



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Faculdade de Engenharia e Ciências
Câmpus de Rosana

Bruna Ruri Kobayachi

Aplicação do resíduo do caroço de pequi para uso como fonte de energia renovável

Rosana - SP
2022

Bruna Ruri Kobayachi

Aplicação do resíduo do caroço de pequi para uso como fonte de energia renovável

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Energia da Faculdade de Engenharia e Ciências, Universidade Estadual Paulista, Câmpus de Rosana, como parte dos requisitos para obtenção da Graduação em Engenharia de Energia.

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

Rosana - SP
2022

K75a	Kobayachi, Bruna Ruri Aplicação do resíduo do caroço de pequi para uso como fonte de energia renovável / Bruna Ruri Kobayachi. -- , 2022 43 f. : il., tabs., fotos Trabalho de conclusão de curso (-) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia e Ciências, Rosana, Orientador: Renivaldo José Dos Santos 1. Biomassa. 2. Pequi. 3. Energia Renovável. 4. Resíduos Sólidos. I. Título.
------	---

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Engenharia e Ciências, Rosana. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

Faculdade de Engenharia e Ciências
Câmpus de Rosana

BRUNA RURI KOBAYACHI

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DA GRADUAÇÃO 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. Leonardo Lataro Paim
UNESP-Rosana

Prof. Me. Carlos Toshiyuki Hiranobe
UNESP-Rosana

Dezembro, 2022

dedico este trabalho
de modo especial, aos meus pais, Edson e
Matiko

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço à minha família, principalmente aos meus pais pela oportunidade de poder estudar, me manter durante o curso e pelo apoio desde sempre. Agradeço também aos professores e funcionários da FEC por todo o conhecimento adquirido e apoio, em especial meu orientador, professor Renivaldo que me acolheu no meu primeiro ano e me aceitou como orientanda até o final da minha graduação. Ao Carlos, que durante a pandemia fez as análises necessárias para a escrita desse trabalho, aos laboratórios da UNESP de Presidente Prudente e Ilha Solteira que também realizaram as análises presentes nesse trabalho.

Agora para os amigos, conheci pessoas que quero levar para a vida toda, Henry e Lucas Laurindo, meus amigos para trabalhos, estudos, jogos e muito mais, fico contente de ter conhecido e me aproximado muito de vocês! Outras pessoas que fazem parte do meu ciclo de amizade, me ajudaram muito durante a minha graduação e agradeço muito por ter conhecido, Fini, Ana, Karla, Jesus e todos os demais colegas de classe. Meu namorado, Diego, que sempre me suporta nas horas difíceis e me dá forças para continuar, agradeço por tudo. Os meus amigos das horas vagas, Ana, Hideki, Lucas, Allysson, Eduardo, Arthur conheci vocês durante o período da pandemia, e quero que essa amizade dure por muitos e muitos anos. Por fim, agradeço novamente a todos que contribuíram diretamente ou indiretamente para minha graduação e para a escrita desse trabalho.

“Pelos surrados e perdidos
Pelos perdidos e esquecidos
Não iremos nos render.”

“The Call” - Edda Hayes

RESUMO

O pequi (*Caryocar brasiliense*) é um fruto típico do cerrado brasileiro, sendo muito apreciado na culinária local, entretanto, cerca de 90 % da massa total do fruto é descartada como resíduo orgânico, este resíduo pode ser reaproveitado como biomassa para a geração de energia térmica. Neste trabalho realizou-se o estudo do processo de combustão e degradação térmica do resíduo do caroço de pequi para utilizá-lo como fonte de energia térmica alternativa. O resíduo foi submetido ao processo de micronização, e posteriormente submetido a secagem em estufa. Em seguida, foi realizado o estudo das propriedades térmicas, como: poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI), microscopia eletrônica de varredura (MEV), análise imediata e elementar e fluorescência de raios-X (FRX). E por meio das análises termogravimétricas (TG) foram determinadas as temperaturas de ignição e combustão. Os resultados mostraram que o resíduo do caroço de pequi apresenta PCS igual a 24,31 MJ kg⁻¹ e o PCI igual a 22,55 MJ kg⁻¹, sendo 79,04 %, de material volátil, 19,42 % de carbono fixo e 1,52 % de cinzas. Esses resultados indicam que o resíduo pode ser utilizado como biomassa nos processos de combustão com geração de energia térmica semelhante ao bagaço da cana de açúcar.

PALAVRAS-CHAVE: Biomassa. Pequi. Energia Renovável, Resíduos Sólidos.

ABSTRACT

The pequi (*Caryocar brasiliense*) is a natural fruit from the Brazilian's Cerrado region, thoroughly enjoyed in the local cuisine. However, about 90% of the fruit's total mass is discarded as organic residue. This residue can be repurposed as biomass for thermal energy generation. This work is a study acknowledging the process of combustion and thermal degradation of pequi's seeds so that it can be utilised as alternative thermal energy. The residue was submitted in a micronization process, and afterwards, submitted in a drying process in a greenhouse. Following this, a study related to the thermal proprieties was realised, aiming for the higher heating value (HHV) and the lower heating value (LHV), scanning electron microscopy (SEM), immediate analysis, elemental analysis and X-ray fluorescence (XRF). Also, by thermogravimetric analysis (TGA), it was determined the temperature points of ignition and combustion. The results showed that the residue of the seed presents HHV equals to 24,31 MJ kg⁻¹ and LHV equals to 22,55 MJ kg⁻¹, showing 79,04 %, of volatile material, 19,42 % of fixed carbon and 1,52 % of ash. These results presents the fact that the residue can be utilised as biomass in the processes of combustion, generating thermal energy similar to the marc (bagasse) of the sugarcane.

KEYWORDS: Biomass, Pequi, Renewable Energy, Solid Waste

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema das aplicações do bio-óleo.....	3
Figura 2 – a) Pequizeiro. b) O fruto do pequizeiro.....	4
Figura 3 – Características morfológicas do pequi.	5
Figura 4 – Caroço de pequi <i>in natura</i>	6
Figura 5 – Caroço de pequi pós micronização	7
Figura 6 – Analisador de umidade.....	8
Figura 7 – Bomba calorimétrica	9
Figura 8 – Representação esquemática do método da intersecção	13
Figura 9 – Curvas de TG e DTG para o caroço de pequi.....	18
Figura 10 – Curva de DSC a taxa de 10 °C/min do caroço de pequi	19
Figura 11 – Microscopia eletrônica de varredura do caroço de pequi micronizado de a) 500x e b) 1000x	20

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores do teor de umidade do caroço de pequi in <i>natura</i> e pós secagem.....	14
Tabela 2 – Análises térmicas para o caroço de pequi	15
Tabela 3 – Poder calorífico superior de biomassas convencionais.....	16
Tabela 4 – Temperaturas características de combustão do caroço de pequi	20

LISTA DE SÍMBOLOS

MJ/kg – Mega Joule por kilograma
MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura
PCS – Poder Calorífico Superior
PCI – Poder Calorífico Inferior
%V – Teor de voláteis
 m_a – Massa da amostra
 m_f – Massa final do cadinho com amostra
 m_i – Massa inicial do cadinho com amostra
%C – Teor de cinzas
 m_c – Massa do cadinho
H – Teor de hidrogênio
 T_b – Temperatura de *burnout*
DSC - Análise Calorimétrica Diferencial Exploratória
 T_i – Temperatura de ignição
mL/min – Mililitros por minuto

Sumário

1.	INTRODUÇÃO.....	1
2.	OBJETIVOS.....	2
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
3.1	BIOMASSA.....	2
3.2	PIRÓLISE.....	2
3.3	PEQUI.....	3
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	6
4.1	OBTENÇÃO DO CAROÇO DE PEQUI	6
4.2	PREPARAÇÃO DO RESÍDUO	6
4.2.1	Micronização do caroço de pequi.....	6
4.2.1	Secagem do caroço de pequi	7
4.3	TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO	7
4.3.1	Análise do teor de umidade.....	7
4.3.2	Poder calorífico superior (PCS)	8
4.3.3	Análise imediata.....	9
4.3.4	Análise elementar.....	10
4.3.5	Fluorescência de raios-X.....	10
4.3.6	Poder calorífico inferior (PCI)	11
4.3.7	Análise termogravimétrica em atmosfera inerte (TG).....	11
4.3.8	Análise Calorimétrica Diferencial Exploratória (DSC)	11
4.3.9	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	12
4.3.10	Determinação das temperaturas características de combustão	12
4.3.10.1	Método da intersecção	12
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	14
5.1	– ANÁLISE DO TEOR DE UMIDADE	14
5.2	– PODER CALORÍFICO SUPERIOR, ANÁLISES IMEDIATA, ELEMENTAR E FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X	14
5.3	– PODER CALORÍFICO INFERIOR (PCI).....	17
5.4	– ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA EM ATMOSFERA INERTE (TG)	17
5.5	– ANÁLISE CALORIMÉTRICA DIFERENCIAL EXPLORATÓRIA (DSC)	19
5.6	– MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)	19
5.7	– DETERMINAÇÃO DAS TEMPERATURAS CARACTERÍSTICAS DE COMBUSTÃO	20
6.	CONCLUSÃO.....	22

1. INTRODUÇÃO

No Brasil cerca de 40,5% dos resíduos gerados não são coletados e por isso compartilham de destino impróprio, o que consequentemente gera riscos à saúde humana e ao meio ambiente [1]. Considerando que quase todas as áreas de trabalho geram algum tipo de resíduo, cada setor produz um tipo de resíduo que é diferente de outro, sendo alguns difíceis de classificar por sua composição ser muito heterogênea. Partido dessa problemática, a biomassa é uma fonte alternativa de energia que consiste em utilizar os resíduos orgânicos advindos das diversas áreas geradoras de resíduos, podendo ser uma alternativa para reduzir o uso de combustíveis fósseis e a emissão de gases de efeito estufa [2].

No Brasil em 2021, a biomassa constituía 8,2% da matriz energética nacional, onde houve um aumento na oferta da mesma em forma de biomassa de cana e biodiesel [3]. Neste estudo o pequi (*Caryocar brasiliense*), foi escolhido como objeto de pesquisa pois mais da metade do fruto é descartado, sendo a parte comestível do mesmo mínima [4]. As partes analisadas serão o caroço e a semente que, por serem ricas em lipídeos, podem ser um ótimo combustível para a obtenção de energia térmica [5].

Para tal aplicação, a superfície do caroço de pequi será observada e analisada por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV). Em seguida o resíduo será submetido á tratamentos prévios como a micronização e a secagem em estufa. Com os resultados da termogravimetria em atmosfera oxidante e inerte, será realizada a determinação das temperaturas de ignição e *Burnout*.

2. OBJETIVOS

O trabalho tem como objetivo geral o estudo do resíduo de pequi como recurso energético em processo de combustão.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 BIOMASSA

Desde os primórdios a humanidade depende de energia, e isso teve um aumento considerável após a Revolução Industrial, que foi o estopim para o uso de combustíveis fósseis (como petróleo e carvão) para gerar energia. Com isso inicia-se também os problemas ambientais como o efeito estufa que é causado pela emissão de gases poluentes na queima de tais combustíveis [6]. A matriz energética do Brasil em 2019 era composta por 46,1% de energias renováveis, sendo 64,9% das hidrelétricas, valor menor se comparado ao ano de 2018, pois houve um incremento das fontes eólica e solar, e na oferta de biomassa, o Brasil se mantém em um patamar renovável superior ao se comparar com o mundo [7].

Como observado, no Brasil não há um uso muito elevado de combustíveis fósseis para a geração de energia elétrica em si, porém, o uso desses é para alimentar outras máquinas, como automóveis e máquinas industriais. Partindo dessa problemática, uma solução para isso seria a utilização de biomassa, que possuía uma participação de 8,4% na matriz energética nacional em 2019, o Brasil possui um grande potencial na geração de energia através da biomassa, pois possui uma vasta produção agrícola, onde os resíduos provenientes dessa, podem deixar de serem desperdiçados e receberem uma utilização de benefício econômico e ambiental [7,8].

A biomassa é considerada uma fonte de energia sustentável, pois consiste em utilizar resíduos orgânicos vindos de diversas áreas, mas principalmente do setor agrícola, e tal fonte de energia passou a ser considerada uma alternativa para a redução do uso de combustíveis fósseis [2]. Das áreas citadas anteriormente, os resíduos das indústrias alimentícias, do meio agrícola e a matéria orgânica do lixo doméstico podem ser estudadas para serem utilizados como biomassa.

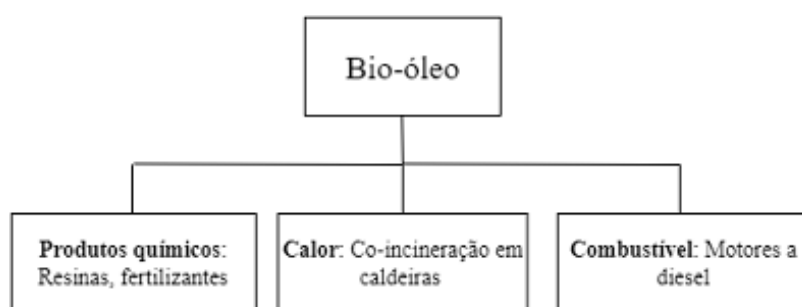
3.2 PIRÓLISE

A pirólise consiste em aquecer a biomassa na ausência de oxigênio, gerando um produto rico em carbono (carvão), gases não condensáveis e bio-óleo [9]. O método consiste na

ruptura de ligações de carbono, onde o carvão se forma no começo do processo junto com gases condensáveis, que por sua vez se decompõem e originam o bio-óleo e os gases não condensáveis, sendo um processo de oxirredução [10,11].

Esse processo pode ser realizado de forma lenta ou rápida, sendo a lenta realizada a baixa temperatura (aproximadamente 400°C) em uma longa residência, favorecendo a produção de carvão, enquanto que a rápida é realizada em alta temperatura (800°C a 900°C) com curta residência, visando obter grandes quantidades de bio-óleo, pois como a residência é curta, evita que os compostos sofram reações secundárias, considera-se que esse líquido possui diversas aplicações, dentre elas a geração de energia [9,12,13]. A Figura 1 mostra algumas aplicações do bio-óleo:

Figura 1 – Esquema das aplicações do bio-óleo.



Fonte: Autoria própria

A pirólise segue a sequência de fenômenos: entre 160°C há a eliminação quase total da umidade, entre 200 e 280°C ocorre a decomposição das hemiceluloses, e na faixa de 280 e 500°C verifica-se a decomposição da celulose, esses dois últimos fenômenos sendo específicos para biomassas de origem vegetal [14]. De acordo com a temperatura, pode haver o favorecimento da formação de frações voláteis no caso de um grande aumento de temperatura, ou das frações sólidas com um aumento gradual da temperatura [15].

O rendimento e o tipo de produto gerados são intimamente ligados a alguns parâmetros, como a temperatura e o tempo de residência, como citados anteriormente, e a granulometria [16,17]. A granulometria é um fator importante quando se tratando da pirólise, pois uma granulometria maior concede uma maior área de contato e consequentemente maior aquecimento em menor tempo de residência [11,18].

3.3 PEQUI

O pequi (*Caryocar brasiliense*) é o fruto do pequizeiro, que é uma espécie arbórea típica do cerrado brasileiro, sendo um dos principais produtos do bioma, conforme ilustrado na

Figura 2a [19], e na Figura 2b [20] o fruto no pequizeiro:

Figura 2 – a) Pequizeiro. b) O fruto do pequizeiro



Fonte: Odair Plantas, Elma Carneiro

O fruto em questão é constituído pelo exocarpo ou pericarpo, de coloração esverdeada ou marrom-esverdeada, mesocarpo externo, polpa branca com coloração pardo-acinzentada e mesocarpo interno, que constitui a porção comestível do fruto, possuindo coloração amarelada (pirênio). O mesocarpo interno separa-se facilmente do mesocarpo externo quando maduro. O endocarpo, que é espinhoso, protege a semente ou amêndoa, que é revestida por um tegumento fino e marrom, sendo também uma porção comestível. Sua safra tem início em meados de setembro até o final de janeiro e no ano de 2020 foram produzidas aproximadamente 6,2 toneladas do fruto, quase o dobro do ano de 2019, que foram produzidas 3,2 toneladas [21,22]. A Figura 3 [23] ilustra as características morfológicas do fruto, cerca de 84% da massa total corresponde ao exocarpo e ao mesocarpo externo (casca), 10% da massa total ao pirênio (polpa) e os 6% restantes do endocarpo (semente ou caroço) [24].

Figura 3 – Características morfológicas do pequi.



Fonte: RODRIGUES, Mara Lina, 2017

Um ponto a se destacar é a polpa, muito apreciada na culinária do centro-oeste brasileiro, sendo utilizada no preparo de diversos pratos, sendo o mais famoso entre eles o arroz com pequi [25]. Tal é rica em lipídios (cerca de 30% a 40%), assim como a semente, que possui aproximadamente 50% de lipídios [5]. A casca e o caroço não são consumidos, sendo descartados, quando poderiam ter alguma finalidade, como o aproveitamento energético desses resíduos [26].

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 OBTENÇÃO DO CAROÇO DE PEQUI

O fruto foi obtido comercialmente na cidade de Cassilândia-MS e cozido para a retirada do caroço.

4.2 PREPARAÇÃO DO RESÍDUO

4.2.1 Micronização do caroço de pequi

O resíduo após a coleta foi micronizado em um moinho de facas da marca Marconi no laboratório de análise da Faculdade de Engenharia e Ciências da UNESP em Rosana – SP. A Figura 4 mostra o caroço *in natura* e a Figura 5 mostra o caroço pós micronização:

Figura 4 - Caroço de pequi *in natura*.



Fonte: Autoria Própria

Figura 5 - Caroço de pequi pós micronização



Fonte: Autoria Própria

A granulometria obtida é inferior a 30 mesh como pode-se observar na Figura 5, visivelmente as partículas são pequenas o suficiente para serem usadas como amostras nos ensaios realizados.

4.2.1 Secagem do caroço de pequi

Após a micronização, o resíduo de pequi foi levado à uma estufa de secagem e esterilização da marca SP Labor, no laboratório de análise da Faculdade de Engenharia e Ciências (FEC) da UNESP em Rosana – SP. O procedimento ocorreu a uma temperatura de 80°C durante 12 horas, sendo esse processo necessário para eliminar a umidade presente no resíduo.

4.3 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO

4.3.1 Análise do teor de umidade

Além da secagem da amostra em estufa, também foi verificado o teor de umidade no caroço de pequi micronizado em um analisador de umidade da modelo MOC63u da marca SHIMADZU, mostrado na Figura 6, que por meio de um recipiente interno, há o aquecimento do material e mede-se a variação da massa da amostra em relação ao aumento da temperatura, quando a massa da amostra fica constante o processo se encerra com a determinação do teor de umidade, calculado a partir da diferença percentual da massa inicial e final. O processo ocorreu

em triplicata e com aproximadamente 3g da amostra.

Figura 6 - Analisador de umidade

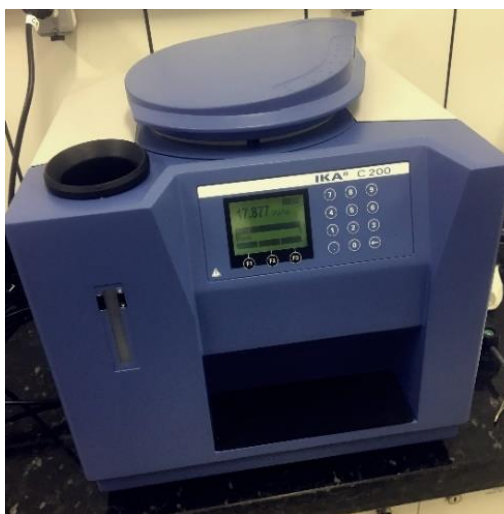


Fonte: Autoria Própria

4.3.2 Poder calorífico superior (PCS)

O poder calorífico superior foi determinado em uma bomba calorimétrica modelo IKA C-200 da marca LABCONTROL, conforme a Figura 7, tal análise indica a quantidade de energia liberada durante a transferência de calor, relacionando-se à eficiência do processo de combustão, onde o teor de umidade influencia diretamente no processo.

Figura 7 - Bomba calorimétrica



Fonte: Autoria Própria

4.3.3 Análise imediata

As análises imediatas utilizadas foram realizadas utilizando o método ASTM E-870-82 “Análise imediata para biomassa e resíduos”, baseado nas normas ASTM D-3172 e D-3175 “Prática padrão para análise de carvão e coque”. Onde primeiramente foi realizado o processo de calcinação nos cadinhos utilizados para a volatilização de substâncias que poderiam estar nos cadinhos devido a outras utilizações, em seguida encheu-se $\frac{3}{4}$ dos cadinhos com a amostra. Para a determinação dos voláteis, a mufla foi programada para aquecer até 850 °C, quando o forno atingiu essa temperatura, os cadinhos tampados foram colocados um de cada vez por 6 minutos cada um, após isso foram colocados em um dessecador para o resfriamento, sendo pesados logo em seguida. O teor de voláteis foi obtido a partir da Equação (2):

$$\%V = \frac{m_i - m_f}{m_a} \times 100\% \quad (2)$$

Onde:

%V – Teor de voláteis (%)

m_a – Massa da amostra (g)

m_f – Massa final do cadinho com amostra (g)

m_i – Massa inicial do cadinho com amostra (g)

Para o teor de cinzas, com a mufla fria e os cadinhos destampados, esta foi configurada para aquecer lentamente até 750 °C e mantê-la por 2 horas, após esse período os cadinhos foram colocados no dessecador até que esfriassem, sendo pesados em seguida. O teor de cinzas foi obtido a partir da Equação (3):

$$\%C = \frac{m_f - m_c}{m_a} \times 100\% \quad (3)$$

Onde:

%C – Teor de cinzas (%)

m_a – Massa da amostra (g)

m_f – Massa final do cadinho com amostra (g)

m_c – Massa do cadinho (g)

Por fim, o teor de carbono fixo é calculado a partir dos teores de voláteis e cinzas, mostrado na Equação (4):

$$\%C = 100 - (\%V + \%C) \quad (4)$$

4.3.4 Análise elementar

A análise elementar determina a composição elementar em termos de carbono, hidrogênio, nitrogênio e oxigênio. A análise foi realizada em um equipamento da marca LECO modelo CHN628, com os resultados tratados no software CHN628 versão 1.30. O equipamento operou com hélio (99,995 %) e oxigênio (99,99 %) com a temperatura do forno primário em 950 °C e do *Afterburner* em 850 °C. As amostras foram analisadas pesando-se aproximadamente 50 mg em uma folha de estanho.

3.3.5 Fluorescência de raios-X

A fluorescência de Raios X é utilizada para analisar as microestruturas de materiais naturais ou sintéticos, permitindo assim a caracterização atômica e molecular da amostra, diferenciando os elementos químicos contidos na mesma [27,28]. Essa análise foi realizada em um equipamento modelo SHIMADZU EDX-7000 PORTA amostra em atmosfera com vácuo em temperatura ambiente, com leitura de sódio (Na) a urânio (U).

4.3.6 Poder calorífico inferior (PCI)

O poder calorífico é a quantidade de energia na forma de calor que é liberada durante o processo de combustão [29]. Essa análise é dividida em dois tipos, o poder calorífico superior, que foi determinado pela bomba calorimétrica, e o poder calorífico inferior, que é a energia disponível por unidade de massa, após as perdas com a evaporação da água [30,31]. A Equação (5) foi utilizada para a determinação do PCI:

$$PCI = PCS - [(600 * 9 * \frac{H}{100} * 4,1868)] \quad (5)$$

Onde:

PCI – Poder calorífico inferior (MJ/kg)

PCS – Poder calorífico superior (MJ/kg)

H – Teor de hidrogênio (%)

O PCS utilizado será o que foi determinado a partir de uma bomba calorimétrica, bem como o teor de hidrogênio, que foi obtido na análise elementar.

4.3.7 Análise termogravimétrica em atmosfera inerte (TG)

A técnica foi realizada em um equipamento da marca NETZSCH modelo 242C, com intervalo de temperatura, 26 até 900 °C, com razão de aquecimento de 10 °C/min em atmosfera de nitrogênio e fluxo de 20 mL/min.

A análise verifica a perda de massa da amostra em função da temperatura e do tempo, submetida a uma variação de temperatura programada e atmosfera inerte. Esse método possibilita observar a variação da massa e quais eventos de perda de massa ocorrem durante a degradação ou evaporação do material provocada pelo processo de aquecimento.

4.3.8 Análise Calorimétrica Diferencial Exploratória (DSC)

Verifica a energia liberada ou absorvida durante o processo de aquecimento do material. A análise foi realizada em um equipamento da marca NETZCH modelo 209, a medida foi realizada com razão de aquecimento de 10 °C/min. na faixa de 30 a 500 °C, em atmosfera de nitrogênio com fluxo de 25 mL/min.

4.3.9 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) pode aumentar em até 300.000 vezes a amostra, sendo que a imagem é formada por um feixe de elétrons de pequeno diâmetro, permitindo explorar a superfície da amostra [32,33]. O equipamento de microscopia eletrônica de varredura da marca Carl Zeiss EVO LS15 a 20 kV foi empregado para investigar a morfologia da superfície do resíduo. As amostras foram revestidas com uma fina camada de ouro usando um Quorum Q 150R ES.

4.3.10 Determinação das temperaturas características de combustão

O estudo das propriedades dos biocombustíveis possui um papel importante em sua utilização. Com isso, as temperaturas de ignição e *burnout* são características cruciais dos combustíveis [34].

A temperatura de ignição é a temperatura mínima para que um combustível inflame espontaneamente, sem nenhuma fonte de ignição externa [35]. Esse parâmetro é também altamente relacionado à segurança no armazenamento, transporte e risco de explosão [36]. A temperatura de *burnout* representa o grau de reação de um combustível, referindo-se à temperatura na qual o combustível é quase completamente consumido [37].

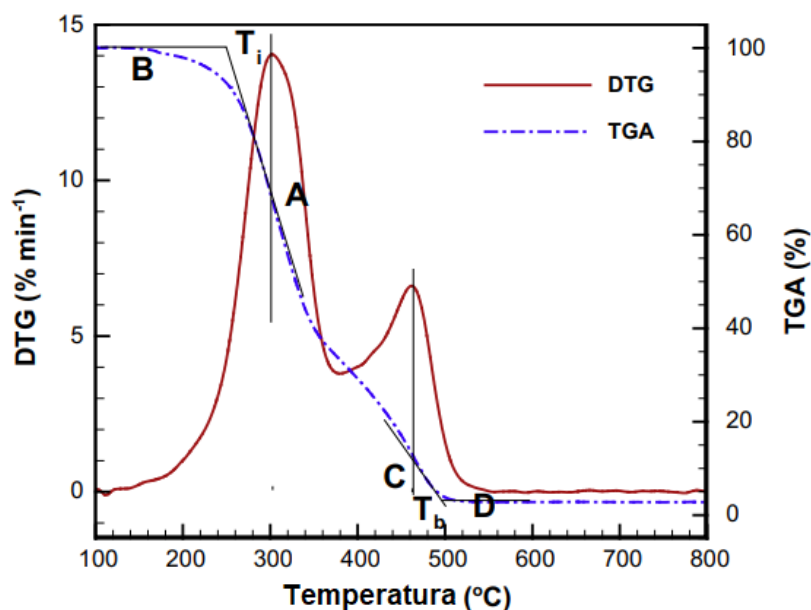
Para se encontrar a temperatura de ignição e de *burnout*, utiliza-se dois métodos. O primeiro método é baseado na intersecção de duas linhas tangentes ao longo de uma curva TGA para a biomassa aquecida no ar, chamado de Método da Intersecção (MI) [38]. O outro método é conhecido como Método do Desvio (MD) e consiste no desvio de duas curvas DTG, uma feita em atmosfera inerte e outra oxidativa no mesmo gráfico [34].

4.3.10.1 Método da intersecção

Para a simplicidade da descrição deste método a Figura 8 [34] mostra detalhadamente o método a partir da técnica termogravimétrica. Inicialmente, dois pontos em uma curva TG são identificados, sendo estes o ponto A e B. O ponto A mostrado na Figura 8 é o ponto no qual uma linha vertical traçada a partir do primeiro pico DTG (o maior valor na curva DTG) cruza a curva TG. O ponto B é o ponto no qual a desvolatilização começa. Desenha-se uma reta que tangencia o ponto A rente a curva TG e uma linha horizontal em B. A temperatura correspondente na intersecção das duas linhas é identificada como a temperatura de ignição (T_i)

[34].

Figura 8 - Representação esquemática do método da intersecção



Fonte: LU, Jau-Jang, 2015

A temperatura de *burnout* deve ser determinada pelo segundo pico da DTG. Primeiramente, determina-se os pontos C e D mostrados na Figura 8. O ponto C está na curva TG, onde uma linha reta vertical no segundo pico da curva DTG cruza a curva TG. O ponto D é o local no qual a curva TG se torna estável, corresponde à temperatura na qual a taxa de perda de massa (dW/dt) retorna a zero ou, por definição, onde a variação da taxa de perda de massa torna-se menor que 1% por minuto. Posteriormente, encontra-se a temperatura de *burnout* (T_b) na intersecção das duas retas, nas quais, uma reta é tangente na curva TG em C e outra horizontal que passa pelo ponto D [36].

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 – ANÁLISE DO TEOR DE UMIDADE

Na Tabela 1 são apresentados os valores de umidade para o caroço de pequi *in natura*:

Tabela 1 - Valores do teor de umidade do caroço de pequi *in natura* e pós secagem,

Pequi <i>in natura</i>	Teor de umidade (%)
Amostra 1	43,76
Amostra 2	44,08
Amostra 3	42,84
Média e desvio padrão	43,56 ± 0,64
Pequi pós-secagem	
Amostra 1	6,33
Amostra 2	6,68
Amostra 3	6,43
Média e desvio padrão	6,48 ± 0,18

Observa-se na Tabela 1 que o teor de umidade para o caroço de pequi *in natura* é elevado, este fato está relacionado ao teor de extrativos que o fruto apresenta. Assim, torna-se, necessário um tratamento prévio como o processo de secagem [39].

Após o processo de secagem, observa-se na Tabela 1 uma abrupta redução no teor de umidade, o que favorece o poder calorífico da biomassa e a eficiência no processo de combustão, visto que o limite máximo de umidade na biomassa não deve ultrapassar 65 % [40].

5.2 – PODER CALORÍFICO SUPERIOR, ANÁLISES IMEDIATA, ELEMENTAR E FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X

A Tabela 2 mostra os valores do PCS, análises imediata e elementar e a fluorescência de Raio-X que foram realizadas para o caroço de pequi. Observa-se que o caroço de pequi possui um poder calorífico superior maior que a maioria das biomassas apresentadas, provando que o resíduo possui um grande potencial para ser utilizado como fonte de energia térmica. O

caroço de pequi apresenta alto teor de materiais graxos e óleo vegetal, elevando assim seu poder calorífico [41].

Tabela 2 - Análises térmicas para o caroço de pequi.

Análises	Valor
PCS base seca (MJ/kg)	24,31 ± 0,70
Análise Imediata (%)	
Voláteis	79,04 ± 0,37
Carbono Fixo	19,42 ± 0,39
Cinzas	1,52 ± 0,06
Análise Elementar (%)	
C	53,12
H	7,789
O	37,503
N	1,588
Fluorescência de Raios X (%)	
K	2,115
P	1,96
Si	0,1
S	0,708
Ca	0,433
Cu	0,198
Fe	0,121
Zn	0,004
Mn	0,004
Rb	0,003
C	94,354

Para fins de comparação, a Tabela 3 foi elaborada compara o poder calorífico superior do caroço de pequi em base seca com algumas biomassas convencionais:

Tabela 3 - Poder calorífico superior de biomassas convencionais

Biomassa	PCS (MJ/kg)
Caroço de pequi	24,31
Bagaço de cana [42]	17,81
Palha de cana [43]	17,00
Carvão vegetal de eucalipto [44]	31,00
Sabugo de milho [45]	17,42
Casca de arroz [46]	16,17
Casca de coco [47]	18,67

Para a análise imediata, o teor de voláteis obtido é considerado alto, o que indica que o caroço de pequi iniciará a combustão em uma temperatura mais baixa, e será consumido mais rápido. Tais substâncias influenciam diretamente na estabilidade de chama na combustão [48,49]. O carbono fixo é responsável pela queima do material após a saída dos voláteis, sendo um alto teor de carbono vantajoso para longas residências em um reator. Para resíduos orgânicos é esperado que o carbono fixo fique entre 10 a 30 %, o caroço de pequi está dentro dessa porcentagem [50]. Por fim as cinzas são componentes indesejáveis em processos de produção de energia, já que são substâncias que não interagem na combustão, tendo um baixo teor delas há um aproveitamento melhor nos processos de queima, as cinzas estão diretamente ligadas à composição química do material, portanto a adubação e disponibilidade de minerais no solo afetam diretamente esse aspecto [51,52]. O valor encontrado é considerado baixo, o que mostra a viabilidade do uso do caroço de pequi como combustível para obtenção de energia térmica.

Para a análise elementar, o pequi apresentou 53,12 % de teor de carbono e 7,789 % de hidrogênio, esses teores contribuem na eficiência da combustão, liberando mais energia, pois estão presentes nas cadeias carbônicas da celulose. Outro fator importante é a razão entre o teor de carbono e oxigênio, que se relaciona com o poder calorífico superior, quanto menor essa razão melhor a propriedade térmica do combustível, pois o teor de oxigênio não contribui para a queima [40]. O baixo teor de nitrogênio (1,588 %) é um ponto positivo, uma vez que pode

haver a formação e liberação de compostos NO_x durante o processo de queima, além da diminuição do poder calorífico do combustível [53,54].

A fluorescência de raios X é uma técnica não destrutiva, utilizada para determinar a composição elementar de uma amostra e a sua concentração, sendo que para o processo de pirólise e gaseificação é necessário o estudo prévio da composição química das cinzas, composta por inorgânicos [55,56,57]. No caso, a maior quantidade de inorgânicos encontrada é de potássio, com 2,115 % e fósforo com 1,96 % de concentração e a menor de rubídio com 0,003 %.

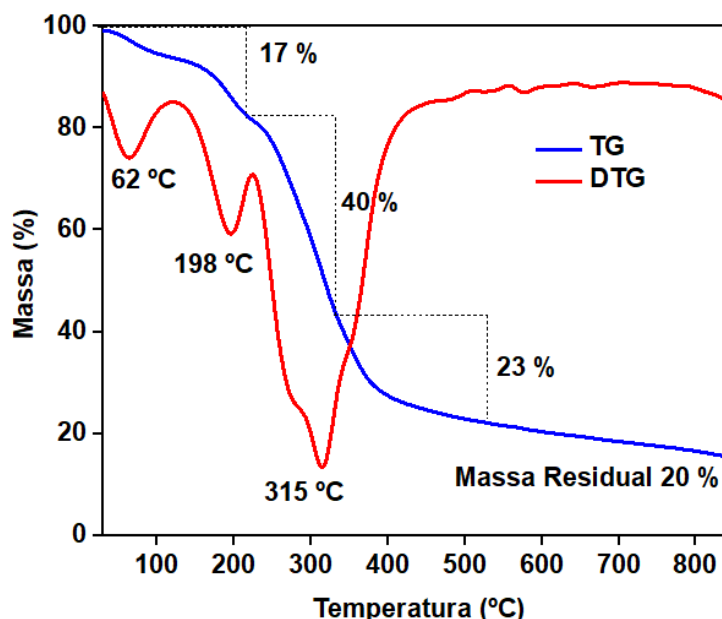
5.3 – PODER CALORÍFICO INFERIOR (PCI)

Utilizando a Equação 1 e os dados do PCS em base seca e o teor de hidrogênio (Tabela 3) obtidos posteriormente, tem-se que o PCI do caroço de pequi é de 22,55 MJ/kg. O PCI é a quantidade de calor liberado excluindo a entalpia de vaporização da água, sendo o calor que realmente é liberado na combustão e costuma ser entre 10 a 20 % menor que o valor do PCS [58,59,60]. Encontrou-se na literatura valor próximo ao calculado, igual a 18,25 MJ/kg [61].

5.4 – ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA EM ATMOSFERA INERTE (TG)

A Figura 9 apresenta as curvas obtidas pela análise termogravimétrica em atmosfera inerte. Em que a curva em azul representa a degradação do pequi em função da temperatura, e a curva em vermelho representa a primeira derivada do processo de degradação da amostra, onde podemos observar as temperaturas em que os eventos de degradação do material são mais intensos.

Figura 9 – Curvas de TG e DTG para o caroço de pequi



Fonte: Autoria Própria

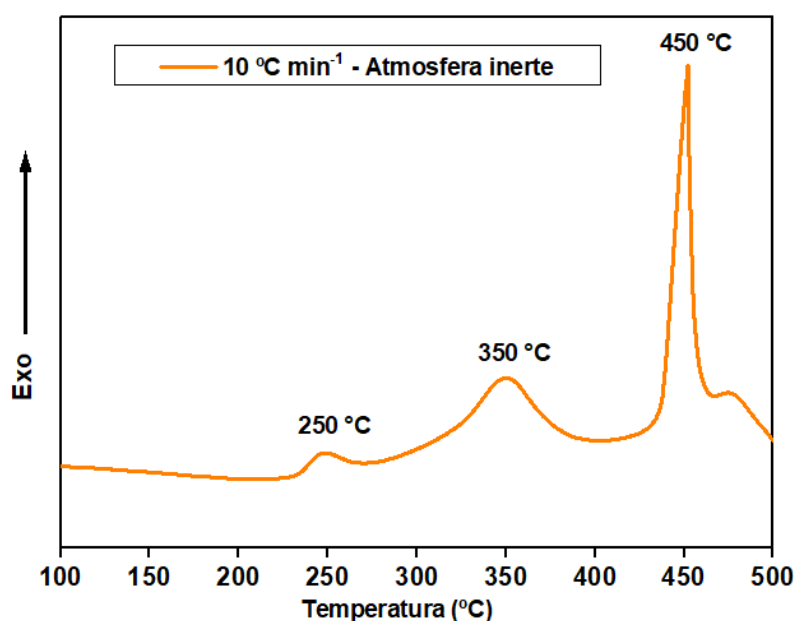
Observa-se que na degradação do caroço de pequi, há quatro eventos principais. O primeiro refere-se à liberação de água, que ocorre entre 30 °C e 95 °C, sendo mais intensa em 62 °C. O segundo evento é a degradação da hemicelulose que possui baixa estabilidade térmica e se degrada entre 220 e 315 °C, com maior intensidade em 198 °C, neste processo ocorre a degradação predominante de vários monossacarídeos, com perda de 17 % de massa [62,63]. O terceiro evento em que ocorre a degradação da celulose que é o principal componente da parede celular das biomassas, acontece com mais intensidade em 198 °C, ocorrendo a perda de massa de 40 % devido à despolimerização de unidades de glicosil, e possui cadeias poliméricas longas com alta estabilidade térmica [64,65]. Por fim, em 315 °C há a degradação da lignina, estrutura que possui alta estabilidade térmica, devido ao grande número anéis aromáticos presentes. Nessa degradação perde-se da 23 % massa [66]. Ao final, obteve-se 20 % de massa residual, correspondente à materiais inorgânicos, valor aceitável para biomassas lignocelulósicas quando submetidas ao processo de combustão em atmosfera inerte [67].

5.5 – ANÁLISE CALORIMÉTRICA DIFERENCIAL EXPLORATÓRIA (DSC)

As curvas de DSC indicam o processo de transferência de calor, sendo por absorção (endotérmica) ou liberação (exotérmica) [68]. A Figura 10 mostra a curva de DSC obtida para o caroço de pequi.

Conforme a Figura 10, observa-se três eventos exotérmicos, que correspondem à degradação da hemicelulose, celulose e lignina, respectivamente. Tais eventos corroboram com as informações obtidas com na análise termogravimétrica.

Figura 10 – Curva de DSC a taxa de 10 °C/min do caroço de pequi

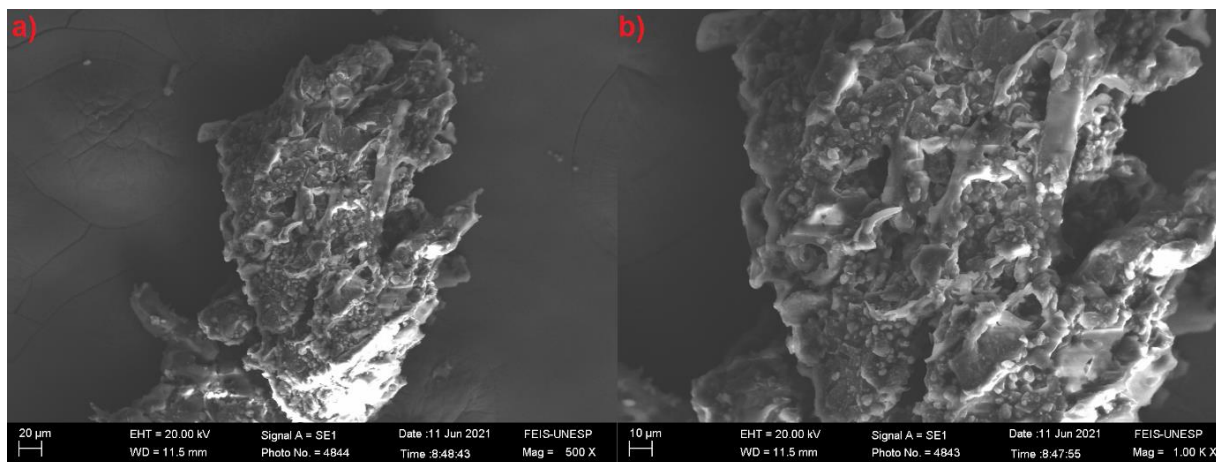


Fonte: Autoria Própria

5.6 – MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A Figura 11 apresenta a microscopia eletrônica de varredura realizada no pequi com ampliação de 500x e 1000x:

Figura 11 - Microscopia eletrônica de varredura do caroço de pequi micronizado de a) 500x e b) 1000x



Fonte: Autoria Própria

Pode-se observar que o caroço de pequi micronizado possui uma estrutura irregular, com o interior poroso e desuniforme. A superfície porosa aumenta a quantidade de umidade absorvida pela amostra, evidenciando a necessidade do processo de secagem para aumentar a eficiência do processo de queima e da liberação de energia.

5.7 – DETERMINAÇÃO DAS TEMPERATURAS CARACTERÍSTICAS DE COMBUSTÃO

A Tabela 4 mostra as temperaturas características de combustão do caroço de pequi, sendo elas as temperaturas de *burnout* e ignição, com base nos resultados da análise termogravimétrica feita em atmosfera inerte nas taxas de aquecimento de 5, 10, 20 e 40 °C/min.

Tabela 4: Temperaturas características de combustão do caroço de pequi.

Taxa de aquecimento (°C/min)	Temperatura (°C)	
	Ignição	<i>Burnout</i>
5	158,69	369,97
10	169,21	379,68
20	173,35	387,87

40	186,28	402,94
----	--------	--------

Observa-se um aumento na temperatura de ignição e *burnout* em função do aumento na taxa de aquecimento. Tal fato é causado pelo aumento da transferência de calor que ocorre para dentro do caroço de pequi, considerando que a biomassa é um mau condutor de calor, e que a pressão interna e a temperatura entre o interior e o exterior do resíduo aumentam conforme o aumento da taxa de aquecimento, o que causa uma liberação de materiais voláteis de forma mais lenta [69]. Essa liberação de material volátil influencia diretamente na temperatura de ignição do caroço de pequi, como observado na Figura 9, em que a desvolatilização ocorre entre 200 a 250 °C. Sugere-se então que a ignição ocorra nos componentes voláteis liberados pelo pequi, ocorrendo a quebra da hemicelulose, e em seguida a desnaturação da celulose, onde há a maior perda de massa, e por fim, a queima da lignina, ocorrendo a queima completa do resíduo [70,71]. O aumento na temperatura de *burnout* é explicado pelo fato que ao aumentar a taxa de aquecimento, o tempo da reação é reduzido e o processo de combustão acontece a temperaturas maiores, devido à transferência de calor e o menor teor de voláteis liberado durante o processo [72].

6. CONCLUSÃO

Verificou-se que o uso do caroço de pequi como fonte de energia térmica no processo de combustão é mais eficiente quando submetido ao processo de micronização, que aumenta a área de contato do resíduo e com uma secagem prévia do mesmo, pois a umidade diminui o poder calorífico superior, ocorrendo a perda de energia correspondente à entalpia de vaporização da água. Observa-se também que o pequi possui um poder calorífico considerável quando comparado com algumas biomassas convencionais, e na análise imediata, a partir do teor de cinzas, carbono fixo e cinzas, conclui-se que a combustão do pequi é rápida, tem ignição em uma temperatura mais baixa e possui uma baixa quantidade de inorgânicos no processo de queima.

A degradação das principais estruturas presentes no caroço de pequi (hemicelulose, celulose e lignina) foi verificada com a termogravimetria e confirmada na análise de calorimetria exploratória diferencial.

A análise elementar mostrou que o resíduo é constituído predominantemente por carbono. A quantidade de carbono e hidrogênio mostra-se adequada para aplicação como biomassa. O baixo teor de nitrogênio é um fator positivo, pois reduz a formação e liberação de compostos NO_x, causadores da chuva ácida e efeito estufa.

Calculou-se o poder calorífico inferior do caroço de pequi a partir do poder calorífico superior e o teor de hidrogênio, sendo esse obtido na análise elementar, verificou-se que o PCI é cerca de 10 % menor que o PCS, sendo o ideal para biomassas lignocelulósicas. Na termogravimetria em atmosfera inerte com várias taxas de aquecimento observou-se que com o aumento dessa, há um aumento na perda de massa da amostra, bem como na temperatura para que haja a degradação de seus componentes. A fluorescência de raios X, mostrou-se que a maior quantidade de inorgânicos corresponde ao carbono e potássio, e a menor de rubídio.

Com a microscopia eletrônica de varredura, observou-se que o caroço de pequi possui uma estrutura irregular, sendo seu interior altamente poroso. A superfície porosa observada, aumenta a quantidade de umidade que pode ser contida pela amostra, por possuir uma maior superfície de contato, aumentando assim a importância do processo de secagem. Por fim, a determinação das temperaturas de ignição e *burnout*, houve um aumento nas temperaturas características de combustão em função da taxa de aquecimento, sendo causada pelo aumento da transferência de calor que ocorre no resíduo. Outro fator a ser considerado é a quantidade de material volátil, que influencia diretamente na temperatura de ignição do pequi, como observado na termogravimetria em diferentes rampas de aquecimento.

Portanto, com todos os resultados obtidos, foi mais que comprovada a viabilidade do caroço de pequi como recurso energético para aplicação em processos de combustão.

REFERÊNCIAS

-
- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2018/2019. Disponível em: <<http://abrelpe.org.br/download-panorama-2018-2019/>>. Acesso em: 20/11/2021
- [2] MACIEL, Luciana Lima Lemos. Biomassa: uma fonte renovável para geração de energia elétrica no Brasil. Revista de Trabalhos Acadêmicos - Universo Campos dos Goytacazes, v. 1, n. 13, 2020.
- [3] BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL. Relatório Síntese BEN. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022>>. Acesso em: 22/11/2022
- [4] DE MORAES, Maria Joselma et al. Characterization of pequi shell (caryocar brasiliense camb.) For its use as a biomass/Caracterização da casca de pequi (caryocar brasiliense camb.) Para sua utilização como biomassa. Brazilian Journal of Development, v. 6, n. 5, p. 26689-26704, 2020.
- [5] BATISTA, Francine Oliveira; DE SOUSA, Romaildo Santos. Compostos bioativos em frutos pequi (caryocar brasiliense camb.) E baru (dipteryx alata vogel) e seus usos potenciais: uma revisão. Brazilian Journal of Development, v. 5, n. 7, p. 9259-9270, 2019.
- [6] MATTEI, Taíse Fátima; SILVA DA CUNHA, Marina. Emissão de gases do efeito estufa no Brasil: análise de curto e longo prazo. Revista em Agronegócio e Meio Ambiente, v. 14, n. 4, 2021.
- [7] MME. Energia no Mundo. Ministério de Minas e Energia. Disponível em:<<http://www.mme.gov.br/documents/10584/3580498/14+-+Energia+no+Mundo+-+Matri- zes+e+Indicadores+2017+-+anos+ref.+2015+-+16+%28PDF%29/60755215-705a-4e76-94ee-b27def639806;jsessionid=23A29A5505323A1DD0ED0E7D02E956E2.srv155>>. Acesso em: 22/11/2022.
- [8] DE MIRANDA, Ronaldo Leão; MARTINS, Eliane Maria; LOPES, Kamila. A potencialidade energética da biomassa no Brasil. Desenvolvimento Socioeconômico em Debate, v. 5, n. 1, p. 94-106, 2019.
- [9] DOS SANTOS GOUVEIA FILHO, Octávio. Produção de bio-óleo por pirólise catalítica de óleos vegetais. Revista Científica Fundação Osorio (ISSN: 2526-4818), v. 4, n. 1, 2019.
- [10] RODRIGUES, Jonatas Lino et al. Estudo da composição química de bio-óleo produzido a partir da pirólise rápida de lodo de estação de tratamento de efluentes utilizando espectrometria de massas de alta resolução. 2019.

-
- [11] SERRÃO, Alisson Caio Magalhães et al. Análise do processo de pirólise de sementes de Açaí (*Euterpe Oleracea*, Mart): Influência da temperatura no rendimento dos produtos de reação e nas propriedades físico-químicas do Bio-Óleo. *Brazilian Journal of Development*, v. 7, n. 2, p. 18200-18220, 2021.
- [12] ANSARI, Khursheed B. et al. Recent developments in investigating reaction chemistry and transport effects in biomass fast pyrolysis: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 150, p. 111454, 2021.
- [13] VIEIRA, Giovana Picoli. Estudo de pirólise catalítica de bagaço de malte em leito fixo. 2019.
- [14] FARIAS, Bruno Maués et al. Investigação cinética da pirólise de biomassa amazônica por termogravimetria. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 7, p. 49400-49418, 2020.
- [15] FERNANDES, Mariane Lissa; DE QUEIROZ, Dalton Pedroso. Pirólise de lixo eletrônico. *ANAIS DO ENIC*, n. 11, 2019.
- [16] NZIHO, Ange et al. The catalytic effect of inherent and adsorbed metals on the fast/flash pyrolysis of biomass: A review. *Energy*, v. 170, p. 326-337, 2019.
- [17] ALVAREZ, Jon et al. Improving bio-oil properties through the fast co-pyrolysis of lignocellulosic biomass and waste tyres. *Waste management*, v. 85, p. 385-395, 2019.
- [18] KABIR, G.; HAMEED, B. H. Recent progress on catalytic pyrolysis of lignocellulosic biomass to high-grade bio-oil and bio-chemicals. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 70, p. 945-967, 2017.
- [19] CARNEIRO, Elma. Cerrado - a flor do pequi. *Caliandra do Cerrado*. Disponível em: <<http://www.caliandrdocerrado.com.br/2010/03/cerrado-flor-do-pequi.html>>. Acesso em: 17/06/2021.
- [20] Odair Plantas. Pequi. Disponível em: <<http://www.odairplantas.com.br/muda/125/pequi>>. Acesso em: 17/06/2021.
- [21] SOUSA, Bruno Nogueira de et al. Composição química do óleo essencial de pequi (*Caryocar brasiliense* Cambess) e atividade nematicida no controle de *Meloidogyne javanica*. 2020.
- [22] CEASA - GO, Análise Conjuntural Anual 2021, Centrais de Abastecimento de Goiás S/A. Disponível em: < <https://www.ceasa.go.gov.br/files/ConjunturaAnual/2020/AnaliseConjuntural2020.pdf> >. Acesso em: 18/06/2021.

-
- [23] RODRIGUES, Mara Lina. Avaliação das características físico-químicas e dos compostos bioativos do azeite de pequi sob diferentes condições de aquecimento. 2017.
- [24] SEBRAE. O cultivo e o mercado do pequi, Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas. Disponível em: <<http://www.sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/o-cultivo-e-o-mercado-do-pequi,0966438af1c92410VgnVCM100000b272010aRCRD>>. Acesso em: 22/11/2021.
- [25] MARTINS, João Paulo Gonçalves et al. Study of pequi peel pyrolysis: Thermal decomposition analysis and product characterization. *Biomass and Bioenergy*, v. 149, p. 106095, 2021.
- [26] DE SOUSA, Erlânio Oliveira et al. Uso da farinha da torta residual da polpa do pequi (*Caryocar coriacium* Wittm) no desenvolvimento e caracterização de biscoito tipo sequilho. *Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas*, v. 15, n. 4, p. 632-643, 2021.
- [27] DE AZEVEDO PADILHA, Natan et al. Investigação preliminar das propriedades químicas dos resíduos do cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) através da técnica de espectroscopia de fluorescência de raio-X por energia dispersiva. *Scientia Naturalis*, v. 3, n. 1, 2021.
- [28] GODINHO, Emmanuel; SPADIM, Emanuel Rangel; DE LIMA CANEPPELE, Fernando. Potencial do uso da biomassa de cana-de-açúcar na geração de eletricidade no Brasil. *Revista Meio Ambiente e Sustentabilidade*, v. 10, n. 21, p. 93-104, 2021.
- [29] SENA, Julia Dutra et al. Co-Carbonização Hidrotérmica de Lodos de Esgoto e Resíduos Lignocelulósicos para Produção de Hidrochar. 2022.
- [30] DA SILVA MIRANDA, Mara Rúbia; VERAS, Carlos Alberto Gurgel. Aproveitamento de resíduos: um estudo da estimativa da energia de ativação do caroço de pequi para análise de viabilidade como fonte de energia limpa. *Brazilian Journal of Development*, v. 7, n. 10, p. 97292-97302, 2021.
- [31] HABITZREITER, Tiago Luis et al. Poder calorífico e análise econômica do uso total ou parcial da biomassa de eucaliptos. *Scientia Agraria Paranaensis*, v. 18, n. 3, p. 282-288.
- [32] SOUZA, Dayana Vieira de; SILVA, Brenda Monara Pereira da. Emprego de material lignocelulósico, oriundo do tratamento de resíduos de indústria cervejeira, para remoção de índigo blue em água. 2022.
- [33] REGIS, Diogo Machado. Utilização de biomassas lignocelulósicas visando extração de celulose e nanocelulose via hidrólise ácida. 2021.

-
- [34] LU, Jau-Jang; CHEN, Wei-Hsin. Investigation on the ignition and burnout temperatures of bamboo and sugarcane bagasse by thermogravimetric analysis. *Applied Energy*, v. 160, p. 49-57, 2015.
- [35] ZHANG, Yuanbo et al. Determination of ignition temperature and kinetics and thermodynamics analysis of high-volatile coal based on differential derivative thermogravimetry. *Energy*, v. 240, p. 122493, 2022.
- [36] DENG, Jun et al. Minimum ignition temperature of aluminium dust clouds via the Godbert–Greenwald furnace. *Process Safety and Environmental Protection*, v. 129, p. 176-183, 2019.
- [37] SAFAR, Michal et al. Catalytic effects of potassium on biomass pyrolysis, combustion and torrefaction. *Applied Energy*, v. 235, p. 346-355, 2019.
- [38] ALMAZROUEI, Manar; JANAJREH, Isam. Thermogravimetric study of the combustion characteristics of biodiesel and petroleum diesel. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 136, n. 2, p. 925-935, 2019.
- [39] VIANA, Nádia Alves. Aproveitamento energético de biomassas residuais florestais do cerrado para produção de gás de síntese por meio do processo de gaseificação. 2015.
- [40] COSTA, Ana Carolina Lopes Amaral. Caracterização físico-química da biomassa de tocos e raízes de clones de eucalipto para fins energéticos. 2019.
- [41] ANTUNES, E. C., ZUPPA NETO, T. O., ANTONIOSI, Filho, N. R., & CASTRO, S. S. Utilização do Pequi (*Caryocar brasiliense* Camb) como Espécie Recuperadora de Ambientes Degradados no Cerrado e Fornecedora de Matéria Prima para a Produção de Biodiesel. In: *I Congresso da Rede Brasileira de Tecnologia de Biodiesel*, Brasília, 2006
- [42] 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.
- [43] PALMA, Kelly Roberta de et al. Estudo da composição química, estrutural e térmica do bagaço e da palha da cana-de-açúcar e de seus pellets considerando as características de fusibilidade de suas cinzas. 2020.
- [44] LOUREIRO, Breno Assis et al. Rendimento gravimétrico da carbonização e caracterização qualitativa do carvão vegetal em clones de híbridos de *Corymbia* spp para uso industrial. *Ciência Florestal*, v. 31, p. 214-232, 2021.

-
- [45] JÚNIOR, Clériston Moura Vieira et al. Produção e análise do Syngas a partir do sabugo de milho. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 6, p. 33116-33123, 2020.
- [46] STRACKE, Marcelo Paulo et al. Cinza de casca de arroz como reservatório molecular de água para a produção de soja. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 1, p. 949-962, 2020.
- [47] MIOLA, Brígida et al. Aproveitamento energético dos resíduos de cascas de coco verde para produção de briquetes. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 25, p. 627-634, 2020.
- [48] NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S. *Dendroenergia: fundamentos e aplicações*. 2. Ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 199 p.
- [49] DA CRUZ, Marlons Lino et al. Estudo da eficiência energética de uma caldeira flamotubular em uma indústria de laticínios. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, v. 8, n. 2, p. 14015-01e, 2022.
- [50] SANTOS FILHO, Atenor. *Coeficiente de rendimento volumétrico na produção de carvão vegetal em uma carvoaria no Sudeste Paraense*. 2022.
- [51] LEONELLO, E. C.; ARRUDA, N. L. F. V.; PASSOS, J. R. S.; PROSDOCINI, A. B. P. Caracterização química da madeira de tocos e raízes de eucalipto. In: GUERRA, S. P. S. EU-FRADE JUNIOR, H. J. *Recuperação energética da biomassa de tocos e raízes de florestas plantadas*. Botucatu: Fepaf, 2019. p. 107-122.
- [52] FELIX, Geisllan J. et al. Reatores de leito fixo concorrente e fluidizado borbulhante na gaseificação da biomassa quando utilizados para geração de energia elétrica. *Revista Processos Químicos*, v. 15, n. 29, 2021.
- [53] SENA, Julia Dutra et al. *Co-Carbonização Hidrotérmica de Lodos de Esgoto e Resíduos Lignocelulósicos para Produção de Hidrochar*. 2022.
- [54] PROTASIO, Thiago de Paula et al. EFEITO DA IDADE E CLONE NA QUALIDADE DA MADEIRA DE *Eucalyptus* spp VISANDO À PRODUÇÃO DE BIOENERGIA. *Ciênc. Florest.*, Santa Maria, v. 24, n. 2, p. 465-477, 2014.
- [55] SANTO, CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO; LIMA, MARIANA DE JESUS. *PIRÓLISE DA CASCA DE CAFÉ: ESTUDO CINÉTICO E DE CONDIÇÕES OPERACIONAIS*.
- [56] AHMAD, Rabi Kabir et al. Exploring the potential of coconut shell biomass for charcoal production. *Ain Shams Engineering Journal*, 2021.

-
- [57] UMAR, H. A. et al. Characterisation of oil palm trunk and frond as fuel for biomass thermochemical. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2020. p. 012011.
- [58] ASTOLPHI, Luiza Pinatti; DA SILVA OLIVEIRA, Juliana; ACHON, Cali Laguna. Teor de umidade inicial e sua influência no processo de biossecagem de lodo. *Revista Científica ANAP Brasil*, v. 14, n. 34, 2021.
- [59] JAYA, Ahmad Adib Mohamad; JALAL, Nurfatin Azma Abdul; MEL, Maizirwan. Simulation Study of Biomass Gasification for Low Heating Value (LHV) Production.
- [60] ABELHA, Pedro; KIEL, Jaap. Techno-economic assessment of biomass upgrading by washing and torrefaction. *Biomass and Bioenergy*, v. 142, p. 105751, 2020.
- [61] AMORAS ORELLANA, Bruna Bárbara Maciel. Utilização de resíduos de biomassa do Distrito Federal para fins energéticos. 2019.
- [62] GALINA, Natália Ribeiro et al. Comparative study on combustion and oxy-fuel combustion environments using mixtures of coal with sugarcane bagasse and biomass sorghum bagasse by the thermogravimetric analysis. *Journal of the Energy Institute*, v. 92, n. 3, p. 741-754, 2019.
- [63] SANTOS, Vanuza Oliveira et al. Pirólise da biomassa Amazônica: parâmetros cinéticos e termodinâmicos usando análise termogravimétrica. 2022.
- [64] OLIVEIRA, Juliana Blume de. Avaliação da degradação térmica da biomassa vegetal pau ferro por análise termogravimétrica (TGA). 2021.
- [65] ZHONG, Dian et al. Characteristics and evolution of heavy components in bio-oil from the pyrolysis of cellulose, hemicellulose and lignin. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 157, p. 111989, 2022.
- [66] CHAKKOUR, Mouad et al. Towards widespread properties of cellulosic fibers composites: A comprehensive review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, p. 07316844221112974, 2022.
- [67] TEH, Jun Sheng et al. Thermal analysis technologies for biomass feedstocks: a state-of-the-art review. *Processes*, v. 9, n. 9, p. 1610, 2021.
- [68] DA SILVA, Sabrina Pereira; AKASAKI, Jorge Luis; SANCHES, Alex Otávio. Reaproveitamento do resíduo da madeira de eucalipto (RME) para a produção de energia sustentável. *Revista Científica ANAP Brasil*, v. 13, n. 28, 2020.

[69] SANTOS, Carolina Monteiro et al. Thermal conversion of defective coffee beans for energy purposes: Characterization and kinetic modeling. *Renewable Energy*, v. 147, p. 1275-1291, 2020.

[70] ISSAC, Miriam et al. Influence of biomass blends on the particle temperature and burnout characteristics during oxy-fuel co-combustion of coal. *Journal of the Energy Institute*, v. 93, n. 1, p. 1-14, 2020.

[71] GUO, Feihong et al. Thermogravimetric analysis on the co-combustion of biomass pellets with lignite and bituminous coal. *Energy*, v. 197, p. 117147, 2020.

[72] JIANG, Chunlong et al. Estudo experimental das características de ignição e combustão de esterco bovino em diferentes condições ambientais. *Energia*, v. 197, p. 117143, 2020