



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO EM
ENGENHARIA QUÍMICA



Análise de uma Caldeira Aquatubular na Indústria do Papel: Estudo de Caso em Guaíba, Rio Grande do Sul

Autor: Eduarda Dalmina Galioto

Orientador: Jordana Corralo Spada

Porto Alegre, fevereiro de 2024

Autor: Eduarda Dalmina Galioto

Análise de uma Caldeira Aquatubular na Indústria do Papel: Estudo de Caso em Guaíba, Rio Grande do Sul

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à COMGRAD/ENQ da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química

Orientador: Jordana Corralo Spada

Banca Examinadora:

Prof^a. Dr^a. Ligia Damasceno Ferreira Marczak, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dr^a. Dirléia dos Santos Lima, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Porto Alegre

2024

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à minha família pelo apoio durante os anos da graduação, principalmente aos meus pais, Sandra Maria Dalmina e Andre Galioto, e ao meu irmão, Mateus Dalmina Galioto, pela oportunidade e incentivo para alcançar esta conquista.

Agradeço aos meus amigos, novos e de longa data, que enfrentaram comigo muitos desafios nos últimos anos, e que deram suporte no início dessa jornada, se tornando pessoas muito especiais que levarei para a vida toda.

Estendo meus agradecimentos à minha orientadora, Jordana Corralo Spada, pelo aprendizado, conhecimento e contribuição nesta etapa final da graduação que foi fundamental para alcançar este resultado.

E por fim, agradeço a todos que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho e para a minha formação acadêmica.

RESUMO

Os geradores de vapor podem ser categorizados em dois tipos: flamotubular e aquatubular. Geralmente, eles são equipados com acessórios projetados para otimizar a vaporização da água, contribuindo assim para um aumento de eficiência da caldeira. A mudança do combustível precisa ser economicamente viável para o negócio e influencia em adequações do processo e de equipamentos industriais. A partir dessa motivação, o presente trabalho apresenta uma avaliação dos aspectos técnicos e econômicos associados à substituição do gás natural empregado na caldeira aquatubular de uma empresa, a partir de um estudo de caso em Guaíba, Rio Grande do Sul, por combustíveis alternativos: GLP, óleo diesel e biodiesel. A mudança de combustível se faz necessária devido à menor demanda atual da empresa. Para o cálculo da eficiência da caldeira utilizou-se o método direto, o qual contabiliza os fluxos energéticos da caldeira, desconsiderando as perdas existentes no processo. Por conta da eficiência do equipamento ser adequada ao encontrado em caldeiras aquatubulares, foi calculada a quantidade de combustível necessária e o gasto econômico diário e mensal para cada alternativa, visando alcançar o mesmo rendimento da caldeira com gás natural. Analisando os resultados quantitativamente, concluiu-se que o óleo diesel é a opção de menor custo em consumo de combustível. Porém, com uma análise qualitativa, que considerou os prováveis custos com a adaptação de partes da caldeira e troca de acessórios, além do custo com local apropriado de armazenamento e a sustentabilidade das alternativas levantadas, concluiu-se que o GLP é a escolha que resulta em uma menor quantidade de modificações no gerador de vapor.

Palavras-chave: Vapor, caldeira aquatubular, combustível.

ABSTRACT

Steam generators can be categorized into two types: smoke tube and water tube. Generally, they are equipped with accessories designed to improve water vaporization, thus contributing to an increase of the boiler efficiency. Changing the fuel needs to be economically viable for the business and impacts into adjustments to the process and industrial equipment. Based on this motivation, the present work presents an evaluation of the technical and economic aspects associated with the replacement of natural gas in a company's water tube boiler, based on a case study in Guaíba, Rio Grande do Sul, with alternative fuels: LPG, diesel oil and biodiesel. The fuel change is necessary due to the company's current lower demand. To calculate the boiler efficiency, the direct method was used, which accounts for the boiler's energy flows, disregarding losses in the process. Inasmuch as the efficiency of the equipment is adequate to that found for water tube boilers, the amount of fuel required and the daily and monthly economic expenditure for each alternative was calculated, aiming to achieve the same efficiency as the natural gas boiler. Analyzing the results quantitatively, it was concluded that diesel oil is an option with lower financial expenditure on fuel consumption. However, with a qualitative analysis, which evaluates the likely costs of adapting boiler parts and changing accessories, in addition to the cost of local storage and the sustainability of the alternatives, we conclude that LPG is the option that results in a smaller amount of modifications to the steam generator.

Keywords: *Steam, Water tube boiler, Fuel.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de uma caldeira flamotubular de três passes.	10
Figura 2 – Esquema de uma caldeira aquatubular.	12

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dependência do coeficiente de excesso de ar (λ) com o estado físico do combustível.	5
Tabela 2 – Valores usuais do coeficiente de excesso de ar para alguns combustíveis em determinados tipos de queimador e fornalha.....	6
Tabela 3 – Valores de poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico inferior (PCI) de combustíveis gasosos.....	7
Tabela 4 – Limites de inflamabilidade de combustíveis em ar, valores representados em porcentagem volumétrica.	8
Tabela 5 – Características físico-químicas do biodiesel produzido a partir de diferentes espécies vegetais.	16
Tabela 6 - Características de projeto da caldeira e dados do combustível.....	21
Tabela 7 – Propriedades dos combustíveis estudados no presente trabalho.	22
Tabela 8 - Dados de consumo de vapor, combustível e propriedades da água.	22
Tabela 9 - Consumo e custo para cada combustível.	24
Tabela 10 - Adaptações necessárias para troca de combustível.	25

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Objetivos	1
2	Revisão Bibliográfica	3
2.1	Combustão	3
2.1.1	Reações de combustão	3
2.1.2	Excesso de ar	4
2.2	Poder calorífico superior e inferior	6
2.3	Limite inferior e superior de inflamabilidade	7
2.4	Temperatura adiabática de chama	9
2.5	Geradores de vapor	9
2.5.1	Flamotubulares	10
2.5.2	Aquatubulares	11
2.6	Combustíveis industriais	13
2.6.1	Gás Natural	14
2.6.2	Óleo diesel	14
2.6.3	Biodiesel	15
2.6.4	Biomassa	16
3	Estudo de caso	19
3.1	A empresa	19
3.2	Detalhamento da caldeira	20
4	Materiais e métodos	21
4.1	Parâmetros do processo	21
4.2	Eficiência da caldeira	23
5	Resultados	24
5.1	Eficiência da caldeira aquatubular com gás natural	24
5.2	Análise da substituição do gás natural por combustíveis alternativos	24
6	Conclusões	28
	REFERÊNCIAS	29

1 Introdução

Desde a Revolução Industrial, o vapor passou a ser parte importante para o desenvolvimento tecnológico e econômico do mundo. Esse era gerado, primeiramente, a partir da queima do carvão mineral, insumo que foi gradativamente substituído por diversos combustíveis ao longo dos anos. Atualmente, o vapor é imprescindível para alguns setores industriais; é muito utilizado nas indústrias têxtil, de laticínios, metalúrgica, papelreira, alimentícia, entre outras. Essa ampla utilização de vapor dá-se, também, pelo fato de que a água, o insumo principal dos geradores de vapor, ser de fácil acesso e sem custo elevado.

Os geradores de vapor presentes na indústria, comumente chamados de caldeiras, variam conforme o layout de passagem de água/calor nas tubulações e são dimensionados a partir da demanda de vapor da indústria a qual atendem. Também, possuem acessórios variados que auxiliam na geração de vapor. Os geradores de vapor podem ser alimentados com combustíveis líquidos, gasosos ou sólidos, sendo eles de origem fóssil ou não. Alguns exemplos de combustíveis utilizados em caldeiras são: gás natural, GLP, biomassa (principalmente derivados da madeira), óleo combustível, entre outros; A escolha deste insumo influencia nas características de determinados acessórios e em aspectos de construção e armazenamento da matéria-prima.

Devido a necessidade de atualização dos processos industriais para atender questões de demandas e de sustentabilidade, diversas empresas necessitam trocar sua matriz energética por outro que se adeque melhor ao processo. Assim, indústrias que fazem uso de geradores de vapor, veem a oportunidade de substituir o combustível empregado nas caldeiras por alternativas que têm um menor impacto negativo ao meio ambiente, o que resulta na adaptação dos equipamentos do processo e, também, em um impacto econômico para o negócio.

Em vista disso, fica evidente a necessidade de uma avaliação técnica e econômica da utilização de combustíveis alternativos nos equipamentos já existentes nas indústrias, a fim de identificar adaptações e reformas necessárias, futuros gastos com os combustíveis alternativos e demais quesitos que impactam o processo e o rendimento do equipamento.

1.1 Objetivos

O presente trabalho visa realizar a avaliação de uma caldeira, por meio de um estudo de caso centrado em uma empresa de produção de papel localizada em Guaíba, Rio Grande do Sul. O enfoque principal será nos aspectos técnicos e econômicos associados à substituição do gás natural, atualmente empregado na caldeira aquatubular da empresa, por combustíveis alternativos.

A análise compreenderá a determinação do consumo de combustível e o custo correspondente para cada alternativa considerada. Para tanto, será mantido um rendimento da caldeira em níveis satisfatórios, enquanto se exploram opções economicamente viáveis. Adicionalmente, o estudo abrangerá os aspectos relacionados à construção do equipamento, incluindo adaptações necessárias para a transição de combustíveis, bem como a substituição e aquisição de componentes.

Essa abordagem integral proporcionará uma visão abrangente das implicações técnicas e econômicas associadas à transição de combustíveis na operação da caldeira, contribuindo assim para a tomada de decisões informadas e eficazes.

2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo, serão abordados conceitos sobre combustão, informações sobre combustíveis e os diferentes tipos de caldeiras atualmente empregadas na indústria. Para tanto, será utilizado como referência um livro base que reúne diversos conceitos derivados de outras referências primárias. Essa abordagem busca estabelecer um contexto fundamental para a compreensão do estudo de caso apresentado neste trabalho, proporcionando uma base sólida para análises e discussões subsequentes.

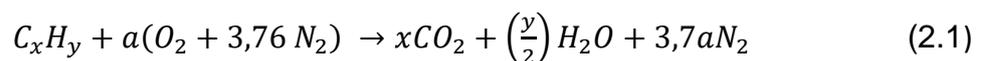
2.1 Combustão

O processo de combustão envolve a conversão da energia química em energia térmica por meio de um conjunto de reações químicas entre um material combustível e um oxidante. A liberação de calor ocorre porque o balanço de energia deste processo é positivo, ou seja, a energia liberada pelas reações químicas é maior que a energia absorvida (MOREIRA, 2023)

A combustão depende de fatores como o tempo em que as reações ocorrem, do estado físico do combustível, do equipamento utilizado e principalmente da relação entre as massas de combustíveis e comburentes (oxidante). São elas que determinam se o processo irá ocorrer de forma a alcançar a oxidação completa de todos os compostos envolvidos para liberar o máximo de energia contida no combustível. Porém, em situações em que há algum reagente em menor quantidade que o outro, ocorre a combustão incompleta com a ocorrência de produtos constituídos da oxidação parcial dos reagentes.

Por razões econômicas, o ar é usualmente utilizado como oxidante das reações de combustão. Considera-se que a composição química do ar em base molar é de aproximadamente 79 % N₂ e 21 % O₂. Em algumas situações, o ar é enriquecido com oxigênio puro para atender as necessidades técnicas do processo (MOREIRA, 2023).

O entendimento da estequiometria da combustão possibilita determinar a quantidade teórica de ar necessária para a combustão completa de uma unidade de combustível e, assim, calcular a relação ar/combustível (kg ar/kg de combustível). O balanço atômico apresentado na Equação 2.1 apresenta a razão estequiométrica entre o oxidante e um combustível hidrocarboneto dado pela fórmula química genérica C_xH_y.



Onde,

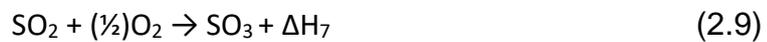
$$a = x + y/4 \quad (2.2)$$

2.1.1 Reações de combustão

Ao utilizar um combustível sólido ou líquido, a liberação de calor é quantificada pelas reações de combustão do carbono (Equação 2.3), hidrogênio (Equação 2.4) e enxofre (Equação 2.5) presentes na substância. As reações representadas consideram a combustão completa.



As reações das Equações 2.6 e 2.7 representam as reações de combustão incompleta, das quais os produtos podem ser oxidados conforme as reações apresentadas nas Equações 2.8 e 2.9.

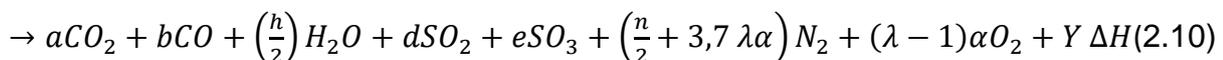
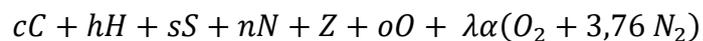


Os ΔH_i representam a quantidade de energia liberada por unidade de massa ou de volume do combustível.

2.1.2 Excesso de ar

O valor de oxigênio ou ar calculado a partir das reações estequiométricas é um valor teórico. Em situações reais, as características da fornalha, do queimador e do escoamento dos fluidos envolvidos na combustão influenciam na homogeneização da mistura combustível/comburente e usualmente, para obter uma mistura adequada para a combustão completa, utiliza-se quantidades maiores de ar do que a estequiométrica (MOREIRA, 2023).

A reação da Equação 2.10 representa a forma generalizada da reação global de combustão na base volumétrica quando se utiliza ar como oxidante.



Em que:

$c; h; s; n; o$ = número de mols de cada elemento ou moléculas de combustível;

Z = cinzas;

$c = a + b$;

$s = d + e$;

Y = material particulado (cinzas + material orgânico não convertido);

λ = coeficiente de ar;

ΔH = quantidade de energia total liberada por unidade de massa ou volume do combustível;

$$\alpha = \text{número de mols de oxigênio estequiométrico} = a + \frac{b}{2} + \frac{h}{2} + d + \frac{3e}{2}$$

Assim, a partir da Equação 2.11 é possível calcular o excesso de ar do processo (λ) utilizando os valores de quantidade de ar estequiométrico e de ar real introduzida no processo. Rearranjando a Equação 2.11 e utilizando os valores de quantidade de ar estequiométrico e excesso de ar desejado, calcula-se a quantidade de ar que deve ser utilizada para o processo de combustão. Conclui-se que quando $\lambda = 1$ ou 100% tem-se uma combustão estequiométrica, para $\lambda > 1$ tem-se uma combustão com excesso de ar e para valores de $\lambda < 1$ uma combustão incompleta ou subestequiométrica. O excesso de ar do processo (λ) é dado pela Equação 2.11.

$$\lambda = \frac{ar_{real}}{ar_{esteq.}} \times 100 \quad (2.11)$$

A Tabela 1 apresenta valores do coeficiente de excesso de ar e sua dependência com o estado físico do combustível. Nota-se que para combustíveis sólidos é necessário maior excesso de ar quando comparado com combustíveis líquidos e gasosos. Dependendo do tipo de queimador ou fornalha, os valores do coeficiente de excesso de ar também podem diferir para um mesmo tipo de combustível, conforme abordado na Tabela 2.

Tabela 1 – Dependência do coeficiente de excesso de ar (λ) com o estado físico do combustível.

Estado físico do combustível	Coeficiente de excesso de ar (λ)
Combustíveis sólidos	1,4 – 2,0
Combustíveis líquidos	1,2 – 1,4
Combustíveis gasosos	1,05 – 1,1

Fonte: Moreira, 2023.

Tabela 2 – Valores usuais do coeficiente de excesso de ar para alguns combustíveis em determinados tipos de queimador e fornalha.

Combustível	Tipo de fornalha (grelha) ou queimador	Coeficiente de excesso de ar (λ)
Carvão	Grelha fixa	1,30 – 1,60
	Grelha vibratória	1,30 – 1,60
	Grelha rotativa	1,15 – 1,50
Óleo combustível	Grelha fixa alimentação por baixo	1,30 – 1,50
	Queimadores de óleo tipo registro	1,05 – 1,15
Gás natural	Queimadores multicombustível	1,05 – 1,20
	Queimadores tipo registro	1,05 – 1,10
Madeira	Grelha	1,20 – 1,25
Licor negro	Fornalha recuperação Kraft e Soda	1,05 – 1,07

Fonte: Considine, 1977, *apud* FRANCISCO, 2012.

2.2 Poder calorífico superior e inferior

O poder calorífico de um combustível é definido como a quantidade de calor liberada durante a combustão completa de uma unidade de massa (1 kg) ou de volume (1 m³) de combustível. Esse valor pode ser determinado por meio de modelos teóricos, considerados valores estimativos, ou experimentalmente, com o auxílio de calorímetros adiabáticos.

Para determinar o poder calorífico de combustíveis sólidos e líquidos, é possível utilizar o modelo de Dulong a partir dos teores de carbono, hidrogênio e enxofre em base seca. Neste caso, o poder calorífico é a soma das entalpias de combustão dos elementos que compõem o combustível, conforme mostram as Equações 2.12 e 2.13 que são utilizadas para determinação matemática do valor do poder calorífico superior e inferior destes tipos de combustíveis, respectivamente.

$$PCS = 33950 C + 144200 \left(H_2 - \frac{O_2}{8} \right) + 9400 S \quad (2.12)$$

$$PCI = PCS - 2400 (9H_2 + w) \quad (2.13)$$

Em que:

PCS = poder calorífico superior, em kJ/kg;

PCI = poder calorífico inferior, em kJ/kg;

C = teor de carbono, em kg C / kg combustível;

H_2 = teor de hidrogênio, em kg H_2 / kg combustível;

O_2 = teor de oxigênio, em kg O_2 / kg combustível;

S = teor de enxofre, em kg S / kg combustível;

w = percentual de umidade.

O modelo de Dulong também demonstra como determinar o poder calorífico de combustíveis gasosos, que, matematicamente, é igual à soma do produto das frações mássicas ou volumétricas de cada componente individual pelo seu respectivo poder calorífico. A Equação 2.14 é aplicada para o cálculo do poder calorífico de combustíveis gasosos.

$$PCS = \sum_{i=1}^n PCS_i \cdot x_i \quad (2.14)$$

Onde:

PCS_i = PCS de cada componente;

x_i = fração mássica ou volumétrica de cada componente;

A Tabela 3 apresenta os valores de PCS e PCI para alguns combustíveis gasosos.

Tabela 3 – Valores de poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico inferior (PCI) de combustíveis gasosos.

Gás	PCS (kJ/kg)	PCI (kJ/kg)
Metano	55.539	50.028
Proprano	50.342	46.332
Butano	49.522	45.719
Gás natural de Santos	53.112	48.020
Gás pobre de carvão vegetal	4.630	4.402
GLP (gás liquefeito de petróleo)	49.933	46.026
Óleo diesel	42.164	39.203
Óleo combustível	42.041	39.717

Fonte: Moreira, 2023.

2.3 Limite inferior e superior de inflamabilidade

No processo de combustão, a relação entre o combustível e o oxidante em uma mistura determina se ela é inflamável ou não. Um dado conjunto de condições permite a propagação de uma chama estável. Porém, conforme estas condições são progressivamente alteradas, a razão ar/combustível alcança um estado em que uma

chama estável não se propaga mais; esse estado é o limite de estabilidade da mistura. Se o comportamento dessa variação resultar na não propagação da chama, esse limite é chamado de limite de inflamabilidade.

Portanto, uma mistura queimarà enquanto a razão ar/combustível estiver entre os limites inferior e superior de inflamabilidade. O limite inferior (LI) informa a concentração mínima de gases de combustão que, misturada com uma quantidade suficiente de ar atmosférico e em contato com uma fonte de ignição, resulta na combustão. E o limite superior (LS) é a maior concentração de gases de combustão em que a chama continua propagando até se extinguir. Industrialmente, o conhecimento deste parâmetro é importante no aspecto operacional e de segurança. Quanto maior o intervalo entre o LI e o LS, mais fácil de se obter uma mistura inflamável.

A Tabela 4 apresenta valores inferiores e superiores de inflamabilidade para diferentes combustíveis em ar.

Tabela 4 – Limites de inflamabilidade de combustíveis em ar, valores representados em porcentagem volumétrica.

Combustível	Limite inferior	Limite superior
Metano	5,0	15,0
Heptano	1,0	6,7
Hidrogênio	4,0	75,0
Monóxido de carbono	12,5	74,2
Acetaldeído	4,0	60,0
Acetileno	2,5	100,0
Óxido de etileno	3,6	100,0

Fonte: Glassman, 2008.

Os limites inferior e superior de inflamabilidade de misturas de combustíveis podem ser calculados pela Lei de Le Chatelier, conforme as Equações 2.15 e 2.16.

$$LImistura = \frac{100}{\frac{C_1}{LI_1} + \frac{C_2}{LI_2} + \dots + \frac{C_i}{LI_i}} \quad (2.15)$$

$$LSmistura = \frac{100}{\frac{C_1}{LS_1} + \frac{C_2}{LS_2} + \dots + \frac{C_i}{LS_i}} \quad (2.16)$$

Onde C_1, C_2, \dots, C_i (% base volumétrica) são as proporções de cada gás na mistura gasosa sem ar.

2.4 Temperatura adiabática de chama

Quando todo o calor envolvido numa reação de combustão é empregado exclusivamente para elevar a temperatura dos produtos, essa temperatura é chamada de temperatura adiabática de chama. Essa é a máxima temperatura que os gases de combustão podem adquirir hipoteticamente, visto que as câmaras de combustão existentes não são adiabáticas, ou seja, ocorrem perdas de energia para o meio. Esse valor é utilizado para comparar mudanças na intensidade térmica com relação a diferentes parâmetros envolvidos no processo de combustão, como o tipo de combustível e a porcentagem de excesso de ar.

O valor da temperatura adiabática de chama pode ser calculado aplicando-se a Primeira Lei da Termodinâmica para um sistema adiabático e considerando-se as entalpias de combustão ou poder calorífico inferior dos combustíveis. Também, nos cálculos considera-se que no processo não há formação de compostos resultantes de combustão incompleta. A Equação 2.17 permite calcular o valor da temperatura adiabática de chama a partir do poder calorífico do combustível (MOREIRA, 2023).

$$m_c \times cp_{gás} \times (T_{ch} - T_m) = m_c \times PCI$$

$$T_{Ch} = T_m + \frac{m_c \times PCI}{m_{gás} \times cp_{gás}} \quad (2.17)$$

Onde:

T_{Ch} = temperatura adiabática de chama, em K;

T_m = temperatura da mistura ar de combustão e combustível na entrada, em K;

m_c = vazão mássica do combustível queimado, em kg/s;

$m_{gás}$ = vazão mássica dos gases de combustão, em kg/s;

$cp_{gás}$ = calor específico dos gases de combustão, em kJ/kg.K.

2.5 Geradores de vapor

Existem diversas razões para a utilização do vapor de água como meio de geração, transporte e utilização de energia. A água está disponível em abundância sendo de fácil obtenção e baixo custo. Seu vapor tem alto conteúdo de energia por unidade de massa e volume. Além disso, as relações de temperatura e pressão de saturação possibilitam sua utilização como fonte de calor com pressões de vapor adequadas à tecnologia disponível há muitos anos.

Em utilizações industriais, caldeiras podem ser classificadas conforme sua pressão de trabalho:

- Baixa pressão: até 10 kgf/cm²;
- Média pressão: de 11 a 40 kgf/cm²;
- Alta pressão: maior que 40 kgf/cm².

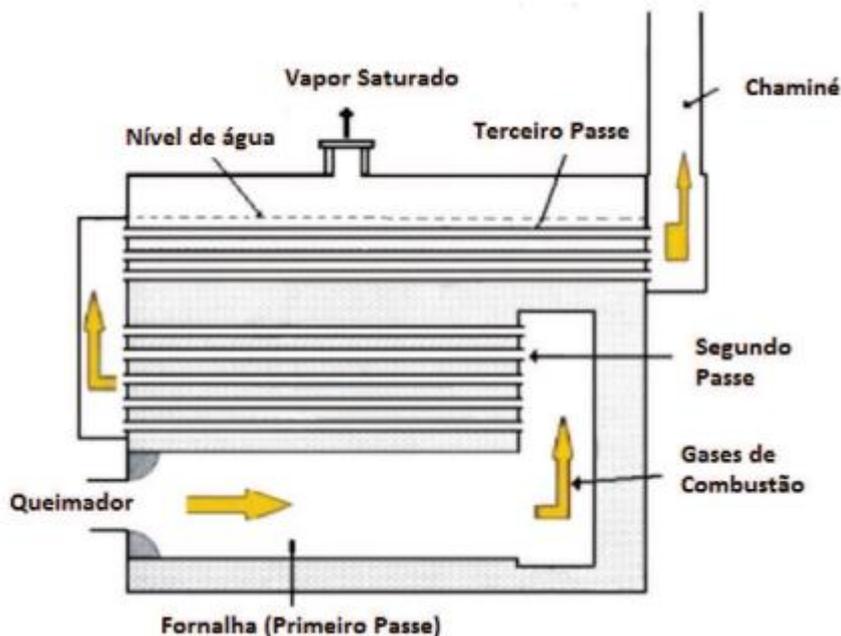
Também podem ser classificadas em dois tipos básicos: flamotubulares e aquatubulares. O primeiro tipo possui uma disposição que permite que os gases de combustão circulem dentro de tubos, vaporizando a água que fica por fora dos mesmos. Já o segundo tipo funciona com uma disposição ao contrário da primeira, com a água sendo vaporizada dentro dos tubos pelos gases de combustão que circulam por fora.

2.5.1 Flamotubulares

A caldeira flamotubular (também chamada de fogotubular ou pirotubular) foi o primeiro tipo de caldeira construído. Neste caso, os gases de combustão produzidos na fornalha circulam no interior dos tubos por um ou mais passes, com os tubos circundados por água. Esse equipamento opera com baixa ou média pressão, e por este motivo é mais utilizado em processos que não requerem pressões e temperaturas muito altas. A caldeira é relativamente simples e compacta, de fácil construção, composta basicamente de um cilindro externo que contém água e um cilindro interno destinado à fornalha.

A Figura 1 mostra uma representação esquemática do funcionamento de uma caldeira flamotubular e apresenta o caminho percorrido pelos gases de combustão. Esses gases são gerados na câmara da fornalha a partir da mistura do combustível com o ar, passam pelo tubulão cheio de água através dos tubos metálicos, sistemas trocadores de calor e, por fim, o gás sai do sistema através de uma chaminé.

Figura 1 – Esquema de uma caldeira flamotubular de três passes.



Fonte: Baggio, 2018.

Há duas variedades de caldeiras flamotubulares utilizadas na indústria, e elas diferem quanto ao arranjo dos tubos por onde os gases de combustão percorrem, que podem estar dispostos de duas formas: verticalmente ou horizontalmente. A flamotubular vertical possui tubos dispostos verticalmente em um corpo cilíndrico fechado por placas chamadas de espelhos. Nesse tipo de caldeira, uma fornalha

interna fica localizada abaixo do espelho inferior. O outro tipo corresponde à flamotubular horizontal, com os vasos de pressão dispostos horizontalmente com os espelhos nas extremidades e junto deles a fornalha e os tubos.

Esse tipo de gerador de vapor é versátil, pois pode utilizar uma grande variedade de combustíveis, desde gás natural e gás liquefeito de petróleo (GLP), óleo combustível, até diversas biomassas, como bagaço de cana-de-açúcar, casca de arroz, cavaco de madeira. A queima da biomassa pode ocorrer por meio de processos de pirólise, gaseificação, combustão ou co-combustão. Os setores da indústria que fazem uso de caldeiras flamotubulares são frigoríficos, indústria de laticínios, alimentos processados, bebidas e fábricas têxteis.

2.5.2 *Aquatubulares*

As caldeiras aquatubulares são utilizadas quando há necessidade de grandes quantidades de vapor com níveis de pressão mais elevados. Nesse tipo de caldeira, devido à passagem da água pelos tubos, a superfície de troca térmica aumenta, proporcionando o aumento da capacidade de geração de vapor da caldeira.

Os tubos onde o vapor de água é produzido interligam dois ou mais reservatórios de água, chamados de tubulão superior e inferior. O tubulão inferior trabalha cheio de água e se localiza na parte inferior da caldeira, ele também armazena lama (lodo químico) que pode se desenvolver no equipamento, e, portanto, também é chamado de tubulão de lama. O tubulão superior (também chamado de tambor de vapor) mantém seu nível de líquido em 50% de sua capacidade (BEGA, 2003).

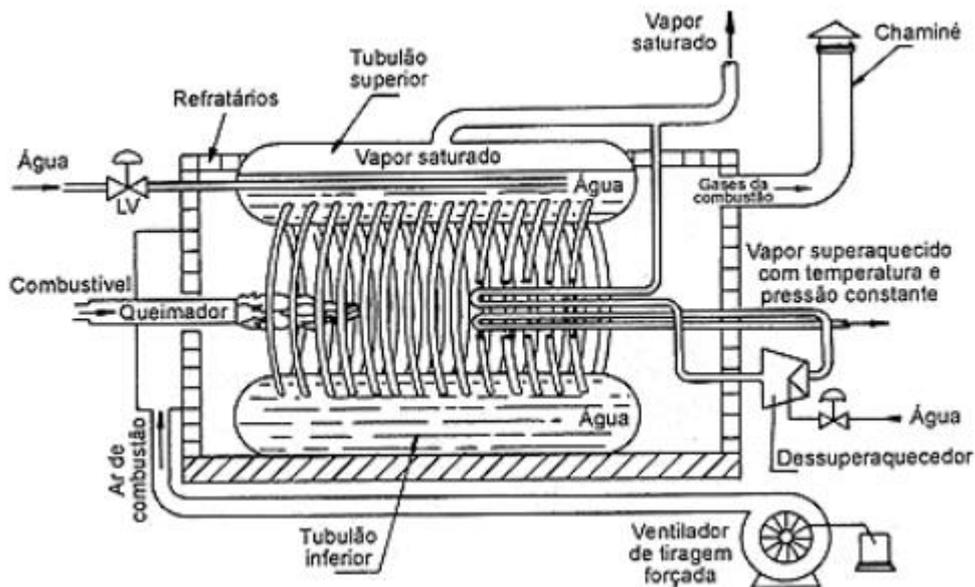
Após a vaporização da água por meio do calor gerado na fornalha, o vapor gerado sobe ao tubulão superior e dá lugar à água fria que posteriormente gerará mais vapor. Equipamentos desse tipo são chamados de caldeiras de circulação natural. Com o aumento da capacidade da caldeira é necessário utilizar uma maior quantidade de tubos, que por consequência resultam em uma maior perda de carga, tornando a circulação natural inviável, fazendo-se necessário utilizar bombas. Nesse caso o equipamento é chamado de caldeira de circulação forçada e pode chegar a 1000 t/h de vapor a uma pressão de 200 bar e temperaturas superiores a 450 °C (BAGGIO, 2018).

Para melhor aproveitar o calor dos gases de combustão, são empregados acessórios chamados de economizador e pré-aquecedor de ar. O economizador de ar utiliza o calor residual dos gases para aquecer a água de alimentação da caldeira. A instalação destes componentes aumenta o rendimento da caldeira e minimiza o choque térmico entre a água de alimentação e aquela presente no tubulão superior. Após os gases de combustão passarem pelo economizador, são levados ao pré-aquecedor de ar com o objetivo de preaquecer o ar de combustão utilizado na queima de combustível (BEGA, 2003).

Os tubos da caldeira aquatubular podem ser dispostos retos ou curvados; a primeira opção proporciona uma maior facilidade de limpeza, porém, atualmente, as caldeiras com tubos curvados são mais utilizadas. Este tipo de equipamento possui um custo elevado de construção, podendo ser até 50% mais cara que uma caldeira flamotubular. E, também, exige um tratamento de água mais rigoroso para evitar incrustações nas paredes dos tubos.

A Figura 2 apresenta de forma esquemática a circulação de água e vapor em uma caldeira aquatubular juntamente de seus principais componentes.

Figura 2 – Esquema de uma caldeira aquatubular.



Fonte: Bega, 2003.

Os componentes básicos de geradores de vapor são: cinzeiro, fornalha, câmara de combustão, superaquecedor, economizador, pré-aquecedor de ar, canais de gases e chaminé. Maiores detalhes sobre cada componente são dados a seguir:

- Cinzeiro: local onde é depositado as cinzas ou pequenos pedaços de combustível não queimado, componente geralmente utilizado em caldeiras que queimam combustível sólido;
- Câmara de combustão: local onde ocorre a queima do combustível. Também proporciona proteção e suporte aos queimadores e grelhas;
- Fornalha: Constituída pelos queimadores (no caso de combustíveis líquidos e gasosos) ou grelhas (para combustíveis sólidos). Dispositivo responsável por promover a queima do combustível, fazendo com que combustível e comburente entrem em contato por tempo suficiente e à determinada temperatura para ocorrer a combustão. Os tipos de queimadores podem ser separados pela forma como ocorre a mistura ar e combustível. Dentre os queimadores de gás, destacam-se os de chama de difusão, pré-mistura e mistura direta. No caso dos queimadores de óleo, são chamados de pulverizadores e podem assumir diferentes formas, como jato de pressão, pulverizador de dois fluidos e copo rotativo. As grelhas podem ser classificadas como fixas, móveis, rotativas, vibratórias, entre outras (BIZZO, 2003);
- Superaquecedor: trocador de calor, equipamento acessório, que aquece o vapor saturado e transforma-o em vapor superaquecido. Utilizado apenas em caldeiras aquatubulares para proporcionar uma maior capacidade para o equipamento;

- Economizador: trocador de calor que utiliza o calor sensível dos gases de combustão que saem da caldeira para aquecer a água de alimentação;
- Pré-aquecedor: trocador de calor que utiliza o calor sensível dos gases de combustão que saem da caldeira para aquecer antecipadamente o ar que ingressa na caldeira;
- Chaminé: utilizado para dispersão dos gases de combustão no meio ambiente.

2.6 Combustíveis industriais

Atualmente, a matriz energética mundial é constituída principalmente por fontes não renováveis, como o petróleo, o gás natural e o carvão mineral, correspondendo a mais de 80 % do total de combustíveis utilizados para geração de energia. As fontes renováveis, como o biodiesel, a biomassa e o etanol correspondem a apenas 13 % desta matriz (MOREIRA, 2023). Os combustíveis podem ser classificados segundo o estado em que se apresentam, como sólido, líquido ou gasoso.

O combustível classificado como sólido possuem formas e granulometrias diversas e apresentam maior crescimento no ambiente industrial nos últimos anos. Este aumento é atribuído, em grande parte, à ascensão da biomassa, uma matéria-prima renovável que propicia um processo de queima mais sustentável. Os combustíveis sólidos, também, podem ser diferenciados entre primários, como carvão mineral (turfa, linhito, antracito, hulha) e derivados da madeira (lenha, cavacos, serragem, casca) e secundários (coque de petróleo, carvão vegetal, resíduos industriais).

Ao empregar combustíveis sólidos em caldeiras industriais, é necessário conhecer algumas propriedades importantes para utilizá-los de forma adequada. As características principais que devem ser analisadas são: análise elementar (composição), massa específica, umidade, teor de carbono fixo, presença de voláteis, cinzas, granulometria e poder calorífico.

O combustível líquido pode ser de fonte mineral, obtido através do refino do petróleo (gasolina, óleo diesel, óleo combustível) formado de hidrocarbonetos, ou não mineral (álcoois e óleos vegetais). Os óleos combustíveis são os principais produtos utilizados nos processos térmicos industriais, o óleo diesel é menos utilizado por possuir um custo elevado, porém o óleo, durante a queima, produz menos gases poluentes. Dependendo do processo, o combustível deve passar por um sistema de filtração para remoção de sedimentos orgânicos e inorgânicos (PETROBRAS, 2019).

Quando se utiliza combustíveis líquidos para geração de vapor, é importante conhecer seu ponto de fulgor para saber como armazená-lo de forma segura, já que esta propriedade informa a menor temperatura na qual um combustível libera vapores em quantidades suficientes para formar uma mistura inflamável com o ar. Outras propriedades que devem ser analisadas são o ponto de ignição, temperatura na qual o combustível entra em combustão espontânea, o ponto de fluidez, temperatura mínima para o combustível se tornar um fluido e a viscosidade, que determina a temperatura de armazenamento, bombeamento e pulverização para a combustão.

Os combustíveis gasosos mais comuns são o gás natural e o gás liquefeito de petróleo (GLP). Eles também podem ter características minerais ou não minerais. As principais propriedades a serem observadas em gases combustíveis são: composição química, determinada através de análises em cromatógrafos; massa molecular, que influencia na massa específica; poder calorífico, limite de inflamabilidade e temperatura adiabática de chama.

Nas próximas seções serão fornecidas informações mais detalhadas sobre os combustíveis de interesse a serem discutidos e mencionados no estudo de caso deste trabalho.

2.6.1 Gás Natural

O gás natural corresponde a fase mais leve do petróleo, sendo constituído de 80 a 90 % de metano, de 5 a 10 % de etano, e outros gases em menores proporções (propanos, butanos, pentanos, hexanos, gás carbônico, gás sulfídrico, nitrogênio e gases raros) (GARCIA, 2013). Assim como a fração líquida do petróleo, ele também pode ser refinado formando gás residual (gás seco), etano, GLP (gás liquefeito de petróleo) e gasolina natural.

Este combustível pode ser classificado em duas categorias: associado ou não associado. O gás associado encontra-se dissolvido no petróleo ou sob a forma de uma capa de gás, nesse caso prioriza-se a produção inicial do óleo e utiliza-se do gás para manter a pressão do reservatório. O gás não associado é aquele que está livre do óleo e da água no reservatório, e sua concentração é predominante na camada rochosa, permitindo a produção de gás natural (ANP, 2024).

Segundo a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, no Brasil, o gás natural produzido é principalmente de origem associada ao petróleo e se destina a diversos mercados de consumo, sendo os mais relevantes a geração de energia termelétrica e os segmentos industriais. Além disso, também é consumido em setores não energéticos como fonte de matéria-prima nas indústrias petroquímica (plásticos, fibras sintéticas, tintas), e de fertilizantes (ureia, amônia e seus derivados).

Dentre os combustíveis de origem fóssil, o gás natural é o que possui a queima mais limpa, ou seja, a sua combustão é isenta de fuligem e outros materiais que prejudicam o meio ambiente. Segundo dados de 2016 da EIA (U.S. Energy Information Administration), em média, o uso do gás natural gera 27% menos CO₂ por unidade de medida gerada (BTU) do que o petróleo, e 44 % menos que o carvão. Além disso, em comparação com derivados do petróleo, ele emite cerca de 33 % menos gás carbônico que o óleo combustível e 27 % menos que o óleo diesel.

2.6.2 Óleo diesel

O óleo diesel é um combustível obtido por meio da destilação fracionada do petróleo, e é uma mistura de diversas correntes obtidas nas unidades de destilação. Ele pode ser constituído das seguintes frações: nafta pesada, querosene, diesel leve, diesel pesado, gasóleo leve de vácuo e óleo leve de reciclo.

No Brasil, o óleo diesel utilizado como combustível industrial não possui as mesmas exigências de qualidade do combustível automotivo (que possui índice de

cetano especificado, por exemplo). Portanto, o óleo diesel para uso térmico poderia ser constituído de correntes instáveis e de baixo nível de cetano. Porém, como implica em custos adicionais de tancagem e bombeio nas refinarias, o óleo diesel utilizado industrialmente é o mesmo que o automotivo (GARCIA, 2013).

Os tipos de diesel disponíveis comercialmente no mercado brasileiro são classificados conforme seu teor de enxofre: diesel S1800, diesel S500, diesel S50, diesel S10. Isto significa que um combustível com S500 possui teor máximo de enxofre de 500 mg/kg. Também, são separados em óleo diesel do tipo A e do tipo B, ambos derivados do processamento do petróleo e do gás natural. Ainda cabe ressaltar que o tipo B possui um teor de biodiesel que é estabelecido pela legislação vigente.

2.6.3 *Biodiesel*

O biodiesel é um combustível renovável obtido por meio de uma reação de transesterificação entre um álcool primário (etanol ou metanol) e gordura de origem animal ou vegetal. As matérias-primas mais utilizadas para a fabricação do biodiesel no Brasil são a soja, o milho, o girassol, o amendoim, o algodão, a canola, a mamona, o babaçu, entre outras.

Atualmente, o biodiesel produzido no Brasil é utilizado como mistura para o diesel em percentuais obrigatórios por lei. A Resolução nº 03 de 20 março de 2023 do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) ampliou a porcentagem de biodiesel no diesel para 12 %, medida válida a partir de abril de 2023. Portanto, por conta da baixa disponibilidade do combustível no mercado, o uso deste combustível renovável para outros fins como em geradores de vapor ainda não é viável, mas a opção está sendo estudada e pesquisas avaliam a viabilidade técnica e econômica da sua utilização para geração de energia por combustão.

Algumas propriedades são determinantes para a avaliação da aplicação do biodiesel em geradores de vapor e a adaptação destes equipamentos para a queima do combustível. Um exemplo disso é a viscosidade do fluido, pois existe uma variação nesta propriedade dependendo da matéria-prima utilizada na fabricação. Desta forma, os bocais e queimadores das caldeiras devem ser adequados para não resultar em um processo ineficiente.

A Tabela 5 apresenta as propriedades físico-químicas de biodiesel de diferentes origens.

Tabela 5 – Características físico-químicas do biodiesel produzido a partir de diferentes espécies vegetais.

Características	Origem do biodiesel				
	Mamona	Babaçu	Dendê	Algodão	Pequi
Poder calorífico (kJ/kg)	9046	9440	9530	9520	9590
Massa específica a 20°C (g/cm ³)	0,9190	0,8865	0,8597	0,8650	0,8497
Viscosidade a 37,8°C (cSt)	21,6	3,9	6,4	6,0	5,2

Fonte: Yasuda, 2006.

2.6.4 Biomassa

A madeira é utilizada como combustível para geração de energia desde quando o homem descobriu o fogo há milhares de anos. Seu uso se intensificou com a utilização de máquinas a vapor no período anterior à Revolução Industrial e, como a lenha era a base da indústria na época, seu consumo exacerbado resultou em um grande desflorestamento na Europa.

Com o início da extração e consumo de combustíveis fósseis, a madeira foi sendo gradativamente substituída, primeiramente pelo carvão mineral e em seguida por petróleo e seus derivados, pois estes apresentavam vantagens em relação ao transporte, manuseio e consumo em relação à madeira. No Brasil, a trajetória de consumo da madeira como fonte de energia é similar ao restante do mundo. Ela foi a fonte primária de energia até 1971, depois ultrapassada pelo petróleo em 1972 e pela hidroeletricidade em 1978 (EMBRAPA, 2021).

Atualmente, por conta da necessidade de redução do uso de derivados do petróleo e da busca por alternativas que reduzam a emissão de gases promotores do efeito estufa, diversos países promovem ações para que energias renováveis tenham participação significativa em suas matrizes energéticas. Assim, a biomassa se torna uma escolha interessante para suprir esta demanda sendo uma fonte sustentável e limpa (CORTEZ, L. A. B. LORA, E. E. S. GÓMEZ, E. O, 2008).

O Centro Nacional de Referência em Biomassa classifica a obtenção da energia da biomassa em tradicional e moderna. A tradicional é a energia obtida por meio da combustão direta da biomassa, e a moderna é obtida utilizando tecnologias avançadas de conversão, como a pirólise da biomassa, geração de eletricidade por meio do gás de síntese ou na produção de biocombustíveis sólidos por adensamento. A forma tradicional é utilizada principalmente em caldeiras industriais, e há um crescente interesse no desenvolvimento tecnológico para melhor aproveitamento do poder calorífico das biomassas considerando a eficiência da geração de vapor e a sustentabilidade.

As caldeiras de biomassa geram energia através de processos de combustão, com a queima direta do combustível nas fornalhas na presença de oxigênio. Os tipos

de biomassa podem ser classificados quanto à origem, podendo ser de origem florestal (lenha, paletes, folhas, eucalipto reflorestado, cavacos, serragem, briquete), agrícola (resíduos das plantações de arroz, soja, milho, cana-de-açúcar) e derivada de resíduos urbanos e industriais obtida de efluentes (pouco utilizada em caldeiras).

Para fazer a escolha da biomassa adequada para queima em caldeiras e definir os parâmetros para uma combustão completa, é necessário conhecer algumas propriedades químicas e físicas do material. Conforme supracitado, deve-se ter conhecimento da composição e dos elementos químicos presentes no combustível, obtidos por meio de uma análise elementar, assim como da densidade, umidade, cinzas, teor de voláteis, percentual de carbono fixo e poder calorífico da biomassa.

A análise elementar determina o percentual dos principais elementos químicos encontrados na biomassa em massa seca (sem considerar a presença da água). Esses constituintes são o carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre. A partir destes valores é possível calcular a composição e o volume dos gases da combustão, o volume de ar necessário para alimentar o processo e o poder calorífico do combustível. Esta análise é realizada através do método de Energia Dispersiva de Raios-X (EDX), no qual a amostra é irradiada por um feixe de raios X fazendo com que os átomos gerem e emitam raios X fluorescentes, resultando em um comprimento de onda característico para cada elemento, e possibilitando uma análise qualitativa e quantitativa dos constituintes da biomassa.

O teor de umidade da biomassa é a massa de água contida no material e pode ser expressa em base úmida e em base seca. A umidade da biomassa influencia no poder calorífico do combustível e no rendimento da caldeira; ela também interfere diretamente no custo da matéria-prima, visto que a biomassa é comprada a granel. A determinação de umidade pode ser feita pelo método gravimétrico, a partir da diferença entre a massa da amostra antes e depois de ser submetida à secagem, ou através de medidores imediatos de umidade disponíveis no mercado, que utilizam diversos princípios para realizar a medição, como micro-ondas, softwares e transdutores que realizam análise da rigidez dielétrica do meio.

As cinzas são resíduos da combustão da biomassa, elas podem ter diferentes origens e serem constituídas de elementos metálicos e semimetálicos, presentes na estrutura molecular do combustível, fragmentos de argila, areia, sais, que estão agregados à biomassa e de fragmentos do solo misturados à biomassa no manuseio. O conhecimento do teor de cinzas e sua composição são importantes para prever o comportamento deste resíduo a altas temperaturas, para evitar inconvenientes provocados por incompatibilidade entre a cinza e o material refratário que compõem o interior das câmaras de combustão, entre outros aspectos operacionais (NOGUEIRA; RENDEIRO, 2008).

O teor de voláteis indica a facilidade de se queimar um combustível, ou seja, a reatividade de um material; quanto maior este teor mais rápida é a ignição (LEWANDOWSKI; KICHERER, 1997). Os materiais voláteis são aqueles que se desprendem no início da combustão, quando o combustível é aquecido a altas temperaturas, e são constituídos principalmente por hidrogênio, hidrocarbonetos, monóxido de carbono e dióxido de carbono (SANTOS, 2012). Este valor pode ser determinado submetendo uma amostra a determinada temperatura e tempo sob

atmosfera inerte. A fração de massa que volatiliza é o teor de voláteis e a fração de carvão que permanece na amostra é chamada de carbono fixo.

O teor de carbono fixo presente na biomassa indica a quantidade de calor a ser gerado na queima. Quanto maior este teor, mais lentamente o combustível irá queimar, maior sua resistência a temperaturas altas, e maior é a liberação de energia durante a combustão. Ele pode ser calculado a partir da Equação 2.18 utilizando os valores do teor de cinzas e teor de voláteis.

$$CF = 100 - (CZ + MV) \quad (2.18)$$

Em que:

CF = teor de carbono fixo (%);

CZ = teor de cinzas (%);

MV = teor de material volátil (%).

3 Estudo de caso

3.1 A empresa

A empresa abordada no presente trabalho é uma indústria do setor papelero e está localizada na cidade de Guaíba, Rio Grande do Sul. Atualmente, ela produz papéis industriais especiais com grau cirúrgico e alimentício para diversas indústrias que produzem embalagens de alimentos e materiais que necessitam ser armazenados em embalagens com um grau elevado de assepsia. As instalações da empresa são do ano de 1944, e a caldeira foi inicialmente projetada para operar em média/alta pressão com vapor superaquecido para cogeração de energia, considerando a produção de uma quantidade de papel muito superior à produzida atualmente. Ainda, cabe ressaltar que o papel produzido no início da operação da fábrica era com características e aplicações industriais diferentes da atual.

Em 1977, a fábrica foi adquirida por uma empresa para suprir a necessidade de produção de papel filtrante com o objetivo de comercializá-lo como filtro para preparo de café. Posteriormente, por conta de utilizar apenas matérias-primas e demais materiais com grau alimentício no seu processo, a empresa desenvolveu um papel com grau cirúrgico que, hoje em dia, é um dos principais produtos comercializados.

A fábrica apresenta uma caldeira do tipo aquatubular, caracterizada por possuir dois balões e um superaquecedor. Inicialmente, o equipamento era alimentado com óleo BPF, porém, posteriormente, o combustível foi substituído por gás natural de petróleo.

Devido à instalação inicial da fábrica estar superdimensionada em relação às atuais necessidades de produção de papel, a empresa empreendeu esforços para ajustar o equipamento existente ou considerar a aquisição de uma nova caldeira equipada com tecnologias mais modernas e seguras para atender à demanda de vapor do processo. Após análises conduzidas por empresas de consultoria, a escolha recaiu sobre a aquisição de uma caldeira flamotubular, projetada para a queima de biomassa. Essa decisão levou em consideração não apenas a eficiência operacional, mas também os impactos positivos na sustentabilidade, resultantes da substituição do combustível anteriormente utilizado, um recurso fóssil, por uma fonte renovável. A biomassa empregada na queima consiste principalmente em serragem, com a inclusão ocasional de casca e cavacos de madeira no processo operacional.

Com a aquisição do novo equipamento, a caldeira aquatubular alimentada com gás natural está sem utilidade no momento. Como a caldeira de biomassa é operada por uma empresa terceira, considera-se a manutenção da instalação antiga em condições para operar se algum imprevisto ocorrer com o equipamento novo ou com a empresa contratada (falta de matéria-prima disponível, necessidade de manutenção em algum componente do equipamento, entre outros motivos).

Nesse contexto, a necessidade de trocar o combustível decorre do contrato com a empresa fornecedora de gás natural, que exige um consumo mínimo mensal para manter o fornecimento. Esta condição torna-se inviável com a instalação antiga, que permanece inativa na maior parte do tempo, operando apenas em momentos específicos para suprir as demandas da caldeira de biomassa. Diante dessa situação, está sendo estudada a substituição do combustível para óleo diesel, GLP ou biodiesel, levando em consideração a disponibilidade desse combustível no

mercado e a ausência da necessidade de um contrato com consumo mínimo para o fornecimento.

3.2 Detalhamento da caldeira

A caldeira aquatubular estudada no presente trabalho foi projetada para suprir uma quantidade de vapor necessária para a produção de papel de duas máquinas (equipamento específico do setor). No entanto, hoje ela atua gerando vapor para a secagem do papel produzido em apenas uma máquina. O vapor superaquecido gerado pelo equipamento é convertido em vapor saturado, pois não há necessidade de altas pressões/temperaturas para secar o papel de forma a alcançar as propriedades desejadas e atender a demanda de vapor para a quantidade de papel produzida.

Com base nos dados fornecidos pela empresa para o ano de 2023, a média de consumo de gás natural mensal foi de 365.237 m³. O equipamento possui um superaquecedor e um economizador, acessórios que auxiliam na eficiência da caldeira, e o material das tubulações é aço carbono ASTM A106. A água utilizada no processo passa por um tratamento convencional na estação de tratamento de água da empresa e por um sistema de desmineralização antes de ser conduzida à caldeira. Essa segunda etapa do tratamento da água é realizada com o auxílio de tanques que possuem uma resina catiônica no seu interior, processo chamado de abrandamento da água, removendo cálcio, magnésio, potássio e outros metais do fluido, substâncias que podem resultar em corrosão e incrustações em partes do equipamento.

A água tratada passa primeiramente pelo desaerador, acessório que tem a finalidade de remover os gases dissolvidos na água, como oxigênio e dióxido de carbono, que causam corrosão. Além disso, adicionam-se produtos químicos sequestrantes de oxigênio para retirar o que não foi removido apenas com o acessório. Nessa etapa, a água está a uma temperatura de 95 °C. Posterior a isso, a água é encaminhada para a caldeira por meio de duas bombas de alimentação passando primeiro pelo economizador; durante o percurso pelos tubos recebe energia dos gases de combustão, elevando sua temperatura até 175 °C e seguindo em direção aos tubulões

Ao passar pelos tubos entre o tubulão inferior e o tubulão superior a água é vaporizada por meio da troca de calor por radiação e convecção com a energia liberada pela queima do gás natural na câmara de combustão através de um queimador do tipo Duobloco. A água vaporizada sobe por circulação natural para o tubulão superior, a 215 °C, que opera com 50 % de sua capacidade. Posteriormente, o vapor saturado é conduzido para o sistema do superaquecedor, que o transforma em superaquecido, elevando a pressão do vapor d'água para valores entre 18 e 21 kgf/cm² a uma temperatura em torno de 280 °C.

Conforme mencionado anteriormente, o vapor d'água utilizado no processo de secagem do papel é saturado, com parâmetros de temperatura e pressão mais baixos. Nesse contexto, o vapor passa por duas válvulas dessuperaquecedoras. Na primeira, a pressão é ajustada para cerca de 12 kgf/cm², e, posteriormente na segunda válvula, reduz-se para aproximadamente 7 kgf/cm² resultando em uma temperatura de aproximadamente 160 °C. Esse vapor é conduzido ao sistema de

secadores composto por diferentes cilindros por onde a folha de papel é seca. Neste processo, o vapor pode passar novamente por válvulas para reduzir sua pressão e construir uma rampa de secagem.

O fornecimento do gás natural é feito através de gasodutos que alimentam a caldeira. Na câmara de combustão o combustível e o ar são injetados no queimador, com um excesso de ar de 5 a 6 %, onde ocorre a combustão e a energia gerada da reação é trocada com a água que está localizada nos tubos. Após, os gases de combustão são conduzidos para o economizador, reduzindo sua temperatura em consequência da troca de calor com a água de alimentação, e são liberados para a atmosfera.

A Tabela 6 apresenta um resumo das características de projeto da caldeira abordada no estudo de caso e alguns dados do combustível utilizado, a data de fabricação refere-se ao ano da última reforma do equipamento.

Tabela 6 - Características de projeto da caldeira e dados do combustível.

Modelo	DP – 25
Fabricante	Dan Power
Data de fabricação	2002
Produção de vapor (projeto)	25.000 kg/h
Temperatura do vapor (projeto)	350 °C
Temperatura de operação (projeto)	275 °C
Pressão de operação	25,0 kgf/cm ²
Pressão máxima de trabalho admissível (PMTA)	32,0 kgf/cm ²
Combustível	Gás natural de petróleo
Poder calorífico inferior	8.800 kcal/m ³

Fonte: A empresa.

4 Materiais e métodos

4.1 Parâmetros do processo

A pressão real do vapor utilizado no processo, que é aplicado principalmente na secagem da folha de papel, é de 7 kgf/cm² distribuído entre quatro grupos de secadores. Portanto, o vapor gerado passa por uma redução de pressão levando o vapor superaquecido a vapor saturado, conforme descrito na seção 3.2. O vapor de baixa pressão é enviado do setor de utilidades para o coletor/distribuidor de vapor da máquina de papel. Deste coletor geral o vapor é distribuído nos quatro grupos de secadores:

- Primeiro grupo: 07 cilindros, utiliza 1,5 a 1,8 kgf/cm²;
- Segundo grupo: 12 cilindros, utiliza 2,6 a 2,8 kgf/cm²;
- Terceiro grupo: 02 cilindros, utiliza 2,5 a 2,7 kgf/cm²;
- Quarto grupo: 06 cilindros, utiliza 5,0 a 5,8 kgf/cm².

Cada grupo de secadores utiliza diferentes pressões, pois dessa forma as características desejadas do papel produzido são alcançadas; estas pressões compõem a rampa de aquecimento dos cilindros secadores. A pressão do vapor utilizado influencia diretamente nos parâmetros e na qualidade da folha de papel, como o seu acabamento superficial e o espaçamento entre as fibras, e, por consequência, a porosidade, filtração da água e resistência ao estouro.

A Tabela 7 apresenta dados do combustível atual e alternativos que serão utilizados nos cálculos para avaliações de consumo e custo por tipo de combustível. As fichas técnicas dos produtos estão anexadas ao final deste trabalho. Os combustíveis alternativos escolhidos foram o GLP, o óleo diesel e o biodiesel devido à facilidade de obtenção e adaptação do equipamento, além de questões econômicas e ambientais que serão melhor discutidas nos resultados do trabalho.

Para os cálculos também serão utilizados dados de operação, consumo de combustível e vapor da caldeira fornecidos pela empresa, e propriedades da água, apresentados na Tabela 8.

Tabela 7 – Propriedades dos combustíveis estudados no presente trabalho.

Combustível	Gás Natural	GLP	Óleo diesel	Biodiesel
PCI (kcal/kg)	11.891,9	11.100	10.100	9.000
Massa específica (kg/m ³) (20°C e 1 atm)	0,740	2,5	840	880

Fonte: Empresa de Pesquisa Energética, 2017.

Tabela 8 - Dados de consumo de vapor, combustível e propriedades da água.

¹ Consumo de combustível (m ³ /mês)	365.237,57
¹ Consumo de vapor (kg/dia)	140.840
² Entalpia da água na entrada do processo (T = 95°C) (kcal/kg)	95,11
² Entalpia do vapor na saída do processo (T = 275 °C/19,5 kgf/cm ²) (kcal/kg)	708,91

Fonte: 1 – A empresa. 2 – Tabela de propriedades da água.

4.2 Eficiência da caldeira

Em diversos processos, o cálculo da eficiência é dado pela relação entre o que foi gasto, ou utilizado, e os produtos obtidos. De acordo com o Conselho dos Proprietários de Caldeiras Industriais dos Estados Unidos (COUNCIL OF INDUSTRIAL BOILER OWNERS, 2021 *apud*. CRUZ *et al.*, 2022), 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. Assim, a análise do desempenho térmico da caldeira depende do rendimento energético que pode ser calculado através de dois métodos, o método direto e o indireto.

O método direto contabiliza os fluxos energéticos da caldeira, ou seja, considera o que está entrando e o que está saindo do equipamento, desconsiderando as perdas existentes no processo.

O rendimento (η) é o valor em porcentagem da eficiência da caldeira em relação à energia liberada por meio da combustão, ou seja, conforme a Equação 4.1, o rendimento é a razão entre a quantidade de calor que é realmente utilizada para gerar vapor saturado ou superaquecido ($Q_{\text{útil}}$) e a energia total liberada na combustão, conhecida como calor disponível ($Q_{\text{disponível}}$) (SOSA, 2007). Para tanto, é necessário que sejam realizadas medições diretas precisas de todos os fluxos mássicos e parâmetros de operação nas saídas e entradas da caldeira, entre elas: vazão mássica da água de alimentação da caldeira, pressão e temperatura de trabalho (da água de alimentação e do vapor de saída), e vazão mássica do combustível.

$$\eta = 100 \times \frac{Q_{\text{útil}}}{Q_{\text{disponível}}} = \frac{\dot{m}_v \cdot (h_v - h_a)}{\dot{m}_{cb} \cdot PCI} \quad (4.1)$$

Em que:

$Q_{\text{útil}}$ = energia útil (kW);

$Q_{\text{disponível}}$ = energia disponível (kW);

\dot{m}_v = vazão mássica de vapor (kg/s);

\dot{m}_{cb} = vazão mássica de combustível (kg/s);

h_v = entalpia do vapor (kJ/kg);

h_a = entalpia da água de alimentação (kJ/kg);

5 Resultados

Neste capítulo serão comentados os resultados obtidos para a eficiência da caldeira a gás natural a partir dos parâmetros de operação da caldeira fornecidos pela empresa. Além disso, será feita uma comparação quantitativa (consumo e custo) e qualitativa dos combustíveis alternativos escolhidos para substituição no processo.

5.1 Eficiência da caldeira aquatubular com gás natural

Os dados fornecidos pela empresa foram suficientes para obter a eficiência da caldeira a gás natural através da Equação 4.1. A partir dos parâmetros de operação e valores da média de consumo de combustível e vapor d'água no processo, obteve-se uma eficiência de 80 %. Valor este considerado adequado, visto que está conforme a média usual para caldeiras aquatubulares (entre 80 % e 85 %) (Eletrobrás, 2005).

5.2 Análise da substituição do gás natural por combustíveis alternativos

Conforme comentado no item 4.1, os combustíveis alternativos comparados no presente trabalho foram o GLP, o diesel e o biodiesel. Para os cálculos da quantidade aproximada do combustível alternativo requerido, visando manter a eficiência de 80 % do equipamento, utilizou-se a Equação 4.1, rearranjando-a para obter o consumo de combustível. Os parâmetros que foram variados foram apenas aqueles relativos às propriedades dos combustíveis, como poder calorífico inferior e massa específica. Portanto, a partir dos valores apresentados no item 4.1, os resultados obtidos para o consumo de combustível mensal estão apresentados na Tabela 9, bem como o gasto mensal despendido pela empresa para cada alternativa.

O custo relacionado a cada combustível foi obtido das seguintes fontes: GLP, Sulgás (fornecedor), diesel, Petrobras e biodiesel, ANP.

Tabela 9 - Consumo e custo para cada combustível.

Combustível	Gás natural	GLP	Óleo diesel	Biodiesel
Consumo de combustível	15.218,23 m ³ /dia	9.651,92 kg/dia	10.607,56 L/dia	11.904,04 L/dia
Custo (R\$)	3,097 /m ³	7,76 /kg	5,98 /L	6,8 /L
Custo diário	R\$ 47.130,86	R\$ 74.936,05	R\$ 75.515,72	R\$ 91.985,76
Custo mensal	R\$ 1.413.925	R\$ 2.248.081	R\$ 2.265.471	R\$ 2.759.572

Fonte: Autora.

Observa-se que entre as opções sugeridas, o biodiesel seria o combustível mais caro, seguido do óleo diesel, e por último, a opção com menor valor, o GLP. No entanto, nota-se que a diferença de custo diário entre GLP e óleo diesel é inferior a 1%. Já entre diesel e biodiesel, ambos combustíveis líquidos, a diferença de custo é superior a 17 %. Porém, além dos custos mensais relacionados com o fornecimento

do combustível, é importante levar em consideração os custos relacionados ao transporte, à logística e adaptações necessárias em componentes da caldeira para a troca de combustível, que também irão gerar um custo para a empresa. A Tabela 10 apresenta uma análise qualitativa das adaptações para cada alternativa. Os custos de transporte e logística não foram levados em consideração neste trabalho. Para tanto são necessários os dados da distância dos principais fornecedores e o custo do diesel, conforme o cálculo previsto por Rezende e Oliveira (2001).

Tabela 10 - Adaptações necessárias para troca de combustível.

Combustível	GLP	Óleo diesel	Biodiesel
Queimador	Possibilidade de utilizar o componente atual (Duobloco)	Substituir o componente	Substituir o componente
Armazenagem	Instalação de central de gás fora da edificação; pode ser armazenado em cilindros ou tanques a granel (acima do solo ou subterrâneos)	Instalação de tanque de armazenamento; limpeza do tanque a cada dois anos; compatível com aço carbono, aço inoxidável e alumínio	Recomendado utilizar tanques de aço carbono; estocagem de no máximo três meses; o material é incompatível com zinco, chumbo, estanho, ligas à base de cobre;
Excesso de ar	Usualmente entre 2 a 5 %	Combustíveis líquidos utilizam de 20 a 40 %	Combustíveis líquidos utilizam de 20 a 40 %
Material de construção da caldeira	Compatível	Avaliar a compatibilidade do óleo diesel com o material das tubulações e mangueiras.	Necessário avaliação de compatibilidade da tubulação e demais componentes devido à características corrosivas de alguns biocombustíveis
Mais adequações	-	Trocador de calor para aquecer o combustível líquido, reduzindo sua viscosidade; aquisição de bombas de deslocamento positivo; filtros de óleo anteriores à sucção das bombas; sistema de tratamento de gases de combustão	

Fonte: A autora.

A partir da Tabela 10, observa-se que há menos adequações a serem realizadas no equipamento com a substituição do combustível atual por GLP. O principal investimento seria no armazenamento do combustível na unidade pois, atualmente, o gás natural é distribuído por um encanamento específico. Para tanto, é necessário a construção de uma central de gás na empresa, seguindo a norma ABNT NBR 13523:2019, que estabelece requisitos mínimos para projeto, montagem, alteração localização e segurança das centrais de GLP, e a norma regulamentadora NR-20, relacionada aos requisitos para os gestão da segurança no trabalho contra os fatores de risco de acidentes provenientes das atividades que envolvem inflamáveis

e combustíveis líquidos. Além disso, a quantidade de excesso de ar para a queima do GLP é próxima daquela já utilizada na caldeira atual, entre 2 e 5 %.

A transição do combustível gasoso para o líquido, seja óleo diesel ou biodiesel, envolve uma série de fatores que resultam em custos para adaptar a caldeira. Inicialmente, a substituição do queimador é essencial, uma vez que o componente atual é projetado exclusivamente para combustíveis gasosos, como gás natural e GLP. Uma alternativa viável é a adoção de um queimador do tipo Monobloco a óleo, que, de acordo com os fornecedores, é compatível tanto com óleo diesel quanto biodiesel.

Assim como no caso do GLP, a utilização de combustíveis líquidos requer um sistema de armazenagem na empresa. O armazenamento pode ser realizado em tanques aéreos (ou acima do solo) ou subterrâneos. No caso dos tanques aéreos, é imperativo a presença de uma bacia de contenção para evitar a contaminação do solo em situações de derramamento. Além disso, é fundamental realizar a limpeza dos tanques com uma frequência máxima de dois anos. A presença indesejada de água e ar nos tanques deve ser evitada, pois isso propicia a oxidação do óleo diesel, comprometendo a qualidade do material.

A utilização dos combustíveis líquidos no processo também envolve a aquisição de um trocador de calor para aquecer o combustível afim de reduzir sua viscosidade, auxiliar no bombeamento nas tubulações e mangueiras, e evitar o entupimento de componentes como o queimador. É necessário também a adição de filtros de óleo antes da sua passagem pelas bombas, as quais devem ser rotativas de deslocamento positivo, para retirar possíveis impurezas que prejudicam a queima e obstruem os bicos dos queimadores. Além disso, torna-se imprescindível a aquisição de um sistema de tratamento de gases de combustão. Na estrutura atual, os gases passam apenas pelo economizador, reduzindo sua temperatura antes de serem lançados na atmosfera. Porém, na queima de combustíveis líquidos são gerados alguns materiais particulados nocivos ao meio ambiente, que devem passar por componentes, como por exemplo, um filtro de mangas, que separa as partículas sólidas dos gases efluentes, purificando-os antes de serem direcionados à atmosfera.

A compatibilidade entre os materiais de construção das tubulações e mangueiras e biodiesel/óleo diesel também deve ser avaliada. A recomendação da Petrobras é utilizar tanques e tubulações de aço carbono, pois o biodiesel é incompatível com zinco, chumbo, estanho, ligas à base de cobre, e determinadas classes de borracha. A manutenção e limpeza dos equipamentos também deve ocorrer mais frequentemente.

Os materiais de dutos de alimentação e exaustão também devem ser analisados considerando a concentração das substâncias que reagem agressivamente com as paredes, danificando o equipamento. Além disso, caso seja utilizado biodiesel puro, deve-se usar mangueiras de borracha especiais, pois o combustível atua como solvente de materiais plásticos. Uma vantagem do biodiesel é a maior segurança no transporte e armazenagem com relação ao diesel, já que o ponto de fulgor do combustível renovável é maior que o de origem fóssil.

Quanto à questão de sustentabilidade, o biodiesel parece ser a opção mais correta, visto que o mesmo é obtido de fontes renováveis, sendo o óleo de soja usualmente utilizado no Brasil. Apesar do GLP ser um combustível de origem fóssil, diferente do biodiesel, a vantagem do uso do GLP em relação ao combustível líquido decorre da menor geração de CO₂ por caloria de gás queimado, devido à relação carbono/hidrogênio ser maior nos óleos do que nos gases combustíveis. Além disso, o GLP é praticamente isento de enxofre. Outra vantagem é a possibilidade da geração de atmosferas neutras ou redutoras, com ausência de fuligem, o que reduz as manutenções com limpeza dos tubos e, em consequência, a eficiência constante da caldeira.

6 Conclusões

Ao analisar o consumo de combustíveis alternativos para atingir o mesmo rendimento da caldeira atual, constata-se que todas as opções acarretam em gastos superiores ao uso do gás natural. Ao comparar os resultados, observa-se um custo significativamente maior com o biodiesel em comparação ao óleo diesel e GLP, devido ao poder calorífico inferior, demandando um volume maior para gerar a mesma quantidade de energia térmica. Apesar disso, o GLP apresenta um gasto econômico próximo ao do óleo diesel.

A vantagem do biodiesel reside na questão de sustentabilidade, de suma importância para a empresa, sendo uma fonte renovável de aquisição menos agressiva ao meio ambiente. Contudo, sua utilização requer atenção especial ao armazenamento e aos materiais da caldeira, dada a incompatibilidade com alguns elementos, além de demandar limpezas e manutenções mais frequente que os outros combustíveis avaliados.

A substituição do gás natural pelo óleo diesel implica em gastos adicionais, incluindo a instalação de tanques de armazenamento. São necessárias adaptações na caldeira para receber e queimar combustível líquido, envolvendo a substituição do queimador, aquisição de trocador de calor ou adaptação do sistema existente para aquecer o óleo, além de filtros para remover impurezas e evitar obstruções.

Devido à presença de materiais particulados nos gases de combustão de líquidos, são necessários equipamentos de tratamento, como um filtro de mangas, para garantir a conformidade com normas ambientais que regulam os níveis aceitáveis de material particulado liberado na atmosfera.

A substituição do gás natural pelo GLP representa uma alternativa que exige menos modificações na caldeira aquatubular, pois o queimador atual é compatível com a queima do GLP, e os materiais de construção das tubulações e componentes são adequados para o gás. A troca de combustível envolve apenas a aquisição de uma central de gás, sujeita a normas regulamentadoras para garantir a segurança no armazenamento e manuseio.

REFERÊNCIAS

BAGGIO, R. W. O. **Modelagem de uma caldeira flamotubular com fornalha aquatubular**. Tese (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Departamento de Engenharia de Controle e Automação e Computação, Universidade Federal de Santa Catarina. Blumenau, p. 82, 2018.

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

BIZZO, W. A. **Geração, distribuição e utilização de vapor**. Campinas: FEM/Unicamp, 2003. 128 p.

CNPE – Conselho Nacional de Política Energética. **Resolução Nº 03, de 20.03.2023** Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/conselhos-e-comites/cnpe/resolucoes-do-cnpe/2023>. Acesso em: 14 dez. 2023.

CONSIGAZ. **Como fazer o armazenamento do gás GLP?**. Disponível em: <https://consigazempresas.com.br/como-fazer-armazenamento-de-gas-glp-industria/>. Acesso em: 20 jan. 2024.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para Energia**. 1ª edição. Campinas: Editora da Unicamp, 2008. 728 p.

CRUZ, M. L. *et al.* Estudo da eficiência energética de uma caldeira flamotubular em uma indústria de laticínios. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, Vol. 08, Nº. 02, mar. 2022.

ELETROBRÁS – Centrais Elétricas Brasileiras. **Eficiência energética no uso de vapor**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005.

EMBRAPA. Madeira para energia. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/>. Acesso em: 29 nov. 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco energético nacional**. Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-46/topico-82/Relatorio_Final_BEN_2017.pdf. Acesso em: 10 jan. 2024.

FRANCISCO, R. P. **Estudo termoquímico da queima de combustíveis em caldeiras usando balanços de energia**. Tese (Programa de Pós-graduação em Engenharia de Energia) – Associação Ampla entre o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais e a Universidade Federal de São João Del Rei, p.148, 2012.

GÁS Natural. **Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**, 09 jan. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-de>

derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/processamento-de-gas-natural/gas-natural. Acesso em: 09 jan. 2024.

GLASSMAN, I. **Combustion**. 4ª edição. San Diego: Academic Press, 2008. 773 p.

GARCIA, R. **Combustíveis e combustão industrial**. 2ª edição. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2013.

ICATERM. **Icaterm – Qualidade em Aquecedores, Caldeiras e Queimadores Industriais**. Disponível em: <https://www.icaterm.com.br/>. Acesso em: 19 jan. 2024.

LEWANDOWSKI, I.; KICHERER, A. Combustion quality of biomass: practical relevance and experiments to modify the biomass quality of Miscanthus x giganteus. European. **Journal of Agronomy**, Vol. 6, 1997.

LOMBARDO, Andrea. Armazenamento: o desafio está no tanque. **BiodieselBR**, Curitiba, 23 jan. 2012. Disponível em: <https://www.biodieselbr.com/revista/006/armazenamento-1>. Acesso em: 20 jan. 2024.

MOREIRA, José R. S. **Energias renováveis, geração distribuída e eficiência energética**. 2ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2023.

PETROBRAS. **Como são formados os preços: diesel**. Disponível em: <https://precos.petrobras.com.br/sele%C3%A7%C3%A3o-de-estados-diesel>. Acesso em: 16 jan. 2024.

PETROBRAS. **Óleo combustível: informações técnicas**. 2019. Disponível em: <https://www.petrobras.com.br/documents/2677942/3190768/manual-tecnico-oleo-combustivel-assistencia-tecnica-petrobras.pdf/7ff0d6b9-3f9f-95f6-2e57-6c6730e851ce?version=1.0&t=1691773221000&download=true>. Acesso em: 20 jan. 2024.

RENDEIRO, G. NOGUEIRA, M. **Combustão e gaseificação da biomassa sólida: Soluções energéticas para Amazônia**. 1ª edição. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008.

REZENDE, J. L. P. de, OLIVEIRA, A. D. de, **Análise econômica e social de projetos florestais**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2001. p. 389.

SANTOS, J. R. S. **Estudo da biomassa torrada de resíduos florestais de eucalipto e bagaço de cana-de-açúcar para fins energéticos**. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo (USP), Piracicaba, 2012.

SOSA A; JUAN H. **Caldeiras aquatubulares de bagaço – estudo do sistema de recuperação e energia**. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2007.

SULGÁS. **Sulgás – Companhia de Gás do Estado do Rio Grande do Sul**. Disponível em: <https://www.sulgas.com.vc/>. Acesso em: 16 jan. 2024.

YASUDA, F. **Estudo da utilização do biodiesel na geração de vapor para a agroindústria.** Tese (Graduação) – Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.