



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

LYANDRA BEATRYZ DE AZEVEDO LIMA

**COMPARAÇÃO DO USO DE RESÍDUOS COMO FONTE DE
COMBUSTÍVEL PARA CALDEIRAS**

Recife
2024

LYANDRA BEATRYZ DE AZEVEDO LIMA

**COMPARAÇÃO DO USO DE RESÍDUOS COMO FONTE DE
COMBUSTÍVEL PARA CALDEIRAS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Mecânica da Universidade Federal de
Pernambuco, como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica.

Orientador: GUILHERME MEDEIROS SOARES DE ANDRADE

Recife

2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Lima, Lyandra Beatryz de Azevedo.

Comparação do uso de resíduos como fonte de combustível para caldeiras /
Lyandra Beatryz de Azevedo Lima. - Recife, 2024.
45 p. : il., tab.

Orientador(a): Guilherme Medeiros Soares de Andrade

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Mecânica -
Bacharelado, 2024.

Inclui referências.

1. Resíduos agroindustriais. 2. Potencial energético. 3. Biomassas. 4.
Combustível renovável. 5. Geração de energia. I. Andrade, Guilherme Medeiros
Soares de. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

RESUMO

O presente trabalho foi uma revisão bibliográfica, que teve como objetivo comparar o potencial calorífico de quatro tipos de biomassas: bagaço de cana, casca de café, casca de arroz e resíduo de eucalipto, considerando seus principais parâmetros físico-químicos, como teor de umidade, teor de cinzas, poder calorífico superior (PCS), poder calorífico inferior (PCI) e densidade. A escolha dessas biomassas foi fundamentada em sua abundância, potencial energético, e na viabilidade econômica e ambiental de seu uso, promovendo soluções sustentáveis para a geração de energia em caldeiras. Para determinar a biomassa mais adequada como combustível para caldeiras, foi realizada uma análise das propriedades físico-químicas de cada uma. O objetivo foi identificar o melhor equilíbrio entre potencial energético, eficiência e viabilidade técnica e econômica. Os dados foram organizados em uma tabela, facilitando a comparação das características, destacando os pontos fortes e fracos de cada biomassa. O resíduo de eucalipto apresentou o melhor desempenho, com baixo teor de umidade (8,91 e 14,44%) e cinzas (0,11 e 0,95%), alta densidade (563 e 1641 kg/m³) e PCS elevado (18,47 e 19,42 MJ/kg), destacando-se como a biomassa mais eficiente para combustão, além de ser a melhor do ponto de vista logístico, devido à sua densidade, valor energético e fácil armazenamento. A casca de café também se mostrou promissora, com bom poder calorífico e moderado teor de cinzas, enquanto a casca de arroz e o bagaço de cana apresentaram limitações devido ao elevado teor de cinzas e umidade, respectivamente. O bagaço de cana é interessante em locais onde está facilmente disponível, desde que os desafios de logística e secagem sejam controlados. A casca de arroz e de café são viáveis em locais que possuem indústrias e seus resíduos sejam abundantes, mas são menos competitivas em demandas energéticas maiores ou longe da área de disponibilidade. Este estudo contribui para a diversificação das fontes energéticas, fornecendo dados relevantes sobre a viabilidade do uso de resíduos agroindustriais na geração de energia de forma sustentável e eficiente.

Palavras-chave: Biomassa; Potencial energético; Resíduos agroindustriais; Combustível renovável; Geração de energia.

ABSTRACT

The present study was a literature review aimed at comparing the calorific potential of four types of biomass: sugarcane bagasse, coffee husk, rice husk, and eucalyptus residue, considering their main physicochemical parameters such as moisture content, ash content, higher heating value (HHV), lower heating value (LHV), and density. The selection of these biomasses was based on their abundance, energy potential, and the economic and environmental viability of their use, promoting sustainable solutions for energy generation in boilers. To determine the most suitable biomass as a fuel for boilers, an analysis of the physicochemical properties of each was conducted. The goal was to identify the best balance between energy potential, efficiency, and technical and economic viability. The data were organized in a table, facilitating the comparison of characteristics, highlighting the strengths and weaknesses of each biomass. Eucalyptus residue showed the best performance, with low moisture content (8.91 and 14.44%) and ash content (0.11 and 0.95%), high density (563 and 1641 kg/m³), and high HHV (18.47 and 19.42 MJ/kg), standing out as the most efficient biomass for combustion, in addition to being the best from a logistical standpoint due to its density, energy value, and ease of storage. Coffee husk also proved promising, with good calorific value and moderate ash content, while rice husk and sugarcane bagasse showed limitations due to their high ash content and moisture content, respectively. Sugarcane bagasse is interesting in locations where it is readily available, provided that logistical and drying challenges are managed. Rice and coffee husks are viable in areas with industries and abundant residues, but they are less competitive in larger energy demands or far from their area of availability. This study contributes to the diversification of energy sources by providing relevant data on the feasibility of using agro-industrial residues for sustainable and efficient energy generation.

Keywords: Biomass; Calorific potential; Agro-industrial residues; Renewable fuel; Power generation.

LISTA DE SÍMBOLOS

M	Massa
M_{H_2O}	Massa de água
$M_{biomassa}$	Massa de biomassa
M_{cinzas}	Massa de cinzas
ρ	Massa Específica
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
kg	Quilograma
TU	Teor de Umidade
TC	Teor de Cinza
TWh	Tera Watt-hora

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	7
1.1.1 Objetivo Geral	9
1.1.2 Objetivos Específicos	9
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	10
2.1 GERAÇÃO DE VAPOR	10
2.1.1 Caldeiras	10
2.1.2 Combustão de Biomassa	12
2.1.2.1 Biomassa	12
2.2. POTENCIAL ENERGÉTICO DAS BIOMASSAS	15
2.2.1 Aprimoramento de propriedades	16
2.3 RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS	17
2.3.1 Resíduos de Eucalipto	18
2.3.2 Bagaço de Cana de Açúcar	19
2.3.3 Casca de Arroz	21
2.3.4 Casca de Café	23
3 METODOLOGIA	24
3.1 PROPOSTA DO TRABALHO	24
3.2 PROCEDIMENTO DE COLETA DE DADOS	26
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
5 CONCLUSÃO	35
REFERÊNCIAS	37

1 INTRODUÇÃO

Devido ao aumento da conscientização ambiental por parte da comunidade científica e da sociedade, observa-se um crescimento significativo na investigação da viabilidade de aproveitamento de resíduos agroindustriais para a produção de uma variedade de produtos, ou até mesmo a geração de novas fontes de energia. Vários setores industriais, incluindo curtumes, usinas de açúcar e álcool, abatedouros, fazendas, indústrias alimentícias, de celulose e papel, são fontes de uma ampla gama de resíduos (ALENCAR, 2020). Os resíduos agroindustriais oferecem uma variedade de oportunidades como combustíveis, abrangendo desde tecnologias de conversão em pequena escala até aquelas para aplicações industriais mais amplas. Essas tecnologias incluem gaseificação, cogeração para produção simultânea de calor e eletricidade, recuperação de energia de resíduos urbanos e biocombustíveis (GOLDEMBERG, 2009).

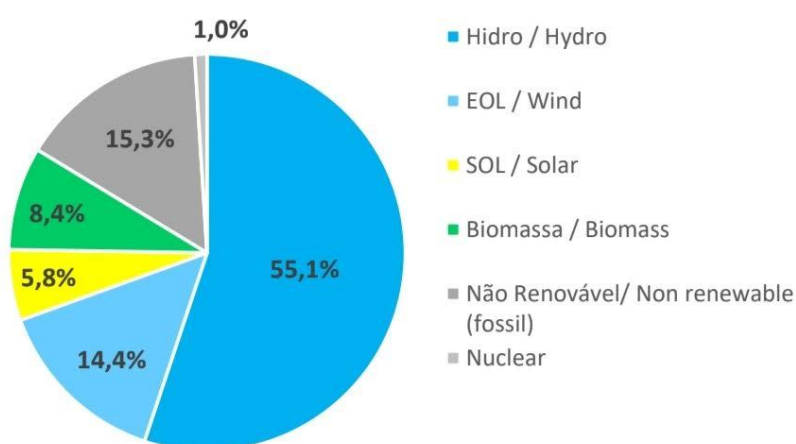
Os combustíveis mais comuns empregados em caldeiras são de origem fóssil e são categorizados de acordo com seu estado físico: líquido, sólido ou gasoso, sendo utilizados como fonte de energia térmica (MOTA, 2020). De acordo com Muraro (2018), a geração de energia proveniente da biomassa tanto é possível, como pode desempenhar um papel significativo na diversificação da matriz energética do país. Uma caldeira a biomassa é um equipamento utilizado para gerar calor ou energia a partir da queima de biomassa, que é material orgânico, como resíduos florestais, agrícolas ou agroindustriais. Esses materiais são queimados dentro da caldeira para aquecer água, produzindo vapor que pode ser usado para gerar eletricidade ou fornecer calor em processos industriais e aquecimento de ambientes.

A biomassa é uma fonte importante na transição para uma matriz energética mais sustentável, segundo a Agência Internacional de Energia (AIE). Substituir combustíveis fósseis por biomassa na produção de energia pode levar a uma redução significativa das emissões de gases de efeito estufa, além de substituir uma fonte de energia não renovável. Grandes produtores de energia em países industrializados estão voltando sua atenção para a biomassa como uma forma de contribuir para a diminuição das emissões de gases poluentes (DERMIBAŞ, 2001).

A partir desta premissa, o presente trabalho teve como objetivo, por meio de uma revisão bibliográfica, avaliar e definir qual seria o melhor resíduo agrícola, dentro dos quatro selecionados para estudo (bagaço de cana de açúcar, casca de café, casca de café e resíduos de eucalipto), que tem mais potencial para ser empregado como combustível em caldeiras, visando identificar aquele que oferece maior viabilidade para essa finalidade.

O presente estudo realiza uma análise das principais biomassas brasileiras que possuem potencial para uso como combustível em caldeiras. Através da identificação das características físico-químicas desses resíduos e da discussão sobre sua viabilidade como fontes de energia renovável, este trabalho contribui para o avanço das tecnologias sustentáveis e para a diversificação da matriz energética nacional. Além disso, enfatiza a relevância do aproveitamento de resíduos agroindustriais, apresentando-os como uma alternativa que é não apenas ambientalmente responsável, mas também economicamente viável para a geração de energia. Segundo dados do Balanço Energético Nacional (2024), no Brasil, entre as fontes com potencial de produzir energia, a biomassa participa com 8,4% do total, como mostrado na Figura 1.1. Outras fontes renováveis conhecidas como a hidrelétrica, solar e eólica representam 55,1%, 5,8% e 14,4%, respectivamente.

Figura 1.1: Gráfico de participação das fontes na capacidade instalada.



Fonte: Balanço Energético Nacional (2024).

De forma a selecionar um combustível oriundo de resíduos, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre as possíveis biomassas que podem ser utilizadas como

combustível em caldeira. Na metodologia deste trabalho foi feita uma reunião de informações, buscas em revistas científicas e dissertações sobre o potencial energético de quatro resíduos agroindustriais e a possibilidade de utilização destes como fonte de energia para alimentação de caldeiras. A seleção desses materiais de estudo foi feita a partir de uma pesquisa em livros, artigos científicos e trabalhos de conclusão de curso que contém estudos relacionados.

Este trabalho é relevante por oferecer uma fundamentação teórica para reconhecer a importância do aproveitamento sustentável de resíduos agroindustriais na geração de energia, alinhando-se aos princípios de sustentabilidade e maior aproveitamento no uso de recursos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo deste estudo é avaliar a partir de uma revisão bibliográfica um resíduo agrícola que apresente maior potencial energético para utilização como combustível em caldeiras.

1.1.2 Objetivos Específicos

Entre os objetivos específicos, tem-se:

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre o tema;
- Selecionar potenciais biomassas de origem brasileiras que possuem potencial energético para utilização como combustível em caldeiras;
- Avaliar as características das biomassas selecionadas e correlacionar suas propriedades físico-químicas (teor de umidade, poder calorífico inferior, poder calorífico superior, massa específica e teor de cinzas);
- Discutir qual a biomassa é mais promissora para ser utilizada como combustível para caldeira.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 GERAÇÃO DE VAPOR

Um gerador de vapor que utiliza a combustão como sua principal fonte de calor é frequentemente chamado de caldeira. A água que é convertida em vapor é o fluido mais comum usado em geradores de vapor, que convertem calor em trabalho (VAKKILAINEN, 2017). Isso ocorre porque possui um alto calor específico, o que significa que pode armazenar e transferir grandes quantidades de calor com pouca variação de temperatura (ÇENGEL, 2013). Além disso, é abundante e de baixo custo, tornando-a economicamente viável para uso em grande escala em sistemas de geração de energia. Sua alta capacidade de vaporizar também facilita a conversão de calor em trabalho, como no caso de turbinas a vapor. A geração de vapor em uma caldeira é um processo que envolve diversos estágios.

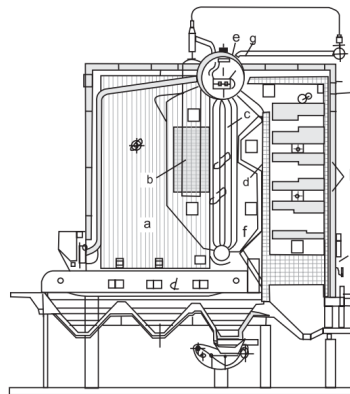
De acordo com Vakkilainen (2017), primeiramente, a água é alimentada na caldeira através de um sistema que pode incluir bombas para garantir um fluxo constante. Em seguida, a água é aquecida utilizando uma fonte de calor, como combustíveis fósseis ou outras fontes de energia. Conforme a água é aquecida, ela se transforma em vapor, com a pressão e temperatura sendo controladas para garantir a produção adequada. Por fim, o vapor gerado é armazenado temporariamente na caldeira e distribuído para os processos ou sistemas que o utilizam, como turbinas para geração de eletricidade ou sistemas industriais de aquecimento (NOGUEIRA et. al., 2005). Segundo Nogueira et. al. (2005), os mais importantes entre os geradores de calor, são as caldeiras, porém também podem ser citados equipamentos como os aquecedores elétricos e os sistemas de aquecimento solar.

2.1.1 Caldeiras

As caldeiras podem ser classificadas de acordo com vários fatores como a sua montagem, sustentação, a energia utilizada, entre outros. Quanto à disposição de água em relação aos gases, as caldeiras são divididas entre aquatubulares (Figura 3.1), onde a água é vaporizada no interior dos tubos, e flamotubulares

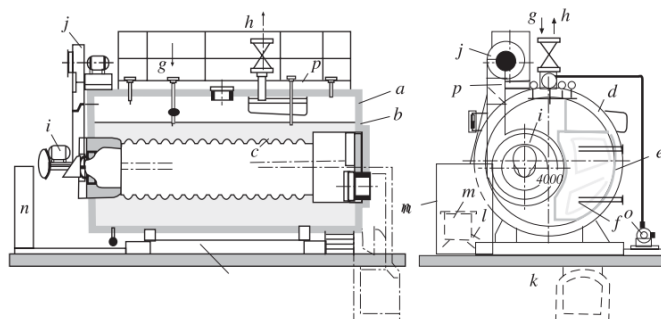
(Figuras 3.2 e 3.3), onde os gases quentes que se originam da combustão circulam no interior dos tubos e a água por fora deles (VAKKILAINEN, 2017). As caldeiras aquatubulares possuem alta eficiência térmica e aquecimento rápido, devido à ampla área de troca de calor e ao menor volume de água, suportando altas pressões. Contudo, são sensíveis à qualidade da água, exigem manutenção complexa e têm custos iniciais elevados, além de maior risco de explosão de vapor em alta pressão. Já as caldeiras flamotubulares têm construção compacta, operação simples, custo mais baixo e flexibilidade de combustível (NOGUEIRA et. al, 2005), mas apresentam eficiência energética ligeiramente menor, suportam pressões mais baixas e necessitam de controle rigoroso de alimentação de água e manutenção regular.

Figura 3.1 - Esquema de uma caldeira aquatubular.



Fonte: Nogueira et. al. (2005).

Figura 3.2 - Esquema de uma caldeira flamotubular a óleo.



Fonte: Nogueira et. al. (2005)

Figura 3.3 - Caldeira flamotubular.



Fonte: VIKON Caldeiras (2024).

O uso do vapor gerado pelas caldeiras é muito amplo, podendo ter aplicações em diversos setores industriais como na indústria sucroalcooleira, de alimentos, bebidas, papel e celulose e têxtil (PEREIRA, 2022). Em seu livro, Nogueira et. al. (2005) citam: “Além da indústria, outras empresas utilizam cada vez mais vapor gerado pelas caldeiras, como restaurantes, hotéis, hospitais e frigoríficos”, o que amplifica ainda mais as áreas de uso das caldeiras.

2.1.2 Combustão de Biomassa

2.1.2.1 Biomassa

De acordo com a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), toda matéria renovável, de origem vegetal ou animal, cuja finalidade é a geração de energia, é considerada uma biomassa. Seu uso é benéfico devido à sua capacidade de ser diretamente utilizada na queima, além de causar poucos impactos socioambientais, visto que essa fonte de energia é considerada limpa e sustentável. A biomassa, do ponto de vista energético, pode ser separada entre resíduos agrícolas, florestais e urbanos e industriais (MOTA, 2020). De acordo com Nogueira e Lora (2003), a

biomassa é composta principalmente de carbono e hidrogênio, com variações mínimas entre diferentes tipos de madeira.

A combustão direta é a forma mais comum de utilização da biomassa, envolvendo a conversão da energia química dos combustíveis em calor, por meio das reações dos componentes da biomassa com o oxigênio disponível (MARAFRON et. al., 2016). Durante a combustão, os componentes orgânicos da biomassa se decompõem, gerando dióxido de carbono, vapor d'água e uma série de compostos voláteis.

Embora a biomassa seja frequentemente associada a combustíveis sólidos, ela não é sempre sólida. Segundo a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), a biomassa pode ser encontrada em formas líquidas, como biodiesel, e gasosas, como biogás. O biogás, por exemplo, é produzido na digestão anaeróbica de resíduos orgânicos em biodigestores. De acordo com Rezende (2017), “A geração através da biomassa líquida ocorre misturando o material orgânico com água no alimentador, a mistura é levada ao biodigestor e, devido à ação de bactérias é transformado em biogás.”. Após esse processo, o biogás pode gerar energia por meio de uma turbina conectada a um gerador elétrico. Dados da Forbes (2023), indicam que o residual de biomassa produzido anualmente no país pode gerar cerca de 77 bilhões de metros cúbicos de biometano ou em 160 TWh de energia elétrica com o uso de biodigestores.

Portanto, a biomassa é uma fonte de energia versátil, não se limitando à forma sólida. Com técnicas como biodigestão e gaseificação, a biomassa pode ser convertida em diferentes formas de energia, contribuindo para uma matriz energética mais sustentável.

2.1.2.2 Caldeira a Vapor de Grelha Rotativa

A biomassa quando triturada em partículas pequenas o suficiente, facilita a queima eficiente, melhora a combustão e maximiza a liberação de energia, sendo ideal para utilização em caldeiras e outros sistemas de geração de calor. Esse tipo de queima direta de biomassa tem sido testada em unidades de carvão de grande porte como uma substituição barata para o carvão (VAKKILAINEN, 2017). Outra possibilidade de queima da biomassa é em Caldeira a Vapor de Grelha Rotativa,

onde a combustão do combustível sólido ocorre em uma camada na parte inferior da fornalha.

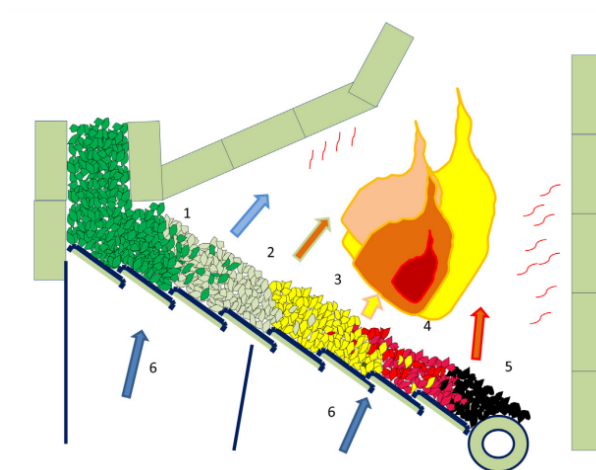
Figura 3.4 - Grelha móvel para caldeiras.



Fonte: MF Rural (2024).

O benefício da queima em grelha (Figura 3.4) é que todas as formas de combustível sólido podem ser queimadas de maneira econômica. Mesmo combustíveis de baixa qualidade, como cascas, podem ser queimados se suas propriedades permanecerem relativamente constantes.

Figura 3.5 - Esquema do Processo de Queima de Material



Fonte: Vakkilainen (2017).

De acordo com Vakkilainen (2017), o processo de queima nas caldeiras com grelhas ocorre em etapas, começando do canto superior esquerdo da Figura 3.5, as etapas incluem: 1 - a alimentação do combustível; 2 - a secagem do combustível,

onde a umidade é evaporada; 3 - a geração de matéria volátil resultando em uma chama visível; 4 - a combustão do carvão; 5 - as cinzas residuais do processo; 6 - indica o ar introduzido na câmara de combustão da caldeira. As partículas de combustível passam por essas fases em sequência, embora simultaneamente possam estar em diferentes estágios de queima na grelha. Grandes partículas de combustível podem ter combustível fresco no núcleo enquanto o carvão na superfície está queimando. O ar primário é fornecido sob a grelha, enquanto o ar secundário e terciário é geralmente injetado na fornalha acima da camada de combustível. Em resumo, a combustão em grelha ocorre em estágios distintos, dependendo da localização do combustível na grelha (VAKKILAINEN, 2017).

2.2. POTENCIAL ENERGÉTICO DAS BIOMASSAS

Alguns fatores são determinantes para definir se um material é um bom combustível e entre esses fatores está a capacidade de combustão desse material. Quando se trata das biomassas, a umidade, o teor de cinzas e o poder calorífico são os parâmetros mais importantes para a avaliação do resíduo e determinação da sua qualidade como combustível (CORRADI, 2021). De acordo com Shapiro (2013), o poder calorífico de algum combustível é equivalente ao módulo da entalpia de combustão e divide-se em superior e inferior.

A quantidade de energia térmica liberada quando os combustíveis são queimados pode ser medida através do seu poder calorífico (NOGUEIRA et. al., 2005). O poder calorífico superior (PCS) é obtido quando toda água formada da reação de combustão estiver na fase líquida e o poder calorífico inferior (PCI), quando toda a água formada é vapor. A análise térmica de um material, consiste no estudo da sua interação com a temperatura ao longo do tempo. A termogravimetria, segundo Denari et. al. (2012), é a técnica termoanalítica que acompanha a perda ou ganho de massa em função do tempo ou da temperatura. Outros fatores também são determinantes para a avaliação do uso de uma biomassa como combustível, entre eles, a massa específica. Esse conceito bastante utilizado na mecânica e na hidráulica tem como definição a razão entre a massa de uma substância e seu volume. Biomassas de maior massa específica (também apresentada como densidade, ρ), tendem a apresentar uma queima mais homogênea e eficaz, o que

leva a uma combustão melhor e a uma maior geração de energia. Pode ser calculada pela razão entre massa e volume de biomassa.

O teor de água, ou umidade, presente em uma substância influencia diretamente sua capacidade de gerar energia térmica, conhecida como poder calorífico. Parte da energia gerada na combustão é usada para evaporar essa umidade, o que reduz a eficiência do processo e diminui a quantidade de calor disponível para a geração de energia. Logo, quanto maior o teor de umidade, menor será o poder calorífico da substância. Esse teor pode ser medido pela relação:

$$TU (\%) = \frac{M_{H_2O}}{M_{biomassa}} \cdot 100 \quad (1)$$

Onde,

TU = teor de umidade (%);

M_{H_2O} = massa de água (kg);

$M_{biomassa}$ = massa de biomassa (kg);

Já o teor de cinzas de cinzas é a dado pela quantidade de biomassa que não sofre a combustão (PEREIRA, 2014), e pode ser encontrado com a seguinte razão:

$$TC (\%) = \frac{M_{cinzas}}{M_{biomassa}} \cdot 100 \quad (2)$$

Onde,

TC = teor de cinzas (%);

M_{cinzas} = massa de cinzas (kg);

$M_{biomassa}$ = massa de biomassa (kg);

Quanto menor o teor de cinzas, melhor para a reação pois maior parte do resíduo sólido será aproveitado na queima e menos desperdício de material.

2.2.1 Aprimoramento de propriedades

Segundo a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), a secagem de biomassas é um processo que pode ser utilizado para otimizar seu uso

como combustível, pois a umidade afeta diretamente o poder calorífico e a eficiência da combustão. Biomassas com alta umidade demandam mais energia para evaporar a água, resultando em perdas significativas de calor e diminuindo a eficiência energética. Além disso, a umidade excessiva pode causar problemas de armazenamento, como deterioração e crescimento de microrganismos, reduzir o valor calorífico e aumentar custos de transporte (CARASCHI et. al., 2019). A secagem pode ser realizada por métodos naturais ou industriais, dependendo da escala de produção e recursos disponíveis. A compactação, por sua vez, aumenta a densidade das biomassas (JAPHET et. al., 2015), facilitando o transporte e armazenamento. Transformando-as em pellets ou briquetes, esse processo não apenas melhora a manuseabilidade, mas também pode elevar o poder calorífico ao eliminar espaços vazios, permitindo uma combustão mais uniforme. Assim, tanto a secagem quanto a compactação são passos críticos para maximizar o potencial das biomassas como fontes de energia renovável.

2.3 RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS

Em 2018, o Brasil se destacou como o terceiro maior produtor agrícola global, alcançando uma produção de mais de 1 bilhão de toneladas de insumos agrícolas. Esse cenário resultou na geração significativa de resíduos agroindustriais, os quais têm despertado interesse como uma alternativa aos combustíveis fósseis para a geração de energia (Silva, 2021).

Segundo Demirbaş (2001), biomassa é a denominação dada a toda a matéria orgânica viva existente no planeta. Além disso é uma fonte de energia renovável, sustentável e com baixo impacto ambiental. Quando cultivada e utilizada de maneira responsável, não aumenta a quantidade de dióxido de carbono na atmosfera. Para decompor a matéria orgânica presente nos resíduos, por meio da biodigestão, é utilizado o biodigestor, um equipamento que cria um ambiente controlado para degradação da matéria orgânica em ausência de oxigênio, resultando na produção de biogás e biofertilizantes. É considerado uma tecnologia altamente eficiente em termos energéticos e ambientais para produção de bioenergia. Ele é integrado às instalações de produção para tratar os resíduos, gerar biogás, energia elétrica e biofertilizante de baixo custo.

A indústria brasileira também produz uma quantidade significativa de resíduos provenientes da biomassa florestal e agrícola, os quais podem ter efeitos prejudiciais ao meio ambiente, como a poluição dos corpos d'água, a ocupação de áreas nas indústrias e a contaminação do ar devido à queima inadequada. Isso destaca a importância de realizar estudos que busquem formas de aproveitar essa biomassa residual. O Ministério de Minas e Energia (MME) afirma que, no país, o bagaço da cana de açúcar é a principal biomassa com potencial para geração de energia elétrica. Além dele, são citados a casca de arroz, castanha, amendoim e a casca de coco.

No ano de 2022, foi decretado um projeto de lei, o PL n.548/2022, com a finalidade de incentivar a utilização de resíduos como fonte de energia, diversificar a matriz energética e estimular o uso de energias renováveis no país. Dados do SEBRAE (2023), indicam que há uma crescente nas pesquisas sobre o reaproveitamento de resíduos para diversos fins, inclusive para a produção de embalagens biodegradáveis.

2.3.1 Resíduos de Eucalipto

Segundo Neiva (2018), a combustão de eucalipto é um processo semelhante à combustão de outras madeiras, mas com algumas particularidades. O eucalipto é uma madeira de rápida combustão, o que significa que produz chamas e calor intensos em um curto período de tempo. Além disso, sua queima produz menos fuligem e resíduos do que outras madeiras, o que a torna uma fonte de energia mais limpa. No entanto, a combustão de eucalipto pode liberar substâncias voláteis como o metanol, que pode ser tóxico se inalado em grandes quantidades. Por isso, é importante usar técnicas adequadas de combustão, como a queima em fornos ou caldeiras projetadas para este fim, para garantir a segurança e a eficiência do processo. O eucalipto é amplamente utilizado como fonte de biomassa para a produção de energia em países como o Brasil e a Austrália, devido à sua rápida regeneração e ao seu alto teor de energia.

De acordo com a Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ), a indústria que mais gera resíduos de eucalipto no Brasil é a de papel e celulose, que utiliza a madeira para a produção de papel e outros produtos derivados. Além disso, a indústria de móveis e a construção civil também utilizam eucalipto, resultando em uma

quantidade significativa de resíduos, como aparas e sobras de madeira. Esses resíduos podem ser aproveitados em processos de biomassa para geração de energia ou como matéria-prima para a fabricação de outros produtos. No entanto, é importante lembrar que o seu uso deve ser feito de forma sustentável e responsável, para evitar impactos negativos na biodiversidade e no meio ambiente. O cultivo de eucalipto gera debates intensos sobre seus impactos socioambientais. As críticas se concentram nos efeitos negativos que essas monoculturas podem ter sobre a biodiversidade local, a qualidade do solo e os recursos hídricos. Segundo Paes et. al. (2013), o eucalipto, tende a consumir grandes quantidades de água e pode alterar a composição do solo. Uma maneira de tentar diminuir os impactos causados pela produção do eucalipto, é utilizando o máximo possível da árvore, isso inclui seus resíduos (Figura 3.6), como galhos, folhas e casca (PAES et. al, 2013).

Figura 3.6: Resíduos de Eucalipto.



Fonte: NUNES (2019).

2.3.2 Bagaço de Cana de Açúcar

A combustão de bagaço de cana é um processo comum em usinas sucroalcooleiras, onde o bagaço é utilizado como fonte de energia renovável para geração de eletricidade e vapor. O bagaço de cana (Figuras 3.7 e 3.8) é um subproduto da produção de açúcar e etanol a partir da cana-de-açúcar e é uma

fonte de biomassa rica em celulose, lignina e outros compostos orgânicos. A queima do bagaço de cana libera calor, que é utilizado para produzir vapor, que por sua vez é usado para gerar eletricidade ou para processos industriais (REZENDE, 2017). Além disso, a combustão do bagaço de cana é considerada uma fonte limpa de energia, uma vez que é um subproduto da produção de açúcar e etanol e reduz a dependência de combustíveis fósseis. O bagaço é utilizado como combustível direto em fornos e caldeiras para gerar vapor, essencial nos processos de beneficiamento da cana, como o aquecimento do caldo de cana e melaço, além de alimentar sistemas de geração de eletricidade (FREITAS, 2016). Segundo dados do Balanço Energético Nacional (BEN), o bagaço de cana é a biomassa mais utilizada no Brasil, em termos de geração de energia elétrica.

Figura 3.7: Bagaço de cana in natura.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 3.8: Bagaço de cana parcialmente processado.



Fonte: OLIVEIRA (2014).

2.3.3 Casca de Arroz

Segundo a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), na região das Américas, o Brasil e os Estados Unidos são notáveis na produção de arroz, onde o primeiro gera 11,7 milhões de toneladas. A produção brasileira de arroz representa aproximadamente 31,0% do total da região. Em uma perspectiva global, o Brasil ocupa o nono lugar, contribuindo com 1,5% da produção mundial de arroz. De acordo com Japhet, Tokan e Muhammad (2015), a casca de arroz é um recurso de biomassa amplamente disponível, mas subutilizado. Apenas uma pequena parte da casca de arroz produzida é aproveitada de forma significativa, enquanto a maior parte é queimada, descartada como resíduo sólido ou utilizada como ração para gado. Diversos fatores contribuem para sua subutilização, incluindo a falta de conscientização sobre seu potencial, conhecimento insuficiente sobre o uso adequado e uma preocupação ambiental limitada.

A produção de energia elétrica a partir dessas cascas apresenta vantagens consideráveis devido à grande quantidade desse resíduo disponível. A queima dessa matéria-prima não só é benéfica para o meio ambiente, mas também contribui para reduzir sua disposição inadequada em locais impróprios. O teor de cinzas é a principal preocupação para o uso desse tipo de resíduo agroindustrial,

pois é uma das principais limitações para o uso da casca de arroz como combustível sólido (SAEED et. al., 2021).

Figura 3.9: Cascas de arroz.



Fonte: MORAIS. (2006).

Figura 3.10: Pellets de casca de arroz.



Fonte: JAPHET et. al. (2015).

As cascas de arroz sem processamento são mostradas na Figura 3.9 e também podem ter sua eficiência energética aumentada, quando é processada e transformada em pellets, como mostrado na Figura 3.10.

2.3.4 Casca de Café

De acordo com o Ministério da Agricultura e da Pecuária (2023), o Brasil é o maior produtor mundial e o segundo maior consumidor de café, exportando cerca de 2,2 milhões de toneladas do produto no ano de 2022. A produção de café é uma das atividades mais importantes do agronegócio. Esse alto nível de produção resulta na geração de grandes quantidades de resíduos, como a casca do café, que se apresenta como uma opção limpa e sustentável para a geração de energia (COSTA; TORRES; LEAL, 2019).

As cascas provenientes dos grãos de café no Brasil representam resíduos renováveis e de baixo custo, muitas vezes subutilizados, porém ecologicamente adequados. Tais resíduos têm o potencial de serem fontes de calor, vapor e eletricidade (VALE et. al., 2007). Sendo assim, a utilização da casca, parte desprezada no processo da produção do café, se mostra muito benéfica por destinar o descarte desse tipo de material. A Figura 3.11 demonstra os resíduos obtidos com esse tipo de biomassa.

Figura 3.11: Resíduos de casca de café.



Fonte: SILVA (2012).

3 METODOLOGIA

Este trabalho trata de uma pesquisa básica estratégica quanto à sua finalidade, descritiva quanto aos seus objetivos, qualitativa, quanto à abordagem e bibliográfica quanto aos procedimentos. O método científico utilizado será o hipotético-dedutivo.

As próximas seções abordam as atividades e os procedimentos para a geração, a coleta e a organização dos dados da pesquisa.

3.1 PROPOSTA DO TRABALHO

A proposta desse trabalho de conclusão de curso foi coletar dados em artigos científicos, anais de conferências, trabalhos de conclusão de curso e livros relacionados ao tema e avaliar entre os combustíveis os resíduos agroindustriais, por meio de parâmetros como teores de cinzas e umidade, poder calorífico inferior (PCI), poder calorífico superior (PCS) e massa específica das biomassas, quais delas tem o melhor desempenho e proporcionam um maior potencial energético na alimentação de caldeiras a biomassa. Com isso, foi analisado e discutido o uso da biomassa como combustível renovável para produção de energia. Para isso, foi selecionado a partir da pesquisa, 4 (quatro) tipos de biomassa, conforme foi estabelecido nos objetivos do trabalho, avaliando o volume que é gerado como resíduo agroindustrial, bem como identificação do poder calorífico destas. A escolha desse número também foi estratégica para permitir uma comparação direta e equilibrada entre as diferentes propriedades das biomassas. Se fossem selecionadas menos de quatro biomassas, o estudo poderia não capturar variações importantes entre diferentes tipos de resíduos. Por outro lado, incluir um número maior de biomassas exigiria uma coleta de dados mais extensa e complexa, além de aumentar o volume de informações a serem processadas, o que comprometeria a qualidade da avaliação e comparação dentro dos limites de um TCC.

A escolha das quatro biomassas para o trabalho foi baseada em diversos fatores importantes. Primeiramente, foi considerada a abundância dessas biomassas no Brasil, onde são geradas em grandes quantidades devido às atividades agrícolas e industriais. Além disso, uma motivação central para a escolha dessas biomassas é a oportunidade de solucionar problemas relacionados ao gerenciamento de resíduos. A geração de grandes quantidades de materiais

residuais que muitas vezes não são aproveitados adequadamente representa um desafio para diversas indústrias. O uso desses resíduos como biomassa para combustível oferece a possibilidade de transformar um produto que seria desperdiçado, em uma fonte de energia renovável, contribuindo para a redução da poluição e do descarte inadequado. A sustentabilidade e a economia foram pontos decisivos na seleção dessas biomassas. A utilização de fontes renováveis não só contribui para a redução da dependência de combustíveis fósseis, como também pode gerar economia para as indústrias, ao transformar subprodutos que seriam descartados em uma valiosa fonte de energia. Outro fator importante na escolha foi o potencial energético dessas biomassas.

Os cinco principais parâmetros mencionados acima, foram utilizados para realizar a comparação das biomassas e os dados obtidos nos estudos coletados foram organizados em uma tabela, que permitiu a análise comparativa e avaliação qualitativa das principais características de cada uma delas. Com essa análise, foram identificadas as vantagens e desvantagens de cada fonte.

No contexto deste trabalho, a eficiência se refere à capacidade das biomassas de converterem o máximo de sua energia potencial em calor útil para a caldeira, minimizando perdas, como aquelas causadas por alta umidade ou alto teor de cinzas. Uma biomassa será considerada mais eficiente quanto maior for o seu poder calorífico e menor a quantidade de resíduos gerados, como cinzas. Além disso, a eficiência também envolve o custo-benefício do processo de geração de energia, considerando o consumo de biomassa necessário para gerar uma quantidade determinada de energia e o impacto disso nos custos operacionais da caldeira.

A viabilidade técnica foi avaliada pela capacidade das biomassas de atender aos requisitos das caldeiras, analisando fatores como teor de umidade, cinzas, poder calorífico e densidade, que afetam a combustão e a adequação ao equipamento. A viabilidade energética analisou o potencial de geração de energia, focando no poder calorífico e na eficiência de conversão, além da energia necessária para o pré-processamento, como a secagem. Também foram considerados o armazenamento e o transporte. A viabilidade econômica tem como base a análise os custos de produção, transporte e processamento das biomassas, além da densidade, que influencia os custos logísticos.

3.2 PROCEDIMENTO DE COLETA DE DADOS

Por se tratar de um trabalho de revisão bibliográfica, onde foi avaliado qual ou quais as potenciais fonte de combustível para uma caldeira, a primeira etapa deste trabalho foi realizar a seleção de estudos que abordam a questão dos resíduos agroindustriais que possam ser utilizados como biomassa, nesta fase uma pesquisa bibliográfica, consiste em revisar: artigos publicados em periódicos científicos internacionais; artigos publicados em periódicos nacionais; livros publicados por pesquisadores referência em suas áreas de atuação; teses e dissertações; anais de conferências internacionais e anais de conferências nacionais. Todo material pesquisado na área do tema abordado.

A pesquisa foi realizada com base em dados acadêmicos como Google Scholar, ScienceDirect e periódicos da CAPES. Foram definidas palavras-chave específicas, como "biomassa para caldeiras", "poder calorífico", "densidade da biomassa", "eficiência energética", "teor de cinzas", "teor de umidade" "bagaço de cana", "casca de arroz", "casca de café", "resíduos de eucalipto", de modo a garantir uma busca abrangente e relevante. Também foram considerados trabalhos de conclusão de curso, dissertações e teses que abordassem o uso dessas biomassas como combustíveis. Além disso, foram utilizados como fontes livros de termodinâmica, geração de vapor e caldeiras.

A seleção dos artigos se deu a partir da leitura dos títulos e resumos, sendo incluídos apenas aqueles que apresentavam dados comparativos de poder calorífico, densidade, teor de umidade e teor de cinzas das biomassas. Os trabalhos selecionados passaram por uma análise qualitativa, sendo comparados quanto à metodologia aplicada e aos resultados apresentados, a fim de garantir a consistência e relevância dos dados utilizados para a avaliação comparativa.

Após a coleta de dados, foi montada uma tabela que permite visualizar as informações de maneira expositiva, destacando os pontos fortes e fracos de cada biomassa. As colunas da tabela foram divididas de acordo com os parâmetros analisados, como poder calorífico superior (PCS), poder calorífico inferior (PCI), densidade, teor de umidade (TU) e teor de cinzas (TC). Cada linha da tabela representou um dos resíduos de interesse, comparados entre si com os diferentes trabalhos realizados, e também com as outras biomassas, permitindo que seus desempenhos fossem comparados diretamente.

O PCS e o PCI foram usados para avaliar o potencial energético de cada biomassa. Biomassas com maior PCS e PCI, foram consideradas mais eficientes para a geração de energia. Comparando os dados de densidade, foi possível avaliar a viabilidade logística. Biomassas com maior densidade, mostraram-se mais vantajosas para transporte e armazenamento, enquanto biomassas de menor densidade, exigem mais espaço e, portanto, apresentam maiores custos logísticos. A umidade foi outro fator crucial analisado. Biomassas com alto teor de umidade, requerem secagem antes do uso, o que as torna menos viáveis sem um tratamento adicional. Por outro lado, as biomassas com menor umidade, estão mais prontas para serem utilizadas em caldeiras sem a necessidade de processos adicionais. O teor de cinzas também foi um parâmetro importante para avaliar o impacto das biomassas na manutenção dos equipamentos de combustão. Biomassas com alto teor de cinzas exigem maior frequência de limpeza e podem reduzir a vida útil das caldeiras, enquanto aquelas com baixo teor de cinzas, como os resíduos de eucalipto, têm menos impacto nos equipamentos.

Portanto, a tabela permitiu uma comparação clara entre as diferentes biomassas, facilitando a identificação de quais possuem maior potencial energético e quais apresentam desafios operacionais, como o teor de umidade e de cinzas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise do potencial calorífico das biomassas selecionadas – bagaço de cana, casca de café, casca de arroz e resíduo de eucalipto – foi realizada a partir de parâmetros como o teor de umidade, teor de cinzas, poder calorífico superior (PCS), poder calorífico inferior (PCI) e densidade. A escolha dessas quatro biomassas foi motivada pela sua ampla disponibilidade no Brasil, pela relevância em setores industriais e agroindustriais, e pela variedade de características físico-químicas, que permitem uma análise comparativa rica em termos de eficiência energética. O bagaço de cana de açúcar foi escolhido por ser um dos principais subprodutos da indústria sucroalcooleira no Brasil, sendo amplamente utilizado como fonte de energia em caldeiras. A casca de arroz foi incluída devido à sua alta produção nas regiões arrozeiras do país, além de seu potencial como resíduo agrícola. A casca de café foi selecionada por ser um resíduo abundante na indústria cafeeira, e seu uso como biomassa ainda é relativamente pouco explorado, o que proporciona oportunidades para novas análises. Por fim, os resíduos de eucalipto foram escolhidos devido à grande utilização da madeira de eucalipto em processos industriais, como nas madeireiras e indústrias de papel e celulose e devido à disponibilidade de resíduos que podem ser aproveitados como combustível.

De forma geral, a maioria das biomassas apresenta baixo teor de cinzas, com exceção da casca de arroz e do bagaço de cana, que possuem níveis mais elevados. A umidade também desempenha um papel fundamental, influenciando diretamente a diminuição do poder calorífico. A análise comparativa desses dados permitiu discutir as vantagens e desvantagens de cada biomassa para seu uso como combustível em caldeiras. Os resultados obtidos foram reunidos na Tabela 1 e comparados a seguir.

Tabela 1 – Compilado de dados obtidos para PCS, PCI, densidade, teor de umidade e teor de cinzas.

Biomassa	PCS (MJ/kg)	PCI (MJ/kg)	ρ (kg/m ³)	TU (%)	TC (%)	Autor
Resíduos de Eucalipto	18,47	-	1641,00	8,91	0,11	SOUZA (2022)
	19,41	-	-	11,00	0,50	SANTOS (2012)
	16,94	15,58	164,30	11,40	8,10	CARESCHI (2019)
	33,61	28,10	563,00	14,44	0,95	NUNES (2019)
	19,42	-	-	-	0,67	BARBOSA et. al (2023)
Bagaço de Cana	18,59	-	-	62,20	5,80	SANTOS (2012)
	9,52	-	100,00	50,00	-	SILVA E MORAIS (2008)
	18,84	17,48	900,28	5,44	-	SILVA (2023)
	17,81	-	569,04	7,94	2,15	COSTA et. al (2020)
	18,03	16,45	-	8,72	0,95	GROTTO (2021)
	11,25	-	827,35	49,80	6,00	SAEED et. al (2021)
	5,57	-	320,00	32,00	3,30	OMONIYI e OLORUNNISOLA (2014)
	14,00	-	280,00	7,00	7,21	
Casca de Arroz	15,96	-	-	-	2,10	PEDROSO (2021)
	14,67	-	-	11,31	15,51	VIEIRA et. al. (2013)
	13,54	-	1410,00	11,00	21,52	FERNANDES et. al (2015)
	13,26	-	1400,00	9,25	22,13	
	12,92	-	114,10	10,61	23,84	MORAIS (2006)
	17,58	15,13	524,30~792,90	2,00~5,20	8,50~15,00	JAPHET et. al. (2015)
	-	13,24~16,20	86~114	8,68~10,44	15~30	MANSARAY GHALY (1996)
	8,97	-	543,00	10,00	19,50	SAEED et. al (2021)
	17,69	-	1141,00	14,00	-	
Casca de Café	16,46	12,72	144,41	15,66	13,96	VALE et. al (2007)
	-	-	116,95	13,50	13,96	
	19,35	-	1132,00	15,00	-	SAEED et. al (2021)
	17,32	15,93	-	8,88	0,79	MANRIQUE et. al. (2019)
	19,01	17,48	614,00	0,00	0,87	
	21,09	-	545,00	6,36	12,33	MERETE (2014)

Fonte: Autoria própria (2024).

O resíduo de eucalipto se destaca positivamente como a biomassa mais eficiente entre as analisadas. Com um teor de umidade relativamente baixo, entre 8,91% e 14,44%, ele pode ser utilizado diretamente em processos de combustão sem a necessidade de pré-secagem, sendo assim, uma excelente opção para sistemas industriais de geração de calor. O teor de cinzas foi o menor entre as biomassas estudadas, variando entre 0,5% e 0,95%, o que torna sua combustão altamente eficiente, gerando uma quantidade mínima de resíduos. O valor de 8,1% do teor de cinzas indicado por Careschi (2019) está acima do esperado e é considerado anômalo para resíduos de eucalipto, podendo indicar contaminação do material ou erros na coleta de amostra de material, portanto, não será considerado. O PCS foi elevado, situando-se na faixa de 16,94 a 19,42 MJ/kg, garantindo uma alta disponibilidade de energia para conversão térmica. Os dados de PCI e PCS obtidos por Nunes (2019) são os melhores, porém esse valor só foi obtido pois foi

utilizado o aglutinante carboximetilcelulose (CMC), alterando o processo de combustão do resíduo de eucalipto. Outro aspecto positivo foi a sua densidade, que pôde ser aumentada por meio da compactação e obtendo o valor de 1641 kg/m^3 (SOUZA, 2022), a maior entre as biomassas avaliadas, o que facilita o armazenamento e o transporte, além de aumentar sua densidade energética.

O bagaço de cana, amplamente utilizado na indústria de biocombustíveis, mostrou um alto teor de umidade, variando entre 50% e 60%, desde que não passe por um processo prévio de secagem (NOGUEIRA; LORA; 2003), que nesse caso faz o teor de umidade diminuir, mas geralmente os valores ainda permanecem mais altos que de outras biomassas. No trabalho conduzido por Silva e Moraes (2008), por exemplo, teor de umidade chegou a 50%. Com secagem prévia, foram encontrados valores de umidade entre 5,44 e 32%, melhores do que os anteriores ao processo de secagem. Embora o bagaço de cana seja abundante e de baixo custo, especialmente em regiões produtoras de açúcar e etanol, a variação na umidade pode impactar o rendimento energético e aumentar os custos de secagem. Esse fator afeta diretamente sua eficiência como combustível, pois uma maior quantidade de energia é consumida na evaporação da água presente antes que o processo de combustão possa efetivamente ocorrer. Sendo assim, elevados níveis de umidade podem reduzir o valor calorífico e aumentar consideravelmente os custos de transporte (CARASCHI et. al., 2019). O teor de cinzas do bagaço de cana foi relativamente baixo, entre 0,95% e 7,21%, o que é favorável para a combustão, pois reduz a quantidade de resíduos gerados. Em termos de PCS, o bagaço de cana-de-açúcar apresentou PCS variando entre 5,57 e $18,839 \text{ MJ/kg}$, o que é considerado moderado. Os dados de Omoniyi e Olorunnisola (2014) e de Silva e Moraes (2008), foram bem menores, podendo indicar um problema na amostragem. Um baixo PCS limita a eficiência da biomassa em aplicações de alta demanda energética. Devido ao elevado teor de umidade, o PCI se mostrou significativamente inferior ao PCS, já que parte da energia disponível é desperdiçada na secagem durante a queima. Em termos de densidade, o bagaço de cana, quando compactado, alcança valores entre 100 e 900 kg/m^3 .

A casca de arroz apresentou PCS variando de 8,97 a $17,69 \text{ kJ/kg}$, com PCI de 13,24 a $16,20 \text{ MJ/kg}$, um valor relativamente baixo, o que reflete a menor quantidade de energia disponível para conversão em calor útil. A densidade variou de 86 a 1410 kg/m^3 , uma grande variação que só pode ser justificada pelo uso de

compactação das cascas na forma de briquetes ou pellets, aumentando sua densidade. Seu teor de umidade, de 2,00 a 11,31%, é considerado adequado para a combustão, porém o teor de cinzas foi consideravelmente alto, chegando a 23,84% em alguns casos, como observado por Moraes (2006). Esse elevado teor de cinzas dificulta o processo de combustão (SAEED et. al., 2015), pois facilita a formação de resíduos e incrustações no equipamento de queima, que requer sistemas de remoção e controle de resíduos mais complexos, aumentando os custos operacionais. Devido à alta quantidade de cinzas, a combustão da casca de arroz é prejudicada, tornando essa biomassa menos eficiente em comparação com outras. Embora a casca de arroz seja amplamente disponível, seu alto teor de cinzas e seu PCS relativamente mais baixo limitam sua viabilidade para caldeiras de alta eficiência.

A casca de café, um resíduo da indústria cafeeira, destacou-se por apresentar um teor de umidade mais baixo, em torno de 6,36% a 15,66%. Essa característica contribui para uma maior eficiência durante a combustão, uma vez que menos energia é desperdiçada no processo de secagem, especialmente quando comparada ao bagaço de cana. O teor de cinzas da casca de café foi moderado, em torno de 0,79 a 13,96%, o que implica que o controle de resíduos é necessário, mas ainda viável. O PCS da casca de café se situou entre 16,46 e 21,09 MJ/kg e PCI entre 12,72 e 17,48 MJ/kg, o que a coloca como uma biomassa competitiva em termos de energia disponível, especialmente no estudo de Merete (2014), que a torna uma opção interessante para caldeiras de médio a grande porte. O PCI, influenciado pelo menor teor de umidade, manteve-se em patamares mais altos do que o observado no bagaço de cana, mostrando que a casca de café pode ser uma opção viável para combustão direta em caldeiras. Sua densidade, em torno de 100 kg/m³ sem compactação, é relativamente baixa, o que pode impactar sua logística de transporte e armazenamento, embora tal fator possa ser compensado pelo seu maior poder calorífico, porém, quando compactada, obtém valores de densidade entre 545 e 1132 kg/m³, a tornando uma ótima opção de biomassa.

A densidade foi um outro critério crucial na escolha, uma vez sabido que biomassas com maior densidade são mais eficientes em termos de armazenamento e transporte, pois ocupam menos espaço e resultam em menores custos logísticos. Resíduos de eucalipto e o bagaço de cana, quando compactados, se destacaram, mostrando boas densidades, oferecendo vantagens significativas para o uso

industrial. A casca de arroz, embora tenha apresentado uma densidade inferior, compensou parcialmente com sua disponibilidade abundante. O teor de umidade é um grande fator de importância, considerando que níveis elevados desta, podem reduzir o valor energético, aumentar o custo e a complexidade do processamento, considerando que a biomassa precisa ser seca antes de ser usada de maneira eficiente. O bagaço de cana, por sua vez, em algumas amostras, apresentou um demasiado teor de umidade, o que é uma desvantagem, pois requer secagem adicional antes de sua combustão. Enquanto isso, os resíduos de eucalipto e a casca de café se mostraram mais atraentes com seus teores de umidade mais baixos, permitindo uma aplicação direta em caldeiras.

Finalmente, o teor de cinzas foi considerado um dos fatores decisivos. A biomassa queima gerando resíduos, e um teor de cinzas elevado aumenta a necessidade de manutenção das caldeiras e pode causar incrustações nos equipamentos (SAEED et. al., 2015), reduzindo sua eficiência ao longo do tempo. A casca de arroz, apesar de sua abundância, apresentou um teor de cinzas extremamente alto, o que a torna menos viável para uso em caldeiras, pois exigiria limpeza e manutenção frequentes. Em contrapartida, os resíduos de eucalipto e a casca de café se destacaram por apresentarem baixos teores de cinzas, resultando em uma operação mais eficiente e menor desgaste nos equipamentos.

Após analisar PCS, PCI, densidade, teor de umidade e teor de cinzas, os resíduos de eucalipto foram identificados como a melhor opção de biomassa para combustíveis em caldeiras. Com elevado valor energético, baixa umidade e baixo teor de cinzas, ele maximiza a eficiência da combustão e minimiza a necessidade de manutenção do equipamento. A casca de café, embora também tenha mostrado um bom desempenho, apresentou variações no teor de cinzas e uma densidade inferior, o que a torna uma alternativa viável, mas não tão eficiente quanto o eucalipto. O bagaço de cana, embora abundante, se mostrou descabido devido ao seu alto teor de umidade, enquanto a casca de arroz foi penalizada pelo teor elevado de cinzas.

Portanto, a análise conclui que, considerando todos os fatores, os resíduos de eucalipto são a biomassa mais eficiente e viável para uso em caldeiras, devido ao seu equilíbrio entre alto poder calorífico, baixo teor de umidade e baixo teor de cinzas. Por outro lado, o bagaço de cana e a casca de arroz, apesar de suas vantagens de disponibilidade, apresentam limitações significativas que comprometem sua viabilidade sem um tratamento adicional. Assim, a tabela foi

essencial para uma análise clara e objetiva dos dados, auxiliando na escolha da biomassa mais eficiente para combustão.

Apesar do poder calorífico ser um ótimo ponto para se determinar a melhor biomassa a ser utilizada como combustível, outros questionamentos podem ser levantados, como custos, a disponibilidade de material, logística de armazenamento e transporte para biomassas que não são de origem local, entre outros. Além disso, os custos iniciais de instalação e a infraestrutura necessária para a coleta e transporte de biomassa podem ser significativos (ALI et. al., 2021). Por isso, foi realizada uma reavaliação da melhor biomassa para uso como combustível em caldeiras, envolvendo a consideração de novos fatores: logística de armazenamento e transporte, disponibilidade local e viabilidade econômica.

De acordo com a Agência Internacional de Energias Renováveis (IRENA), a elaboração de um plano de negócios, em alguns casos, é fundamental para garantir a viabilidade econômica da utilização de biomassa, considerando os custos de coleta e logística. Os custos variam bastante entre as biomassas, de acordo com sua origem, necessidade de pré-tratamento ou secagem, sua densidade e até a necessidade de transporte para o local de armazenamento ou de utilização como combustível (SEARCY et. al., 2007). O bagaço de cana-de-açúcar, por exemplo, é um subproduto amplamente disponível em regiões produtoras, mas seu transporte a longas distâncias pode elevar os custos significativamente. O estudo conduzido por Filho (2009), deixa a entender que os principais custos da utilização do bagaço de cana-de-açúcar estão relacionados à implantação e operação da usina, porém, o mesmo estudo ainda avalia o uso deste tipo de biomassa como viável e vantajoso. Da mesma forma, a casca de arroz é um subproduto barato em áreas de produção de arroz, mas seu elevado teor de cinzas faz que seja necessária a manutenção dos equipamentos, aumentando seu custo operacional. A casca de café, que é menos abundante em termos de quantidade e de localização, pode ser mais cara em regiões distantes das áreas produtoras. Em contrapartida, os resíduos de eucalipto, apesar de possuírem um custo geralmente mais elevado em regiões distantes das plantações e indústrias de celulose, ainda são competitivos nas áreas florestais. Um estudo no sul da Itália, conduzido por Sgroi et. al. (2015), ressalta que, para agricultores locais na Itália que fazem a rotação de culturas durante o ano, o cultivo de eucalipto tem menor impacto ambiental, mas apresenta menor rentabilidade devido aos altos custos de produção. A viabilidade econômica do uso dessas

biomassas está diretamente ligada à proximidade de fontes industriais. O bagaço de cana é economicamente viável em regiões produtoras de cana de açúcar, como São Paulo, Goiás e Minas Gerais, conforme a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), enquanto o transporte a longas distâncias se torna inviável sem secagem ou compactação. A casca de arroz segue uma lógica similar, sendo mais vantajosa em áreas produtoras. Por outro lado, a casca de café, predominantemente encontrada em Minas Gerais e Espírito Santo, de acordo com a CONAB, enfrenta altos custos de transporte fora dessas regiões. Já os resíduos de eucalipto podem ser mais vantajosos em áreas próximas a plantações florestais, e sua densidade, relativamente alta, ajuda a tornar o transporte a distâncias moderadas mais viável em comparação com as demais biomassas.

No que diz respeito ao armazenamento e à logística, o bagaço de cana apresenta desafios significativos devido ao seu alto teor de umidade (SEARCY et. al., 2007). Sem um armazenamento adequado, o bagaço pode ser desperdiçado, aumentando os custos logísticos. Em contrapartida, a casca de arroz, que possui um teor de umidade relativamente baixo, é mais fácil de armazenar, mas sua baixa densidade encarece o transporte. A casca de café, apesar de ter um teor de umidade intermediário, requer menos espaço de armazenamento do que a casca de arroz mas ainda possui baixa densidade, resultando em custos logísticos elevados. Os resíduos de eucalipto, por sua vez, são mais densos e têm um teor de umidade baixo, o que facilita o armazenamento e transporte, tornando-os a biomassa mais eficiente do ponto de vista logístico.

Diante desses novos critérios, a reavaliação dos critérios logísticos mantém os resíduos de eucalipto como a opção mais equilibrada. Eles combinam densidade, valor energético, facilidade de manejo e custos moderados. O bagaço de cana é viável quando está prontamente disponível, mas suas desvantagens logísticas precisam ser contornadas, bem como seus desafios de secagem precisam ser gerenciados adequadamente. Em cenários que exigem maior demanda energética ou onde há grande disponibilidade dos resíduos, não havendo necessidade de transporte para grandes distâncias, os resíduos de eucalipto oferecem vantagens claras. A casca de arroz e a casca de café, apesar de serem alternativas viáveis em contextos regionais, perdem competitividade devido a limitações como alto teor de cinzas e baixa densidade, respectivamente.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, uma análise comparativa sobre o potencial energético de diferentes biomassas foi realizada a fim de comparar as suas propriedades energéticas e de avaliar sua viabilidade como fontes de energia em processos de combustão. As biomassas avaliadas foram: bagaço de cana, casca de café, casca de arroz e resíduo de eucalipto, levando em consideração parâmetros como teor de umidade, teor de cinzas, poder calorífico superior (PCS), poder calorífico inferior (PCI) e densidade. Esses parâmetros são essenciais para determinar a eficiência energética e a aplicabilidade de cada biomassa na indústria.

Os resultados mostraram que os resíduos de eucalipto e a casca de café, deste ponto de vista, são as opções mais interessantes para serem usadas como combustível em caldeiras. Ambos apresentaram alto poder calorífico e densidade moderada. O resíduo de eucalipto, em particular, se destacou por ter um teor de cinzas muito baixo, o que, somado ao seu elevado PCS, garante uma combustão eficiente e menos manutenção. Isso o torna uma das melhores opções quando o foco é obter alta eficiência energética com baixa geração de resíduos.

Outro ponto relevante é a facilidade de armazenamento e transporte desses resíduos, especialmente do eucalipto, que, além de ser altamente energético, possui uma densidade que favorece a logística, sendo, economicamente, interessante para aplicações industriais. Entre as biomassas analisadas, o resíduo de eucalipto demonstra ser a escolha mais adequada para sistemas de geração de calor, oferecendo uma combinação promissora de eficiência, sustentabilidade e viabilidade econômica. Quanto à casca de café, embora tenha apresentado um bom desempenho, ainda assim, ficou abaixo do eucalipto em alguns aspectos. As demais biomassas, como o bagaço de cana e a casca de arroz, enfrentam desafios significativos, como o baixo poder calorífico e o alto teor de cinzas, o que impacta diretamente na eficiência dos processos de combustão. Apesar de serem materiais de fácil acesso, essas limitações dificultam sua competitividade, exigindo adaptações tecnológicas para que possam ser melhor aproveitadas.

Esses resultados reforçam a literatura existente, como os estudos de Nogueira e Lora (2003), que destacam a importância de se escolher biomassas com propriedades físico-químicas adequadas para garantir eficiência energética. Além disso, a conclusão está de acordo com as observações de Demirbaş (2001), que

ressaltam como a densidade e o poder calorífico são fatores determinantes para a viabilidade de uma biomassa como combustível.

Apesar da eficiência energética ser um dos principais pontos a serem avaliados na escolha de um resíduo a ser utilizado como combustível para caldeiras, também foram avaliados outros parâmetros, com custos, armazenamento e logística para se utilizar a biomassa, além da disponibilidade deste material. Apesar de ser menos disponível, o resíduo de eucalipto continua sendo uma ótima alternativa para utilizar como combustível, devido às suas características que não aumentam muito o custo de operação e manutenção de maquinário e também pode ser um resíduo mais compacto, o que não onera muito no transporte e armazenamento. Apesar disso, o eucalipto pode não ser a melhor opção de biomassa, caso o material precise ser deslocado por grandes distâncias para ser utilizado, o que aumentaria significativamente o custo e se tornaria menos viável economicamente.

Em um cenário onde o bagaço de cana é amplamente disponível, sendo um subproduto deixado pela indústria sucroalcooleira, esse resíduo também se mostra uma ótima alternativa à biomassa no Brasil. Apesar de seu alto teor de umidade, que pode ser diminuído em uma secagem prévia para melhor aproveitamento e melhora do potencial energético, a abundância dessa biomassa a torna viável a ser utilizada como combustível para caldeiras. As dificuldades surgem por conta do armazenamento e dos custos iniciais para implementação. Apesar disso, dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), por meio do Balanço Energético Nacional (BEN), provam que a utilização do bagaço de cana para geração de energia não apenas é possível, como é a principal fonte de energia renovável no Brasil, tendo uma participação de 16,8% na Oferta Interna de Energia no ano de 2023.

Em conclusão, foi observado que os resíduos podem ser utilizados como fontes de combustíveis, entendendo-se que a melhor escolha deve ser tomada dentro de um contexto, onde são estudadas as propriedades físico-químicas dos materiais, as necessidades de cada indústria, onde a biomassa será utilizada e de onde ela será retirada e, também, sabendo-se que em cada cenário, as biomassas podem ter suas vantagens e desvantagens. O presente trabalho discutiu o potencial energético de diferentes resíduos agroindustriais, fornecendo um estudo teórico para futuras aplicações voltadas para soluções energéticas mais eficientes e sustentáveis no contexto industrial.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA. **Renewables 2023**. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/renewables-2023>. Acesso em 03 mar. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Energia de biomassa 2020**. Brasília: ANEEL. Disponível em: <https://biblioteca.aneel.gov.br/Busca/Download?codigoArquivo=177741&tipoMidia=0>. Acesso em: 30 set. 2024.

ANDRADE, P. F. de; *et al.* **Destinação de lodo de sistemas de tratamento para fins energéticos**. Volume 05, número 03 Especial. 2023. Disponível em: <https://rlas.uniplaclages.edu.br/index.php/rlas/article/view/94>. Acesso em 05 fev. 2023.

ARRUDA, M. Z. de. **Análise de combustíveis de caldeiras**. 2009. Disponível em: <http://usuarios.upf.br/~engeamb/TCCs/2009-2/>. Acesso em: 16 dez. 2022.

AZEVEDO, J. **Combustíveis fósseis: tipos e impactos**. Ecycle, 2021. Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/combustiveis-fosseis/>. Acesso em: 01 abr. 2023.

BELLEN, H. M. V. **Gestão ambiental e sustentabilidade**. Florianópolis: Editora da UFSC, 2011. Disponível em: http://arquivos.eadadm.ufsc.br/EaDADM/UAB_2011_1/Modulo_6/Gestao_Ambiental_Sustentabilidade/material_didatico/gestao_ambiental_e_sustentabilidade%20ed%20Final%20Grafica.pdf. Acesso em: 28 mar. 2023.

BOTELHO, M. H. C; BIFANO, H. M. **Operação de caldeiras: gerenciamento, controle e manutenção**. 2 edição. São Paulo: Blucher, 2015. Acesso em: 03 fev. 2023.

BURNTECH. **O que pode ser queimado em caldeiras a biomassa?** Burntech Blog, 2023. Disponível em: <https://blog.burntech.ind.br/o-que-pode-ser-queimado-em-caldeiras-a-biomassa/>. Acesso em: 10 jan. 2023.

CARASCHI, J. C. *et al.* Evaluation of Biomass Properties for the Production of Solid Biofuels. **Floresta e Ambiente**, v. 29, n. 2, 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/loram/a/nccDSz4NJMbdbXNbbqv6GYt/?lang=en>. Acesso em: 4 set. 2024.

CARDOSO, B. M. **Uso da biomassa como alternativa energética**. Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica/Curso de Engenharia Elétrica, 2012. Disponível em: <http://repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10005044.pdf>. Acesso em: 05 mar. 2023.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Thermodynamics: An Engineering Approach**. McGraw-Hill, 2014.

COELHO, C. T. *et al.* **Panorama do Potencial de Biomassa no Brasil**. 2002 Disponível em: https://www2.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros/panorama_biomassa.pdf. Acesso em: 04 set. 2024.

Confederação Nacional da Indústria. **Meio ambiente e sustentabilidade**. Portal da Indústria, 2021. Disponível em: <https://www.portaldaindustria.com.br/industria-de-a-z/meio-ambiente-e-sustentabilidade/>. Acesso em: 05 fev. 2023.

COSTA, R. A. B. *et al.* **Estudo da geração de energia utilizando biomassa da casca do café**. Anais IV CONAPESC... Campina Grande: Realize Editora, 2019.

Disponível em: <https://editorarealize.com.br/artigo/visualizar/56818>. Acesso em: 20 out. 2024.

CORRADI, G. M. **Qualidade energética de diferentes biomassas florestais utilizadas no Oeste Paranaense**. 2021. Disponível em: <https://tede.unioeste.br/handle/tede/5480>. Acesso em 05 mar. 2024.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. Campinas: Editora Unicamp, 2008. 732 p. Acesso em 08 fev. 2023.

DEBONI, T. L. **Qualidade da Biomassa Florestal Utilizada para Geração de Energia por Uma Unidade Geradora em Lages-SC**. 2017. Acesso em 08 fev. 2023.

DEMIRBAŞ, A. **Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals**. *Energy Conversion and Management*, v. 42, p. 1357-1378, 2001. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890400001370?via%3Dihub>. Acesso em: 03 set. 2024.

FARHAD, A.; *et al.* **Alimentando o futuro: aplicações de biomassa para energia verde e sustentável**. *Discov Sustain* 5, p. 156, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00309-z>. Acesso em: 03 out. 2024.

FILHO, P. L. D. **Análise de Custos na Geração de Energia com Bagaço de Cana-de-Açúcar: um Estudo de Caso em Quatro Usinas de São Paulo**. São Paulo, 2009. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-10062011-114743/publico/Paulo_Dantas.pdf. Acesso em: 03 out. 2024.

FREITAS, G. M. **Biomassa, uma fonte de energia**. 2016. Disponível em: <http://repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10018701.pdf>. Acesso em: 05 jan. 2023.

GOLDEMBERG, J. **Biomassa e energia**. 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/L6Pd3ZKdPqc4pZ4TQn5RyQy/#>. Acesso em: 28 mar. 2023.

HESELTON, K. E. **Boiler Operator's Handbook**. New York, 2004. Acesso em: 08 fev. 2024.

IRENA, Agência Internacional de Energias Renováveis. **Biomass for Heat and Power**. Technology Brief, 2015. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2015/IRENA-ETSAP_Tech_Brief_E05_Biomass-for-Heat-and-Power.pdf. Acesso em: 02 out. 2024.

JACINTHO, H. **Biodigestores: transformando resíduos agropecuários em energia**. FORBES, 2023. Disponível em: <https://forbes.com.br/forbesagro/2023/05/biodigestores-transformando-residuos-agropecuarios-em-energia/>. Acesso em: 05 jan. 2023.

JAPHET, J. A.; TOKAN, A.; MUHAMMAD, M. H. **Production and Characterization of Rice Husk Pellet**. American Journal of Engineering Research (AJER), v. 4, n. 12, p. 1-9, 2015. Disponível em: [https://www.ajer.org/papers/v4\(12\)/P0401201120119.pdf](https://www.ajer.org/papers/v4(12)/P0401201120119.pdf). Acesso em 24 set. 2024.

LORENSETTI, R. **Caldeira a biomassa: Você sabe como ela funciona?**. Coontrol, 2019. Disponível em: <https://blog.coontrol.com.br/caldeira-a-biomassa-voce-sabe-como-ela-funciona/>. Acesso em: 01 abr. 2023.

LORESENTTI, R. **A Importância da caldeira a biomassa para a sustentabilidade.** Coontrol, 2021. Disponível em: <https://blog.coontrol.com.br/caldeira-a-biomassa-e-sustentabilidade/>. Acesso em: 01 abr. 2023.

MANRIQUE, R. *et al.* **Evaluation of the energy density for burning disaggregated and pelletized coffee husks.** ACS Omega, v. 4, n. 2, p. 2957-2963, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b02591>. Acesso em: 04 set. 2024.

MANSARAY, K. G.; GHALY, A. E. **Physical and Thermochemical Properties of Rice Husk.** Energy Sources, 1997. 19(9), 989–1004. <https://doi.org/10.1080/00908319708908904>. Acesso em: 24 set. 2024.

MARAFON, C. A. *et al.* **Uso da Biomassa para a Geração de Energia.** Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2016. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1063559>. Acesso em: 19 out. 2024.

MERETE, W. *et al.* **O potencial da casca e da polpa do café como fonte alternativa de energia ecologicamente correta.** East African Journal of Sciences, v. 8, n. 1, 2014. Disponível em: <https://www.ajol.info/index.php/eajsci/article/view/119352>. Acesso em: 04 set. 2024.

MORAIS, M. R. *et al.* **Obtenção de briquetes de carvão vegetal de cascas de arroz utilizando baixa pressão de compactação.** ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 6., 2006, Campinas. Proceedings online... Disponível em: http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022006000200019&lng=en&nrm=abn. Acesso em: 06 set. 2024.

MORAN, M. J. *et al.* **Princípios de Termodinâmica para Engenharia.** LTC Editora: 7a edição, Rio de Janeiro, 2014. Acesso em: 08 jan. 2023.

MOTA, M. M. **Aumento de geração de vapor em uma caldeira de biomassa: estudo em função da estabilidade operacional.** 2020. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/25954>. Acesso em: 22 dez. 2023.

NETO, P. V. P. S. **Relação entre a umidade e o poder calorífico da biomassa utilizada na Cocelpa.** 2014. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1884/45620>. Acesso em: 05 mar 2023.

NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S. **Dendroenergia: Fundamentos e Aplicações.** 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/272814747_Dendroenergia_fundamentos_e_aplicacoes_2a_ed. Acesso em: 03 set. 2024.

NOGUEIRA, L. A. H.; ROCHA, C. R.; NOGUEIRA, F. J. H. **Eficiência no uso de vapor.** Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005.

NUNES, R.; DE ANDRADE, A. M.; JÚNIOR, A. F. D. **Production of briquettes using coconut and eucalyptus wastes.** *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 23, n. 8, p. 605-610, 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/nj5d3KPG4Bn7YRCJyRfW77J/?lang=en>. Acesso em: 04 out. 2024.

OLIVEIRA, M. M. **Análise da porosidade nanométrica de materiais lignocelulósicos derivados de bagaço de cana-de-açúcar submetidos à compressão úmida.** São Paulo, 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/293639953_Analise_da_porosidade_nanometrica_de_materiais_lignocelulosicos_derivados_de_bagaco_de_cana-de-acucar_submetidos_a_compressao_umida?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6Ii9kaXJlY3QiLCJwYWdlIjoX2RpcmVjdCJ9fQ. Acesso em: 13 ago. 2024.

OMONIYI, T. **Experimental Characterisation of Bagasse Biomass Material for Energy Production**. International Journal of Engineering and Technology. 2014. Volume 4. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/331037049_Experimental_Characterisation_of_Bagasse_Biomass_Material_for_Energy_Production. Acesso em: 23 set. 2024.

PAES, F. A. S. V. *et al.* **Impacto do manejo dos resíduos da colheita, do preparo do solo e da adubação na produtividade de eucalipto**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 37, p. 1081-1090, 2013. Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180228128025>. Acesso em: 21 out. 2024.

PEDROSO D. T. *et al.* **Torrefação de bagaço de cana-de-açúcar para gaseificação em leito fluidizado**. Ciências Aplicadas. 2021; 11(13):6105. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app11136105>. Acesso em: 24 set. 2024.

PEREIRA, T. V.; SEYE, O. **Caracterização física térmica de biomassa local. ENEPEX**. Disponível em: <http://eventos.ufgd.edu.br/enepex/anais/arquivos/393.pdf>. Acesso em 27 jan. 2023.

REZENDE, B. X. **Estudo da Viabilidade da Utilização de Biomassa para Geração de Energia Elétrica**. 2018. 39 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas, Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, 2018.

ROSSOL, C. D. *et al.* **Caracterização, classificação e destinação de resíduos da agricultura**. Scientia Agraria Paranaensis, v. 11, n. 4, p. 33–43, 2013. Disponível em: <https://e-revista.unioeste.br/index.php/scientiaagraria/article/view/5858>. Acesso em: 08 mar. 2024.

SAENGER, M. *et al.* **Combustion off coffee husks**. Applied Energy, [S. l.], v. 76, n. 1, p. 15-28, 2004. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148100001063>. Acesso em: 23 set. 2024.

SAMPSON, J. A. **Feasibility and Technoeconomic Analysis of Small-Scale Biomass to Power System with Novel Producer Gas Cleanup Technology**. Massachusetts Institute of Technology, 2020. Disponível em: <https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/127873/1196830808-MIT.pdf?sequence=1>. Acesso em: 04 out. 2024.

SANTOS, N. B. P. **Análise do cavaco de bambu como alternativa ao cavaco de eucalipto para utilização em caldeiras a vapor**. 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/36423>. Acesso em 27 jan. 2024.

SEARCY, E.; *et al.* **The Relative Cost of Biomass Energy Transport**. Applied Biochemistry and Biotechnology. v. 136–140, 2007. Disponível em: <https://bioenergy.inl.gov/Journal%20Articles/The%20Relative%20Cost%20of%20Biomass%20Energy%20Transport.pdf>. Acesso em: 02 out. 2024.

SGROY, F.; *et al.* **Economic assessment of *Eucalyptus* (spp.) for biomass production as alternative crop in Southern Italy**. 2015. v. 44, p. 614-619. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.032>. Acesso em: 02 out. 2024.

SIGNORELLI, S. C. M.; *et al.* Determinação da massa específica de biomassa de plantas do Nordeste do Brasil e seus biocarvões e avaliação da afinidade metálica para os íons Cu^{2+} , Ni^{2+} e Cr^{3+} . In: **Anais do XII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica**. Blucher Chemical Engineering Proceedings, v. 1, n. 4, p. 1062-1067. São Paulo: Blucher, 2017. Acesso em: 05 fev. 2023.

SILVA, J. P. **Caracterização da Casca de Café (coffea arábica, L) in natura, e de seus Produtos Obtidos pelo Processo de Pirólise em Reator Mecanicamente**

Agitado. Campinas, 2012. Disponível em:
<https://repositorio.unicamp.br/acervo/detalhe/858892>. Acesso em: 13 ago. 2024.

SILVA, M. F. F. **Avaliação do potencial energético de resíduos agroindustriais.**
 Rev. Virtual Quim. 2022. Disponível em:
<https://doi.org/10.21577/1984-6835.20210097>. Acesso em: 05 fev. 2023.

SILVA, O. F.; WANDER, A. E. **Estatística de produção.** Embrapa, 2023. Disponível em:
<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/arroz/pre-producao/socioeconomia/estatistica-de-producao>. Acesso em: 05 jan. 2023.

SOUZA, S. T. **A importância do tratamento de água em caldeiras industriais.**
 2022. Disponível em:
https://repositorio.pgsscogna.com.br/bitstream/123456789/57251/1/SANTIAGO_TOLDO_DE_SOUZA.pdf. Acesso em: 08 fev. 2023.

SPADOTTO, C. A.; RIBEIRO, W. C. **Gestão de resíduos na agricultura e agroindústria.** Botucatu: FEPAF, 2006. Disponível em:
<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/15288/gestao-de-residuos-na-agricultura-e-agroindustria>. Acesso em 22 dez. 2023.

VAKKILAINEN, E.K. **Stem generation from biomass: construction and design of large boilers.** Oxford: Butterworth-Heinemann. 2017. Acesso em: 24 mar. 2023.