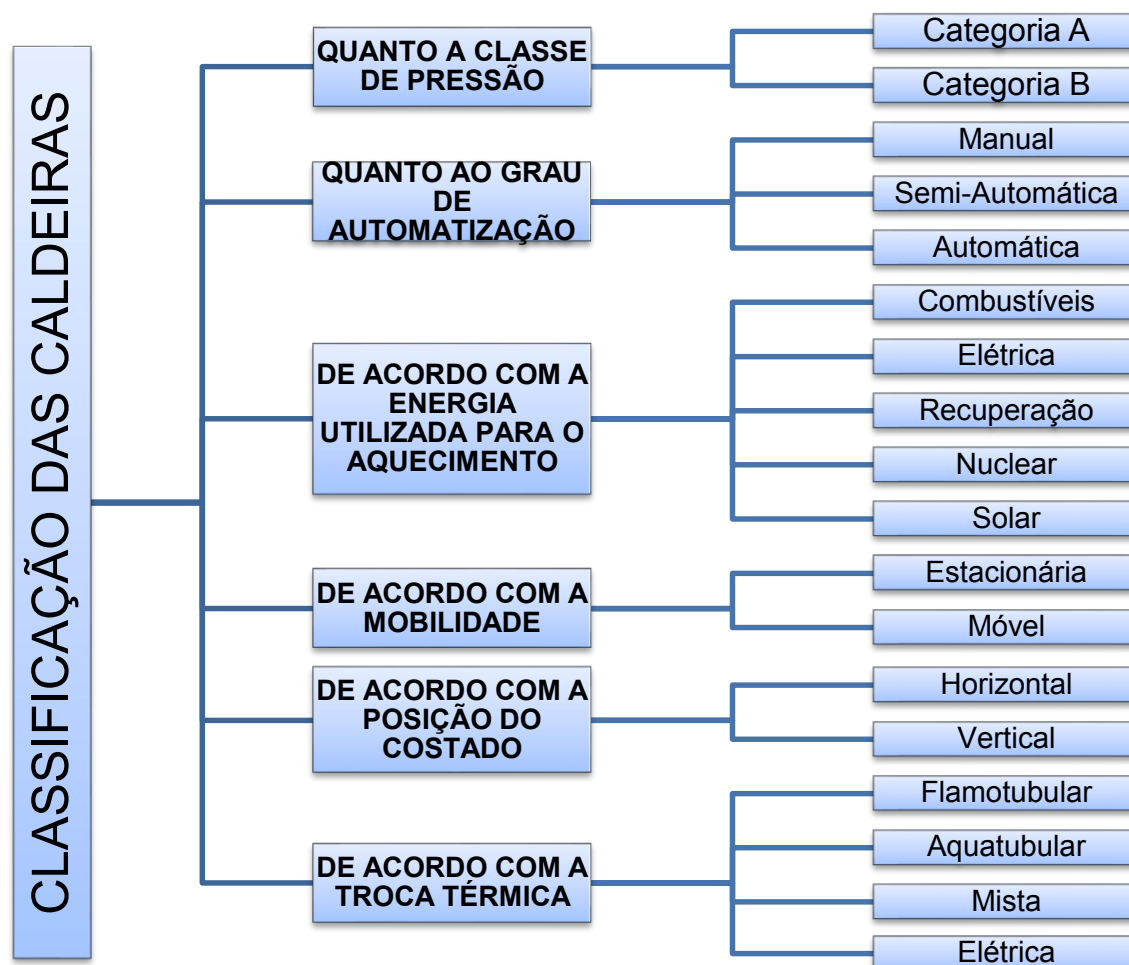
O pré-aquecedor de ar aumenta a temperatura do ar de combustão antes que este entre na fornalha, segundo Santos (2021). Já os queimadores servem para queimar combustíveis em suspensão, conforme o mesmo autor. Já com equipamentos auxiliares, há as válvulas de segurança que servem para evitar excesso de pressão e um eventual acidente, os indicadores de nível indica o nível da água dentro do tubulão de evaporação, os sistemas de controle de água de alimentação servem para regular a quantidade de água no tubulão de evaporação, os sensores de temperatura medem a temperatura dos fluidos.

### 2.5.1 Classificação das caldeiras

A Escola Nacional da Inspeção do Trabalho (ENIT) através da NR 13 (2020) classifica as caldeiras em duas categorias, quanto às classes de pressão, em categorias A e B. A categoria A possui pressão de operação igual ou superior a 1.960 KN/m<sup>2</sup>, com volume superior a 0,1 m<sup>3</sup> e a categoria B possui pressão de operação acima de 60 KN/m<sup>2</sup> e inferior a 1.960 KN/m<sup>2</sup>, volume interno superior a 0,1 m<sup>3</sup>, conforme Figura 7.

Moreira (2007) classifica as caldeiras quanto ao grau de automatização como manuais, semiautomáticas e automáticas, como mostra a Figura 7. Moreira (2007) também classifica as caldeiras de acordo com a energia utilizada para o aquecimento, que pode ser por combustíveis líquidos (óleo BPF, óleo xisto, diesel e gorduras), sólidos (lenha em tora, cavaco, carvão, bagaço de cana, cascas e caroços, por exemplo) e gasosos (gás natural e gás liquefeito de petróleo (GLP)), elétricas (eletrodos submersos a resistores), de recuperação (uso de gases com altas temperaturas de outros processos exotérmicos), nucleares (urânio) e solares. O mesmo autor classifica as caldeiras de acordo com a mobilidade que podem ser estacionárias ou móveis (navais, rodoviárias ou ferroviárias), quanto à posição do costado, ou corpo, que podem ser horizontais ou verticais, e quanto a troca térmica como flamotubulares, aquatubulares, mistas e elétricas, ambos mostrados na Figura 7.

Figura 6 – Classificação das caldeiras



Fonte: O autor.

Baggio (2018) define caldeiras flamotubulares (tubo de fogo ou pirotubular) como de construção simples, produz gases quentes na sua combustão, é utilizada para pequenas produções de vapor (em torno de 10 toneladas por hora) e pressões baixas (até 1.000 kPa). Moreira (2007) aponta algumas vantagens como baixo custo de aquisição; pouca alvenaria necessária para sua construção; pré-fabricada; de fácil operação; atende bem ao aumento instantâneo de demanda de vapor; não necessita de tratamento de água muito apurado; fácil limpeza da fuligem; fácil substituição de tubos e desvantagens das caldeiras flamotubulares como baixo rendimento térmico; partida lenta; pressão de operação de até 1.961,33 KPa; baixa taxa de vaporização; capacidade de produção limitada; necessita de muito espaço; circulação de água deficiente; dificuldades na instalação de economizador, superaquecedor e pré-aquecedor; grande peso.

Baggio (2018) também descreve caldeiras aquatubulares (caldeiras de tubos de água) afirmando que os gases resultantes da combustão circulam por fora dos tubos e nesse tipo de caldeira, a água circula no interior dos tubos e os gases circulam por fora. A caldeira mista possui fornalha similar a aquatubular e tambor de vapor de uma flamotubular, segundo Baggio (2018). Moreira (2007) ainda afirma que normalmente são utilizadas para queima de combustíveis sólidos (lenha, bagaço de cana, etc.). E as elétricas possuem como principal finalidade transformar energia elétrica em energia térmica, de acordo com Moreira (2007).

### 2.5.2 Operação e Manutenção de Caldeiras

No ambiente onde as caldeiras são instaladas, deve haver saídas em posições opostas para facilitar as saídas em caso de emergência, conter o livro de anotações diárias do equipamento, onde serão anotados consumo de combustível, pressão, volume de vapor produzido e outras informações e anomalias, caso surjam, além do manual de operação, que consta as etapas a serem seguidas pelos operadores para executarem de forma segura e eficiente. Além disso é necessária a NR 13, em cumprimento às leis e ao comprometimento com a saúde e segurança de todos envolvidos não somente na caldeira como todos na empresa de uma forma em geral.

Os operadores de caldeiras precisam ter alguns cuidados pessoais como a não utilização de adornos e utilização de uniformes, não utilização de objetos cortantes, como facas, canivetes e outros utensílios como isqueiro a gás, latas de aerossol, embalagens PET, bebidas, *sprays*, não fumar, não utilizar celulares e similares.

Com relação às manutenções a serem realizadas, geralmente as mais comuns são as corretivas que como o próprio nome sugere, corrige um problema, parando a produção, sendo de maior custo e a preventiva que é um tipo de manutenção programada, portanto não interrompe a produção pra ser realizada, sendo de menor custo e de menor impacto negativo à produção. Portanto o operador precisa manter a casa da caldeira limpa e organizada, verificar a pressão interna e nível de água da caldeira, o aspecto do condensado, cor da chama, que é possível analisar a mistura ar/combustível, que caracteriza o grau de poluição e

conseqüentemente de corrosão do equipamento, a cor dos gases de exaustão, que deve ser incolor.

Não deve apertar parafusos ou porcas com a caldeira em funcionamento, podendo correr o risco de acidentes, inclusive explosão, verificar estado das válvulas de segurança, acionando-a manualmente para testar seu funcionamento, testar alarmes de gás, de água, de queda ou de alta pressão, verificar a temperatura de saída dos gases, garantir que o condensado retorne ao sistema, garantindo sua reutilização, cuidar dos motores, bombas, ventiladores e manômetros. Fazer a descarga de lodo de fundo periodicamente, o que é indicado de 1 em 1 hora, durante certa de 10 a 15 segundos e verificar a temperatura de saída dos gases para medir a eficiência térmica do equipamento. Semanalmente é necessário testar as válvulas da linha de vapor e testar o detector de vazamentos, mensalmente deve ser criado um relatório de tudo que ocorreu com equipamento além do teste manual das válvulas de segurança. Semestralmente é necessário desligar, esfriar, drenar, desmontar parcialmente e limpar a caldeira. E anualmente é necessário a inspeção da caldeira através de profissional altamente qualificado gerando o relatório que será guardado na empresa.

Caso essas recomendações não sejam seguidas, acidentes podem ocorrer, segundo Alberichi (2013) por motivos como a pressão alcançada pela caldeira atingir uma pressão acima da PMTA, causando tricas e rachaduras nos equipamentos. Além disso pode causar também vazamento de gases, poeiras e calor, válvula de segurança pode não funcionar, falta de água e corrosão interna e externa do equipamento, até mesmo explosões.

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

Este capítulo apresenta a descrição do equipamento da caldeira estudada, bem como a análise da operação padrão do equipamento e a coleta de dados, fundamentais para a proposta de estudo da eficiência térmica do equipamento.

#### **3.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE GERAÇÃO DE VAPOR**

O local destinado às caldeiras é denominado casa de caldeiras, que é um local que precisa ser limpo, organizado e arejado, de acesso restrito ao operador,

onde não se pode estocar nenhum tipo de material a não ser os materiais utilizados para o processo de combustão da caldeira. A Figura 8 mostra a casa da caldeira da fábrica de laticínios em estudo.

Figura 7 – Casa da caldeira do Laticínios Lindo Vale São Geraldense



Fonte: O autor (2021).

A empresa Laticínios Lindo Vale São Geraldense, localiza-se na cidade de São Geraldo – MG, a 33,8 km de Ubá e a 30 km de Viçosa/MG, conforme Figura 9. A empresa produz queijo minas frescal, requeijão, ricota, manteiga e mussarela, conforme mostra Figura 10. A caldeira utilizada nesse Laticínio é do tipo flamotubular horizontal, com ante fornalha e grelha aquatubular (Figura 11), de categoria B, movida a diesel originalmente, mas adaptada a combustível sólido (toras de madeira).

Figura 8 – Mapa da região da cidade de São Geraldo



Fonte: Google Maps (2022).

Figura 9 – Produtos do Laticínios Lindo Vale São Geraldense



Fonte: Laticínios Lindo Vale São Geraldense (2022).

Figura 10 – Vista lateral da caldeira do Laticínios Lindo Vale São Geraldense



Fonte: O autor (2021).

Essa caldeira foi produzida pela Fábrica de Caldeiras Santa Luzia Ltda, situada na cidade de Juiz de Fora, MG em 2002, possui capacidade de produção de 2.500 kgV/hora do tipo SIM/22, modelo HFWB, número de série 1874. Possui Pressão Máxima de Trabalho Admissível (PMTA) de 833,56 kPa e Pressão de Teste Hidrostático (PTH) de 1.250,34 kPa e superfície de aquecimento de 116 m<sup>2</sup>, sendo 77 m<sup>2</sup> de caldeira e 39 m<sup>2</sup> de ante fornalha e capacidade de 0,69 kgV/s, conforme Figura 12. Esse equipamento usava como combustível óleo diesel, mas foi adaptada para biomassa.

Figura 11 – Placa de identificação da caldeira



Fonte: O autor.

A Tabela 4 apresenta um resumo das características da caldeira em estudo: tipo, modelo, ano de fabricação, produção de vapor, PMTA, PMT, classificação segundo a NR 13, código de construção, tipo de vapor, número de passes, área de superfície de aquecimento, material do costado, material dos espelhos, câmara de combustão, tipo de fornalha e o combustível.

Tabela 4 – Características da caldeira em estudo

Marca / Fabricante	Fábrica de Caldeiras Santa Luzia Ltda.
Produto	Caldeira Industrial
Tipo	SIM/22
Modelo	HFWB
Ano de Fabricação	2002
Produção de Vapor	0,69 kgV/s
Pressão Máxima de Trabalho Admissível – PMTA	833,56 kPa
Pressão de Teste Hidrostático – PMT	1.250,34 kPa
Classificação NR13	Categoria B
Código de Construção	ASME
Tipo de Vapor	Saturado
Número de Passes	4
Área de Superfície de Aquecimento	116 m <sup>2</sup>
Material do Costado	ASTM A-367
Material dos Espelhos	ASTM A-367
Câmara de Combustão	Ante fornalha
Tipo de Fornalha	Aquatubular
Combustível	Lenha de eucalipto – sólido

Fonte: Adaptado de Barbieri (2017).

A Tabela 5 apresenta as características do combustível, como poder calorífico superior, densidade, temperatura, umidade, percentual de carbono, oxigênio, hidrogênio, nitrogênio, cinzas e de carbono fixo e material volátil. Algumas informações implícitas utilizadas na simulação serão apresentadas a seguir. O valor do PCI foi estimado por meio de correlação (= 3.035 kJ/kg).

Tabela 5 – Características do combustível

Parâmetro	Valor [Unidade]
Poder calorífico superior	4595 [kcal/kg]
Densidade*	507 [kg/m <sup>3</sup> ]
Temperatura	298° [K]
Umidade	30 [%]
Carbono	50,2 [%]
Oxigênio	43,4 [%]
Hidrogênio	6,1 [%]
Nitrogênio	0,2 [%]
Cinzas	0,2 [%]
Carbono Fixo**	17,27 [%]
Material Volátil**	83,24 [%]

Fonte: Adaptado de Barbieri (2017) apud Quirino et al. (2004); Santos\* et al. (2012); Borges\*\* (2015).

Já a Tabela 6 apresenta os parâmetros de operação da instalação, apontando as pressões externas e internas da caldeira, temperaturas da água de alimentação, da saída do condensado, do condensado, de referência e da pressão de referência.

Tabela 6 – Parâmetros de operação da instalação

Parâmetro	Valor [Unidade]
Pressão externa da caldeira	101,33 [kPa]
Pressão interna da caldeira	735,50 [kPa]
Temperatura da água de alimentação	333,8 [K]
Temperatura da saída do vapor	503 [K]
Temperatura do condensado	442,9 [K]
Temperatura de referência	298 [K]
Pressão de referência	101,33 [kPa]

Fonte: Adaptado de Barbieri (2017).

A ante fomalha é uma parte da caldeira que serve para iniciar o processo de combustão através da alimentação do equipamento de combustível através do operador, como mostra a Figura 13.

Figura 12 – Vista da ante fomalha da caldeira do Laticínios Lindo Vale São Geraldense



Fonte: O autor (2021).

A grelha aquatubular, mostrada na Figura 14, está contida na ante fomalha e que utiliza a água dentro dos tubos para ser aquecida com o calor produzido pela queima do combustível produzindo vapor que é utilizado no corpo da caldeira posteriormente.

Figura 13 – Ante fornalha com grelha aquatubular



Fonte: O autor (2021).

A Figura 15 mostra o corpo da caldeira, local onde ocorre a transformação da água líquida em vapor que é canalizado para as linhas de produção.

Figura 14 – Vista do corpo da caldeira do Laticínios Lindo Vale São Geraldense



Fonte: O autor (2021).

A Figura 16 mostra o abrandador, um equipamento localizado na área externa à casa da caldeira, que serve para impedir a formação de incrustações nas tubulações ao reduzir a dureza da água, ou seja, elimina os sais que contaminam a água.

Figura 15 – Abrandador



Fonte: O autor (2021).

Para aferir a pressão que o vapor produzido está, é utilizado o manômetro de saída de vapor, como mostra a Figura 17. Quando atingir a pressão necessária para a utilização nas linhas de produção, a válvula de saída de vapor é aberta. Caso contrário, essa válvula permanece fechada para não comprometer a qualidade dos produtos e dos processos.

Figura 16 – Manômetro de saída de vapor



Fonte: O autor (2021).

Ao lado da ante fornalha existe uma porta por onde as cinzas resultantes da queima do combustível são depositadas no fundo para serem retiradas e descartadas

(Figura 18). Quando o operador alimenta a caldeira, essa porta permanece fechada para não haver entrada de ar e esse ar levar o fogo em direção a porta de entrada do combustível, ou seja, há o risco do operador de sofrer queimaduras. Quando a alimentação for interrompida, essa porta permanece aberta. Os gases resultantes do processo de combustão saem da caldeira em direção a atmosfera através da tubulação mostrada na Figura 19.

Figura 17 – Saída das cinzas resultantes da queima do combustível na ante fornalha



Fonte: O autor (2021).

Figura 18 – Saída dos gases resultantes da combustão da biomassa



Fonte: O autor (2021).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 OPERAÇÃO DA CALDEIRA EM ESTUDO

A operação da caldeira foi objeto de investigação, através de visitas de campos realizadas junto a Empresa Laticínios Lindo Vale São Geraldense, ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Foram realizadas oito visitas, com acompanhamento do operador técnico da mesma. As principais observações estão registradas e apresentadas adiante.

Primeiramente o operador verifica se a quantidade de água que há no reservatório é suficiente para alimentar a caldeira, em seguida ele alimenta a caldeira com algumas toras de madeira, molha um pedaço de papelão com querosene, e lança esse papelão na caldeira, ateando fogo para iniciar a ignição. Quando o fogo é aceso, o operador liga o equipamento através do painel de comandos da caldeira e mantém a saída do vapor aberta para as linhas de produção. Durante esse processo, que dura aproximadamente 1 hora, o operador verifica todo funcionamento do equipamento, como necessidade de mais lenha, de injeção de água, possíveis vazamentos. Quando a pressão interna do equipamento alcançar 735,5 kPa, todos os processos e equipamentos que necessitam de vapor produzido pela caldeira estão preparados para funcionarem, são eles:

- Limpeza dos reservatórios de água que é utilizada para limpeza dos caminhões que transportam leite: os caminhões chegam à fábrica de laticínios, descarrega o leite e em seguida utilizam a água desses reservatórios para higienização do tanque do caminhão, para em seguida, deixar a fábrica;
- Processo de pasteurização do leite a 343 K: o processo de pasteurização do leite consiste no aumento da temperatura deste até aproximadamente 343 K, não muito a mais do que isso, senão ocorre a desnaturação do leite. E logo em seguida, diminui-se a temperatura, o que faz com que haja eliminação dos microorganismos presentes;
- Produção de salmoura (água saturada de sal), com temperaturas superiores a 363 K;

- Filamento de mussarela a 345 K: Ao acrescentar fermento ao leite para dar as características finais da mussarela e repousar essa massa por algum tempo, faz com que essa massa atinja uma consistência elástica, formando esses filamentos;
- Produção de ricota a 363 K:
- Trituração da massa de requeijão a 363 K;
- Limpeza de fôrmas de queijo: Essas fôrmas de queijo são recipientes que dão a forma arredondada do queijo.
- Limpeza de caixas que armazenam queijo pronto a 343 K. Essas caixas são utilizadas para armazenar os queijos prontos e transportá-los até a câmara fria onde irão aguardar o transporte até o cliente;

O operador monitora o equipamento para que a pressão mantenha o mais constante possível. Caso ela caia, é inserida mais madeira, senão os processos que utilizam o vapor produzido pela caldeira perdem eficiência, matéria-prima e material em processo são perdidos. Caso ela suba e alcance pressões superiores a 784,53 kPa, o próprio equipamento, através da válvula de segurança, descarrega o excesso de para evitar acidentes como explosão.

O sistema de descarga de vapor é feito automaticamente através de quatro válvulas com periodicidade de uma hora, mas caso seja necessário, o operador pode efetuar descarga manual. Essas válvulas estão numeradas de 1 a 4, sendo que a de número 3 é utilizada como descarga de fundo, que é responsável pela retirada de toda sujeira e os restos de materiais químicos produzidos pela caldeira no corpo dela. Cardoso (2018) complementa afirmando que também serve para retirar as impurezas presentes na superfície da água.

O sistema de injeção de água é composto por duas bombas, a primeira é a principal e funciona de forma automática, já a segunda é uma bomba de reserva utilizada em casos de emergência, quando a bomba principal não funcionar devido a algum defeito. Esse sistema é responsável por injetar água dentro do corpo da caldeira, que se torna vapor que é canalizado para as linhas de produção.

O reservatório (Figura 20) é misturado com o condensado que vem da produção através das linhas que auxilia no aumento da temperatura da água para que

esta entre na caldeira com uma temperatura um pouco mais alta para aumentar a eficiência térmica do equipamento.

Figura 19 – Reservatório de água de alimentação da caldeira



Fonte: O autor (2021).

Ao mesmo tempo que isso ocorre, um sistema que contém dois reservatórios com produtos químicos, conforme Figura 21, bombeia frequentemente esses materiais para o reservatório onde serão misturados para que a água entre na caldeira com condições melhores para utilização pelo equipamento, para evitar, por exemplo, incrustações e deterioração da caldeira, que são responsáveis também pela diminuição da eficiência energética da caldeira, além de maior necessidade de manutenções.

Figura 20 – Tratamento de água de alimentação da caldeira




Fonte: O autor (2021).

No corpo da caldeira existe uma espécie de porta que é chamada de sala de visita da caldeira, que dá acesso ao interior do equipamento para vistorias e manutenções, como as limpezas dos tubos. Essa porta deve ter ótima vedação para não haver perda de calor para o ambiente, nem acidente envolvendo o operador e precisa ser testada para conferir sua vedação periodicamente para não haver risco de uma rachadura ou até mesmo uma explosão enquanto a caldeira está em operação.

O controle de pressão máxima de trabalho é feito através de duas válvulas de segurança, uma que é acionada quando a pressão de operação da caldeira atingir 764,92 kPa e a outra quando atingir 784,53 kPa, ambas automaticamente. Se houver alguma falha na primeira válvula, a segunda é acionada, oferecendo uma maior garantia de que a pressão interna do equipamento não exceda limite ao qual ela foi projetada, e nem que haja algum acidente, causando explosão. Os dados coletados neste trabalho mostram que o consumo médio diário de madeira é sazonal, podendo ser estimado em 5,5 m<sup>3</sup>, como mostram os registros da Figura 22.

Figura 21 – Consumo diário de combustível

 <b>CONTROLE DE CONSUMO DE MADEIRA</b>				<b>CALDEIRA</b> <b>MÊS: FEVEREIRO/2022</b>	
DATA:		HORÁRIO INÍCIO:	HORÁRIO FIM:	CONSUMO:	RESPONSÁVEL:
01/02/2022	TERÇA-FEIRA	04 : 00	12 : 15	5 M <sup>3</sup>	doudio
02/02/2022	QUARTA-FEIRA	04 : 00	13 : 00	7 M <sup>3</sup>	doudio
03/02/2022	QUINTA-FEIRA	04 : 00	12 : 00	3+2 M <sup>3</sup>	doudio
04/02/2022	SEXTA-FEIRA	04 : 00	11 : 30	2+2 M <sup>3</sup>	doudio
05/02/2022	SÁBADO	04 : 00	11 : 00	3+1+1 M <sup>3</sup>	doudio
06/02/2022	DOMINGO	:	:	M <sup>3</sup>	
07/02/2022	SEGUNDA-FEIRA	04 : 00	14 : 30	3+3+1 M <sup>3</sup>	doudio
08/02/2022	TERÇA-FEIRA	:	:	M <sup>3</sup>	

Fonte: O autor (2022).

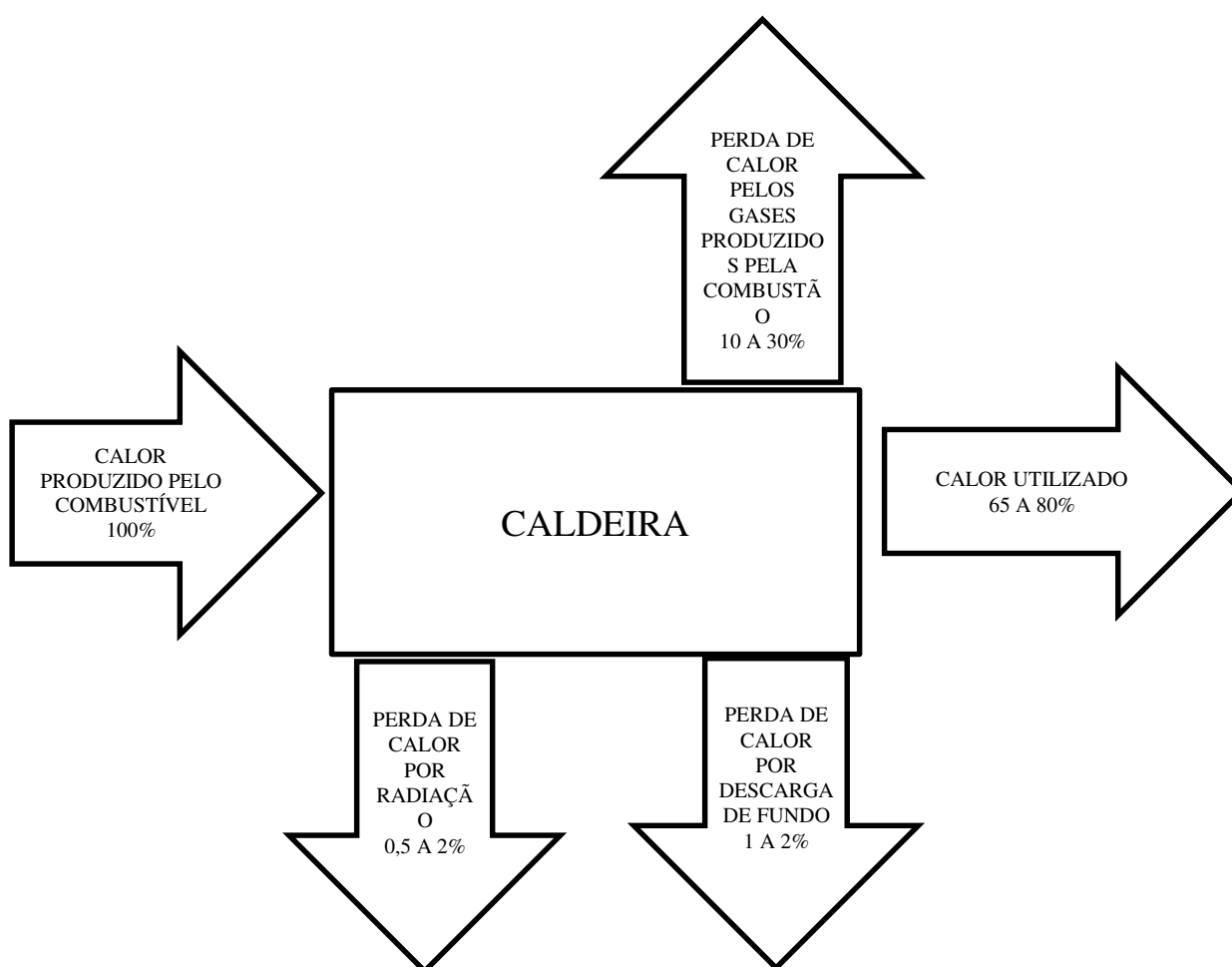
## 4.2 EFICIÊNCIA TÉRMICA

A eficiência térmica das caldeiras depende do tipo de combustível, sistema de combustão, design de construção do equipamento e sistema operacional de controle

de vapor, de acordo com Conselho dos Proprietários de Caldeiras Industriais dos Estados Unidos (*Council of industrial Boiler Owners*) (2021).

O cálculo da eficiência de qualquer processo é a relação do que foi gasto, utilizado, ou seja, todos os recursos investidos, considerados como entrada ou *input*, com os produtos obtidos, ou seja, os resultados, as saídas ou *outputs*, segundo (ASME PTC 4, 1998) conforme mostra a equação 7. Segundo Jayamaha (2008), as perdas de energia em percentual que uma caldeira pode apresentar são de 0,5% a 2% por radiação, 1 a 2% por descarga de fundo, 10 a 30% por gases exauridos pela combustão, ou seja, de 65 a 80% do calor inserido no equipamento é aproveitado no processo produtivo, conforme Figura 23.

Figura 23 – Balanço de energia de uma caldeira



Fonte: Adaptado de OYAMA (2017).

Os gases produzidos pela combustão possuem temperatura de 463 K, teor de gás oxigênio (O<sub>2</sub>) de 14,33%, teor de gás dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) de 5,87% e teor de gás monóxido de carbono (CO) de 0,01%, conforme Tabela 7.

Tabela 7 – Características dos gases resultantes da combustão

Parâmetro	Valor [Unidade]
Temperatura dos gases de combustão na base da chaminé	463 K
Teor de gás oxigênio (O <sub>2</sub> )	14,33%
Teor de gás dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	5,87%
Teor de gás monóxido de carbono (CO)	0,01%

Fonte: Adaptado de Barbieri (2017).

Considera-se também para a análise do desempenho térmico da caldeira em estudo depende do rendimento energético desse equipamento que pode ser calculado através de dois métodos, o método direto, que segundo Hengwen et al. (2013) quando a evaporação da caldeira for igual ou maior que 20 t/h, 14 MW é mais difícil de ser calculado, e o método indireto, que é o método mais utilizado pelas indústrias devido à sua melhor precisão nos resultados – representados pelas Equações 18 e 19, respectivamente:

$$n = \left( \frac{\text{output}}{\text{input}} \right) = \left( \frac{\text{saída}}{\text{entrada}} \right) \times 100 \quad (\text{Eq. 18})$$

em que a saída é considerada a energia acrescentada ao vapor da caldeira e a entrada é toda energia que entra na caldeira, que é calculada como o produto do poder calorífico do combustível com a vazão mássica deste, conforme equação 19.

$$n_{MD} = \frac{\dot{m}_v (h_v - h_a)}{\dot{m}_c PC} \quad (\text{Eq. 19})$$

onde:

$n_{MD}$  = Eficiência através do método direto;

$\dot{m}_v$  = Vazão mássica de vapor (kg/s);  
 $h_v$  = Entalpia do vapor produzido (kJ/kg);  
 $h_a$  = Entalpia de água de entrada (kJ/kg);  
 $\dot{m}_c$  = Vazão mássica de combustível (kg/s);  
 $PC$  = Poder calorífico do combustível (kJ/kg).

O Método Direto contabiliza os fluxos energéticos que estão entrando e saindo da caldeira. Apesar de ser um método simples, desconsidera-se todas as perdas existentes no processo. Pelo Método Direto, a eficiência energética é obtida pela divisão da energia líquida gerada pela caldeira pela energia total consumida (ou energia do combustível). A energia líquida gerada pela caldeira é o cálculo da energia que sai pelo vapor menos a energia que entra pela água de alimentação da caldeira. A energia do combustível, por sua vez, é representada pela multiplicação entre o consumo de combustível da caldeira e o poder calorífico deste combustível, conforme especificado pela Eq. 19.

Durante a combustão é liberada uma energia, que é denominada de poder calorífico (PC), de acordo com Barbieri (2017). De acordo com o mesmo autor, existem 2 tipos de poder calorífico: superior (PCS) e inferior e (PCI), ambos utilizam como unidade de medida J/kg.

Conforme esclarece Senger (2015), no método indireto são consideradas todas as perdas existentes no processo de combustão de uma caldeira e através desse método é realizado o acompanhamento da eficiência energética a) Perdas associadas por cinzas; b) Perdas por convecção e radiação; c) Perdas por vazamentos e purgas e d) Perdas por combustão incompleta (Centrais Elétricas Brasileiras, 2005). Esse método é o mais convencional, pois trata de forma mais sucinta das perdas relacionadas ao processo de combustão e mostra os pontos a serem melhorados para a busca do melhor desempenho de operação do equipamento (Senger, 2015). Esse método é um método mais confiável do que o método direto por serem as perdas de calor menos variáveis.

As perdas por chaminés associadas aos gases secos produzidos pela combustão, estão representadas pela Equação 20, segundo Centrais Elétricas Brasileiras (2005):

$$P_{GS} = (m_{CO_2} c_{pCO_2} + m_{SO_2} c_{pSO_2} + m_{O_2} c_{pO_2} + m_{N_2} c_{pN_2}) \cdot (T_{CH} - T_R) \quad (\text{Eq. 20})$$

onde:

$m_i$  = massa do componente  $i$  formado na combustão, em kg/kg de combustível;

$c_{pi}$  = calor específico médio entre as temperaturas  $T_{CH}$  e  $T_{Ref}$ . em kJ/kg.°C

$T_{CH}$  = temperatura dos gases na chaminé, em °C;

$T_R$  = temperatura de referência adotada, em °C.

Já as perdas por chaminés associadas ao vapor presente na chaminé, são representadas pela Equação 21, como aponta Centrais Elétricas Brasileiras (2005):

$$P_V = m_p \cdot c_{pv} (T_{CH} - T_R) + m'_v \cdot h_{IV} \quad (\text{Eq. 21})$$

onde:

$m_p$  = vazão mássica total de vapor em kg/kg de combustível;

$c_{pv}$  = calor específico médio do vapor entre  $T_{CH}$  e  $T_{Ref}$  em kJ/kg °C;

$m'_v$  = vazão mássica de vapor formado na combustão e presente no combustível em kg/kg de combustível;

$h_{IV}$  = entalpia de vaporização da água na entalpia de referência em kJ/kg

As perdas por radiação e convecção são normalmente complexas devido às diversas medições para serem obtidas, entretanto, adota-se para efeito de cálculo, entre 1% e 4% da energia fornecida.

As purgas são necessárias para garantir que a concentração de sais na água esteja em níveis toleráveis, e suas perdas são inevitáveis, podendo ser calculada através da Equação 22, de acordo com Centrais Elétricas Brasileiras (2005).

$$P_p = m_p \cdot c_{pa} (T_p - T_R) \quad (\text{Eq. 22})$$

onde:

$m_p$  = vazão média de água purgada em kg/kg de combustível;

$c_{pa}$  = calor específico da água no estado líquido, em kJ/kg °C;

$T_p$  = temperatura de saturação da água na pressão da caldeira, em °C;

Após a queima dos combustíveis sólidos, as cinzas que saem do equipamento são sinais de que há perdas que devem também ser calculadas através da Equação 23, segundo Centrais Elétricas Brasileiras (2005).

$$P_{TC} = m_R * 1170 \quad (\text{Eq. 23})$$

onde:

$m_R$  = massa de cinza obtida pela massa de combustível em kg/kg de combustível;

1170 = valor médio aproximado da entalpia sensível das cinzas.

Existem também as perdas de calor contido nas cinzas, que estão associados ao combustível não queimado, podendo ser calculado através da Equação 24, conforme Centrais Elétricas Brasileiras (2005).

$$P_{CC} = m_C * 33780 \quad (\text{Eq. 24})$$

onde:

$m_C$  = massa do carbono presente nas cinzas, em kg/kg de combustível

33780 = fator de correção

Portanto, pode-se considerar como perdas totais, pelo método indireto, o somatório de todas as perdas citadas anteriormente, ou expressa pela Equações 25 e 26, conforme Centrais Elétricas Brasileiras (2005).

$$n_{MI} = 1 - \frac{\sum \text{Perdas}}{q_f} \quad (\text{Eq. 25})$$

$$n_{MI} = 1 - \left[ K + \frac{\lambda \left( \frac{a}{c} + 1 \right) c_p * (T_{CH} - T_{Ref})_p}{PC} \right] \quad (\text{Eq. 26})$$

onde:

$K$  = somatória de todas as perdas citadas anteriormente;

$\lambda$  = coeficiente de excesso de ar na combustão, relacionando o ar real que foi fornecido como o ar teórico que o combustível requereu;

PC = poder calorífico do combustível.

Para mensurar o  $\lambda$ , foi utilizada a Tabela 8, considerando, então entre 1,40 a 1,50.

Tabela 8 – Quantidades Usuais de Excesso de ar

Combustível	Tipo de Fornalha ou Queimador	Excesso de Ar
Carvão Pulverizado	Fornalhas totalmente irradiadas	1,15 a 1,20
	Parcialmente irradiadas	-
	Com retirada escórias sólidas	1,15 a 1,40
Carvão moído	Fornalhas ciclones	1,10 a 1,15
Carvão	Grelhas planas	1,30 a 1,60
	Grelhas vibradoras refrigerada a	1,30 a 1,60
	água	1,15 a 1,50
	Grelhas rotativas	1,20 a 1,50
	<i>Underfeed Stoker</i>	
Óleo combustível	Atomização mecânica	1,20 a 1,25
	Atomização com ar em baixa pressão	1,30 a 1,40
		1,05 a 1,10
	Atomização com vapor auxiliar	
Gás Natural, Refinaria e Coqueria	Queimador com registro	1,05 a 1,10
	Queimador multi-combustível	1,07 a 1,12
Gás de alto-forno	Queimador de bocal inter-tubo	1,15 a 1,18
Lenha	Grelha plana (tiragem natural)	1,40 a 1,50
	Grelha plana (tiragem forçada)	1,30 a 1,35
Bagaço de cana	Todas as fornalhas	1,25 a 1,35
Licor negro	Caldeiras de recuperação	1,05 a 1,07
Lama ácida	Pulverização com vapor auxiliar	1,10 a 1,15

Para melhorar a eficiência térmica de uma caldeira são necessários alguns cuidados que estão relacionados, de acordo com Senger (2015) com a economia de combustível, redução das perdas de calor na caldeira, no percurso do fluido dentro do equipamento, dos cuidados relativos à manutenção e utilização da instrumentação de forma correta.

De acordo com Oyama (2017), para reduzir as perdas de calor gerado pelas caldeiras, pode-se utilizar o pré-aquecedor para aquecer o ar de entrada das caldeiras antes este ar entre no equipamento e se misture com o combustível, acelerando assim o processo de combustão. Outra forma para otimizar a eficiência térmica das caldeiras é a utilização dos gases gerados pela combustão entre no economizador, que segundo Santos (2021) é o local por onde passa a água que alimenta a caldeira, aumentando a temperatura dessa água, acelerando também o processo de combustão.

Senger (2015) acrescenta que além disso, deve-se tomar cuidado com a umidade do combustível sólido, que influencia diretamente na queima e na produção de calor, impactando diretamente na eficiência energética. Caso a umidade desse combustível for alta, o processo de combustão é dificultado, diminuindo a eficiência energética, caso a umidade desse combustível for alta, o inverso acontece. Saidur et al. (2011) afirma que a densificação da biomassa também auxilia além do aumento da densidade da biomassa, contribui para melhorar a qualidade desse combustível e reduz custos de manuseio e transporte.

Nogueira (2005) aponta outros cuidados para aumentar a eficiência energética das caldeiras como o projeto desse equipamento ter sido bem feito, eliminação de sujeiras nas superfícies de troca térmica, monitoramento da temperatura dos gases da chaminé e inspeção visual para verificação de incrustações, instalação de analisadores de gases da chaminé para que dados como a porcentagem de oxigênio, a temperatura do gás da chaminé e a eficiência da caldeira sejam obtidos. Além da instalação de economizador que é considerado um trocar de calor que eleva a temperatura da água antes que ela seja introduzida na caldeira, a recuperação de calor da descarga de fundo que elimina os sais minerais da água injetada na caldeira e o lodo.

Considerando o que ora foi apresentado, os resultados obtidos podem ser sumarizados, como mostra a Tabela 9.

Tabela 9 – Resultados obtidos através do cálculo de rendimento térmico pelo método indireto

Propriedade	Valor [Unidade]
Massa de ar teórico	$m_{ar,teor} = 4,196$ [kg/kg de comb.]
Excesso de ar	EA = 214,8 [%]
Massa de ar real	$m_{ar,real} = 13,21$ [kg/kg de comb.]
Massa de gás seco de combustão	$m_{GS} = 13,54$ [kg/kg de comb.]
Perda pelos gases secos de combustão	$q_1 = 11,18$ [%]
Perda pelos gases úmidos de combustão	$q_2 = 5,50$ [%]
Perda pela umidade do combustível	$q_3 = 4,30$ [%]
Perda pela umidade do ar de alimentação	$q_4 = 0,25$ [%]
Perda pela queima incompleta do combustível	$q_5 = 0,08$ [%]
Perda pela radiação e convecção	$q_6 = 4,00$ [%]
Perda pelas cinzas não queimadas	$q_7 = 0,04$ [%]
Perdas totais	$q_{totais} = 11,18$ [%]
Rendimento Térmico	$\eta_{MI} = 74,65$ [%]

Fonte:O autor.

## 5. CONCLUSÕES

A preocupação com relação à conservação e manutenção do meio ambiente levou as empresas a reduzirem a utilização de combustíveis de fontes de energia não renovável pelas renováveis. Uma das alternativas é a biomassa, que cresceu 9,10% no último senso do BEN 2021. A Indústria de Laticínios Lindo Vale São Geraldense possui uma caldeira flamotubular que utiliza esse combustível nesse equipamento, que nas condições de operação descritas nesse trabalho, resultou em um rendimento térmico de 74,65%, ou seja, houve uma perda de 25,35%, referentes a 11,18% dos gases secos de combustão, 5,50% dos gases úmidos de combustão, 4,30 da umidade do combustível, 4,00% por radiação de convecção, 0,25% pela umidade do ar de alimentação, 0,08% pela queima incompleta do combustível e 0,04% pelas cinzas não queimadas.

Para aumentar a eficiência térmica desse equipamento, sugere-se a não utilização de entulho como combustível, pois isso causa sujeira excessiva e acúmulo de materiais no fundo da caldeira, o que faz necessário manutenção corretiva para limpeza do fundo desse equipamento em intervalos de tempo muito curtos; também é necessário a correção de grandes vazamentos de vapor entre a fornalha e o corpo da caldeira e na sala de visita; melhoria do isolamento das madeiras em depósito, construindo uma parede para evitar contato direto entre as madeiras e o ar externo; troca dos visores dos manômetros da caldeira para melhor visualização e aferição das medições; abertura da saída de vapor para as linhas de produção somente quando a caldeira atingir a pressão de trabalho necessária à sua utilização; utilização de medição da composição dos produtos da combustão para análise da emissão e posterior redução de poluentes na atmosfera; aferição regular da umidade da madeira para posterior análise dos impactos dessa umidade da eficiência térmica da caldeira.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. 2020. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 19/03/2021.

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. 2013. Resolução n° 903, de 22 de julho de 2013 Disponível em < <http://pnqa.ana.gov.br/Qualiagua.aspx> > Acesso em 19/03/2021.

ANALYSER INSTRUMENTAÇÃO ANALÍTICA. Disponível em: <LOJA NET LAB. Disponível em: <<https://www.lojanetlab.com.br/equipamentos-para-laboratorios/analizador-de-gases/aparelho-de-orsat-q332>>. Acesso em: 09/11/2021.

ANDRES, S. C. **Análise comparativa de diferentes processos de limpeza química de caldeiras utilizadas em uma termoeletrica do RS.** 2012. 70 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Energias Renováveis e Ambiente) – Universidade Federal do Pampa, Bagé, RS, 2012.

ASME PTC 4. Fired Steam Generators, The American Society of Mechanical Engineers, Three Park Avenue, New York NY 10016-5990, 1998.

ALBERICHI, M. **Estudo das instalações e operações de caldeiras de uma indústria de produtos químicos do estado do Paraná, sob a ótica da NR-13 e NR-28.** 2013. 103 f. Monografia (Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2013.

BAGGIO, R. W. O. **Modelagem de uma Caldeira Flamotubular com Fornalha Aquatubular.** 2018. 81 f. Dissertação (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, SC, 2018.

BARBIERI, R. C. **Aplicação do Método Indireto no Cálculo da Eficiência Energética de Caldeira Industrial Flamotubular Alimentada por Lenha.** 2017. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2017.

BARBIERI, R. C.; CAMPOS, J. C. C.; BRITO, R. F.; SIQUEIRA, A. M. O.; MINETTE, L. J.; ACEVEDO, E. J. **Análisis de la eficiencia energética de una caldera industrial alimentada por leña.** 2019. 20 f. Artigo científico. Research, Society and Development. Vargem Grande Paulista, SP, 2019.

BELLO, L. F. R. **Introdução de caldeira de biomassa em uma fábrica do ramo de nutrição animal utilizando cavaco de eucalipto como combustível.** 2018. 37 f. Trabalho de Conclusão de Curso (bacharelado em Engenharia Mecânica) – Centro Universitário do Sul de Minas, Varginha, MG, 2018.

CAPEHART, B. L.; TURNER, W. C.; KENNEDY, W. J. **Guide to Energy Management.** 7 ed. Firemont Press. 2012.

CARDOSO, D. R. O. **Aumento de eficiência energética de uma instalação de geração de vapor por meio do reaproveitamento de energia em linhas de retorno**

**de condensado.** 2018. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2018.

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS. **Eficiência energética no uso de vapor.** Rio de Janeiro, Eletrobrás, 2005. 196p.

CEREIJO, G. N. **Modelagem simplificada e simulação da combustão de uma partícula de biomassa suspensa em escoamento unidimensional.** 2014. Dissertação de Mestrado. Universidade de Campinas, Campinas, SP, 2014.

CONFOR. Disponível em: <<https://www.confor.com.br/produto/detector-de-ionizacao-de-chama>>. Acesso em: 09/11/2021.

COUNCIL OF INDUSTRIAL BOILER OWNERS. 2021. Disponível em: <<https://www.cibo.org/>>. Acesso em 08/03/2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional.** 2021. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>>. Acesso em: 24/01/2022.

FILHO, R. R. A. **Metodologia para análise energética e exergética de uma caldeira aquatubular com queima de bagaço de cana.** 2014. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Baurú, SP, 2014.

FRANCISCO, R. P. **Estudo termoquímico da queima de combustíveis em caldeiras usando balanços de energia.** 2012. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia) – Associação ampla entre o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais e a Universidade Federal de São João Del Rei, São João Del Rei, MG, 2012.

GOOGLE. **Mapa da região de São Geraldo/MG.** 2022 Google Maps. <<https://www.google.com.br/maps/@-20.8900243,-42.7923108,11z>>. Acesso em: 24/01/2022.

HENGWEN, Z; SHUO, D.; FANG, Y.; LIANGPING, S. The Research and Application of Industrial Boiler Energy Efficiency Test. **Applied Mechanics an Materials**, v. 228, p. 296-302, 2013.

KIESOW, R. M. **Desenvolvimento de um sistema para pré-aquecimento de água de alimentação de uma caldeira flamotubular.** 2015. 62 f. Trabalho de Conclusão de Estágio 2 (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, RS, 2015.

LATICÍNIOS LINDO VALE SÃO GERALDENSE. São Geraldo, 2022.

LAVEZZO, C. A. L. **Fontes de Energia.** 2016. 25 f. Artigo Gestão em Foco – Centro Universitário Amparense, Amparo, SP, 2016.

LOJA NET LAB. Disponível em: <<https://www.lojanetlab.com.br/equipamentos-para-laboratorios/analizador-de-gases/aparelho-de-orsat-q332>>. Acesso em: 09/11/2021.

MARTINS, I. P. **Redução sistemática de mecanismos cinéticos de combustão**. 2011. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2011.

MADEJSKI, P.; ZYMELKA, P. **Calculation methods of steam boiler operation factors under varying operating conditions with the use of computational thermodynamic modeling**. Elsevier. 2020. 12 f. Artigo científico. Elsevier, 2020.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N.; BOETTNER, D. D.; BAILEY, M. G. **Princípios de termodinâmica para engenharia**. 2013. 708 f. 7 ed. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda. 2013.

MOREIRA, L. C. O. **Comparação entre os poluentes atmosféricos e ruídos emitidos por uma caldeira flamotubular movida a gás natural e a óleo combustível BPF 2A**. 2007. 145 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) – Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Campo Grande, MS, 2007.

NOGUEIRA, L. A. H.; et al. **Eficiência energética no uso do vapor manual prático**. Eletrobrás, 2005. 96 f. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/mobile/lcmartinelli1/eficincia-energtica-no-uso-do-vapor>>. Acesso em 19/03/2021.

OYAMA, H. C. **Análise de processo em caldeiras da indústria sucroenergética**. 2017. 79 f. Monografia (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2017.

PINHEIRO, P. C. C. **Curso de Combustão de Combustíveis Gasosos**. 1999. 54f. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 1999.

RABAÇAL, M. E. R. F. **Influência das características do combustível no desempenho energético e ambiental de caldeiras domésticas**. 2010. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2010.

ROCCO, C. D. **Um modelo de otimização para as operações de produção de vapor em caldeiras industriais: um estudo de caso na indústria de alimentos**. 2011. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2011.

SAIDUR, R.; ABDELAZIZ, A.; DEMIRBAS, B., HOSSAINA, M.S.; MEKHILEF, S. **A review on biomass as a fuel for boilers**. Elsevier. 2011. 28 f. Artigo científico. Elsevier, 2011.

SANTOS, E. J. N.; FRAGA, F. E. **A importância do tratamento e cuidados com a água de caldeira**. 2017. 10 f. Artigo (Bacharelado em Ciência e Tecnologia) – Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, RN, 2017.

SANTOS, P. H. C. **Estudo de caso: Readequação do sistema de geração de vapor**

**em uma empresa automotiva.** 2021. 50 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2021.

SEARCY, E.; FLYNN, P.; GHAFOORI, E; KUMAR, A. **The relative cost of biomass energy transport.** 2007. 14 f. Artigo científico. Biochemistry and Biotechnology, 2007.

SENGER, R. **Análise do rendimento térmico de uma caldeira alimentada com lenha em toras.** 2015. 62 f. Monografia de Bacharelado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, PR, 2015.

SHIRMER, W. N.; RUDNIAK, A. **Avaliação das emissões gasosas de diferentes tipos de combustíveis utilizados e seus impactos ambientais.** 2009. 10 f. Artigo científico. Tecno-lógica, 2009.

THERMO FISHER SCIENTIFIC. Disponível em:  
<<https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/14800300>>. Acesso em:  
09/11/2021

URNS, S. R. **An introduction to combustion: concepts and applications.** 2000. 676 f. 2 ed. McGraw-Hill. 2000.

URNS, S. R. **Introdução à combustão: conceitos e aplicações.** 2013. 404 f. 3 ed. McGraw-Hill. 2013.