



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

Faculdade de Engenharia e Ciências (FEC) – Campus de Rosana

LEANDRO GALVANI BAFFI

**CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA DA BIOMASSA DE DILLENIA INDICA (MAÇÃ-
DE-ELEFANTE) PARA VIABILIZAÇÃO NA PRODUÇÃO DE ENERGIA**



Rosana - SP
2023

Leandro Galvani Baffi

**CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA DA BIOMASSA DE DILLENIA INDICA (MAÇÃ-
DE-ELEFANTE) PARA VIABILIZAÇÃO NA PRODUÇÃO DE ENERGIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenadoria de Curso de Engenharia de
Energia da Faculdade de Engenharia e Ciências
(FEC) – Campus Rosana, Universidade
Estadual Paulista, como parte dos requisitos
para obtenção do diploma de Graduação em
Engenharia de Energia.

Orientador(a): Prof. Dr. Renivaldo José dos
Santos

Coorientador(a): Dr. Carlos Toshiyuki
Hiranobe

Rosana - SP
2023

B143c Baffi, Leandro Galvani

Caracterização térmica da biomassa de *Dillenia indica* (Maçã-de-elefante) para viabilização na produção de energia / Leandro Galvani Baffi. -- Rosana, 2023

45 p. : il., tabs., fotos, mapas

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de Energia) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia e Ciências, Rosana

Orientador: Renivaldo José dos Santos

Coorientador: Carlos Toshiyuki Hiranobe

1. Biomassa - Biomassa vegetal. 2. Energia - Aproveitamento energético. 3. Resíduos - Resíduos orgânicos. I. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

Faculdade de Engenharia e Ciências (FEC) – Campus de Rosana

LEANDRO GALVANI BAFFI

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO EM ENGENHARIA DE ENERGIA”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

Prof. Dr. Leandro Ferreira Pinto
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Renivaldo José dos Santos
Orientador/UNESP-Rosana

Prof. Dr. Carlos Toshiyuki Hiranobe
Coorientador/UNESP-Rosana

Prof. Dr. Leonardo Lataro Paim
UNESP-Rosana

Novembro/2023

Dedico este trabalho de modo especial, à minha família,
Maurício Baffi Felippelli, Luciana Molina Galvani Baffi e Lucas
Galvani Baffi;

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, por sempre iluminar meu caminho e me proteger no decorrer de toda minha vida e vivência na faculdade e, por me dar forças para continuar e finalizar o curso de Engenharia de Energia na UNESP (Rosana). Agradeço minha família (Maurício Baffi Felippelli, Luciana Molina Galvani Baffi e Lucas Galvani Baffi) por sempre me ouvir e me aconselhar da melhor forma, me dando total o suporte para a aquisição do meu Diploma de Engenharia de Energia numa das melhores faculdades do país. Fico feliz em seguir o exemplo dos meus pais que também estudaram na UNESP (São José do Rio Preto). Não posso esquecer dos meus amigos Chris Calandrin, Felipe Cardoso, Gustavo Sandro, João Lucas, João Pedro P., João Victor, José Mejia, Kevin Barbosa, Matheus Micelli, Pablo André, Pedro Mark, Pietro Leme, Ryan Gomes e Vitor Ghiraldelo e, a todos os outros não citados, que sempre estiveram comigo em todos os momentos, altos e baixos, participando ativamente nas derrotas e nas vitórias, acompanhando meu crescimento como graduando e como pessoa. Muito obrigado a minha namorada Camila Liendra Rausis Hiranobe, por ter me apoiado em todos os momentos até a apresentação final do trabalho. Obrigado a todo corpo docente e funcionários por terem formado a pessoa e o profissional que sou hoje. Agradeço imensamente o apoio, a dedicação, o acolhimento, os conselhos e a vivência que tive com todos, consegui aprender muito e usufrui dos melhores momentos com vocês. Agradeço em especial, meu orientador Renivaldo José dos Santos e meu parceiro e supervisor Carlos Toshiyuki Hiranobe, que me acolheram de braços abertos, mesmo no final da minha graduação, me orientando e me acompanhando da melhor forma na execução e na apresentação do meu projeto. Obrigado por participarem do meu crescimento pessoal e profissional, por me mostrarem um mundo diferente dentro da faculdade. Todos foram mais que apenas profissionais, vocês foram amigos, colegas e família pra mim, foram pessoas com um nível de empatia altíssimo que sempre quiseram o meu melhor e o melhor de todos os demais alunos. **MUITO OBRIGADO.**

“O importante é não parar de questionar;
a curiosidade tem sua própria razão de existir.”

Albert Einstein

RESUMO

Biomassa, classificada como material orgânico não fóssil com energia armazenada na forma química em sua composição, é comumente utilizada na produção de bioenergia. Originada de florestas, plantações, safras, algas e proveniente de resíduos orgânicos de cidades e indústrias, a biomassa pode ser considerada uma ótima fonte alternativa para os combustíveis poluentes que são utilizados na produção de energia mundial. O presente trabalho apresenta uma análise de caracterização térmica da biomassa proveniente da *Dillenia indica*, mais conhecida como maçã-de-elefante ou árvore do dinheiro no Brasil, para avaliação de seu potencial energético na produção de calor, tendo seus valores comparados com outras biomassas convencionais geradoras de energia. Primeiro o fruto foi coletado no município de Rosana, no Estado de São Paulo e depois preparado para os testes em laboratório. Durante o preparo, foram realizados processos de micronização (redução de tamanho) e secagem da amostra, visando aproveitar ao máximo a queima da amostra nos processos futuros. Esses processos caracterizam a *Dillenia indica* na forma física e química em relação às suas propriedades térmicas, representadas pela degradação térmica, poder calorífico (energia liberada na queima), análises imediata e elementar e, a composição da matéria. Tais estudos foram realizados em laboratórios por meio de equipamentos e normas específicas. Os resultados desses procedimentos mostraram que a maçã-de-elefante apresentou cerca de 7,710% de umidade em base seca (b.s), com respectivos valores de poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico inferior (PCI) de 17,463 MJ/kg e 16,019 MJ/kg. Valores que posteriormente foram comparados com os de biomassas convencionais utilizadas na cogeração de energia e em estudos energéticos. O PCS da maçã-de-elefante se aproxima dos valores de biomassas como a do bagaço de cana-de-açúcar (17,810 MJ/kg), milho (18,554 MJ/kg) e sorgo (16,945 MJ/kg), principais fontes de geração de bioenergia para usinas e estudos de viabilidade energética, combatendo a crescente demanda por eletricidade e tornando as atividades industriais autossustentáveis. Conclui-se que a *Dillenia indica* possui um potencial energético elevado, contribuindo para a cogeração de energia, servindo como base também, para a confecção de futuros biocombustíveis densificados.

PALAVRAS-CHAVE: Biomassa; Resíduos; *Dillenia indica*; Maçã-de-elefante; Potencial energético;

ABSTRACT

Biomass, classified as non-fossil organic material that has energy stored in the chemical form in its composition, used by production of bioenergy. Biomass comes from forests, plantations, crops, algae and organic waste from cities and industries, and can be considered a great alternative source for polluting fuels that are used in global energy production. The present work portrays thermal characterization studies of biomass from *Dillenia indica*, better known as maçã-de-elefante or árvore do dinheiro in Brazil, to evaluate its energy potential in heat production, having its values compared with other conventional biomass power generators. First the fruit was collected in the municipality of Rosana, in the State of São Paulo and then prepared for studies. During preparation, micronization and drying processes were carried out on the sample, aiming to make the most of burning the sample in future processes. These processes characterize *Dillenia indica* in physical and chemical form in relation to its thermal properties, represented by thermal degradation, calorific value (energy released during burning), immediate and elementary analysis, and the composition of matter. Such studies carried out in laboratories using specific equipment and standards. The results showed that the elephant apple presented around 7.710% moisture on a dry basis (b.s), with respective higher calorific value (PCS) and lower calorific value (PCI) values of 17.463 MJ/kg and 16.018 MJ/ kg. Values that were later compared with those of conventional biomass used in energy cogeneration and in energy studies. The maçã-de-elefante PCS is close to biomass values such as sugarcane bagasse (17,810 MJ/kg), corn (18,554 MJ/kg) and sorghum (16,945 MJ/kg), the main sources of bioenergy generation for plants and energy forecast studies, combating the growing demand for electricity and making industrial activities self-sustainable. It's concluded that *Dillenia indica* has a high energy potential, contributing to energy cogeneration, also installed as a base for the manufacture of future densified biofuels.

KEYWORDS: Biomass; Residues; *Dillenia indica*; Maça-de-elefante; Energy potential;

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Classificação dos Resíduos Sólidos.	3
Figura 2 – Árvore maçã-de-elefante com seus frutos.....	5
Figura 3 – <i>Dillenia indica</i> (maçã-de-elefante).	6
Figura 4 – Mapa do município de Rosana no Estado de São Paulo.	8
Figura 5 – Estufa.	9
Figura 6 – Moinho de facas.	9
Figura 7 – Balança analisadora de umidade.	10
Figura 8 – A) Mufla. B) Mufla com cadinho.....	11
Figura 9 – Bomba calorimétrica.	12
Figura 10 – Maçã-de-elefante cortada ao meio.	14
Figura 11 – Redução com faca de cozinha.	14
Figura 12 – Amostra final guardada em saco plástico com vedação.....	15
Figura 13 – Cinzas da maçã-de-elefante.....	17
Figura 14 – Análise termogravimétrica.	21

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Percentual de umidade da amostra granulada (20 mesh).....	15
Tabela 2 – Percentual de umidade da amostra não granulada (in natura).	16
Tabela 3 – Quantidade de amostra por cadinho utilizado.....	16
Tabela 4 – Teor de materiais volatilizados (TMV).....	17
Tabela 5 – Teor de cinzas.....	18
Tabela 6 – Análise elementar.	19
Tabela 7 – Poder calorífico superior da maçã-de-elefante.	19
Tabela 8 – Valores de PCS das biomassas.	22

LISTA DE SÍMBOLOS

% <i>H</i>	Teor de Hidrogênio
b.s	Base seca
C	Carbono
cal	Caloria(s)
CH ₄	Metano
cm	Centímetros
CO ₂	Gás carbônico
g	Gramas(s)
H	Hidrogênio
h	Hora(s)
J	Joule(s)
kg	Quilograma(s)
min ⁻¹	Por minuto
MJ/kg	Mega Joule(s) por quilograma(s)
ml	Mililitros
N	Nitrogênio
N ₂ O	Óxido nitroso
O	Oxigênio
°C min ⁻¹	Grau(s) Celsius por minuto
°C	Graus Celsius
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
RS	Resíduos Sólidos
S	Enxofre
TC	Teor de Cinzas
TCF	Teor de Carbono Fixo
TG	Termogravimetria
TMV	Teor de Materiais Voláteis
TU	Teor de Umidade

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1. RESÍDUOS SÓLIDOS (RS)	3
2.2. BIOMASSA	4
2.3. MAÇÃ-DE-ELEFANTE (<i>Dillenia indica</i>)	5
2.4. PIRÓLISE.....	7
3. OBJETIVOS.....	7
3.1. OBJETIVO GERAL.....	7
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
4. MATERIAIS E MÉTODOS	8
4.1. COLETA DA MAÇÃ-DE-ELEFANTE	8
4.2. PREPARO DA AMOSTRA.....	8
4.3. ANÁLISE IMEDIATA	9
4.3.1. Análise do Teor de Umidade (TU).....	10
4.3.2. Análise do Teor de Materiais Voláteis (TMV).....	10
4.3.3. Análise do Teor de Cinzas (TC).....	11
4.3.4. Análise do Teor de Carbono Fixo (TCF)	11
4.4. ANÁLISE ELEMENTAR	12
4.5. ANÁLISE DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR (PCS)	12
4.6. ANÁLISE DO PODER CALORÍFICO INFERIOR (PCI).....	12
4.7. ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TG)	13
4.8. COMPARAÇÃO LITERATURA.....	13
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	13
5.1. PREPARO DA BIOMASSA	13
5.2. ANÁLISE IMEDIATA	15
5.2.1. Teor de Umidade.....	15
5.2.2. Teor de Materiais Voláteis	16
5.2.3. Teor de Cinzas	17
5.2.4. Teor de Carbono Fixo	18
5.3. ANÁLISE ELEMENTAR	18
5.4. PODER CALORÍFICO SUPERIOR (PCS).....	19
5.5. PODER CALORÍFICO INFERIOR (PCI).....	20
5.6. TERMOGRAVIMETRIA (TG)	20
5.7. COMPARAÇÃO ENERGÉTICA	22
6. CONCLUSÃO.....	23
7. ATRIBUIÇÕES FUTURAS	24

REFERÊNCIAS	25
-------------------	----

1. INTRODUÇÃO

O elevado crescimento da população, ascensão da economia e a melhora das condições de vida junto à industrialização e urbanização acelerada, desencadeou significativamente uma maior produção de resíduos, que até hoje são difíceis e complexos de se tratar e destinar em locais ambientalmente corretos. Na década que marcou o início do século XXI, referente aos anos de 2001 até meados de 2010, o Brasil descartava cerca de 60% dos resíduos gerados ao todo em locais ambientalmente inadequados, como lixões e áreas a céu aberto. Índice que desde o primeiro ano foi aumentando até a implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei Federal que determina uma série de diretrizes e objetivos de gerenciamento ambiental que devem ser cumpridas em todo o território brasileiro. Após sua implementação em 2010, o número de resíduos descartados de maneira imprópria representou somente 20% da produção geral, atualmente, margeando os 18% [1, 2].

Para se classificar os resíduos sólidos, são necessários conhecimentos associados a identificação dos processos ou atividades que lhes deram origem, sua constituição física e química, além de suas características próprias. Desse modo, a natureza complexa e a tecnologia utilizada na fabricação de materiais/objetos não favorecem o processo de identificação e classificação desses novos compostos. Outro fator responsável por dificultar tal análise é a amplitude das áreas de produção dos resíduos, uma vez que quanto maior o número de áreas de produção existentes, maior é a gama de classificação de um resíduo [3].

A negligência nas ações de gerenciamento de resíduos sólidos acarreta sérios problemas ambientais, associados a poluição do solo, do ar e da água, destruição da fauna e flora, danos à saúde humana além do esgotamento dos recursos naturais. Logo, todo resíduo em geral, deve ser processado de maneira adequada antes de sua destinação final. Algumas soluções viáveis incluem a reciclagem, práticas de educação sanitária e ambientais visando a redução da produção de lixo, logística reversa, coleta seletiva e compostagem. [4, 5].

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), os resíduos sólidos são classificados e encontrados no estado sólido e semissólido, derivados de atividades domésticas, hospitalares, industriais, comerciais, agrícolas, de varrição e de serviços [6]. São divididos em subgrupos, representados pelos resíduos sólidos urbanos, industriais e agrícolas. Dentro dessas divisões, estão presentes as matérias orgânicas que são descartadas sem o menor proveito. O reaproveitamento da biomassa é considerado uma solução viável para resolver os problemas citados anteriormente. A biomassa é uma fonte de energia originada de florestas (resíduos de madeiras), produções agrícolas (resíduos de origem animal e vegetal), resíduos municipais (móveis de madeira inservíveis e podas de árvores) e rejeitos industriais (resíduos

com celulose). Esse recurso reaproveita a parte orgânica dos resíduos sólidos produzidos, reduzindo a emissão de gases poluentes, atendendo a demanda energética tanto nacional quanto mundial, e é considerada uma excelente substituta para os combustíveis fósseis [7, 8, 9].

Segundo o Balanço Energético Nacional (BEN) – 2018, as termelétricas que utilizam biomassas como combustível, representaram cerca de 9,1% na matriz elétrica brasileira [10]. Este tipo de matriz energética tende a ascensão de sua representatividade por apresentar fontes alternativas de geração de energia nacional. Essas termelétricas podem suprir a demanda de energia hidrelétrica e apresentam menores riscos, quando comparados as usinas nucleares. A biomassa também possui uma extensa quantidade de substrato orgânico em sua composição, incluindo biomassa vegetal, subprodutos do etanol, esterco animal e resíduos domésticos, que podem ser utilizados em processos de conversão [11].

Com tudo, no que diz respeito ao reaproveitamento da matéria orgânica encontrada nos resíduos como fonte de energia térmica, a *Dillenia indica*, conhecida popularmente como maçã-de-elefante foi escolhida como objeto de estudo para o presente trabalho. Diversas partes de seu fruto são descartadas após a extração de substâncias químicas associadas a medicina tradicional, fitoterapia ou alimentação, corroborando para sua escolha na execução do trabalho [12]. O projeto é inovador, pois não há estudos relacionados à reutilização desta biomassa como fonte geradora de energia. Portanto, ele tem como objetivo, apresentar uma análise geral das propriedades físico-químicas da fruta, analisando seu potencial energético e sua viabilidade na produção de calor.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. RESÍDUOS SÓLIDOS (RS)

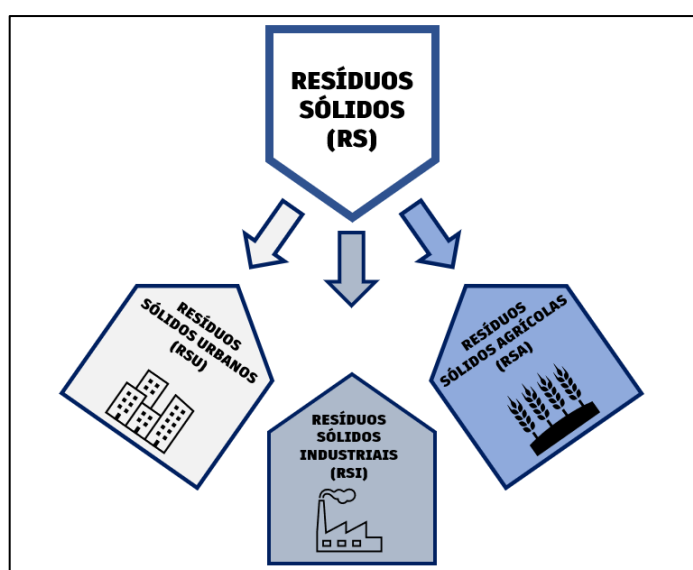
A produção de resíduos sólidos decorrente da urbanização e expansão da economia cresce a uma taxa que supera a própria urbanização. Tal crescimento está intrinsecamente ligado à poluição do ecossistema em geral, associando-se também à emissão de Gases de Efeito Estufa (GEEs) por meio de sua má gestão [13].

Esses resíduos apresentam riscos à saúde humana e meio ambiente, causam mortalidades, emitem gases poluentes na atmosfera e favorecem a incidência de doenças nas grandes áreas quando são gerenciados de forma inadequada por exemplo [14, 15].

A ação de gerenciamento adequado desses sólidos produzidos por organizações públicas e privadas é considerada o maior desafio para as autoridades fiscalizadoras que se encontram em pequenos e grandes municípios e em países em desenvolvimento. Tal processo é descentralizado e baseia-se na economia de cada país, sendo que são levados em consideração a alta taxa de produção de Resíduos Sólidos e ao ônus que recai sobre o orçamento da região. Levando em consideração os princípios de “reduzir, reutilizar e reciclar” (3R), a gestão adequada dos resíduos estabelece e mantém um conceito de sustentabilidade e zelo pelos recursos naturais e pela saúde humana e do meio ambiente [16, 17, 18].

Como dito anteriormente, a ABNT define os RS como aqueles que são encontrados no estado sólido ou semissólido, resultante de várias atividades e de diversas origens. Eles são divididos em subgrupos representados pelos resíduos sólidos urbanos, industriais e agrícolas, conforme ilustrado na Figura [1].

Figura 1 – Classificação dos Resíduos Sólidos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim, reutilizar os RS como matéria-prima para a formação de compostos, reduz a extração de recursos naturais, permitindo sua não escassez, e reduz a quantidade de materiais descartados, corroborando para uma melhor interação com o meio ambiente, respeitando seus domínios [19, 20].

2.2. BIOMASSA

O crescimento da demanda por eletricidade, as variações ambientais decorrentes da industrialização e a emissão de gases poluentes na atmosfera (associado fortemente ao gás carbônico – CO_2) proveniente da queima de combustíveis fósseis acarretou o progresso da inserção de alternativas mais sustentáveis para a produção de energia, dando voz para as características renováveis e limpas no setor [21].

Baseada principalmente na utilização desses tipos de combustíveis não renováveis para a produção de energias (elétrica, térmica, dentre outras), produtos químicos e combustíveis, a economia global se mostra na necessidade da adesão de meios que substituam os que a compõem [22]. Dados os processos produtivos citados anteriormente, sabe-se que eles são responsáveis por uma intensa emissão de GEEs, dentre eles o Metano (CH_4), o óxido nitroso (N_2O) e o CO_2 , criando um ciclo em cadeia que impacta de forma negativa o meio ambiente em geral. Visando alterar e melhorar essa realidade, estudos e aplicações de fontes sustentáveis alternativas estão sendo levadas em consideração e ganhando força no mundo [23, 24].

Dentre os desdobramentos das principais tecnologias associadas a energia renovável, a bioenergia (proveniente da biomassa) toma força quando comparada as demais (hídrica, geotérmica, marinha, eólica e solar). No que diz respeito a ela, a bioenergia é a quarta maior fonte primária de energia, perdendo espaço somente para o petróleo, carvão e o gás natural, os famosos combustíveis fósseis [25].

A biomassa, matéria utilizada para a produção da bioenergia, é um material orgânico não fóssil de ocorrência natural que possui energia química armazenada em sua composição. São geralmente originadas de florestas, plantações florestais e agrícolas, produção de safras, algas ou até de resíduos e descartes de indústrias e municípios (lixos). No caso dos resíduos da silvicultura, agricultura e de produção urbana, estão representados a madeira, restos de colheita, papel, estrume, palha e águas residuais [26, 27, 28].

Sendo uma fonte sustentável e possuindo alta diversidade, a biomassa se difere no fato de suas aplicações serem mais amplas e distintas. Enquanto muitas fontes de energia são utilizadas na produção exclusiva de eletricidade, o desenvolvimento da bioenergia e os estudos da biomassa visam também a produção de biocombustíveis que são usados tanto na geração

térmica de energia, quanto na geração elétrica, além de serem aplicadas nos setores de modais/transporte [29]. Seus derivados possuem um alto potencial de substituição para os combustíveis fósseis, corroborando para a redução da emissão de poluentes e do aquecimento global, atendendo a demanda energética social e permitindo uma economia circular ativa das regiões [30, 31].

2.3. MAÇÃ-DE-ELEFANTE (*Dillenia indica*)

Descoberta na Indonésia, a maçã-de-elefante (semelhante a uma maçã e apreciada por elefantes) é uma fruta peculiar comumente encontrada nas regiões da Ásia Tropical, presente em países como China, Butão, Sri Lanka, Malásia, Indonésia, Nepal, Filipinas, Vietnã, Tailândia e fortemente apreciada na Índia, ocupando todo seu território [32, 33, 34]. Encontrada também na América, nas porções tropicais do hemisfério Sul, a *Dillenia indica* veio para o Brasil nas expedições portuguesas de D. João IV, onde o clima favoreceu seu desenvolvimento [35, 36].

Denominada cientificamente como *Dillenia indica*, em homenagem ao botânico alemão Johann Jacob Dillenius (*indica*, representação em Latim de Índia), a maçã-de-elefante é a fruta da árvore *Dillenia indica* L., uma angiosperma perene da família das *Dilleniaceae*. Sua árvore possui potencial de crescimento de até 15 metros de altura, com folhas fasciculadas nas pontas dos ramos, lanceoladas, medindo cerca de 25 centímetros de comprimento. Possui também uma flor branca grande, atraente e vistosa com média de 15 centímetros de diâmetro e ramificada de ponta a ponta. Por fim, essa planta apresenta uma grande fruta dura associada à maçã, com aproximadamente 10 centímetros de diâmetro [37], ilustrada pela Figura [2].

Figura 2 – Árvore maçã-de-elefante com seus frutos.



Fonte: Mudás Gran Dourados.

Considerada uma das frutas mais apreciadas na culinária assamesa (Assam, Índia), seu sabor azedo é bastante utilizado como aromatizantes no preparo de alimentos como geleias, compotas, picles e curries [38, 39]. A Figura [3] ilustra o corte transversal do fruto da *Dillenia indica*.

Figura 3 – *Dillenia indica* (maçã-de-elefante).



Fonte: Maria mestre-cuca.

Além de possuir afinidade com a culinária, a maçã-de-elefante possui um histórico fitoterápico e medicinal bem agregado. Usada no Nordeste da Índia como medicina tradicional, suas folhas e frutos quando processados, produzem sucos, pós e mucilagens para tratamento de doenças, machucados e problemas como diarreia, distúrbios estomacais, febre, feridas, câncer, diabetes, tosse, reumatismo, problemas urinários e problemas na pele. Sua polpa (mesocarpo) e sépalas, podem ser aplicadas no couro cabeludo auxiliando na prevenção da queda de cabelo e na formação de caspas. [40, 41].

Quando convertidas em caldos, as folhas da *Dillenia indica* L. são usadas na síntese de nanopartículas “verdes”, ecológica e biologicamente corretas, servindo como agentes controladores de mosquitos (vetores) e patógenos microbianos como *Aedes aegypti* e *Culex quinquefasciatus* e, *Staphylococcus aureus* e *Serratia marcescens*, respectivamente [42]. Seu fruto contém propriedades antimicrobianas, antioxidantes, anti-inflamatórias, antidiabéticas e analgésicas, apresentando ácido ascórbico (Vitamina C), tocoferol (Vitamina E), caroteno, glicosídeos, alcaloides, esteroides, flavonoides e compostos fenólicos [43, 44, 45].

Os estudos já realizados, publicados e encontrados na literatura estão relacionados à utilização da fruta para produção de alimentos (devido sua acidez) e para confecção de medicamentos utilizados pelos nativos como medicina tradicional ou antidiabéticos mais

específicos [46, 47, 48]. Porém, os voltados à análise de seu potencial energético e suas características térmicas são dificilmente encontrados.

Desde sua implementação na culinária e na medicina, as folhas e partes do fruto da *Dillenia indica* possuem funções específicas e certas utilidades, entretanto, algumas fibras do fruto e parte de seu interior são descartadas sem reaproveitamento, possibilitando a inserção e adesão de estudos e pesquisas relacionadas a produção de energia e biocombustível.

2.4. PIROLÍSE

Considerada um processo irreversível, a pirólise é uma das principais técnicas de obtenção de energia, na qual a matéria orgânica é decomposta por meio da exposição ao calor, sofrendo alterações contínuas em suas composições físicas e químicas. Os produtos desse processo são obtidos em uma atmosfera inerte, em condições não oxidantes. Dentre os principais produtos oriundos da biomassa, estão presentes o carvão vegetal, o bio-óleo e o gás pirolítico, que possuem potencial de conversão em produtos químicos, biocombustíveis e biomateriais de alto valor agregado [49, 50, 51, 52].

O carvão (biochar) é produzido em condições de temperaturas mais baixas, com taxa de aquecimento reduzida em um tempo de residência relativamente alto. No caso do bio-óleo (produto de maior taxa de produção), considerada uma tecnologia mais avançada quando comparada a da geração do biochar, as condições estão relacionadas a temperaturas mais elevadas, na ordem de 400 a 700 °C, com tempo de residência menor, tendo por objetivo evitar que os produtos se decomponham em compostos não condensáveis. Já a produção de gás pirolítico é consequente da pirólise instantânea, uma tecnologia ainda mais avançada associada a condições de temperaturas bem elevadas e taxa de aquecimento muito maior, com o menor tempo de residência dentre os processos, cerca de meio segundo (0,5s) [53, 54].

Esses são os exemplos das aplicações desse processo de obtenção de energia utilizando a biomassa. Por possuir uma montagem de planta rápida de pirólise, uma elevada gama de biomassa que pode ser usada na degradação térmica e uma baixa emissão de gases poluentes, essa técnica se sobressai dentre as demais citadas [55].

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo, estudar as propriedades físico-químicas da *Dillenia indica* por meio de técnicas de caracterização térmica, avaliando e comparando seu potencial energético e sua viabilidade na produção de calor.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Uso dos resíduos da Maçã-de-elefante como objeto de estudo;
- Análises das propriedades físico-químicas da matéria (teor de umidade, análise imediata, elementar, análise termogravimétrica e poder calorífico) em função da degradação térmica;
- Decomposição da amostra por meio da temperatura e do tempo;
- Comparação com a literatura (valores de energia liberada na queima);
- Avaliação da viabilidade energética da biomassa;

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A maioria dos processos e análises que compõe o trabalho foram realizados nos domínios da Faculdade de Engenharia e Ciências (FEC) – UNESP, nos laboratórios do Campus. Todas as análises foram feitas em triplicata.

4.1. COLETA DA MAÇÃ-DE-ELEFANTE

O fruto foi coletado manualmente na região do município de Rosana/SP, representado pela Figura [4] onde são encontrados diversos pontos de coleta. O clima da região favorece o crescimento da planta nos domínios da cidade. Não houve gastos na colheita do material.

Figura 4 – Mapa do município de Rosana no Estado de São Paulo.



Fonte: Wikipedia.

4.2. PREPARO DA AMOSTRA

Cerca de 1kg da maçã-de-elefante sofrerá redução de tamanho por meio de cortes manuais com auxílio de uma faca. O produto dos cortes será despejado em bandejas para posteriormente serem secos em estufa, respeitando as condições de temperatura e tempo (104 °C e 24h de residência, respectivamente). Com o material seco e reduzido, é possível fazer a micronização, processo no qual será usado um moinho de facas (MARCONI) para obtenção da

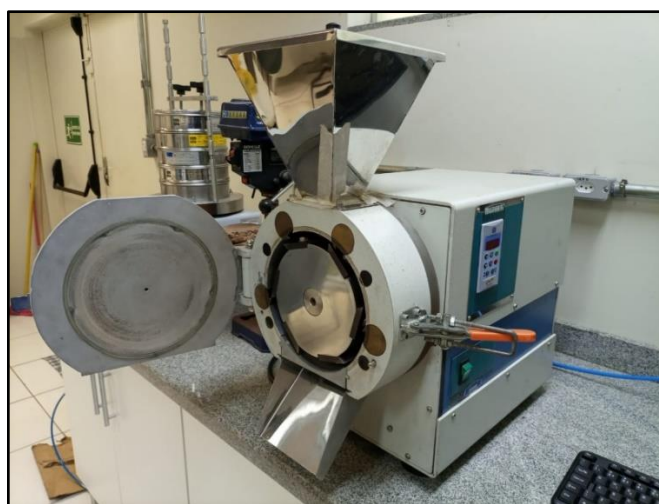
biomassa em pó até uma granulometria desejada (20 mesh). Após a produção da matéria em pó, ela será guardada/armazenada em sacos plásticos com vedação, respeitando as integridades da biomassa seca e impedindo o acúmulo de impurezas. As Figuras [5] e [6] abaixo representam os equipamentos que serão usados em laboratório para obtenção desejada da biomassa.

Figura 5 – Estufa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 6 – Moinho de facas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

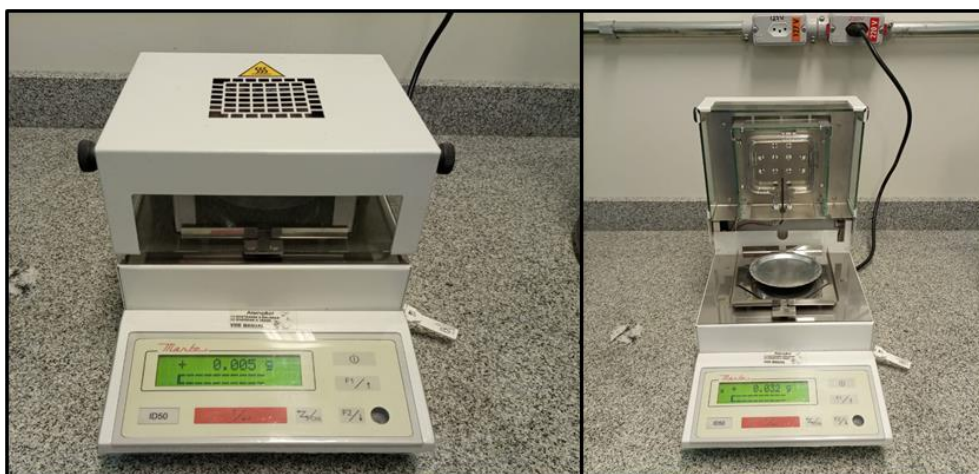
4.3. ANÁLISE IMEDIATA

A análise imediata será realizada de acordo com as normas ASTM – D3173, ASTM – D3175 e ASTM – D3174 e, de acordo com as técnicas apresentada no Livro Tecnologia da Gaseificação de Biomassa, associada a análise padrão de carvão e coque [56].

4.3.1. Análise do Teor de Umidade (TU)

Seguindo a norma da ASTM – D3173 e utilizando uma balança analisadora de umidade (Marte – ID50), representada na Figura [7], é possível determinar o teor de umidade da amostra granulada e não granulada, ou seja, em pó e em pedaços, respectivamente. A balança analisadora obtém o grau de umidade da matéria analisando as variações de massa do material durante o período de aquecimento em seu funcionamento. Os valores de pré e pós-aquecimento da amostra de estudo são registrados na memória interna do equipamento, que por sua vez, possui uma função de subtração, responsável por entregar o valor final da análise. Quando não houver mais variações de massa na balança, o aquecimento é cessado e a diferença entre as massas são calculadas e devolvidas em porcentagem.

Figura 7 – Balança analisadora de umidade.

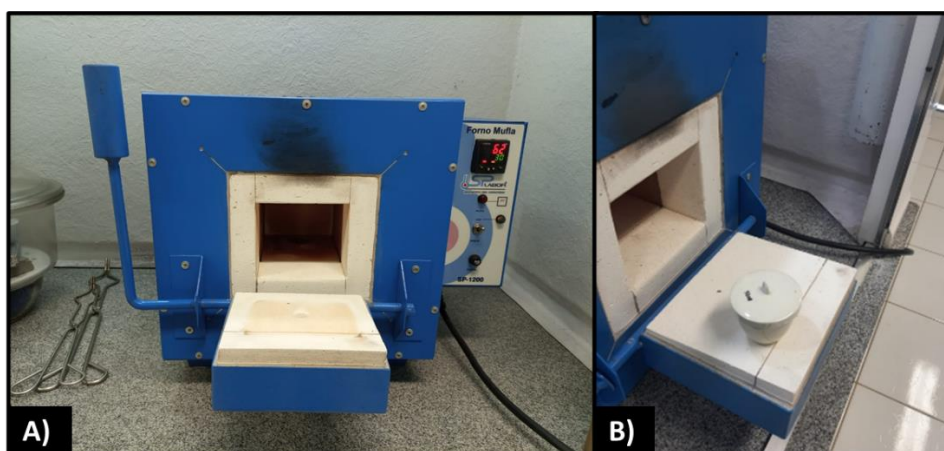


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.2. Análise do Teor de Materiais Voláteis (TMV)

Após seca e reduzida, é possível obter os valores de materiais voláteis que são liberados durante o aquecimento da biomassa, seguindo a norma ASTM – D3175. Cerca de 2g de amostra será colocada dentro de um cadinho com tampa e em seguida direcionada à mufla, representada na Figura [8], para aquecimento em 850 °C com tempo estimado de 6 minutos. Depois do aquecimento, o cadinho será resfriado e mantido dentro de um dessecador por cerca de 30 minutos, para manter a integridade do material, impedindo com que haja contato com umidade durante o processo de estudo. O TMV é obtido através da diferença de peso das amostras (comparação de massas), onde são analisadas as massas antes e depois do aquecimento. O resultado da diferença entre as análises representa o teor de materiais que foram dissipados durante o aquecimento (voláteis).

Figura 8 – A) Mufla. B) Mufla com cadinho.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.3. Análise do Teor de Cinzas (TC)

No final dos processos de degradação térmica, encontram-se os materiais particulados, materiais indesejados, considerados restos e sobras dos processos de queima. Esses materiais são obtidos de acordo com a norma ASTM – D3174, onde a amostra residirá na mufla até sua queima final completa, sobrando somente os materiais inorgânicos. O cadinho, após obtenção do TMV, será redirecionado a mufla novamente, sob influência de temperatura de 750 °C e com tempo de residência de 4 horas aproximadamente. Com o mesmo processo de comparação de massa, será calculado o valor de materiais particulados presentes na biomassa.

4.3.4. Análise do Teor de Carbono Fixo (TCF)

Dentre todas as análises realizadas na análise imediata, o teor de carbono fixo (TCF) é representado pela sobra de todos os componentes que a compõem. Para encontrar o valor do TCF, é preciso retirar de um total numérico de consideração 100%, a soma de todos os teores calculados anteriormente durante a execução da análise. A composição da biomassa rege as somas dos teores de umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo. Obtendo os 3 primeiros valores de teores (umidade, voláteis e cinzas) é possível por meio de uma simples equação, obter o resultado do último teor, o de carbono fixo. A equação abaixo mostra o cálculo que será utilizado para encontrar o TCF.

$$TCF = 100\% - (TU + TMV + TC)$$

4.4. ANÁLISE ELEMENTAR

A análise elementar é usada para determinar os elementos que compõem a matéria orgânica, quantificando em porcentagem elementos como Carbono (C), Oxigênio (O), Hidrogênio (H), Nitrogênio (N) e Enxofre (S). Seguindo as normas da ASTM – D3176 e utilizando um equipamento da marca LECO – CHN628 (software CHN628), será determinada a composição elementar da maçã-de-elefante.

4.5. ANÁLISE DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR (PCS)

Responsável por entregar numericamente o valor de energia interna de uma amostra orgânica, o PCS, leva em consideração a água no estado líquido presente na amostra durante o processo de queima. O processo revela o valor da energia liberada na queima da matéria incluindo o valor de energia necessário para alterar a água do estado líquido para o gasoso. Esse estudo será realizado com auxílio de uma bomba calorimétrica da LABCONTROL (IKA C-200), conforme mostra a Figura [9], no qual serão utilizadas 3 amostras da maçã-de-elefante secas e micronizadas.

Figura 9 – Bomba calorimétrica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.6. ANÁLISE DO PODER CALORÍFICO INFERIOR (PCI)

Possui majoritariamente as mesmas características do PCS. O poder calorífico inferior é responsável por entregar também o valor de energia liberada na queima da amostra orgânica (avaliando sua energia interna). Contudo, a água se encontra no estado gasoso dentro da amostra,

não condensada, característica relevante no processo, uma vez que é desconsiderado o valor de energia necessário para alteração do estado da água. Quando trabalhado numericamente, é possível encontrar o valor do PCI utilizando algumas análises feitas durante a caracterização térmica da amostra, como por exemplo, a análise elementar.

Seguindo a equação abaixo, consegue-se determinar o valor de PCI, utilizando os resultados do poder calorífico superior (PCS) e da análise elementar (em específico, a quantidade de hidrogênio na composição da matéria).

$$PCI = PCS - [600 * 9 * (\% \text{ Hidrogênio}) * 4,186] \text{ (kJ/kg)}$$

Onde o valor de 4,186 é dado pela conversão da unidade em calorias (cal) para Joules (J);

4.7. ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TG)

Neste ensaio, será usado um analisador termogravimétrico da marca NETZSCH (242C), operando a temperatura ambiente até 900 °C, com razão inicial de aquecimento de 10 °C min⁻¹. A termogravimetria é realizada em uma atmosfera controlada com gás nitrogênio (N₂) e fluxo de 20 ml min⁻¹. Essa técnica permite um estudo mais detalhado do comportamento da biomassa sob ação do calor, ou seja, é possível analisar os processos de degradação da matéria e seus principais eventos de decomposição. Dentre os eventos estão a quebra da hemicelulose, da celulose e da lignina.

4.8. COMPARAÇÃO LITERATURA

Por fim, será realizado uma comparação dos resultados encontrados para os valores de poder calorífico com os valores presentes na literatura de outras biomassas mais convencionais usadas na produção de energia ou em estudos térmicos. Essa análise tem o intuito de analisar e comparar a viabilidade na *Dillenia indica* na produção de energia. As biomassas mais comuns, usadas para produção de energia (carvão vegetal de eucalipto, bagaço da cana-de-açúcar, dentre outros), terão seus valores de energia interna comparados com o encontrado no presente estudo, visando identificar a qualidade da maçã-de-elefante na produção de calor.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. PREPARO DA BIOMASSA

O fruto foi coletado na região do município de Rosana/SP, em lugares de fácil acesso e de fácil colheita. Foi priorizado para a escolha dos frutos, aqueles mais verdes, não tão maduros,

apresentando uma maior rigidez. Após a seleção e o apanho da *Dillenia indica*, foi dado sequência ao processo de micronização, começando pelos cortes manuais com faca de cozinha. A Figura [10] mostra o fruto cortado ao meio, no início do processo de redução de tamanho com auxílio de uma faca, sendo finalizado na representação da Figura [11].

Figura 10 – Maçã-de-elefante cortada ao meio.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 11 – Redução com faca de cozinha.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Depois de micronizado, o material foi seco em estufa, com temperatura de aquecimento de cerca de 110 °C por aproximadamente 1 dia (24 horas). A amostra em seguida foi direcionada ao moinho de facas da marca MARCONI, sofrendo a redução final de tamanho (pó).

Por fim, para atingir a granulometria desejada, houve um peneiramento que garantiu os 20 mesh do produto, que posteriormente foi guardado em sacos plásticos de vedação para

controle da integridade da biomassa, não sendo influenciada pela umidade externa e nem pelas impurezas do ar conforme a Figura [12] abaixo.

Figura 12 – Amostra final guardada em saco plástico com vedação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2. ANÁLISE IMEDIATA

5.2.1. Teor de Umidade

Foi possível determinar o teor de umidade da biomassa granulada (pó) e não granulada (pedaços) com auxílio da balança analisadora de umidade, conforme evidenciado na Tabela 1 e na Tabela 2, respectivamente. Esse estudo avalia a influência da superfície de contato e do tamanho das partículas durante o processo de aquecimento.

Tabela 1 – Percentual de umidade da amostra granulada (20 mesh).

Amostra	Percentual	Média + D. Padrão (%)
1	7,530	7,710 ± 0,130
2	7,810	
3	7,800	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nessa primeira Tabela, a amostra se encontrava desidratada e micronizada, com peneiramento já efetuado, adquirindo a granulometria desejada. Portanto, o material usado no estudo já possuía um valor de umidade reduzido.

Tabela 2 – Percentual de umidade da amostra não granulada (in natura).

Amostra	Percentual	Média + D. Padrão (%)
1	71,660	72,870 ± 2,850
2	70,150	
3	76,800	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Já na segunda Tabela, a amostra utilizada sofreu redução de tamanho, resultando-se em pedaços, porém não foi desidratada, possuindo um valor de umidade elevado, que foi aferido pela balança. Essa propriedade, quando representada por um alto índice, influencia negativamente no processo de queima da matéria orgânica, reduzindo sua eficiência de combustão.

5.2.2. Teor de Materiais Voláteis

Três cadinhos com cerca de 2g de amostra foram tampados e analisados nesse estudo, visando a determinação dos materiais que se volatilizam durante seu aquecimento. Após a queima da amostra na mufla, foi tabelado primeiro a massa de cada cadinho para que em seguida, fosse possível determinar a quantidade de voláteis consumidos durante a combustão, conforme mostram as Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 – Quantidade de amostra por cadinho utilizado.

Amostra	Massa (g)	Média + D. Padrão (%)
1	2,125	2,054 ± 0,050
2	2,008	
3	2,028	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 3, encontra-se quantificado a massa de amostra seca e micronizada de *Dillenia indica* dentro de cada cadinho com tampa, dando início ao processo de queima em mufla para determinação do TMV. Depois da queima, a massa do cadinho é novamente analisada e por fim, comparada, determinando a quantidade de massa que sobrou no recipiente após a combustão. Toda a massa consumida durante a queima, associada à quantidade de materiais que se volatilizaram no processo, foi obtida pela diferença entre os valores mássicos analisados antes

e depois do aquecimento a 850°C. Os valores consumidos encontrados estão representados na Tabela 4, entregando em porcentagem o resultado volatilizado.

Tabela 4 – Teor de materiais volatilizados (TMV).

Amostra	Massa (g)	Média + D. Padrão (g)	Média c/ relação à amostra total (%)
1	1,588	1,536 ± 0,037	74,808 ± 0,120
2	1,500		
3	1,521		

Fonte: Elaborado pelo autor.

Percebe-se que a maior parte da composição da amostra se volatiliza quando exposta a grandes temperaturas, representando cerca de 74,8% da amostra que foi levada para análise. Tal característica implica na estabilidade das chamas e na facilidade de queima da biomassa. Esse estudo foi realizado com o cadinho exposto a temperaturas de cerca de 850 °C por cerca de 6 minutos na mufla, um tempo de residência relativamente curto, porém, com um valor de temperatura bastante elevado.

5.2.3. Teor de Cinzas

As cinzas, consideradas materiais indesejáveis e inorgânicos, são o produto final da queima completa da matéria orgânica (biomassa). Todo o restante da amostra, residindo no cadinho após o aquecimento final em mufla, determina o teor de cinzas. A Figura [13] representa a amostra ao final do aquecimento, sobrando apenas impurezas.

Figura 13 – Cinzas da maçã-de-elefante.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Foram tabeladas as quantidades de cinzas encontradas em triplicata das amostras de maçã-de-elefante, após a combustão final da amostra (cerca de 750 °C por 4 horas em mufla), processo subsequente daquele que determina o teor de materiais voláteis (TMV). A Tabela 5 abaixo mostra os valores encontrados no estudo.

Tabela 5 – Teor de cinzas.

Amostra	Cinzas (g)	Cinzas (%)	Média + D. Padrão (%)
1	0,055	2,603	2,506 ± 0,080
2	0,050	2,505	
3	0,049	2,411	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em sua composição, há a presença de impurezas e elementos químicos que por ventura, foram absorvidos durante o crescimento e desenvolvimento da planta. Os valores encontrados de cinzas na amostra são relativamente baixos, corroborando para um aproveitamento elevado da matéria durante sua queima.

5.2.4. Teor de Carbono Fixo

Propriedade que não é eliminada no aquecimento da amostra, o Teor de Carbono Fixo (TCF) é determinado pela diferença dos processos anteriormente calculados e analisados, incluindo o teor de umidade (TU), o teor de materiais voláteis (TMV) e o teor de cinzas (TC). Formulando uma equação, apresentada abaixo, foi possível determinar desse teor, representando em porcentagem a quantidade de carbono (C) encontrado no cadinho estudado.

$$TCF = 100\% - (TU + TMV + TC) \quad (1)$$

$$TCF = 100\% - (7,710 + 74,808 + 2,506) \quad (2)$$

$$TCF = 100\% - 85,025\% \quad (3)$$

$$TCF = 14,975\% \quad (4)$$

5.3. ANÁLISE ELEMENTAR

Com auxílio de um equipamento da marca LECO - CHN628, seguindo as normas da ASTM – D3176, foi possível determinar a porcentagem de cada elemento que constitui a

amostra de *Dillenia indica* conforme mostra a Tabela 6. Dentre eles estão o carbono (C), o oxigênio (O), o hidrogênio (H), o nitrogênio (N) e o enxofre (S).

Tabela 6 – Análise elementar.

Elementos	Estudo 1	Estudo 2	Estudo 3	Média + D. Padrão (%)
<i>C</i>	44,430	42,850	42,760	43,347±0,940
<i>O</i>	46,750	48,420	48,510	47,893±0,990
<i>N</i>	0,700	0,130	0,430	0,420±0,280
<i>H</i>	6,210	6,660	6,310	6,393±0,240
<i>S</i>	1,910	1,940	1,970	1,940±0,030

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores encontrados nesse estudo serão utilizados para obtenção de resultados de outras análises, como por exemplo, o poder calorífico inferior (PCI). Na utilização do parâmetro matemático responsável por determinar o valor de PCI, foi levado em consideração a quantidade do elemento Hidrogênio (H), disposto na amostra analisada pela caracterização elementar. Ou seja, tendo a associação desse teor ao (H) estrutural da amostra.

5.4. PODER CALORÍFICO SUPERIOR (PCS)

Estudo associado a amostra em base seca (b.s), foi utilizado uma bomba calorimétrica para determinar e quantificar a energia liberada durante a queima da biomassa, com teor de umidade reduzido. A Tabela 7 a seguir, mostra os valores de massa dentro de cada recipiente de análise e suas respectivas energias.

Tabela 7 – Poder calorífico superior da maçã-de-elefante.

Amostra	Massa (g)	PCS (MJ/kg)	Média + D. Padrão (MJ/kg)
1	0,606	17,385	17,463 ± 0,070
2	0,641	17,456	
3	0,664	17,549	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Esse valor de energia, referente a biomassa seca e micronizada da maçã-de-elefante, foi comparado com os valores de outras biomassas, consideradas convencionais na produção de energia ou na utilização em estudos térmicos. Os detalhes estão no tópico “COMPARAÇÃO ENERGÉTICA”.

5.5. PODER CALORÍFICO INFERIOR (PCI)

Desconsiderando a energia necessária para alterar o estado da água dentro da amostra, o PCI foi determinado utilizando o valor da porcentagem de hidrogênio (H) proveniente da análise elementar e o valor de PCS encontrado pela bomba calorimétrica. Considerada uma aproximação da realidade, o poder calorífico inferior, é um parâmetro matemático obtido a partir dos valores do poder calorífico superior estudado, com a extração da energia de vaporização da água.

Trabalhando numericamente com as informações adquiridas pelo estudo, foi possível obter o valor do PCI, conforme mostra a sequência de equações abaixo.

$$PCI = PCS - [600 * 9 * (\% \text{ Hidrogênio}) * 4,186] \quad (1)$$

$$PCI = 17,463 - (600 * 9 * 0,06393 * 4,186) * 10^3 \quad (2)$$

$$PCI = 17,463 - (1,445) \text{ MJ/kg} \quad (3)$$

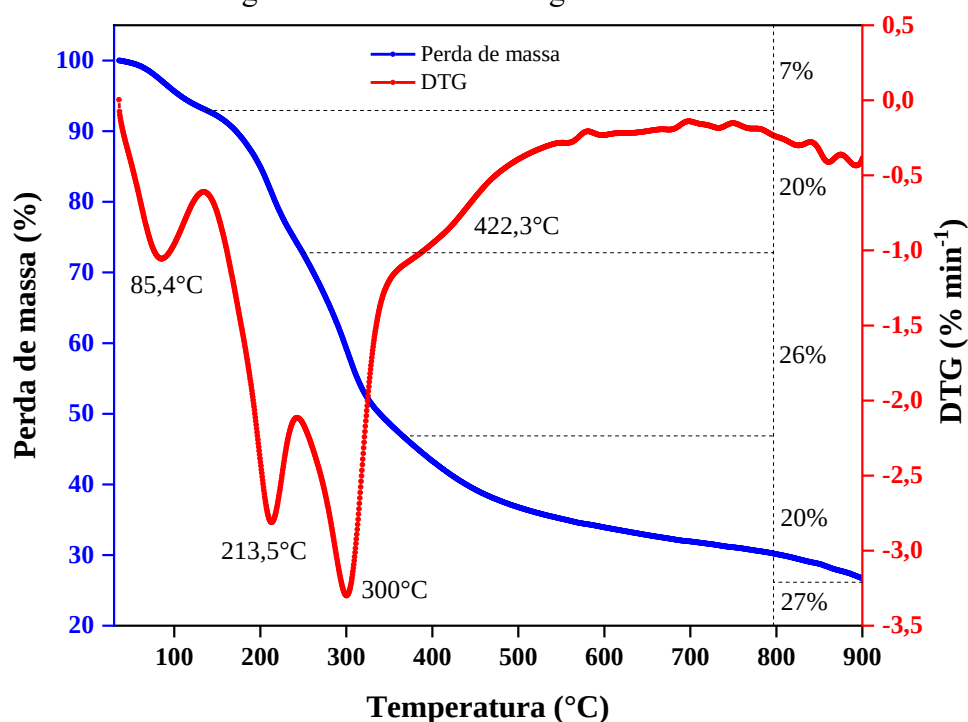
$$PCI = 16,018 \text{ MJ/kg} \quad (4)$$

Considerado pela literatura, cerca de 10% menor que o valor de PCS encontrado pelas análises, o PCI representou uma redução de cerca de 8,275% do PCS encontrado pela bomba calorimétrica, comprovando sua veracidade. Ressalta-se que essa análise é um parâmetro que se aproxima da realidade.

5.6. TERMOGRAVIMETRIA (TG)

Estudo feito para monitoramento da variação de massa da amostra em função de aumento de temperatura e tempo, sob influência de uma atmosfera controlada. O TG mostra a decomposição térmica da biomassa relacionando-o aos principais eventos de cada estágio, conforme ilustrado na Figura [14].

Figura 14 – Análise termogravimétrica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Dentre os principais eventos da degradação térmica tem-se a perda de umidade da amostra e as quebras de hemicelulose, celulose e lignina. A curva azul, representada na imagem, está associada a perda de massa da *Dillenia indica* durante todo o processo de aquecimento, já a curva vermelha se associa aos eventos citados.

Com ocorrência a 85,4 °C, o primeiro grande evento é determinado pela perda de água da biomassa, quantificando cerca de 7% da massa da amostra estudada. O segundo grande evento foi verificado na temperatura de 213,5 °C, determinando a quebra da hemicelulose, confirmando perda de 20% de sua massa original. A manifestação do terceiro evento surgiu na temperatura de 300 °C, na qual confirmou a perda de 26% da amostra associada a degradação da celulose. Por fim, tendo ocorrência a 422,3 °C, o quarto evento possibilitou a análise da degradação da lignina, fração mais difícil de ser quebrada da planta. A quebra da lignina representou uma perda de 20% da massa original da amostra aproximadamente. Cerca de 27% da amostra foi encontrada no final da análise termogravimétrica, compondo os materiais inorgânicos não degradáveis e impurezas da matéria, que são depositados em sua estrutura durante a formação e desenvolvimento da planta e do fruto. Algumas análises podem ser feitas para identificação dessas frações não degradáveis, como por exemplo a fluorescência de raio-X. Como não é o objetivo desse trabalho, essas análises não foram feitas.

5.7. COMPARAÇÃO ENERGÉTICA

O valor da energia liberada durante a queima da biomassa da maçã-de-elefante, incluindo a energia necessária para vaporização da água que condensa no processo, foi comparado com os demais valores de energia liberada pelas biomassas convencionais utilizadas para produção de energia e utilizadas em estudos térmicos. Dentre as biomassas escolhidas na literatura estão o carvão vegetal de eucalipto, o milho, o farelo da soja, o bagaço da cana-de-açúcar e o sorgo. Vale ressaltar que todos os resíduos produzidos no cultivo do milho (caule, folha, sabugo e palha) possuem um valor de PCS, que por mais que sejam próximos, são numericamente diferentes. No caso do milho, foi feita uma média dos valores de cada parte, usando-a para comparação energética representada na Tabela 8.

Tabela 8 – Valores de PCS das biomassas.

Biomassa	PCS (MJ/kg)
<i>Carvão de Eucalipto</i>	32,648
<i>Farelo de soja</i>	19,450
<i>Milho</i>	18,554
<i>Bagaço de cana</i>	17,810
<i>Maçã-de-elefante</i>	17,463
<i>Sorgo</i>	16,945

Fonte: Elaborado pelo autor.

O cultivo de milho gera vários resíduos como partes do caule, folhas, sabugos e palhas, que por sua vez, podem ser utilizados na cogeração de energia. A média feita com os poderes caloríficos superiores dessas partes representaram cerca de 18,554 MJ/kg [57]. A soja, sendo um dos principais alimentos responsáveis pelas mudanças na base da produção agrícola nacional desde 1960, possui maior incentivo estatal em seu cultivo. Ela também é utilizada em estudos térmicos visando a cogeração de energia, no qual seu farelo obtém um valor de energia liberada de aproximadamente 19,450 MJ/kg [58, 59]. Já o bagaço de cana-de-açúcar, resíduos finais das produções de açúcar e etanol das usinas sucroalcooleiras, são utilizados nas próprias usinas para produção de energia térmica em caldeiras, onde o excedente é amontoado próximo ao setor. Ele pode sofrer densificação energética e ser transformado em *pellets* (prensado), que por estudos, detém um valor de PCS de cerca de 17,810 MJ/kg [60].

Mediante o aumento da demanda energética nacional, estudos referentes à novas fontes alternativas de produção de energia entram em pauta. O sorgo, por possuir um ciclo de produção

mais rápido (cerca de 5 meses), um cultivo mecanizado e um potencial energético mais promissor, começou a ser utilizado na produção de energia, possuindo um valor de 16,945 MJ/kg aproximados [61]. No presente estudo, a *Dillenia indica* (maçã-de-elefante), um fruto utilizado majoritariamente na produção de medicamentos e alimentos, possui um potencial energético consideravelmente elevado, fácil cultivo em território nacional e alta taxa de geração de resíduos referentes ao seu manuseio. Ela detém um valor de PCS de aproximadamente 17,463 MJ/kg, se espelhando nos demais valores apresentados.

Todos os valores apresentados até então, possuem uma distância considerável de energia liberada na queima, quando comparada ao do carvão de eucalipto. Essa ocorrência se dá pela carbonização da matéria, processo de aquecimento em forno elétrico com temperatura e atmosfera controlada. A madeira de eucalipto, após seca, passa por esse processo de recuperação de energia intrínseca, entregando um valor energético de cerca de 32,648 MJ/kg ao final de todo o processo [62].

6. CONCLUSÃO

Conclui-se neste trabalho que a biomassa residual proveniente da *Dillenia indica*, mais conhecida como maçã-de-elefante possui um potencial energético consideravelmente elevado, características confirmadas pelas técnicas de caracterização térmica do material, incluindo análises e estudos de suas propriedades físico-químicas.

O teor de umidade (TU) da amostra, propriedade que influencia diretamente na eficiência de sua queima encontrado foi relativamente baixo, detendo um valor de $7,710 \pm 0,130\%$ após os procedimentos de preparo do material de estudo. Ressaltando que o material após micronização e desidratação, foi armazenado em sacos plástico com vedação para controle de sua integridade, impedindo o contato dela com umidade e impurezas externas.

Grande parte da matéria orgânica presente na biomassa foi queimada durante o processo de caracterização térmica, uma vez que o teor de materiais residuais quantificado foi de cerca de $2,506 \pm 0,080\%$. Esse valor está ligado às impurezas e compostos inorgânicos que são absorvidos durante todo o desenvolvimento da planta.

Quando analisada por uma bomba calorimétrica ou trabalhada numericamente com parâmetros matemáticos, a biomassa de *Dillenia indica* desidratada obteve um valor classificado como elevado para a energia liberada em sua queima. O poder calorífico superior (PCS) deteve um resultado de cerca de $17,463 \pm 0,070$ MJ/kg entregue pelo equipamento, incluindo a energia necessária para evaporação da água no processo. Já o poder calorífico inferior (PCI), avaliado pelo método matemático de aproximação com a realidade, detendo um

valor de 16,019 MJ/kg, representou de maneira direta a energia liberada pela queima da amostra, desconsiderando a energia de vaporização da água.

A comparação com a literatura serviu para comprovar o status de classificação do potencial energético da fruta associado ao Poder Calorífico Superior (PCS), que se assemelha bastante com os resultados encontrados em estudos energéticos de biomassas convencionais na produção de calor.

7. ATRIBUIÇÕES FUTURAS

Depois de comparar o PCS apresentado neste trabalho, com os valores de PCS de outras biomassas convencionais usadas na cogeração de energia e estudos térmicos, foi avaliado que a maçã-de-elefante possui sim um potencial energético elevado, sendo viável na produção de energia. Seus resíduos podem ser estudados visando fabricação de biocombustíveis para alimentação de caldeiras ou fornos, produção de novas substâncias orgânicas como grafeno, ou realização de novos estudos energéticos.

Vale ressaltar que seu uso como fonte de energia térmica é mais eficiente quando micronizada e desidratada, aumentando a superfície de contato da amostra com o calor e diminuindo a quantidade de umidade presente em sua composição, respectivamente.

Possuindo o caráter de inovação energética, futuros projetos e estudos referentes a sua utilização na geração de combustíveis alternativos podem ser realizados, citando novos processos de manipulação das amostras, como a densificação energética. No exemplo da densificação energética o material é prensado e transformado em pellets ou briquetes, biocombustíveis com potencial energético elevado, já que a energia é compactada em uma porção de volume ainda menor. Análises energéticas relacionadas à mistura de elementos para produção de um composto ainda melhor e mais eficiente são viáveis também. Com tudo, uma vez que os projetos existentes associados à *Dillenia indica* são focados na confecção de medicamentos e na fabricação de comida, a possibilidade de inserção de novas atribuições se eleva. Dentro dessa inserção, tem-se os exemplos citados anteriormente no texto, representando estudos energéticos de caracterização, manipulação de amostras e produção de novas substâncias, além da geração de energia.

REFERÊNCIAS

- [1] DE CAMPOS, Victor Arruda Ferraz et al. Uma revisão da gestão de resíduos no Brasil e em Portugal: Resíduos em energia como caminho para o desenvolvimento sustentável. *Energia renovável*, 2021.
- [2] DOS SANTOS, Ivan Felipe Silva et al. Incineration of municipal solid waste in Brazil: An analysis of the economically viable energy potential. *Renewable Energy*, v. 149, p. 1386-1394, 2020.
- [3] ZHOU, Hui et al. Classificação de componentes de resíduos sólidos urbanos para conversão térmica em pesquisa de resíduos em energia. *Combustível*, v. 145, p. 151-157, 2015.
- [4] MALAV, Lal Chand et al. Uma revisão sobre os resíduos sólidos urbanos como uma fonte renovável para um projeto de transformação de resíduos em energia na Índia: práticas atuais, desafios e oportunidades futuras. *Journal of Cleaner Production*, v. 277, p. 123227, 2020.
- [5] CHEN, David Meng-Chuen et al. O crescimento mundial de resíduos sólidos urbanos: tendências e impactos. *Cartas de Pesquisa Ambiental*, v. 15, n. 7, pág. 074021, 2020.
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: resíduos sólidos: classificação. ABNT, 2004.
- [7] NUNES, L. J. R.; CAUSER, T. P.; CIOLKOSZ, D. Biomass for energy: A review on supply chain management models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 120, p. 109658, 2020.
- [8] BAR-ON, Yinon M.; PHILLIPS, Rob; MILO, Ron. The biomass distribution on Earth. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 115, n. 25, p. 6506-6511, 2018.
- [9] GUO, Hao-nan et al. Application of machine learning methods for the prediction of organic solid waste treatment and recycling processes: A review. *Bioresource Technology*, v. 319, p. 124114, 2021.

[10] BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL: BRAZILIAN ENERGY BALANCE. [S. l.], 2019. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico-494/BEN%202019%20Completo%20WEB.pdf>>.

[11] BORGES, Cosme P. et al. A systems modeling approach to estimate biogas potential from biomass sources in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.138, p.110518, 2021.

[12] RAI, Harsha; SAJWAN, Shuchi Upadhyay Atul. An overview of *Dillenia indica* and their properties. 2020.

[13] CHEN, Ying-Chu. Effects of urbanization on municipal solid waste composition. *Waste management*, v.79, p.828-836, 2018.

[14] REN, Bo et al. Eco-friendly geopolymer prepared from solid wastes: A critical review. *Chemosphere*, v.267, p.128900, 2021.

[15] KRYSTOSIK, Amy et al. Solid wastes provide breeding sites, burrows, and food for biological disease vectors, and urban zoonotic reservoirs: a call to action for solutions-based research. *Frontiers in public health*, v.7, p.405, 2020.

[16] NANDA, Sonil; BERRUTI, Franco. Municipal solid waste management and landfilling technologies: a review. *Environmental Chemistry Letters*, v.19, n.2, p.1433-1456, 2021.

[17] ABDEL-SHAFY, Hussein I.; MANSOUR, Mona SM. Solid waste issue: Sources, composition, disposal, recycling, and valorization. *Egyptian journal of petroleum*, v.27, n.4, p.1275-1290, 2018.

[18] DAS, Subhasish et al. Solid waste management: Scope and the challenge of sustainability. *Journal of cleaner production*, v.228, p.658-678, 2019.

[19] RAMOS, Ana; ROUBOA, Abel. Renewable energy from solid waste: Life cycle analysis and social welfare. *Environmental impact assessment review*, v.85, p.106469, 2020.

-
- [20] OLIVEIRA, Karina Aparecida de. Aproveitamento de resíduos sólidos industriais para produção de compósitos termoacústicos.2018.
- [21] SIWAL, Samarjeet Singh et al. Recovery processes of sustainable energy using different biomass and wastes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,v.150,p.111483,2021.
- [22] POPP, József et al. Bioeconomy: Biomass and biomass-based energy supply and demand. *New Biotechnology*,v.60,p.76-84,2021.
- [23] CHEN, Jiaxin et al. A review on recycling techniques for bioethanol production from lignocellulosic biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,v.149,p.111370,2021.
- [24] ANTAR, Mohammed et al. Biomass for a sustainable bioeconomy: An overview of world biomass production and utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,v.139,p.110691,2021.
- [25] CHEN, Wei-Hsin et al. Progress in biomass torrefaction: Principles, applications and challenges. *Progress in Energy and Combustion Science*,v.82, p.100887,2021.
- [26] BAR-ON, Yinon M.; PHILLIPS, Rob; MILO, Ron. The biomass distribution on Earth. *Proceedings of the National Academy of Sciences*,v.115,n.25,p.6506-6511,2018.
- [27] NUNES, L. J. R.; CAUSER, T. P.; CIOLKOSZ, D. Biomass for energy: A review on supply chain management models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,v.120,p.109658,2020.
- [28] ANTAR, Mohammed et al. Biomass for a sustainable bioeconomy: An overview of world biomass production and utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,v.139,p.110691,2021.
- [29] WOICIECHOWSKI, Adenise Lorenci et al. Lignocellulosic biomass: Acid and alkaline pretreatments and their effects on biomass recalcitrance—Conventional processing and recent advances. *Bioresource technology*,v.304,p.122848,2020.

-
- [30] SHERWOOD, James. The significance of biomass in a circular economy. *Bioresource technology*,v.300,p.122755,2020.
- [31] MLONKA-MĘDRALA, Agata et al. Pyrolysis of agricultural waste biomass towards production of gas fuel and high-quality char: Experimental and numerical investigations. *Fuel*,v.296,p.120611,2021.
- [32] YESHWANTE, S. B. et al. Anti-inflammatory activity of methanolic extracts of *Dillenia indica* L. leaves. *Journal of Young Pharmacists*,v.1,n.1,p.63,2009.
- [33] KUMAR, Deepak et al. Anti-leukemic activity of *Dillenia indica* L. fruit extract and quantification of betulinic acid by HPLC. *Phytomedicine*,v.17,n.6,p.431-435,2010.
- [34] DEEPA, N.; JENA, Bhabani Sankar. Antioxidant fraction from bark of *Dillenia indica*. *International Journal of Food Properties*,v.14,n.5,p.1152-1159,2011.
- [35] ZAPPI, Daniela Cristina. Flora das cangas da Serra dos Carajás, Pará, Brasil: Dilleniaceae. *Rodriguésia*,v.,n.3,p.1099-1103,2018.
- [36] SANTOS, Gabrielle Araújo. Avaliação dos frutos de *dillenia indica* (maçã de elefante) como planta alimentícia não convencional.2021.
- [37] KAMBOJ, Parul; TALUKDAR, Narayan C.; BANERJEE, Sanjay K. Therapeutic benefit of *Dillenia indica* in diabetes and its associated complications. *Journal of diabetes research*,v.2019,2019.
- [38] BISWAS, Rajarshi et al. Tyrosinase inhibitory mechanism of betulinic acid from *Dillenia indica*. *Food chemistry*,v.232,p.689-696,2017.
- [39] KUMAR, Sunil; KUMAR, Vipin; PRAKASH, Om. Antidiabetic and antihyperlipidemic effects of *Dillenia indica* (L.) leaves extract. *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences*,v.47,p.373-378,2011.

-
- [40] MANHOLER, Daniele Domingos et al. Coagulation/flocculation of textile effluent using a natural coagulant extracted from *Dillenia indica*. *Water Science and Technology*, v.80, n.5, p.979-988, 2019.
- [41] KUMAR, Sunil; KUMAR, Vipin; PRAKASH, Om. Enzymes inhibition and antidiabetic effect of isolated constituents from *Dillenia indica*. *BioMed Research International*, v.2013, 2013.
- [42] KRISHNAN, Meenambigai et al. Leaf extract of *Dillenia indica* as a source of selenium nanoparticles with larvicidal and antimicrobial potential toward vector mosquitoes and pathogenic microbes. *Coatings*, v.10, n.7, p.626, 2020.
- [43] BORUAH, Rimki et al. *Dillenia Indica*: An underutilized fruit with gamut of food and industrial prospectives. *Medicinal Plants-International Journal of Phytomedicines and Related Industries*, v.12, n.2, p.214-219, 2020.
- [44] ABDILLE, Md H. et al. Antioxidant activity of the extracts from *Dillenia indica* fruits. *Food chemistry*, v.90, n.4, p.891-896, 2005.
- [45] SOUZA, Amanda Alvarenga de et al. Estudo do efeito antinociceptivo, anti-inflamatório e do perfil químico do extrato e frações dos frutos de *Dillenia Indica* Linn. 2018.
- [46] JAISWAL, Sweta et al. Antibacterial and antimutagenic activities of *Dillenia indica* extracts. *Food Bioscience*, v.5, p.47-53, 2014.
- [47] DESHMUKH, N. et al. Elephant apple. *Ind Ins Sci*, v. 18, p. 409-420, 2019.
- [48] GODEWATTE, G. A. C. J.; WICKRAMASINGHE, I.; WIJESEKARA, I. Evaluation of nutritional properties and mineral content of *Dillenia indica* (Elephant Apple) fruit. 2021.
- [49] DEMIRBAS, Ayhan; ARIN, Gönenç. An overview of biomass pyrolysis. *Energy sources*, v.24, n.5, p.471-482, 002.

[50] YOGALAKSHMI, K. N. et al. Lignocellulosic biomass-based pyrolysis: A comprehensive review. *Chemosphere*,p.131824,2021.

[51] HU, Xun; GHOLIZADEH, Mortaza. Biomass pyrolysis: A review of the process development and challenges from initial researches up to the commercialisation stage. *Journal of Energy Chemistry*,v.39,p.109-143,2019.

[52] HUANG, Yong et al. Fundamental advances in biomass autothermal/oxidative pyrolysis: a review. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*,v.8,n.32,p.11888-11905,2020.

[53] HASAN, M. M. et al. Energy recovery from municipal solid waste using pyrolysis technology: A review on current status and developments *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,v.145,p.111073,2021.

[54] LENG, Lijian et al. A review on pyrolysis of protein-rich biomass: Nitrogen transformation. *Bioresource Technology*,v.315,p.123801,2020.

[55] Qingyin et al. Progress in catalytic pyrolysis of municipal solid waste. *Energy Conversion and Management*, v.226,p.113525,2020.

[56] GLAUCO SÂNCHEZ, C. Tecnologia da Gaseificação de Biomassa. 1. Ed. Campinas: Átomo. 2010. 432 p.

[57] ZAMBRZYCKI, Geraldo Cesar; DO VALE, Ailton Teixeira; DE SIQUEIRA DANTAS, Vandui Francisco. Potencial energético dos resíduos da cultura do milho (*Zea mays*).*Evidência*,v.13,n.2,p.153,2013.

[58] SILVA, Felipe et al.Soja: do plantio à colheita. Oficina de Textos,2022.

[59] HOCHSCHEIDT, Bruna et al. Análise das características químicas e energéticas de blendas de farelo de soja com bagaço de cana e serragem de eucalipto.*Acta Iguazu*,v.5,n.5,p.1-9.

[60] COSTA, Ana Carolina Lopes Amaral et al. Caracterização física, química e mecânica de pellets de bagaço de cana-de-açúcar. *Energia Na Agricultura*, v.35, n.1, p.38-45, 2020.

[61] MAY, A. et al. Cultivo do sorgo biomassa para a cogeração de energia elétrica. 2013.

[62] CARMONA, Iara Nobre et al. CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA DO CARVÃO VEGETAL DE *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* PLANTADOS NO OESTE DO PARÁ. *Revista Agroecossistemas*, v.11, n.2, p.57-65, 2020.