



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA FLORESTAL - DCFL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL**

IRLAN PAULO FERREIRA CAMPELO

**CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA DA MARAVALHA GERADA NO
PROCESSAMENTO MECÂNICO DA MADEIRA EM MARCENARIAS DE
PEQUENO PORTE**

**RECIFE - PE
2023**

IRLAN PAULO FERREIRA CAMPELO

**CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA DA MARAVALHA GERADA NO
PROCESSAMENTO MECÂNICO DA MADEIRA EM MARCENARIAS DE
PEQUENO PORTE**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte das exigências para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof^o. Dr. Rafael Leite Braz

**RECIFE - PE
2023**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C193c Campelo, Irlan Paulo Ferreira
CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA DA MARAVALHA GERADA NO PROCESSAMENTO MECÂNICO DA
MADEIRA EM MARCENARIAS DE PEQUENO PORTE / Irlan Paulo Ferreira Campelo. - 2023.
39 f. : il.

Orientador: Rafael Leite Braz.
Inclui referências.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Bacharelado em
Engenharia Florestal, Recife, 2024.

1. Desdobramento da madeira. 2. Caracterização química. 3. Energia renovável. 4. Sustentabilidade. I. Braz, Rafael
Leite, orient. II. Título

CDD 634.9

IRLAN PAULO FERREIRA CAMPELO

**CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA DA MARAVALHA GERADA NO
PROCESSAMENTO MECÂNICO DA MADEIRA EM MARCENARIAS DE
PEQUENO PORTE**

Aprovado em 21 de setembro de 2023

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dra. Eliane Cristina Sampaio de Freitas
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Me. Cleyton dos Santos Souza
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof. Dr. Rafael Leite Braz
Universidade Federal Rural de Pernambuco
(Orientador)

**RECIFE - PE
2023**

*“Até os jovens se cansam e ficam exaustos,
e os moços tropeçam e caem; mas aqueles
que esperam no SENHOR renovam as suas
forças. Voam alto como águias; correm e
não ficam exaustos, andam e não se
cansam.”*

Isaias 40:30-31

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus.

Gostaria de começar expressando minha profunda gratidão à minha avó, Maria José Ferreira, que sempre foi a minha maior incentivadora. Infelizmente, não tive a oportunidade de realizar o seu sonho de me ver formado, mas seu amor e apoio foram a força que me trouxe até aqui. Seu espírito perseverante e sua crença em mim sempre serão minha inspiração.

Aos meus pais, meu eterno agradecimento. Vocês são os meus pilares, que me sustentaram com amor, encorajamento e apoio ao longo desta jornada acadêmica. Amo vocês profundamente e sou grato por tudo que fizeram por mim.

Aos meus amigos que o curso de Engenharia Florestal me deu e aos que fizeram parte durante todo esse caminho de quase 6 anos de curso, agradeço pela amizade, pelo companheirismo e pelo apoio mútuo que compartilhamos. Saibam que todos vocês, Ana Clara, Marcos Dias, Kamilo Alaboodi, Israel Vicente, Lucas Paz, Ursula Neves, Carol Caren, Jonatas Carlos, Lorena Paulina, Joseph Soares, João Victor, Renata Barbosa, Gustavo Vieira, Gustavo Andrade, Loghan Moreira, Giúlia Stéphan e Juliana Rodrigues, estão em meu coração. Juntos, enfrentamos desafios, celebramos conquistas e criamos memórias que levaremos para o resto de nossas vidas.

À técnica do Laboratório de Tecnologia e Anatomia da Madeira, Suzana Lopes, expresso minha sincera gratidão por sua orientação e assistência incansável durante a realização das análises deste trabalho.

Aos professores e professoras do Departamento de Ciência Florestal – UFRPE, por todos os ensinamentos e contribuições para minha vida profissional. Em especial ao meu orientador Rafael Leite Braz, pelo incentivo e apoio durante toda a graduação.

A todos vocês, minha mais profunda gratidão. Espero que este trabalho honre a confiança que depositaram em mim.

RESUMO

No Brasil, o consumo de energia elétrica tem crescido cada vez mais, a busca por outras fontes energéticas deve ser discutida e trabalhada, principalmente em algumas regiões do país. A crise energética do Brasil é marcada por fatores políticos, econômicos e ambientais, que estão diretamente relacionados com a dificuldade do país em manter o seu abastecimento de energia. Diante desse contexto, diversos setores têm buscado novas alternativas energéticas a fim de suprir a demanda exigida, investindo cada vez mais em alternativas sustentáveis. Dessa forma, o objetivo do trabalho foi avaliar o potencial energético da maravalha gerada no processamento mecânico da madeira em marcenarias de pequeno porte por meio das propriedades energéticas. O material utilizado foi as maravalhas de maçaranduba e sucupira, coletadas em duas marcenarias no município de Camaragibe - PE. As análises realizadas foram: teor de umidade, densidade a granel, teor de materiais voláteis, cinzas, carbono fixo, poder calorífico superior, inferior e útil, teor de extrativos, teor de lignina e holocelulose. Os resultados das análises químicas e calorimétricas das maravalhas embora indiquem que o Tratamento T1 tenha apresentado ligeira vantagem frente ao Tratamento T2, essas diferenças são mínimas e podem ser atribuídas a variações naturais nas propriedades das maravalhas. Sendo assim, os materiais de maravalha analisados possuem propriedades energéticas promissoras. Sua elevada densidade energética, baixo teor de umidade e composição química favorável indicam que a maravalha pode ser uma excelente opção como fonte energética. Essa descoberta sugere que a maravalha pode servir como uma alternativa eficiente e sustentável na substituição de matrizes energéticas não renováveis, contribuindo assim para a diversificação e aprimoramento do suprimento energético, fazendo com que um resíduo/descarte possa ser reaproveitado e usado de forma direta para a geração de energia ou obtenção de briquetes, pellets.

Palavras-chave: Desdobramento da madeira, Caracterização química, Energia renovável, Sustentabilidade.

ABSTRACT

In Brazil, electricity consumption has grown increasingly, the search for other energy sources must be discussed and worked on, especially in some regions of the country. Brazil's energy crisis is marked by political, economic and environmental factors, which are directly related to the country's difficulty in maintaining its energy supply. Given this context, several sectors have sought new energy alternatives in order to meet the required demand, investing increasingly in sustainable alternatives. Thus, the objective of the work was to evaluate the energy potential of wood shavings generated in the mechanical processing of wood in small carpentry workshops through its energetic properties. The material used was maçaranduba and sucupira wood shavings, collected in two carpentry workshops in the municipality of Camaragibe - PE. The analyzes carried out were: moisture content, bulk density, content of volatile materials, ash, fixed carbon, higher, lower and useful calorific value, extractive content, lignin and holocellulose content. The results of the chemical and calorimetric analyzes of the wood shavings, although they indicate that Treatment T1 had a slight advantage over Treatment T2, these differences are minimal and can be attributed to natural variations in the properties of the wood shavings. Therefore, the wood shavings materials analyzed have promising energetic properties. Its high energy density, low moisture content and favorable chemical composition indicate that wood shavings can be an excellent option as an energy source. This discovery suggests that wood shavings can serve as an efficient and sustainable alternative in replacing non-renewable energy matrices, thus contributing to the diversification and improvement of the energy supply, meaning that waste/disposal can be reused and used directly for generating energy or obtaining briquettes, pellets.

Keywords: Wood splitting, Chemical characterization, Renewable energy, Sustainability.

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

ONU – Organização das Nações Unidas

ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

TCF – Teor de Carbono Fixo

TMV – Teor de Materiais Voláteis

TCZ – Teor de Cinzas

DG – Densidade a Granel

TU – Teor de Umidade

PCS – Poder Calorífico Superior

PCI – Poder Calorífico Inferior

PCU – Poder Calorífico Útil

TE – Teor de Extrativo

LIG TOTAL – Lignina Total

HOLO – Holocelulose

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	10
2.	OBJETIVOS	11
2.1.	Geral.....	11
2.2.	Específicos	11
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
3.1.	BIOMASSA.....	12
3.2.	RESÍDUOS DO PROCESSAMENTO MECÂNICO DA MADEIRA	12
3.3.	PROPRIEDADES DA BIOMASSA PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA	13
4.	METODOLOGIA	17
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
5.1.	Química Estrutural.....	25
5.2.	Química Imediata.....	27
5.3.	Poder calorífico	29
5.4.	Comparação entre Biomassas	31
6.	CONCLUSÕES	34
7.	REFERÊNCIAS	35

1. INTRODUÇÃO

O consumo de energia no Brasil e no mundo tem crescido cada vez mais, o que conseqüentemente faz com que ela se torne escassa em algumas regiões. O cenário atual de demanda crescente por energia e a necessidade constante de mitigar os impactos ambientais têm impulsionado a busca por fontes energéticas alternativas e sustentáveis. Nesse contexto, a biomassa proveniente dos resíduos de marcenarias surge como um potencial solução para ambos os desafios, uma vez que os resíduos de marcenarias são compostos principalmente de madeira e seus derivados, que têm potencial energético considerável.

O crescente debate global sobre a transição para fontes de energia sustentáveis destaca a relevância de explorar alternativas baseadas em biomassa, particularmente aquelas provenientes de resíduos orgânicos (Sharma *et al.*, 2014).

A Organização das Nações Unidas (ONU) em conjunto com seus parceiros no Brasil está trabalhando para atingir os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), uma agenda mundial adotada durante a Cúpula das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento Sustentável. Ao todo são 17 objetivos ambiciosos e interconectados que abordam os principais desafios de desenvolvimento enfrentados por pessoas no Brasil e no mundo. A ODS 7 é relacionada à energia limpa, sendo assim, ela visa assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todos.

Além disso, o ODS 7 está interconectado com outros objetivos, como o combate às mudanças climáticas (ODS 13) e a promoção de cidades sustentáveis (ODS 11), uma vez que a energia limpa desempenha um papel fundamental na mitigação das mudanças climáticas e no desenvolvimento sustentável das cidades.

Essas metas fazem parte dos esforços globais para garantir que a energia seja produzida e consumida de forma sustentável, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis e mitigando os impactos ambientais das atividades energéticas. O cumprimento dessas metas é crucial para alcançar um futuro mais sustentável e igualitário.

Dentre as alternativas sustentáveis, a biomassa, assim como as demais fontes de energia renovável, tem ganhado destaque mundial por proporcionar energia elétrica limpa, através de desenvolvimentos tecnológicos, assim como, a energia eólica e solar (Campos, 2021).

Tal circunstância visa reduzir e/ou eliminar a superexploração dos recursos naturais não renováveis pelo fato de serem finitos, como no caso do carvão mineral, gás

natural e matérias-primas derivadas de petróleo (Basso, 2017). Conforme a Agência Nacional de Energia Elétrica (2020), a biomassa é definida como todo recurso renovável oriundo de matéria orgânica, seja de origem animal ou vegetal, que pode ser utilizada na produção de energia.

Dessa forma, baseando-se na composição orgânica dos resíduos de marcenarias e considerando sua natureza derivada da madeira, foi levantado a hipótese se esses resíduos possuem propriedades químicas favoráveis para serem utilizados como combustível. A análise da química imediata dos resíduos, incluindo teores de umidade, voláteis, carbono fixo e cinzas, além do poder calorífico (superior, inferior e útil), permitirá avaliar se esses resíduos possuem potencial energético e se podem ser eficazes quando queimados para a produção de calor e energia. Além disso, espera-se que a utilização dos resíduos de marcenarias como fonte de energia possa contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para a gestão mais sustentável dos resíduos industriais.

2. OBJETIVOS

2.1. Geral

Avaliar o potencial energético da maravalha *in natura* provenientes do processamento mecânico da madeira de *Manilkara spp.* (maçaranduba) e *Bowdichia spp.* (sucupira) para uso energético.

2.2. Específicos

- Quantificar e qualificar os componentes químicos estruturais das amostras de biomassa quanto aos teores de holocelulose, lignina e extrativos.
- Avaliar, por meio da análise imediata, o Teor de Cinza, Teor de Voláteis e Teor de Carbono Fixo das maravalhas *in natura*;
- Estimar o poder calorífico superior, inferior e útil das maravalhas *in natura*;

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. BIOMASSA

Nos últimos anos, a biomassa emergiu como uma opção para diversificar a matriz energética global e, conseqüentemente, diminuir a dependência de combustíveis fósseis. Apesar de representar apenas 13% do consumo mundial de energia primária, a biomassa destaca-se como uma das fontes de energia com maior potencial de crescimento nos próximos anos. Até hoje, várias regiões ao redor do mundo dependem da biomassa, especialmente madeira (lenha e carvão) e resíduos agrícolas, como uma fonte significativa de energia térmica e elétrica (International Energy Agency, 2012).

O Brasil possui um grande potencial para produção de biomassa. É um dos países que possui maior abundância de energia renovável do mundo, e diferente dos outros países, possui algumas vantagens para liderar a agricultura de energia. Uma das vantagens que se destaca é a capacidade de incorporar novas áreas à agricultura para geração de energia sem competir com a agricultura de alimento e com impactos ambientais limitados ao socialmente aceito (Borges *et al.*, 2017).

Segundo BRASIL (2012), além da biomassa de origem madeireira, existem diversos outros tipos que podem ser usados como fonte energética para gerar energia mecânica, térmica e elétrica. Como recurso energético, a biomassa é classificada nas seguintes categorias de acordo com a sua origem: biomassa energética florestal, com seus produtos e subprodutos ou resíduos; biomassa energética agrícola, englobando as culturas agroenergéticas e os resíduos e subprodutos das atividades agrícolas, agroindustriais e da produção animal; e rejeitos urbanos.

De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (2009), a biomassa de origem florestais são compostas predominantemente por biomassa lenhosa. A utilização final dessa biomassa para fins energéticos é realizada principalmente por meio de processos termoquímicos simples, como a combustão direta e a carbonização. No entanto, as mesmas também podem ser utilizadas para a produção de combustíveis líquidos e gasosos, como metanol, etanol e gases de síntese.

3.2. RESÍDUOS DO PROCESSAMENTO MECÂNICO DA MADEIRA

Nas serrarias e nas marcenarias, após o processamento mecânico da madeira, é comum o descarte de grandes volumes de materiais como a serragem, o pó-de-serra, as

maravalhas, as cascas, os pequenos fragmentos, as costaneiras, as lascas e os topos (Santiago & Andrade, 2005).

A serragem de maravalha é um material composto por lascas finas e pequenas de madeira, sendo um resíduo sólido obtido através de passagem da lâmina de serra durante o corte da madeira (Cabreira, 2011). Geralmente esse resíduo é visto como poluente ao meio ambiente e seu interesse comercial é quase zero. Essa biomassa resultante da madeira possui alto potencial energético que pode ser usada como combustível. O uso da biomassa resultante dos resíduos de serragem para produção de energia está também associado à redução no consumo de combustíveis fósseis por um lado e por outro a redução da pressão sobre os recursos florestais (Fortes, 2020).

Neste contexto, é relevante ressaltar a técnica de briquetagem. Este processo envolve a compressão de resíduos lignocelulósicos, como serragem, maravalha, casca de arroz, entre outros, para possibilitar seu aproveitamento como matéria-prima, substituindo a lenha por um produto equivalente (Schütz *et al.*, 2010).

A briquetagem de resíduos de biomassa é vantajosa tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico, principalmente devido à abundância desses materiais. Durante a briquetagem, os resíduos são compactados principalmente por meio do controle de temperatura e pressão. De acordo com Chen *et al.* (2009), o aumento da temperatura torna a lignina plástica, permitindo que ela atue como um ligante natural para as partículas durante o processo de compactação. Além disso, os materiais compactados exibem uma maior uniformidade em suas propriedades e uma maior concentração de energia.

Assim como a briquetagem, a peletização também busca utilizar resíduos sólidos para produção energética. A peletização envolve a compactação de matéria-prima lignocelulósica particionada, utilizando a liberação do material sob a pressão de dois ou mais rolos através de uma matriz perfurada, podendo ou não incluir aditivos. Esse procedimento resulta na fabricação de pellets, que são biocombustíveis sólidos, de formato granulado e cilíndrico, caracterizados por uma alta densidade energética em comparação com a matéria-prima original (Castellano *et al.*, 2015).

3.3. PROPRIEDADES DA BIOMASSA PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA

A biomassa pode ser adquirida de vegetais não lenhosos e lenhosos, como no caso da madeira e seus resíduos, de resíduos orgânicos, assim como, em biofluidos. Nesse sentido, para a determinação da potencialidade de um combustível, é necessário avaliar se este é usado dentro de sua plena capacidade. No primeiro momento, deve-se buscar

conhecer as suas características químicas e térmicas fundamentais como a composição estrutural, a composição imediata e o poder calorífico (Pento, 2015).

Os extrativos são substâncias químicas secundárias que não se encontram na composição da parede celular da madeira. Estas substâncias possuem a capacidade de se dissolver em água ou solventes orgânicos e são mais abundantes nas cascas de árvores lenhosas. Os extrativos são caracterizados por terem uma massa molecular reduzida e, dependendo do tipo de madeira, podem afetar as características organolépticas, como cor e odor. Além disso, a quantidade de extrativos pode variar mesmo dentro da mesma árvore (Carneiro, 2018).

Na madeira espécies folhosas, a quantidade de extrativos varia de 2 a 3%, enquanto em madeira de coníferas, esses valores podem ser ainda mais elevados. Apesar de sua concentração relativamente baixa, a presença desses componentes químicos tem um impacto direto em diversos processos relacionados ao uso da madeira (Area, 2008).

A madeira é constituída de celulose, hemiceluloses e lignina, além de conter substâncias acidentais extraíveis, denominadas de extrativos e também de uma pequena fração de inorgânicos, distribuídos nas diversas camadas que compõem a fibra. A lignina é o composto mais importante quando se objetiva a produção de carvão vegetal, pois o rendimento gravimétrico do processo de carbonização e a qualidade do mesmo estão diretamente relacionados aos teores de lignina presentes na madeira, uma vez que se trata de um polímero que possui uma estrutura química aromática e de alta massa molar, o que a torna mais resistente termicamente quando comparado à celulose e às hemiceluloses (Sjöström, 1993; Rowell *et al.*, 2005). Além disso, a lignina tem ligação direta com o poder calorífico, onde quanto maior o teor de lignina encontrado, maior será o poder calorífico da biomassa.

A celulose e hemiceluloses na madeira representam o total de polissacarídeos denominados, também, como holocelulose. A celulose é um polissacarídeo de cadeia linear com a estrutura de um polímero de comprimento tão grande que a torna insolúvel em solventes orgânicos, água, ácidos e bases diluídas à temperatura ambiente (Fengel e Wegener, 1984). As hemiceluloses são polissacarídeos de baixo peso molecular, frequentemente, associados à celulose nos tecidos das plantas. Nas plantas vasculares terrestres são extremamente ramificadas e constituídas de uma gama de unidades de açúcares, como D-xilose, D-manose, D-galactose, D-glicose, L-arabnose, ácido 4-O-metilglicurônico, ácido D-galactourônico e ácido D-glicurônico (Sjöström, 1993).

Para a utilização de um resíduo sólido (biomassa) como fonte energética, também

deve ser analisado a composição da química imediata, sendo assim, devem ser analisados os teores de carbono fixo (TCF), materiais voláteis (TMV) e cinzas (TCZ), visto que eles estão diretamente ligados ao poder calorífico.

O carbono fixo é a fração de carvão que permanece na amostra após a combustão e o seu teor depende principalmente, da quantidade de materiais voláteis, já que o teor de cinzas para produtos madeireiros é baixo. Silva *et al.* (2015), dizem que quanto maior o índice de carbono fixo, menor será o teor de materiais voláteis, isso faz com que o processo de queima do material dure por mais tempo, ou seja, um maior teor de carbono fixo acarreta um maior tempo de residência no processo de queima.

Materiais voláteis são a parte do combustível que evapora quando são submetidos a elevadas temperaturas. Para biomassa a faixa aceitável está entre 75% e 85% (Brito; Barrichelo, 1978; Chaves *et al.*, 2013). É importante frisar que os voláteis possuem um papel relevante durante a ignição e as etapas iniciais de combustão da biomassa (Pento, 2015). De preferência, é indicado que as biomassas para utilização energética possuam altos teores de carbono fixo (Soares *et al.*, 2014).

As cinzas por sua vez é o material residual proveniente do processo de combustão, sendo formadas por substâncias inorgânicas, por tanto, sempre é desejável a utilização de materiais com teores de cinzas inferiores a 2% para produtos madeireiros (Abreu, 2005). De acordo com Jara (1989), o poder calorífico é definido como a quantidade de energia na forma de calor liberada pela combustão de uma unidade de massa da madeira. A composição imediata de uma amostra é o conteúdo em porcentagem de massa de carbono fixo, voláteis, umidade e cinzas.

Outro parâmetro de importante conhecimento é a densidade. A densidade expressa a quantidade de massa ocupada em uma unidade de volume. Dessa forma, a densidade a granel (DG) faz a relação entre o peso da madeira e o volume conhecido. Vale ressaltar que a densidade está diretamente ligada ao poder calorífico da madeira, ou seja, espera-se que quanto maior a densidade, maior será o poder calorífico (TAPPI, 2010).

Dentre todas as variáveis analisadas, o teor de umidade (TU) é a propriedade física que mais varia dentro da árvore, visto que ela expressa a quantidade de água presente na biomassa em relação ao seu peso total. A determinação do TU é realizada através do método gravimétrico. Segundo Neves (2012), é preferível que a madeira apresente baixos teores de umidade, para que o seu poder calorífico seja elevado.

O uso da madeira para energia é um componente de grande importância no suprimento de energia primária, especialmente que diz respeito ao uso doméstico e

industrial. A combustão da biomassa gera energia na forma de calor, que é liberada durante a combustão completa de uma unidade de massa ou volume do combustível (kcal/kg^{-1} ou kcal/m^3), que pode ser definido como poder calorífico (Habitzreiter *et al.*, 2020). Em termos de qualidade da biomassa para a produção de energia, quanto mais alto for o poder calorífico, maior será a energia contida.

Segundo Brito *et al.*, (2008), O poder calorífico pode ser expresso de duas maneiras, como Poder Calorífico Superior (PCS) ou Poder Calorífico Inferior (PCI), dependendo da consideração do calor liberado pela condensação da água formada durante a combustão devido à presença de hidrogênio na composição química do material.

O Poder Calorífico Superior (PCS) corresponde ao calor liberado na queima de uma substância, incluindo o calor latente de condensação dos vapores d'água produzidos. Nesse sentido, quanto maior o PCS, maior é o potencial calorífico do resíduo. O PCS é calculado a partir do combustível seco usando um calorímetro, que determina o poder calorífico da biomassa florestal. Os valores do PCS são ligeiramente superiores na prática devido ao ambiente fechado do calorímetro, retendo os produtos da combustão. Durante o resfriamento, ocorre a condensação do vapor d'água, liberando calor latente de vaporização (Pereira Júnior, 2001).

O PCI leva em consideração o calor liberado na combustão e subtrai o calor latente da água produzida na queima. Ele é importante para avaliar o calor disponível efetivamente na forma de energia térmica após a combustão.

4. METODOLOGIA

O material utilizado foi a maravalha da madeira, proveniente de duas madeiras localizadas em Camaragibe-PE. A coleta do material foi realizada conforme a disponibilidade da madeira no dia da coleta, sendo assim, foram coletadas amostras da maravalha de maçaranduba (*Manilkara spp.*) e sucupira (*Bowdichia spp.*) (Figura 1). Com o material ainda em formato de maravalha foram realizadas as análises de teor de umidade e densidade a granel. Essas análises, assim como todas as outras que se seguiram, foram realizadas no Laboratório de Tecnologia e Anatomia da Madeira do Departamento de Ciência Florestal da UFRPE, campus sede.

Figura 1. Material coletado em marcenarias para a realização das análises.



Fonte: Autor, 2023.

Teor de umidade

A avaliação do teor de umidade foi realizada conforme a NBR8112, que consiste na determinação da umidade por meio do método gravimétrico, tomando-se a massa das amostras (Figura 1) antes e após serem levadas a estufa até obtenção de massa constante a $105 \pm 3^\circ \text{C}$. Pela diferença da massa úmida pela seca, foi determinado o teor de umidade do material.

$$\text{TU} = \frac{(A - B)}{A} \times 100$$

Sendo:

A = massa úmida (g);

B = massa seca a 105°C (g).

Densidade a Granel

A densidade a granel dos resíduos foi determinada por meio NBR 6922 da ABNT (1981). Para tal, as amostras dos materiais foram pesadas em um recipiente com dimensões conhecidas, obtendo a densidade pela relação entre a massa e volume.

Preparo das Amostras

Após a determinação do teor de umidade e densidade a granel, os materiais coletados foram separados em 3 amostras, as quais com o auxílio um moinho de facas, do tipo Willey foram reduzidas a partículas pequenas. Após isto, as amostras foram armazenadas para posteriormente serem realizadas as análises.

Análises realizadas

Foram realizadas as seguintes análises: Teor de Umidade; Densidade; Análise Química Imediata: Material Volátil, Carbono Fixo e Cinzas; Poder Calorífico Superior, Inferior e Útil; Teor de Extrativos; Teores de Lignina e Análise Estatística.

Análise da Química Imediata

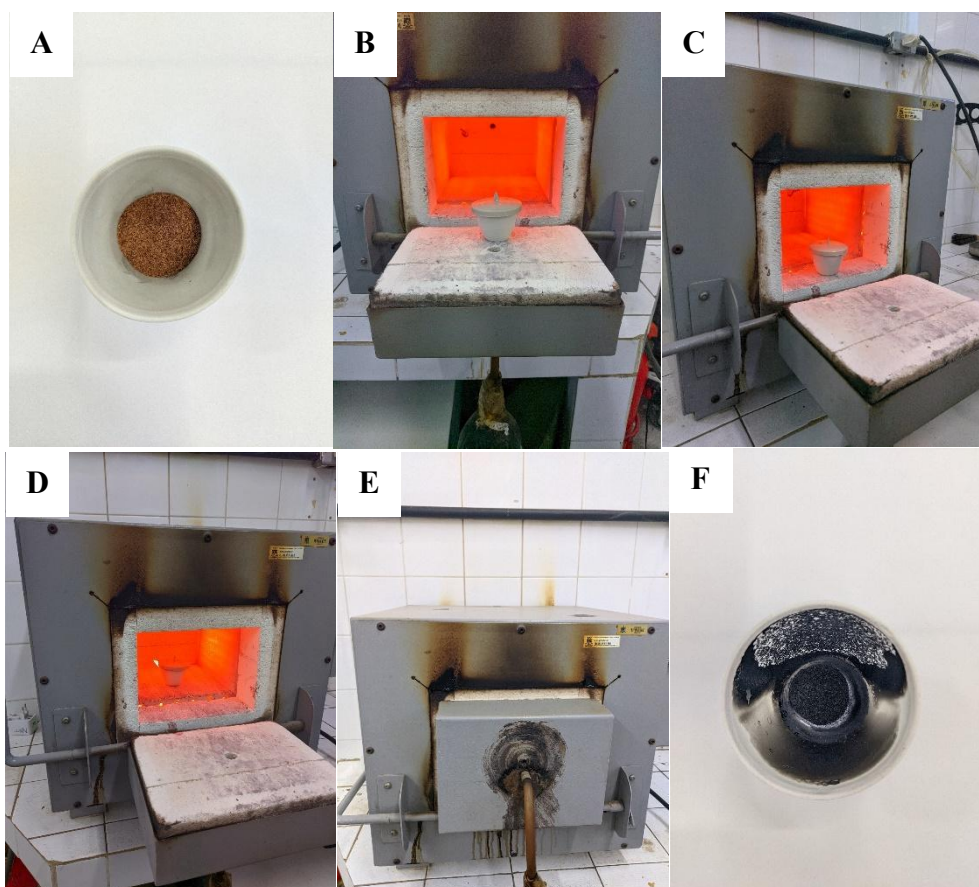
A determinação do teor de materiais voláteis, teor de cinzas e carbono fixo do carvão vegetal e da madeira, foram baseadas na norma da American Society for Testing and Materials (ASTM) D1762 - 84 (1995), adaptada.

Teor de Materiais Voláteis

Para a determinação do teor de materiais voláteis do resíduo, as amostras anteriormente trituradas, foram classificadas através de peneiras de 60 Mesh e 100 Mesh, utilizando o material que se encontra entre as duas granulometrias, ou seja, sobre a peneira de 100 Mesh. Em seguida foi pesado, aproximadamente, 1g do resíduo, isento de umidade. A amostra foi depositada em um cadinho de louça previamente seco e tarado (Figura 2-A). O cadinho foi tampado e colocado na borda externa do forno elétrico tipo mufla, previamente aquecido a 950°C ($\pm 10^\circ\text{C}$), por 2 minutos (Figura 2-B). Passado esses 2 minutos o cadinho foi levado colocado na borda interna interior da mufla, onde permaneceu por mais 3 minutos (Figura 2-C). Após esse tempo ele foi colocado no interior da mufla (Figura 2-D) com a tampa fechado (Figura 2-E), onde permaneceu por 6 minutos. Após esfriar, o cadinho foi pesado para obter o teor de materiais voláteis

(Figura 2-F). Foram realizadas três repetições para cada amostra dos resíduos.

Figura 2. Procedimento para a determinação do teor de materiais voláteis.



Fonte: Autor, 2023.

O teor de voláteis é determinado pela seguinte equação:

$$TMV = \frac{(m2 - m3)}{m} \times 100$$

Sendo:

TMV = teor de materiais voláteis (%);

m2 = massa inicial do cadinho + amostra (g);

m3 = massa final do cadinho + amostra (g);

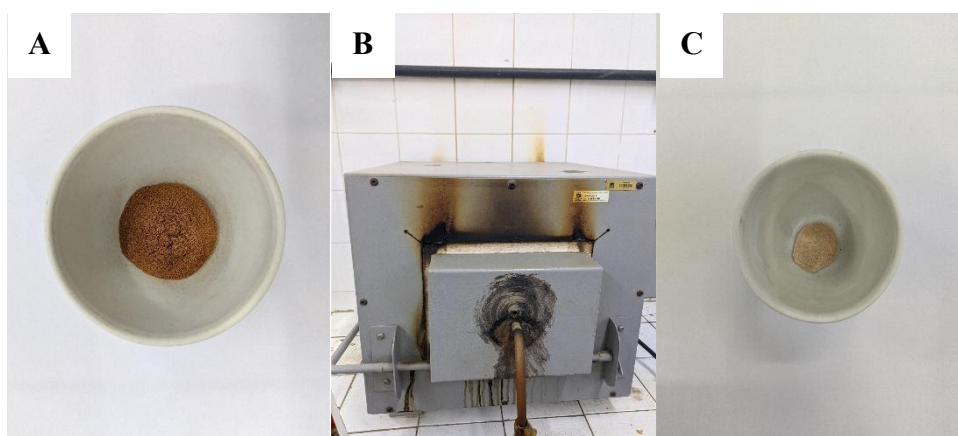
m = massa da amostra (g).

Teor de Cinzas

Para a determinação do teor de cinzas do resíduo as amostras foram trituradas com o auxílio de um moinho e classificadas através de uma peneira de 100 Mesh, utilizando o material que passou pela peneira. Em seguida foi pesado, aproximadamente, 1g do

resíduo isento de umidade. A amostra foi depositada em cadinho de louça previamente seco e tarado (Figura 3-A), e levado a um forno tipo mufla (Figura 3-B) previamente aquecido a 750°C ($\pm 10^{\circ}\text{C}$). O cadinho permaneceu na mufla até que o resíduo queimasse completamente, aproximadamente 6 horas. Após a queima, o cadinho foi retirado e pesado para obter, assim, o teor de cinzas (Figura 3-C). Foram realizadas 3 repetições para cada resíduo.

Figura 3. Procedimento para a determinação do teor de cinzas.



Fonte: Autor, 2023.

As cinzas obtidas foram pesadas e o teor das mesmas foi determinado pela equação:

$$\text{TCZ} = \frac{(m1 - m0)}{m} \times 100$$

Sendo:

TCZ = Teor de Cinzas (%);

m1 = massa do cadinho + resíduo (g);

m0 = massa do cadinho (g);

m = massa da amostra (g).

Teor de Carbono Fixo

Com a obtenção dos valores de materiais voláteis e cinzas, o teor de carbono foi estimado pela seguinte equação:

$$\text{TCF} = 100 - (\text{TCZ} + \text{TMV})$$

Sendo:

TCF = teor de carbono fixo (%);

TCZ = teor de cinzas (%);

TMV = teor de materiais voláteis (%).

Poder calorífico superior, inferior e útil

O Poder Calorífico Superior (PCS), Inferior (PCI) e Útil (PCU) foi estimado por meio dos valores obtidos para o Teor de Materiais Voláteis, Teor de Cinzas e Carbono Fixo e obtidos por meio de modelagem da análise imediata e poder calorífico de diversas biomassas (Ferreira *et al.*, 2014), conforme equações propostas por Parikh, Channiwala e Ghosal (2005):

$$\text{PCS (kcal/kg)} = 84,5104 \times (\% \text{ TCF}) + 37,2601 \times (\% \text{ TMV}) - 1,8642 \times (\% \text{ TCZ})$$

$$\text{PCI (kcal/kg)} = \text{PCS} - (600 \times 0,09 \times \% \text{ H})$$

$$\text{PCU (kcal/kg)} = (\text{PCI} \times (1 - (0,01 \times \% \text{ TU}))) - (600 \times 0,01 \times \% \text{ TU})$$

Sendo:

PCS = Poder calorífico superior (kcal/kg);

PCI = Poder calorífico inferior (kcal/kg);

PCU = Poder calorífico útil (kcal/kg);

TCF = Teor de carbono fixo (%);

TCZ = Teor de cinzas (%);

TMV = Teor de materiais voláteis (%);

H = Teor de hidrogênio considerado de 5,99%.

Análise da Química Estrutural

Para a análise da química estrutural as amostras foram peneiradas e classificadas através de peneiras de 40 e 60 mesh, sendo utilizada a fração que passou pela peneira de 40 mesh e que ficou retida na peneira de 60 mesh. Com o material que ficou retido na peneira de 60 mesh foram determinados os teores de extrativos totais, lignina solúvel e insolúvel, e holocelulose da madeira.

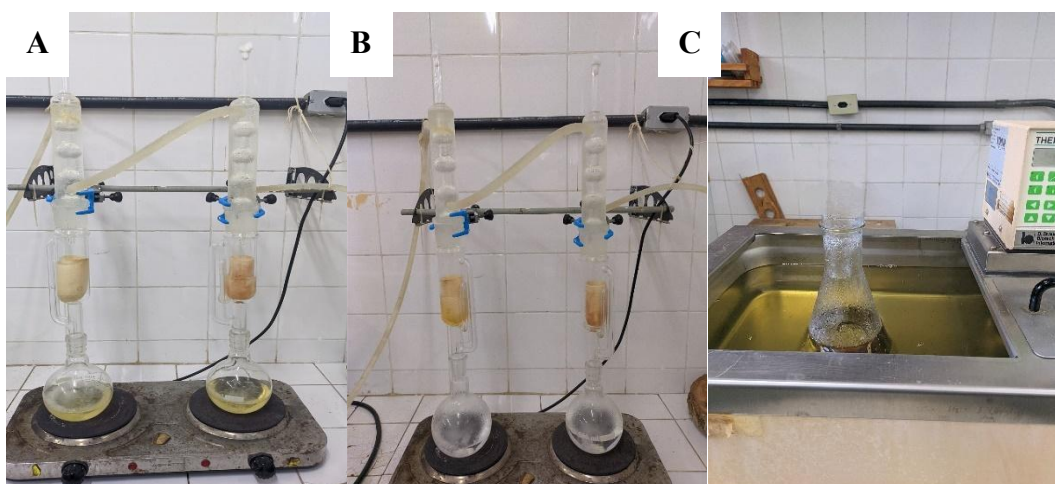
Extrativos Totais

A determinação de extrativos totais foi realizada com base na norma da Tappi T 204 cm-97, onde foram pesados 2 g das amostras secas que foram colocadas em cartucho

de celulose e levadas ao aparelho Soxhlet (Figura 4-A), por um período de 6 horas, contendo no balão de 500 mL, 250 mL de uma solução etanol:hexano (1:2). Em seguida, o solvente foi recuperado e o material foi levado à estufa para secagem do solvente residual. Após seco, o material foi retornado ao aparelho Soxhlet (Figura 4-B) em um cartucho de celulose por um período de 4 horas, tendo como solvente no balão de 500ml, 250 mL de etanol a 95%. Ao final do processo, o solvente foi recuperado e as amostras foram levadas a estufa para secagem do solvente residual.

Posteriormente, o material foi posto no "banho-maria" numa temperatura de 100 °C por 1 hora, sendo misturado a 500 mL de água destilada em um elermeyer de 1 L (Figura 4-C). Ao término do processo, as amostras foram filtradas, depositadas em cadinhos filtrantes (previamente secos e tarados) e colocados em estufa por um período de 24 horas. Depois o material foi resfriado em um dessecador e pesado.

Figura 4. Procedimento para determinação do teor de extrativos.



Fonte: Autor, 2023.

O teor de extrativos totais foi obtido conforme equação abaixo:

$$\text{TET (\%)} = \frac{\text{Pas} - (\text{Pac} - \text{Pc})}{\text{Pas}} * 100$$

Sendo:

TET = Teor de extrativos totais;

Pas = Peso da amostra seca;

Pac = Peso da amostra + cadinho;

Pc = Peso do cadinho filtrante.

Lignina Insolúvel

O teor de lignina insolúvel foi determinado com base na norma da Tappi T 222 se-02, onde foram pesados 0,300 g de smaravalha seca (amostra livre de extrativos), e colocados em tubos de ensaios com cerca de 60 mm de comprimento e 15 mm de diâmetro e, adicionados 3 mL de ácido sulfúrico 72% (resfriado a 10-15 °C). Posteriormente, o material foi levado a banho maria 30±0,2 °C por 1 hora. Após este período, o material foi transferido dos tubos de ensaio para vidros de penicilina com capacidade de 100 mL, com 84 mL de água destilada. O material foi colocado em uma autoclave a uma temperatura de 118 °C.

Em seguida, a mistura ainda quente foi filtrada com o auxílio de um cadinho de filtro, sintetizado com placa porosa, forrado com óxido de alumínio e tarado. O resíduo filtrado foi deixado para secar na estufa calibrada a 103±2 °C por 24 horas. Após este processo o material foi pesado e o teor de lignina foi calculado conforme a seguinte fórmula:

$$\text{TLI (\%)} = \frac{(\text{Pac} - \text{Pc})}{0,3\text{g A.S}}$$

Sendo:

TLI: teor de lignina insolúvel;

Pac: Peso da amostra + cadinho;

Pc: Peso do cadinho filtrante;

A.S: Porcento absolutamente seco.

Lignina Solúvel

Foi utilizado o filtrado obtido pelo método anterior, onde foi preparado uma solução em branco, diluindo 3 mL de H₂SO₄ 72% com 1000 mL de água destilada. Com as cubetas de sílica e a solução de branco, o espectrofotômetro foi ajustado para 100% de transmitância e 0% de absorbância. Em seguida, foi realizada a leitura do filtrado, no comprimento de onda de 215 nm 280 nm. O teor de lignina solúvel foi obtido pela seguinte fórmula:

$$\text{TLS (\%)} = \frac{(4,3 * A_{215} - A_{280})}{(300 * P)} * 100$$

Sendo:

A_{215} = Absorbância do filtrado a 215 nm;

A_{280} = Absorbância do filtrado a 280 nm;

P= Peso a.s da madeira usada em gramas.

A holocelulose foi obtida pela diferença (Holocelulose (%) = 100% - Extrativos (%) - Lignina (%) – Cinzas (%)).

Análises Estatísticas

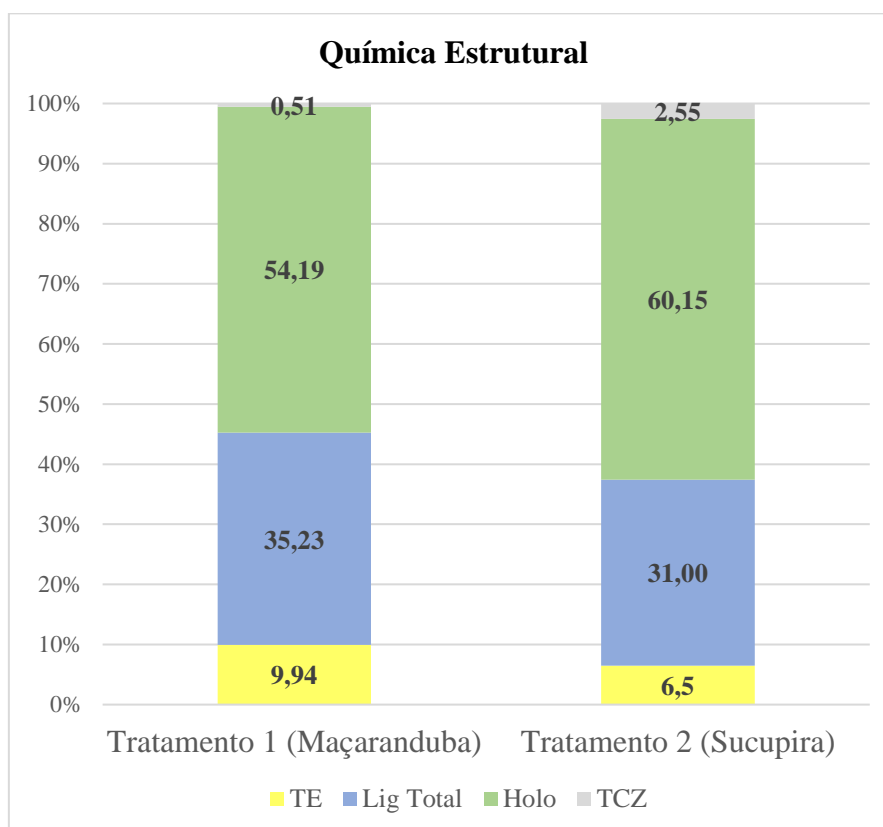
Os resultados obtidos para a biomassa estudada foram submetidos a estatística do tipo descritiva e a análise de variância (ANOVA), por meio do teste F , a 5% de significância. Com auxílio do software Excel, também foram obtidos os valores médios, o desvio padrão e o coeficiente de variação.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Química Estrutural

Os valores para o teor de extrativos, lignina total, bem como para holocelulose e teor de cinzas estão apresentados no Gráfico 1.

Gráfico 1. Valores médio das características da química estrutural da biomassa de maravalhas.



TE = Teor de Extrativos; LIG TOTAL = Lignina Total; HOLO = Holocelulose; TCZ = Teor de Cinzas.

Com base nos resultados obtidos através da análise de variância (ANOVA) e por meio do teste F a 5% de significância, foi possível notar que para a característica teor de extrativos não houve diferença significativa entre os tratamentos. Porém para as características lignina total, holocelulose e cinzas, essa diferença entre os tratamentos foi constatada. Esse fato evidencia a diferença mínima, porém existente, no que diz respeito as proporções de matérias presentes nas espécies estudadas

O valor do teor de extrativo para o Tratamento T1 foi de 9,94%. Esse valor está próximo ao encontrado por Nobre *et al.* (2014), que identificou um teor de extrativos de 7,36% ao estudar a biomassa de maçaranduba. Por sua vez, o resultado para o teor de

extrativo do Tratamento T2 foi de 6,5%. Costa *et al.* (2017), encontraram um valor semelhante, de 5,44%, ao analisar a biomassa de sucupira, sugerindo uma consistência nos teores de extrativos para essa biomassa.

Medeiros *et al.* (2022), ao realizar o processo de extração utilizando água quente para as mesmas biomassas analisadas, encontraram teores de extrativos ainda mais elevados, sendo de 13,50% para maçaranduba e 10,21% para sucupira. Isso indica que a metodologia de extração influencia diretamente nos resultados para a variável teor de extrativos.

A presença de extrativos em biomassa é relevante para a eficiência da combustão e a formação de resíduos durante o processo de queima. Os extrativos, que incluem resinas e outros compostos orgânicos, podem influenciar a liberação de calor durante a combustão, tornando-se um fator crítico na determinação do potencial energético da biomassa.

Os resultados obtidos para o teor de lignina total indicam que o Tratamento T1 apresentou um teor de lignina total de 35,23%, enquanto o Tratamento T2 registrou um valor ligeiramente inferior, com 31%. Esses valores são maiores aos que foram encontrados no estudo de Medeiros *et al.* (2022), que encontrou um teor de lignina de 29% para a maçaranduba e 23% para a sucupira. Entretanto, os valores são consistentes com o trabalho de Nobre *et al.* (2014) e Costa *et al.* (2017), que obtiveram valores para teor de lignina de 34,68% e 30,30%, para a biomassa de maçaranduba e sucupira, respectivamente.

Vale ressaltar que a lignina é um componente da madeira que desempenha um papel importante na determinação de suas propriedades físicas e químicas. O teor de lignina afeta a densidade, a resistência e a reatividade da madeira, sendo relevante na avaliação de sua adequação para diferentes aplicações.

Para o teor de holocelulose o Tratamento T1 obteve valor de 54,19%, enquanto o Tratamento T2 teve um valor mais alto, de 60,15%. Esses resultados são menores do que os encontrados no estudo de Medeiros *et al.* (2022), que encontrou valores de 66% para a maçaranduba e 72% para a sucupira. Porém, estão similares com o trabalho de Costa *et al.* (2017), que obteve um valor de 62,08% para a holocelulose da sucupira.

A holocelulose é uma fração da madeira que compreende principalmente celulose e hemicelulose, sendo uma parte valiosa para a produção de produtos celulósicos, biocombustíveis e outras aplicações industriais. Um teor mais elevado de holocelulose pode indicar maior potencial para a produção de celulose e derivados.

Os resultados da análise de extrativos, lignina total e holocelulose nas biomassas de maçaranduba e sucupira demonstram que a maravalha dessas espécies de madeira possuem características químicas distintas. Embora o material da maçaranduba tenha apresentado ligeira vantagem frente a sucupira, ambas as maravalhas apresentaram teores de lignina total elevados, sugerindo maior densidade e resistência da madeira, bem como potencial calorífico superior. O teor de extrativos, embora varie entre os tratamentos, está dentro da faixa esperada para biomassa, mostrando-se apto para produção de energia.

5.2. Química Imediata

Os valores da densidade a granel, teor de umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo dos resíduos estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação das características da biomassa de maravalha.

Tratamento	DG (g/cm ³)	TU (%)	TMV (%)	TCZ (%)	TCF (%)
T1 (Maçaranduba)	0,165 (0,00) (0,01)*	14,67 (0,23) (0,02)	82,13 (0,56) (0,001)	0,51 (0,22) (0,44)	17,36 (0,35) (0,02)
T2 (Sucupira)	0,161 (0,00) (0,01)	10,91 (0,27) (0,02)	79,64 (1,12) (0,01)	2,55 (0,36) (0,14)	17,81 (1,48) (0,08)

DB = densidade básica; TMV = teor de materiais voláteis; TCZ = teor de cinzas; TCF = teor de carbono fixo. *Valores entre parêntesis correspondem ao desvio padrão e coeficiente de variação (%), respectivamente.

Ao realizar a análise de variância (ANOVA) e o teste *F* das características da química imediata dos materiais coletados, foi observado diferença significativa para as variáveis densidade a granel, teor de materiais voláteis e teor de cinzas, fazendo com que o Tratamento T1 tenha ligeira vantagem sobre o Tratamento T2.

A densidade a granel refere-se à massa por unidade de volume, sendo assim, durante as análises foi observado que o Tratamento T1 teve um valor de 0,165 g/cm³, enquanto o Tratamento T2 obteve 0,161 g/cm³. Esses valores encontrados são maiores que os observados por Moulin *et al.* (2011) nos seus estudos, onde na análise de maravalhas o mesmo encontrou valores de 0,094 g/cm³. A diferença entre as densidades a granel pode estar associada a variações nas características da maravalha, como o

tamanho das partículas e a compactação durante o processo de armazenamento. É importante ressaltar que a densidade é uma propriedade que está diretamente ligada ao poder calorífico, onde quanto maior o valor da densidade, maior é o poder calorífico.

No que diz respeito ao teor de umidade, os resultados revelaram que a serragem da maravalha do Tratamento T1 apresentou um valor para essa característica ligeiramente maior que o Tratamento T2. Essas variações nos teores de umidade podem ser atribuídas a diferentes condições de armazenamento e manuseio das maravalhas nas serrarias. Segundo Neves (2012), é preferível que a madeira apresente baixos teores de umidade, para que o seu poder calorífico seja elevado. Vale *et al.* (2000), dizem que a umidade da madeira é uma característica importante que influencia negativamente na produção de calor por unidade de massa do material. Para que a madeira esteja em boas condições para produção de energia, deve estar com umidade abaixo de 25%. Sendo assim, os valores encontrados durante o presente trabalho satisfazem essa condição, condicionando o material como apto para produção energética.

Os materiais voláteis representam os componentes da maravalha que podem ser liberados durante o processo de queima. A diferença nos teores de voláteis pode afetar o comportamento da combustão, influenciando a liberação de calor e a formação de gases poluentes. Os resultados indicaram que o teor de voláteis na maravalha do Tratamento T1 foi de 82,13%. Esse valor é semelhante ao encontrado no trabalho feito por Lira, Silva e Andersen (2014), onde nos seus estudos foi encontrado um valor de 84,46% para teores de voláteis da maravalha de maçaranduba. Enquanto isso o teor de materiais voláteis no Tratamento T2 foi de 79,64%. Os resultados encontrados estão dentro do esperado, onde para biomassa a faixa aceitável está entre 75% e 85% (Brito; Barrichelo, 1978; Chaves *et al.*, 2013). O valor encontrado nas análises do presente trabalho também está próximo aos valores encontrados por Machado *et al.* (2014), e de acordo com a literatura, onde Nogueira e Lora (2003) indicam que são interessantes valores de materiais voláteis cima de 80%.

A análise dos resíduos de maravalha também revelou diferenças nos teores de cinzas entre os tratamentos. O Tratamento T1 apresentou um teor de cinzas de 0,51%, enquanto o Tratamento T2 registrou um teor de cinzas de 2,55%. As cinzas representam os resíduos minerais após a combustão. As cinzas é o material residual proveniente do processo de combustão, sendo formadas por substâncias inorgânicas, dessa forma é preferível a utilização de produtos que apresentem baixos níveis de cinzas, o que foi observado nesse trabalho, visto que a maravalha proveniente da maçaranduba apresentou

0,51% de teor de cinzas e a da sucupira obteve 2,55%. Basso (2017) diz que o teor ideal de cinzas é inferior a 1,5%, enquanto para o uso siderúrgico, Santos (2016), diz que é indicado teores de cinzas no carvão inferior a 1%, para evitar contaminação e redução do seu poder calorífico. Dessa forma, apenas o material proveniente da maçaranduba se encaixa para uso em setor siderúrgico.

O teor de carbono fixo encontrado foi de 17,36%, para o Tratamento T1 e 17,81% para o Tratamento T2, fazendo com que, estatisticamente através do teste *F*, os tratamentos sejam similares para essa característica. Esses resultados encontrados coincidem com os que foram encontrados por Juizo *et al.* (2017). Um alto teor de carbono fixo, influencia diretamente no processo de queima, onde quanto maior o teor de carbono fixo, maior será o tempo de queima. Sendo assim, a maravalha analisada apresenta bons valores, fazendo com que seu tempo de queima seja mais longo que o de outras biomassas de origem florestal.

Sendo assim, foi notado que os teores de cinzas nas maravalhas analisadas variaram, sendo mais baixos para o Tratamento T1 (maçaranduba) e um pouco mais elevados para o Tratamento T2 (sucupira). Ambos os valores estão dentro das faixas aceitáveis para uso energético. Os teores de materiais voláteis foram semelhantes para ambos os tratamentos, estando dentro da faixa considerada adequada para biomassa energética. Já o teor de carbono fixo também foi semelhante entre os tratamentos, indicando que ambos os materiais possuem potencial de queima eficiente.

5.3. Poder calorífico

Os valores estimados do poder calorífico superior, inferior e útil estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação do poder calorífico da biomassa de maravalhas.

Tratamento	PCS (kcal/kg)	PCI (kcal/kg)	PCU (kcal/kg)
T1	4526,21	4202,75	3502,47
(Maçaranduba)	(9,22) (0,00)*	(9,22) (0,00)	(11,84) (0,00)

T2	4467,55	4144,09	3626,45
(Sucupira)	(84,16) (0,02)	(84,16) (0,02)	(75,83) (0,02)

PCS = Poder calorífico superior; PCI = Poder calorífico inferior; PCU = Poder calorífico útil. *Valores entre parêntesis correspondem ao desvio padrão e coeficiente de variação (%), respectivamente.

O poder calorífico representa o potencial para combustão de cada matéria orgânica analisada, porém ele depende de diversos fatores, tais como, densidade, umidade, voláteis, cinzas e carbono fixo.

Os resultados revelaram que a serragem da maravalha do Tratamento 1 apresentou um PCS de 4526,21 kcal/kg, enquanto no Tratamento 2 esse valor foi ligeiramente menor, com 4467,55 kcal/kg. Na literatura é possível encontrar valores de poder calorífico superior para espécies florestais entre 4630 kcal/kg e 4547 kcal/kg (Oliveira *et al.* 2010; Soares, 2014). Esses valores são próximos aos que foram encontrados nas análises realizadas nesse trabalho, qualificando assim o resíduo madeireiro analisado como apto para utilização como geração de energia.

Os valores obtidos para o PCI foram de 4202,75 kcal/kg para o Tratamento 1 e 4144,09 kcal/kg para o Tratamento 2.

A maravalha do Tratamento 1 apresentou um PCU de 3502,47 kcal/kg, enquanto a do Tratamento 2 registrou um valor de 3626,45 kcal/kg. Dessa forma, o PCU do Tratamento 2 apresentou ligeira vantagem em relação ao Tratamento 1. O PCU leva em consideração as perdas de calor associadas à temperatura dos gases de exaustão e à umidade inicial do combustível. Representa, assim, o calor realmente aproveitável durante a queima.

É importante notar que, ao realizar o teste de *F* com um nível de significância de 5%, observamos que os valores obtidos para o Poder Calorífico Superior (PCS) e o Poder Calorífico Inferior (PCI) dos tratamentos são estatisticamente similares entre si. Essa similaridade estatística sugere que não há diferença significativa entre os tratamentos em relação à sua capacidade de fornecer energia.

Esse fator é de grande importância, pois implica que ambos os materiais estudados têm potencial para serem utilizados como fontes energéticas. A similaridade estatística nos valores de PCS e PCI indica que não há vantagem clara de um material sobre o outro em termos de poder calorífico, o que significa que ambos podem ser igualmente eficazes na produção de energia.

A diferença nos poderes caloríficos útil (PCU) entre os tratamentos pode ser atribuída a variações nas propriedades químicas e físicas da maravalha, tais como teor de umidade e composição química. O teor de umidade mais baixo do Tratamento 2 pode contribuir para um potencial calorífico mais efetivo após a combustão.

Nos resultados da avaliação do poder calorífico dos resíduos de maravalha foi observado que ambos os tratamentos demonstraram valores consideráveis de PCS, PCI e PCU, indicando um potencial adequado como fonte de energia. A similaridade estatística entre os tratamentos em relação a PCS e PCI sugere que ambos têm capacidade semelhante de fornecer energia térmica. O PCU do Tratamento T2 apresentou uma ligeira vantagem em relação ao Tratamento T1, o que pode ser atribuído a variações no processo de armazenagem das maravalhas.

5.4. Comparação entre Biomassas

Os valores no Quadro 1 a seguir são referentes as biomassas florestais e agrícolas em comparação com a biomassa de maravalhas utilizada no presente trabalho.

Quadro 1. Valores médios das características das biomassas florestais e agrícolas.

Biomassa	Autor	TMV (%)	TCZ (%)	TCF (%)	PCS (kcal/kg)
Resíduo de Soja	Vieira, A. C. (2012)	89,90	3,29	6,81	3933,79
Casca de Arroz	Vieira, A. C. (2012)	82,09	15,51	2,39	3503,87
Torta de Pinhão Manso	Vale <i>et al.</i> , (2011)	77,40	7,95	14,21	5122,00
Epicarpo de Pinhão Manso	Vale <i>et al.</i> , (2011)	72,60	14,43	13,00	3461,00
Casca de Eucalipto	ASSIS, C. F. C. (2014)	77,49	13,50	9,01	3787,00

Castanha	NASCIMENTO, V. F. (2012)	86,27	0,37	13,36	4824.69
Sapucaia	NASCIMENTO, V. F. (2012)	81,14	2,00	16,86	4662.27
Maçaranduba	Autor (2023)	82,13	0,51	17,36	4526,21
Sucupira	Autor (2023)	79,64	2,55	17,81	4467,55

TMV = teor de materiais voláteis; TCZ = teor de cinzas; TCF = teor de carbono fixo; PCS = poder calorífico superior.

A análise do Quadro 1 nos permite destacar ainda mais as maravalhas de maçaranduba e sucupira como promissoras fontes de biomassa para fins energéticos. Ambas apresentam características vantajosas que as colocam em uma posição competitiva em relação a outras biomassas.

Primeiramente, é notável que tanto a maçaranduba quanto a sucupira exibem valores de Teor de Matéria Volátil (TMV) que estão entre os mais altos do quadro, com 82,13% e 79,64%, respectivamente. Isso é especialmente relevante para a produção de energia, uma vez que a matéria volátil é a fração da biomassa que libera gases combustíveis durante a combustão, contribuindo significativamente para o potencial calorífico. Esses altos valores de TMV indicam que ambas as maravalhas podem gerar uma quantidade substancial de energia quando queimadas.

Além disso, os baixos teores de cinzas (TCZ) dessas maravalhas, com 0,51% para maçaranduba e 2,55% para sucupira, são altamente favoráveis. Baixos teores de cinzas significam que há menos resíduos sólidos deixados após a queima, o que não apenas simplifica o processo de conversão de biomassa em energia, mas também reduz a necessidade de tratamento de resíduos, tornando o processo mais sustentável e econômico.

No que diz respeito ao Teor de Carbono Fixo (TCF), ambas as maravalhas apresentam valores sólidos, com 17,36% para maçaranduba e 17,81% para sucupira. Esse parâmetro é de suma importância, uma vez que indica a quantidade de carbono disponível para a produção de calor durante a combustão. Valores elevados de TCF são altamente desejáveis para garantir um alto potencial calorífico.

Ao comparar esses resultados com outras biomassas do quadro, é notado que tanto a maçaranduba quanto a sucupira aparecem como excelentes opções para geração de energia. Sua combinação de alto teor de matéria volátil, baixo teor de cinzas e teor de carbono fixo sólido as coloca entre as melhores alternativas disponíveis, o que é particularmente importante em um cenário de busca por fontes de energia renovável e sustentável. Portanto, essas maravilhas podem desempenhar um papel significativo na busca por soluções energéticas mais limpas e eficientes.

6. CONCLUSÕES

Com base no estudo realizado, pode-se concluir que os resultados das análises químicas e calorimétricas das maravalhas de maçaranduba e sucupira indicam que ambas são adequadas para uso como fontes de energia. Suas características químicas, incluindo teores de cinzas, voláteis, carbono fixo e lignina, sugerem potencial para uma queima eficiente, seja na forma direta ou em forma de briquetes ou pellets. Além disso, a estimativa do poder calorífico confirma sua capacidade de produzir energia térmica significativa. Embora o Tratamento T1 apresente ligeira vantagem frente ao Tratamento T2, essas diferenças são mínimas e podem ser atribuídas a variações naturais nas propriedades das maravalhas.

7. REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3ª ed. Brasília 2009. Disponível em: <www.aneel.gov.br>. Acesso 01 ago. 2023.
- AREA, M. C. **Panorama de la industria de celulosa y papel em Iberoamérica**. Red Iberoamericana de Docencia e Investigación en Celulosa y Papel: Argentina, 2008.
- ASSIS, C. F. C. **Caracterização de biomassas para a sua injeção em altos-fornos**. 2014. 132 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6922: Carvão vegetal - Ensaios físicos, Determinação da massa específica, Densidade a granel**. São Paulo. P. 2. 1981.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112: Carvão Vegetal – Análise Imediata**. São Paulo. p. 2. 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação**. São Paulo. p. 71. 2004.
- ASTM INTERNATIONAL. **D 1762-84: Standard test method for chemical analysis of wood charcoal**. West Conshohocken, 1984.
- BASSO, S. 2017. **Análise do carvão vegetal para uso doméstico**. 42p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química), Faculdade de Engenharia Química. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa
- BORGES, A. C. P *et al.* ENERGIAS RENOVÁVEIS: UMA CONTEXTUALIZAÇÃO DA BIOMASSA COMO FONTE DE ENERGIA. **REDE - Revista Eletrônica do PRODEMA**, Fortaleza, v. 10, n. 2, mar. 2017. ISSN 1982-5528. Disponível em: <<http://www.revistarede.ufc.br/rede/article/view/239>>. Acesso em: 04 set. 2023.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Brasília. **Anuário estatístico de energia elétrica**, 2012. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br>. Acesso 01 ago. 2023.
- BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. **Características do eucalipto como combustível: análise química imediata da madeira e da casca**. IPEF, 1978.
- BRITO, J. O. *et al.* Florestas energéticas. In: ALBUQUERQUE, A. C. S.; SILVA, A. G. Agricultura tropical: quatro décadas de inovação tecnológicas, institucionais e políticas. Brasília: Embrapa Informações Tecnológicas, 2008. v. 1, pt 8, cap. 3, p. 735-751.
- CABREIRA, M. P. Classificação de Resíduos de Serraria e seu Potencial de Utilização. Rio Grande do Sul: São Gabriel. 2011.
- CAMPOS, M. **Crise energética no Brasil**. Mundo Educação, 2021. Disponível em: <<https://mundoeducacao.uol.com.br/geografia/crise-energetica-no-brasil.htm> >. Acesso em: 25 de agosto de 2023.

CARNEIRO, M. E. B. **Manual da Madeira: propriedades e qualidades**. Curitiba, 1 ed., 2018.

CASTELLANO, J. M. *et al.* Study on the effects of raw materials composition and pelletization conditions on the quality and properties of pellets obtained from different woody and non woody biomasses. **fuel**, London, v. 139, p. 629-636, 2015.

CHEN, L. J.; XING, L.; HANA, L. Renewable energy from agro-residues in China: solid biofuels and biomass briquetting technology. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Oxford, U.K., v. 13, n. 9, p. 2689-2695, Dec. 2009.

COSTA, L., *et al.*, (2017). Caracterização anatômica e descrição físico-química e mecânica da madeira de *Mimosa schomburgkii*. *FLORESTA*. 47. 383. 10.5380/rf.v47i4.54471.

FENGEL, D; WEGENER, G. (1984). **Wood, Chemistry, Ultrastructure, Reactions**. Waster & Grugter, New York, 613.

FERREIRA, I. T. *et al.* **Estimativa do potencial energético de resíduos celulósicos de fabricação de papel através de análise imediata**. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, v. 3, n. 4, 2014.

FORTES, A. G.; MUTENDA, F. M.; RAIMUNDO, B. **Energias Renováveis em Moçambique: disponibilidade, geração, uso e tendências futuras**. *Revista Brasileira Multidisciplinar, [S. l.]*, v. 23, n. 1, p. 6-27, 2020. DOI: 10.25061/2527-2675/ReBraM/2020.v23i1.681. Disponível em: <https://www.revistarebram.com/index.php/revistauniara/article/view/681>. Acesso em: 4 de Julho de 2023.

HABITZREITER, T. L. *et al.* **Poder calorífico e análise econômica do uso total ou parcial da biomassa de eucaliptos**. *Scientia Agraria Paranaensis, [S. l.]*, v. 18, n. 3, p. 282–288, 2020. DOI: 10.18188/sap.v18i3.21822. Disponível em: <https://e-revista.unioeste.br/index.php/scientiaagraria/article/view/21822>. Acesso em 29 Agosto de 2023.

HAYKIRI-ACMA, H.; YAMAN, S.; KUCUKBAYRAK, S. **Comparison of the thermal reactivities of isolated lignin and holocellulose during pyrolysis**. *Fuel Processing Technology*, v.91, p. 759–764, 2010.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2012. Disponível em: <www.iea.org>. Acesso em: 01 de agosto de 2023.

JUIZO, C. G. F.; LIMA, M. R.; SILVA D. A. **Qualidade da casca e da madeira de nove espécies de Eucalipto para produção de carvão vegetal**. *Agrária*, v.12, n.3, p.386-390, 2017. DOI:10.5039/agraria.v12i3a5461.

LIRA, J. O. B.; SILVA, K. C. G.; ANDERSEN, S. L. F. Estudo das características de combustão de resíduos sólidos da região nordeste utilizando análise termogravimétrica. Florianópolis. 2014. p. 4.

MACHADO, G.O.; VOGEL, F.; SILVA, M.M. **Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas, químicas e energéticas do carvão de**

cinamomo (Melia azedarach L.). *Ambiência*, v.10, n.1, p.83-96, 2014. [https://doi:10.5935/ambiencia.2014.01.07](https://doi.org/10.5935/ambiencia.2014.01.07).

MEDEIROS, D. T *et al.* Caracterização da madeira de espécies da Amazônia. **Madera bosques**, Xalapa , v. 27, n. 2, e2722209, 2021 . Disponível em <http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712021000200212&lng=es&nrm=iso>. acesso em 12 setembro de 2023. Epub 04-Abr-2022. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2722209>.

MORAIS, S. A. L.; NASCIMENTO, E. A.; MELO, D. C. Análise da madeira de Pinus oocarpa Parte 1 – Estudo dos constituintes macromoleculares e extrativos voláteis. **Revista Árvore**, v. 29, n. 3, p. 461-470, 2005.

MOULIN, J. C *et al.* (2011). **Avaliação energética da maravalha gerada em uma serraria de pequeno porte**. *Journal of Biotechnology and Biodiversity*, 2(2), 16-22. <https://doi.org/10.20873/jbb.uft.cemaf.v2n2.moulin>

NASCIMENTO, V. F. **Caracterização de biomassas amazônicas: ouriço de castanha-do-Brasil, ouriço de sapucaia e caroço do fruto do tucumã : visando sua utilização em processos de termoconversão**. 2012. 128 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, SP. Disponível em: <https://hdl.handle.net/20.500.12733/1618869>. Acesso em: 13 set. 2023.

NAÇÕES UNIDAS. (2015). **Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 7: Assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todos**. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/7>>. Acessado em 12 de setembro de 2023..

NEVES, T. A. **Qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de Eucalyptus cultivados no sul de Minas Gerais**. 94 f. Dissertação. Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.

NOBRE, J *et al.*, (2014). Caracterização elementar, química e energética de resíduos de manilkara huberi (maçaranduba) do estado do Pará elemental characterization, chemical and energetic of wastes from manilkara huberi (massaranduba) of the state of Para.

NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S. 2003. **Dendroenergia: fundamentos e aplicações**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência. 199p.

OLIVEIRA, A.C *et al.* **Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de Eucalyptus pellita F. Muell**. *Scientia Forestalis*, v. 38, n. 87, p. 431-439, 2010. <http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr87/cap10.pdf>. 12 Mai. 2021

PARIKH, J.; CHANNIWALA, S. A.; GHOSAL, G. K. **A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels**. *Fuel*, v. 84, n. 5, p. 487-494, 2005.

PAULA, L. E. R., TRUGILHO, P. F., REZENDE, R. N., *et al.*, “Produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulósicos”. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 61, pp. 103-112, 2011.

PENTO, G. A. **Geração de vapor na indústria, estudo da viabilidade da substituição de combustíveis fósseis para biomassa, combustível renovável**. 2015. Trabalho de

conclusão de Curso – Engenharia Mecânica. Centro Universitário do Sul de Minas, Varginha. Disponível em: <http://repositorio.unis.edu.br/handle/prefix/956>. Acesso em: 01 de agosto de 2023.

PEREIRA JÚNIOR, V. B. **Alternativas para a cogeração de energia de uma indústria de chapas de fibra de madeira**. 2001. 115f. Dissertação (Mestrado em Agronomia / Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

ROWELL, R. M. *et al.* **Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites**. Boca Raton: CRC Press, 2005. p. 121-138.

SANTIAGO, A. R.; ANDRADE, A. M. de. Carbonização de resíduos do processamento mecânico da madeira de eucalipto. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 15, n. 1, p. 01-07, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/198050981819>. Acesso em: 01 ago. 2023.

SANTOS, R. C. *et al.* **Influência das propriedades químicas e da relação siringil/guaiacil da madeira de eucalipto na produção de carvão vegetal**. Revista Ciência Florestal, Santa Maria, v. 26, n. 2, p. 657-669, 2016.

SHARMA, S *et al* (2014). Biomass Conversion Technologies for Renewable Energy and Fuels: A Review Note. **IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)**, Volume 11, Issue 2, Página(s). Acesso 01 ago. 2023. Disponível em: www.iosrjournals.org.

SHEN, R.; GU, S.; BRIDGWATER, A.V. The thermal performance of the polysaccharides extracted from hardwood: Cellulose and hemicelluloses. **Carbohydrate Polymers**, v.82, p. 39-45, 2010.

SCHÜTZ, F. C. A.; ANAMI, M. H.; TRAVESSINI, R. Desenvolvimento e ensaio de briquetes fabricados a partir de resíduos lignocelulósicos da agroindústria. **Inovação e Tecnologia**, v. 1, n. 1, p. 1-8, 2010.

SILVA, D. A.; MULLER, B. V.; KUIASKI, E. C.; ELOY, E.; BEHLING, A.; COLAÇO, C. M. **Propriedades da madeira de Eucalyptus benthamii para produção de energia**. Pesquisa Florestal Brasileira, v. 35, n. 84, p. 481-485, 2015.

SJÖSTRÖM, E. **Wood chemistry: fundamentals and applications**. 2nd ed. New York: Academic Press, 1993. 293 p.

SOARES, V. C. *et al.* **Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto**. Revista Árvore [online]. 2014, v. 38, n. 3. Acessado 30 Agosto 2023, pp. 543-549. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000300017>. Epub 15 Ago 2014. ISSN 1806-9088. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000300017>.

TAPPI. **T 204 cm-97: Solvent extractives of wood and pulp**. Atlanta, 1997

TAPPI. **UM 23: Bulk density of wood chips, Useful Method UM 23**. Atlanta, 2010.

Vale, A. T. do.; Brasil, M. A. M.; Carvalho, C. M. de; Veiga, R. A. de A. (2000), **Produção de energia do fuste de Eucalyptus grandis Hill exmaiden e Acacia**

mangium Willd em diferentes níveis de adubação. Revista Cerne, 6, 83-88.

Vale, A. T. do ., Mendes, R. M., Amorim, M. R. S., & Dantas, V. F. de S.. (2011). **Potencial energético da biomassa e carvão vegetal do epicarpo e da torta de pinhão manso (Jatropha curcas).** Revista Cerne, 17(2), 267–273. <https://doi.org/10.1590/S0104-77602011000200015>

VIEIRA, A. C. **Caracterização da Biomassa Proveniente de Resíduos Agrícolas.** Dissertação - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2012.