

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Instituto de Ciências Agrárias

Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais

Bárbara Lôpo de Lima

**CASCA DE PEQUI (*Caryocar brasiliense* CAMB.) COMO MATÉRIA-PRIMA PARA
BIOCOMBUSTÍVEIS SÓLIDOS: AVALIAÇÃO ENERGÉTICA E PRODUÇÃO DE
BRIQUETES**

Montes Claros

2025

Bárbara Lôpo de Lima

**CASCA DE PEQUI (*Caryocar brasiliense* CAMB.) COMO MATÉRIA-PRIMA PARA
BIOCOMBUSTÍVEIS SÓLIDOS: AVALIAÇÃO ENERGÉTICA E PRODUÇÃO DE
BRIQUETES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Florestais.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Colen

Coorientadora: Profa. Dra. Marina Donária Chaves Arantes

Montes Claros

2025

Lima, Bárbara Lôpo de.

L732c
2025 Casca de pequi (*Caryocar brasiliense* Camb.) como matéria-prima para biocombustíveis sólidos [manuscrito]: avaliação energética e produção de briquetes/
Bárbara Lôpo de Lima. Montes Claros, 2025.
73f. :il.

Dissertação (mestrado) - Área de concentração em Ciências Florestais.
Universidade Federal de Minas Gerais / Instituto de Ciências Agrárias.

Orientador: Fernando Colen
Banca examinadora: Alfredo Napoli, Edy Eime Pereira Baraúna.

Inclui referências: f. 34-40; 52-53; 70-71.

1. Biocombustíveis -- Teses. 2. Biomassa -- Densidade -- Teses. 3. Energia -- Fontes alternativas -- Teses. I. Colen, Fernando. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Ciências Agrárias. III. Título.

CDU: 620.9


ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Aos 18 dias do mês de julho do ano de dois mil e vinte e cinco, às 14:00 horas, sob a Presidência do Professor Fernando Colen, D. Sc. (Orientador – UFMG/ICA) e com a participação dos Professores Marina Donária Chaves Arantes, D. Sc. (Coorientadora - UFSJ) e Edy Eime Pereira Baraúna, D. Sc. (UFMG/ICA) e de Alfredo Napoli, D. Sc. (Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique), reuniu-se, presencialmente, a Banca de Defesa de Dissertação de **Bárbara Lôpo de Lima**, aluna do Curso de Mestrado em Ciências Florestais. Após a avaliação da referida aluna, a Banca Examinadora procedeu à publicação do resultado da defesa da Dissertação intitulada: **"Casca de Pequi (*Caryocar Brasiliense* Camb.) como Matéria-Prima para Biocombustíveis Sólidos: Avaliação Energética e Produção de Briquetes"**, sendo a aluna considerada **Aprovada**. E, para constar, eu, Professor Fernando Colen, Presidente da Banca, lavrei a presente ata que depois de lida e aprovada, será assinada por mim e pelos demais membros da Banca examinadora.


OBS.: A aluna somente receberá o título após cumprir as exigências do ARTIGO 74 do regulamento do Curso de Mestrado em Ciências Florestais, conforme apresentado a seguir:

Art. 74 – Para dar andamento ao processo de efetivação do grau obtido, o candidato deverá, após a aprovação de sua Dissertação e da realização das modificações propostas pela banca examinadora, se houver, encaminhar à secretaria do colegiado do Curso, com a anuência do orientador, no mínimo 3 (três) exemplares impressos e 1 (um) exemplar eletrônico da dissertação, no prazo de 60 (sessenta) dias.


Montes Claros, 18 de julho de 2025.

Documento assinado digitalmente
 **FERNANDO COLEN**
 Data: 22/07/2025 13:49:37-0300
 Verifique em <https://validar.jf.gov.br>

Fernando Colen
 Orientador

Documento assinado digitalmente
 **MARINA DONÁRIA CHAVES ARANTES**
 Data: 22/07/2025 13:25:59-0300
 Verifique em <https://validar.jf.gov.br>

Marina Donária Chaves Arantes
 Coorientador

Documento assinado digitalmente
 **EDY EIME PEREIRA BARAÚNA**
 Data: 23/07/2025 12:55:24-0300
 Verifique em <https://validar.jf.gov.br>

Edy Eime Pereira Baraúna
 Membro



Alfredo Napoli
 Membro

DEDICATÓRIA

À minha mãe, cuja ausência não diminui o quanto ela faria parte dessa conquista.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Fernando Colen, pela orientação atenta, pela paciência ao longo do processo e pelo apoio técnico e acadêmico que contribuíram para a realização deste trabalho.

À minha coorientadora, Prof.^a Dr.^a Marina Donária Chaves Arantes, sou grata pelas sugestões.

À Prof.^a Dr.^a Talita Baldin, meu sincero agradecimento não só pela ajuda técnica, mas também pelas palavras de incentivo e apoio ao longo da jornada. Sua confiança fez a diferença em muitos momentos.

Ao Prof. Edy Eime Pereira Baraúna, agradeço pelas contribuições importantes nas apresentações.

Ao Prof. Thiago Protássio, agradeço pelo acolhimento durante a visita técnica e pelas análises fundamentais para o desenvolvimento da pesquisa.

Ao técnico Everson de Souza Silva, minha eterna gratidão por toda ajuda prática nos experimentos e pela disposição em colaborar sempre que necessário.

Aos técnicos da infraestrutura que foram essenciais para o desenvolvimento e produção do equipamento usado nesse trabalho.

Aos meus colegas que estiveram ao meu lado durante essa caminhada, obrigada pelas conversas, pelo apoio, pela troca de ideias, pelos momentos de descontração e pela parceria nos desafios diários.

À FAPEMIG, ao Instituto de Ciências Agrárias da UFMG, ao corpo docente e administração, agrago por todo suporte e oportunidade de realização do mestrado.

RESUMO

A busca por fontes renováveis de energia tem estimulado o uso de resíduos orgânicos como matéria-prima para a produção de bioenergia. A cadeia produtiva do pequi (*Caryocar brasiliense* Camb.) desempenha importante papel econômico e social, em especial no estado de Minas Gerais. Entretanto, a comercialização do fruto gera uma quantidade expressiva de cascas que, se descartadas de forma inadequada, podem contribuir para a sobrecarga de sistema de manejo de resíduos e para a degradação ambiental. Com o intuito de valorizar esse subproduto, este estudo avaliou o potencial energético da biomassa da casca de pequi para confecção de briquetes em diferentes proporções de umidade (5%, 7,5% e 10%). Foram avaliadas propriedades físicas, mecânicas e térmicas da biomassa *in natura* em estudo, e como a umidade de produção e a temperatura de carbonização influenciam nas propriedades energéticas desses briquetes. As carbonizações foram realizadas em duas temperaturas finais (360°C e 480°C) com uma taxa de 1,5°C min⁻¹. Para verificar essa influência, foram determinados o rendimento gravimétrico com base na massa seca, análise imediata, poder calorífico superior (PCS), densidade aparente, densidade energética e índice de quebra. O experimento seguiu um delineamento inteiramente casualizado em arranjo fatorial, considerando a umidade de produção dos briquetes e a temperatura final da carbonização. A biomassa *in natura* apresentou um alto teor de material volátil (74,41%), de carbono fixo (22,69%) além de um poder calorífico de 14,23 MJ kg⁻¹, mostrando a eficácia do material para produção de energia. A análise química evidenciou 69,38% de extrativos, 10,27% de lignina e 20,35% de holocelulose. A análise termogravimétrica da casca relevou comportamento compatível com o de biomassas lignocelulósicas. Os briquetes produzidos com menor umidade apresentaram maior resistência mecânica. A carbonização a 480 °C resultou no aumento do teor de carbono fixo e do PCS dos briquetes, embora com menor rendimento gravimétrico. Os efeitos da umidade foram mais evidentes nas carbonizações a 360 °C, indicando uma interação dependente da temperatura. Os resultados deste estudo demonstram o potencial da casca de pequi como matéria-prima para a produção de biocombustíveis sólidos, promovendo o aproveitamento de resíduos agroindustriais e apoiando iniciativas voltadas à economia circular e alinhadas à transição energética de baixo carbono.

Palavras-chave: Biocombustíveis, densidade, fontes alternativas.

ABSTRACT

The search for renewable energy sources has stimulated the use of organic waste as raw material for bioenergy production. The pequi (*Caryocar brasiliense* Camb.) production chain plays an important economic and social role, especially in the state of Minas Gerais. However, the commercialization of the fruit generates a significant amount of peel that, if disposed of improperly, can contribute to the overload of waste management systems and environmental degradation. In order to add value to this by-product, this study evaluated the energy potential of pequi peel biomass for the production of briquettes at different moisture contents (5%, 7.5%, and 10%). The physical, mechanical, and thermal properties of the raw biomass under study were evaluated, as well as how production moisture and carbonization temperature influence the energy properties of these briquettes. Carbonization was performed at two final temperatures (360°C and 480°C) at a rate of 1.5°C min⁻¹. To verify this influence, the gravimetric yield based on dry mass, immediate analysis, gross calorific value (GCV), bulk density, energy density, and breakage index were determined. The experiment followed a completely randomized design in a factorial arrangement, considering the production moisture of the briquettes and the final carbonization temperature. The raw biomass had a high content of volatile material (74.41%), fixed carbon (22.69%), and a calorific value of 14.23 MJ kg⁻¹, showing the effectiveness of the material for energy production. Chemical analysis showed 69.38% extractives, 10.27% lignin, and 20.35% holocellulose. Thermogravimetric analysis of the bark revealed behavior compatible with that of lignocellulosic biomasses. Briquettes produced with lower moisture content showed greater mechanical resistance. Carbonization at 480 °C resulted in an increase in the fixed carbon content and PCS of the briquettes, although with lower gravimetric yield. The effects of moisture were more evident in carbonization at 360 °C, indicating a temperature-dependent interaction. The results of this study demonstrate the potential of pequi peel as a raw material for the production of solid biofuels, promoting the use of agro-industrial waste and supporting initiatives aimed at the circular economy and aligned with the low-carbon energy transition.

Keywords: Alternative sources, biofuels, density.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – (a) Pequi (<i>Caryocar brasiliense</i>); (b) Comunidade extrativista coletando frutos de pequi; (c) Pequizeiro; (d) Flor do pequi; (e) Processamento do fruto para produção de polpas e derivados alimentícios; (f) Festa do Pequi em Montes Claros, Minas Gerais – 2024.....	26
Figura 2 – Cascas descartadas no Mercado Municipal de Montes Claros – MG.....	28
Figura 3 – Resumo gráfico do estudo.....	44
Figura 4 – Equipamento confeccionado para a produção dos briquetes.	45
Figura 5 – Curvas termogravimétricas (a) e Derivadas da curva termogravimétrica (b) da biomassa da casca do pequi em diferentes razões de aquecimento.....	48
Figura 6 – Vista frontal (a) e superior (b) dos briquetes produzidos de biomassa de casca de pequi.	49
Figura 7 – Prensa manual utilizada na compactação da biomassa e produção dos briquetes. .	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Análise imediata da casca do pequi.	46
Tabela 2 – Marcha de carbonização em função do tempo e temperatura de carbonização.....	58
Tabela 3 – Valores médios e desvio padrão para rendimento gravimétrico, licor pirolenhoso e gases não condensáveis após carbonização dos briquetes.	60
Tabela 4 – Propriedades dos briquetes carbonizados	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BEN – Balanço Energético Nacional

ESG – *Environmental, Social, and Governance* (Ambiental, Social e Governança)

GEE – Gases de efeito estufa

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IRENA – Agência Internacional de Energia Renovável

ODS – Objetivos de desenvolvimento sustentável

RSU – Resíduos sólidos urbanos

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	14
INTRODUÇÃO, OBJETIVOS DA PESQUISA, REVISÃO DE LITERATURA E DESENVOLVIMENTO DA PRENSA BRIQUETADEIRA	14
1.1 Introdução	14
1.2 Objetivos.....	17
1.2.1 <i>Objetivo geral</i>	17
1.2.2 <i>Objetivos específicos</i>	17
1.3 Revisão de literatura	18
1.3.1 <i>A crescente demanda por fontes de energia renovável</i>	18
1.3.2 <i>Biomassa como fonte de energia renovável</i>	19
1.3.3 <i>Gestão de resíduos e seu aproveitamento para bioenergia</i>	20
1.3.4 <i>Densificação da biomassa</i>	23
1.3.5 <i>Espécie em estudo, atividade extrativa e aproveitamento energético de resíduos gerados</i>	25
1.3.6 <i>Características da biomassa lignocelulósica para produção de biocombustíveis</i>	30
1.3.7 <i>Processo de carbonização da biomassa lignocelulósica</i>	31
1.4 Desenvolvimento da Prensa Briquetadeira.....	33
Referências	34
CAPÍTULO 2	41
APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE CASCAS DE PEQUI NA PRODUÇÃO DE BRIQUETES	41
2.1 Introdução.....	42
2.2 Materiais e métodos.....	43
2.2.1 <i>Obtenção e caracterização da biomassa</i>	43
2.2.2 <i>Análise termogravimétrica da biomassa</i>	44
2.2.3 <i>Produção e avaliação dos briquetes</i>	44
2.2.4 <i>Análise estatística dos dados</i>	45
2.3 Resultados e discussões	46
2.3.1 <i>Caracterização química da biomassa</i>	46
2.3.2 <i>Análise termogravimétrica da biomassa</i>	47
2.3.4 <i>Densificação da biomassa</i>	49
2.3.5 <i>Análise de resistência dos briquetes</i>	50
2.4 Conclusão	51

Referências	52
CAPÍTULO 3	54
PROPRIEDADES ENERGÉTICAS DE BRIQUETES PRODUZIDOS A PARTIR DA CASCA DE PEQUI (<i>Caryocar Brasiliense</i> CAMB.): INFLUÊNCIA DA UMIDADE E DA TEMPERATURA DE CARBONIZAÇÃO	54
3.1 Introdução.....	55
3.2 Metodologia.....	56
3.2.1 <i>Material Utilizado</i>	56
3.2.2 <i>Carbonização dos briquetes e rendimentos da carbonização</i>	57
3.2.3 <i>Propriedades do Briquete Carbonizado</i>	59
3.2.4 <i>Análise Estatística</i>	60
3.3 Resultados.....	60
3.3.1 <i>Rendimentos da Carbonização dos briquetes da casca de pequi</i>	60
3.3.2 <i>Propriedades do Briquete Carbonizado</i>	61
3.4 Discussão.....	64
3.4.1 <i>Rendimento da Carbonização</i>	64
3.4.2 <i>Propriedades do Briquete Carbonizado</i>	65
3.5 Conclusão	68
Referências	70
Limitações do estudo	72
Considerações finais.....	72
Sugestões para futuros trabalhos	72

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO, OBJETIVOS DA PESQUISA, REVISÃO DE LITERATURA E DESENVOLVIMENTO DA PRENSA BRIQUETADEIRA

1.1 Introdução

A maior parte das emissões de gases de efeito estufa (GEE), que contribuem para o aquecimento global, é derivada da queima de combustíveis fósseis usados para geração de energia. Nesse sentido, a transição para fontes de energia renováveis, como energia solar, eólica, hidrelétrica e da biomassa, é uma medida essencial para diminuir as emissões de carbono e para os países se ajustarem às mudanças climáticas. As Nações Unidas estabeleceram uma série de Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) que abordam estratégias para lidar com as mudanças climáticas até o ano de 2030, destacando a inovação tecnológica, o crescimento econômico inclusivo e sustentável e a energia acessível e ecologicamente correta (RAHMAN; ALAM; VELAYUTHAM, 2022).

Os países em desenvolvimento, ao aproveitar o seu potencial de geração de energia renovável podem fazer progressos significativos rumo à consecução dos ODS até 2030, em especial ao OD7 - Energia limpa e acessível (KYEI; BOATENG; FRIMPONG, 2025). Nessa perspectiva, a bioenergia surge como uma solução ambientalmente benéfica e potencialmente revolucionária para a crescente demanda energética. Mesmo sendo favorável ambientalmente, a produção de biocombustíveis ainda requer o uso de algumas culturas alimentares, o que gera um desacordo sobre o uso desses recursos (SUBRAMANIAM; AL-MULALI, 2024), como por exemplo a cana-de-açúcar e o milho. Nesse sentido, a utilização de resíduos torna-se uma opção atrativa. A gestão integrada de resíduos sólidos urbanos (RSU) é essencial para o estabelecimento de um ambiente sustentável, uma vez que alivia o consumo de recursos naturais e as emissões de GEE. Destaca-se que a valorização de resíduos os transformando em fontes de energia contribui para o estabelecimento de uma economia circular ao passo que transforma subprodutos em novas oportunidades de negócio sustentáveis.

O extrativismo sustentável desempenha um papel essencial ao proporcionar meios de subsistência para diversas comunidades no estado de Minas Gerais (CARNEIRO et al., 2023). O pequi (*Caryocar brasiliense* Camb.) é o recurso natural mais importante na cultura material e imaterial do Norte de Minas e sua apreciação gastronômica garante uma expressividade na economia, na sociedade e na cultura da região (SILVA; TUBALDINI, 2013). No entanto, a comercialização de produtos na região norte do estado tende a aumentar significativamente a geração de resíduos. Caso esses subprodutos não sejam devidamente gerenciados, podem se

tornar um problema ambiental relevante. Diante disso, torna-se essencial identificar e implementar estratégias sustentáveis que possibilitem o reaproveitamento eficiente desses materiais, sendo uma dessas estratégias a produção de biocombustíveis sólidos.

A briquetagem de biomassa é uma tecnologia de densificação, usada para melhorar o potencial de energia da biomassa para aplicações de aquecimento doméstico e geração de energia (CARTER et al., 2018; OBI; PECENKA; CLIFFORD, 2022). Esse processo envolve a compactação da biomassa o que geralmente aumenta a densidade aparente, melhora seu manuseio e logística, além de otimizar as propriedades térmicas da biomassa (OBI; PECENKA; CLIFFORD, 2022). Ao empregar as cascas de pequi geradas pela atividade extrativa em briquetes densificados, tem-se uma forma eficiente de dar destino a um resíduo que geralmente seria descartado. Essa solução está em sintonia com os princípios da economia circular, ao evitar o desperdício, agregar valor a um subproduto e reduzir os impactos ambientais relacionados ao acúmulo de resíduos.

Após o adensamento da biomassa, os briquetes produzidos podem ser carbonizados. Esse processo termoquímico pode ser usado como uma forma de otimizar as propriedades energéticas da biomassa. Estudos mostram que a carbonização da biomassa aumenta o teor de carbono fixo, reduz a matéria volátil e eleva o poder calorífico da biomassa, melhorando sua eficiência energética (WEBER; QUICKER, 2018; QIN et al., 2022). Pesquisas que comparam briquetes *in natura* e briquetes carbonizados evidenciam que os briquetes carbonizados apresentam maior potencial energético em razão dos maiores teores de carbono fixo e poder calorífico, porém apresentam baixa resistência mecânica (PROTÁSIO et al., 2012). Nesse contexto, a carbonização dos briquetes produzidos a partir das cascas de pequi surge como uma estratégia para agregar valor energético ao resíduo.

O uso mais intenso da lenha como fonte de energia é observado em áreas rurais e de baixa renda, onde a população costuma acessar esse recurso sem custos, por meio da coleta de galhos ou corte de árvores (NEGI et al., 2018). Pesquisas indicam que, nessas localidades, o consumo médio de lenha por habitante é de aproximadamente 1.297 ± 952 kg por ano, situação na qual a variação entre os indivíduos vai de 150 até 4.000 kg por pessoa ao ano (GIODA et al., 2022). Frente a esse elevado consumo, torna-se necessário promover alternativas energéticas mais sustentáveis, com o objetivo de reduzir a dependência da lenha como principal fonte de energia em comunidades rurais.

Diante do potencial ainda pouco explorado dos resíduos do extrativismo do pequi, este trabalho propõe o aproveitamento da casca de pequi na forma de briquetes como alternativa energética para comunidades do Cerrado. Nesse sentido, esta pesquisa dialoga com as práticas

das comunidades locais que já fazem uso do pequi para subsistência. A possibilidade de transformar o resíduo da casca em briquetes visa agregar valor à sua cadeia produtiva ao passo que abre caminhos para a bioeconomia sem romper com os modos de vida dessas populações. Os biocombustíveis poderiam ser utilizados na substituição da lenha convencional em residências ou poderiam ser comercializados gerando renda para as comunidades. Pretende-se fornecer subsídios técnicos para o uso eficiente da casca de pequi como biocombustível sólido, promovendo o desenvolvimento socioambiental em regiões extrativistas do Cerrado.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar o potencial energético da casca de pequi (*Caryocar brasiliense* Camb.), visando o aproveitamento sustentável desse resíduo por comunidades extrativistas do Cerrado.

1.2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar a biomassa da casca de pequi, com foco em parâmetros físicos, químicos e térmicos relevantes para seu uso energético, a fim de entender seu comportamento como matéria-prima.
- Confeccionar uma briquetadeira manual de baixo custo e produzir briquetes utilizando diferentes níveis de umidade (5%, 7,5% e 10%), com o objetivo de avaliar a influência da umidade na compactação, densidade e integridade física dos briquetes.
- Realizar a carbonização dos briquetes em duas temperaturas finais (360 °C e 480 °C), buscando entender como a temperatura e umidade de produção dos briquetes influenciam a qualidade do material produzido e avaliar os produtos da carbonização, a fim de verificar a viabilidade de uso como combustível alternativo.

1.3 Revisão de literatura

1.3.1 A crescente demanda por fontes de energia renovável

O crescimento populacional, aliado ao avanço da urbanização e à intensificação da mecanização nos setores industriais, têm provocado um aumento na demanda global por energia. Como consequência, houve uma redução nas reservas de combustíveis fósseis, o que demonstra a necessidade de se buscar fontes alternativas e renováveis para suprir essa crescente demanda (PARIMALA DEVI et al., 2025; CHATUANRAMTHARNGHAKA et al., 2024). Essa busca também está diretamente ligada à transição energética, desempenhando um papel fundamental na mitigação das mudanças climáticas (VIGLIONI; CALEGARIO; FERREIRA, 2025).

A crise climática, por sua vez, está relacionada ao uso de combustíveis fósseis, como carvão mineral, petróleo e gás natural, que são responsáveis por aproximadamente 75% das emissões globais de GEE (ROSS, 2025). Para conter os impactos das mudanças climáticas, é fundamental ampliar o uso de fontes renováveis de energia, elemento chave na transição para uma economia de baixo carbono (PRZYCHODZEN; PRZYCHODZEN, 2020). Nesse cenário, diversos países têm firmado compromissos internacionais para enfrentar os desafios energéticos e climáticos (ULLAH et al., 2025).

Um dos marcos mais relevantes para esse esforço conjunto é a adoção do Acordo de Paris, que estabelece metas como limitar o aumento da temperatura global a menos de 2 °C, com esforços para alcançar 1,5 °C; fortalecer a resiliência de economias, ecossistemas e comunidades; e garantir apoio técnico e financeiro aos países em desenvolvimento (ULLAH et al., 2025). De maneira complementar, a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável estabelece, entre seus 17 ODS, o ODS 7 – Energia Limpa e Acessível – e o ODS 13 – Ação contra a Mudança Global do Clima – reforçando a importância da transição energética no combate às mudanças climáticas.

Além das ações governamentais, o setor privado também tem assumido um papel cada vez mais relevante nesse processo. Atualmente, muitas empresas têm incorporado os princípios ambientais, sociais e de governança (ESG) em suas estratégias de longo prazo. Para isso, é necessário que ajustem suas operações e direcionem recursos para iniciativas com menor impacto ambiental. Nesse contexto, os chamados “títulos verdes” ganham relevância, pois representam uma importante ferramenta de financiamento para projetos sustentáveis (ZHANG et al., 2023). Ao utilizar esse mecanismo, as empresas conseguem apoiar ações ambientalmente

responsáveis e, ao mesmo tempo, fortalecer modelos de negócio alinhados ao desenvolvimento sustentável (ZHANG et al., 2023).

No cenário nacional, o Brasil se destaca por ter uma matriz elétrica majoritariamente composta por fontes renováveis, com foco para a geração hidrelétrica. Em 2023, a energia proveniente de hidrelétricas respondeu por 58,9% da oferta interna de eletricidade, incluindo quase toda a energia importada da Usina de Itaipu (BEN, 2024). No total, as fontes renováveis corresponderam a 89% da eletricidade disponível no país, considerando tanto a produção interna quanto as importações, que também têm origem predominantemente renovável (BEN, 2024). Apesar de esse cenário ser mais positivo em comparação ao de muitos países, que ainda dependem fortemente de fontes fósseis, é fundamental reconhecer que mesmo as fontes renováveis podem gerar impactos ambientais, portanto, promover a conservação de energia, o uso eficiente dos recursos e a adoção de práticas sustentáveis é cada vez mais necessário e merece atenção especial (ENVIROLITERACY, 2024).

1.3.2 Biomassa como fonte de energia renovável

A biomassa é uma fonte de energia primária não fóssil, constituída por matéria orgânica de origem vegetal ou animal. Ela contém energia armazenada na forma química e pode ser convertida em fonte renovável de baixo impacto ambiental e múltiplas aplicações (AHMADIPOUR et al., 2025). Por ser renovável e versátil, a biomassa representa uma alternativa estratégica para diminuir o uso de combustíveis fósseis, contribuindo para o suprimento das demandas energéticas (ERIXNO et al., 2022).

Em termos de sua origem, a biomassa utilizada para fins energéticos pode ser agrupada em três categorias principais: a biomassa energética florestal, que inclui seus produtos, subprodutos e resíduos; a biomassa energética proveniente da agropecuária, abrangendo culturas energéticas e os resíduos e subprodutos das atividades agrícolas, agroindustriais e pecuárias; e os resíduos urbanos (BEN, 2024). A utilização da biomassa energética é estratégica devido à dispersão de recursos por todo o território, relacionada à ocupação territorial. Além disso, essa fonte é altamente promissora para o futuro, impulsionada pelos avanços tecnológicos na conversão de energia, pelo aumento da produção excedente e pelas mudanças climáticas em curso (BAMISILE et al., 2023).

Muitos países estão utilizando cada vez mais a biomassa como fonte alternativa de energia renovável. De acordo com a publicação “Estatísticas da capacidade de produção de energia renovável em 2025” da Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA), a capacidade global de bioenergia atingiu quase 151 GW em 2024, com a Ásia respondendo pela

maior parte com 64.434 MW, liderada pela China com 32.564 MW. A capacidade de energia de biomassa na América do Sul é liderada pelo Brasil, que aumentou de 14.079 MW, em 2015, para 17.807, em 2024, marcando um crescimento de quase 27% em cinco anos. Além disso, a capacidade do país é 24 vezes maior que a do Uruguai, segundo colocado no ranking.

Embora o aproveitamento da biomassa para geração de energia ofereça inúmeras vantagens, fatores como disponibilidade, custo e qualidade da matéria-prima, despesas de transporte e sistemas logísticos, afetam sua eficiência (DUC BUI et al., 2023). Nesse sentido, tecnologias de transformação são requeridas, como a compactação, que é capaz de converter matérias-primas amorfas e de baixa densidade em combustíveis sólidos eficientes sob pressão mecânica melhorando, assim, a eficiência do armazenamento e transporte (YANG et al., 2025).

1.3.3 Gestão de resíduos e seu aproveitamento para bioenergia

O aumento na quantidade de RSU tem sido impulsionado pelo crescimento populacional global, o processo de urbanização e o desenvolvimento industrial (KHAN et al., 2022). Em concordância com a Lei Nº 12.305/2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos, tem-se que os resíduos sólidos referem-se a materiais, substâncias, objetos ou bens resultantes das atividades humanas na sociedade, que necessitam de uma disposição final apropriada, visto que podem estar no estado sólido, semissólido, ou mesmo na forma de gases contidos em recipientes e líquidos com características que impossibilitam seu descarte adequado na rede pública de esgotos ou em corpos d'água. Soluções técnicas ou econômicas viáveis são necessárias para lidar com esses resíduos, considerando a melhor tecnologia disponível.

Nesse contexto, a valorização energética dos RSU pode desempenhar um papel fundamental para uma abordagem eficaz, priorizando as estratégias de prevenção, reutilização e reciclagem nos sistemas de gestão. Essas medidas não apenas minimizam o impacto ambiental, mas também maximizam o potencial de aproveitamento dos recursos e promovem sua gestão sustentável (SCARLAT; FAHL; DALLEMAND, 2019). Além disso, a Lei Nº 12.305/2010, estabelece a gestão integrada de RSU, que pode ser descrita como um conjunto de ações voltadas para a busca de soluções para os resíduos sólidos, de forma a considerar as dimensões política, econômica, ambiental, cultural e social, com controle social e sob a premissa do desenvolvimento sustentável.

Na América Latina, a gestão de resíduos apresenta desafios como a governança ambiental deficiente e a falta de práticas eficazes de gestão integrada de resíduos. A escassez de investimentos financeiros nesse setor dificulta a contratação de mais trabalhadores e a implementação de novas tecnologias, tornando essas iniciativas praticamente inviáveis

(HETTIARACHCHI et al., 2018). Porém, considerando a projeção de crescimento contínuo da população, urbanização em curso, mudanças nos padrões de vida e hábitos de consumo, espera-se um aumento de aproximadamente 69,15% na geração de resíduos até o ano de 2050, com destaque para o aumento dos RSU (KAZA et al., 2018). Nesse sentido, a gestão integrada de resíduos sólidos é essencial para mitigar os desafios relacionados à geração e tratamento de resíduos, especialmente diante desse cenário, sendo uma prática ambientalmente sustentável (COELHO et al., 2023).

Diante das crescentes dificuldades na gestão adequada dos resíduos lignocelulósicos, torna-se essencial explorar rotas tecnológicas que permitam seu aproveitamento energético e agregação de valor (GONTARD et al., 2018). Os três métodos principais para converter as biomassas lignocelulósicas em energia são a combustão direta, conversão termoquímica e conversão bioquímica (SAXENA; ADHIKARI; GOYAL, 2009).

A combustão direta da lignocelulose gera eletricidade, mas sua eficiência é limitada pelo alto teor de oxigênio. A conversão termoquímica pode ocorrer principalmente por meio da gaseificação, pirólise e hidrólise, processos nos quais há a quebra da estrutura densa da lignocelulose, reduzindo a polimerização e o teor de oxigênio, aumentando o valor da biomassa (YANG et al., 2024). A gaseificação converte polímeros em gases combustíveis (CO, H₂ e hidrocarbonetos leves) sob altas temperaturas, enquanto a pirólise decompõe a biomassa em carvão, bio-óleo e gases em ambiente com pouco ou nenhum oxigênio. Já hidrólise quebra a lignocelulose em moléculas menores com ajuda da água (YANG et al., 2024). A conversão bioquímica utiliza microrganismos e enzimas para formar compostos como metano e etanol. Os produtos da conversão podem estar nas fases gasosa, líquida e sólida, sendo os gases usados como combustível ou para produção de H₂ via reforma catalítica (YANG et al., 2024).

Na combustão direta da biomassa, a energia química armazenada fotossinteticamente é convertida em calor e, mesmo que esse processo gere CO₂, os percentuais gerados ainda são cerca de 20% menores do que os emitidos a partir da queima dos combustíveis fósseis (FROESE et al., 2010; LAM et al., 2019; YU et al., 2021). Nesse processo, são usadas usinas combinadas de calor e energia alimentadas por biomassa e incluem uma caldeira, uma turbina a vapor de condensação e um gerador elétrico (CHEN et al., 2021). A combustão da biomassa gera calor no interior da caldeira, onde a água é aquecida e transformada em vapor, conforme o ciclo Rankine. Esse vapor, em alta pressão, é então direcionado para uma turbina, onde se expande e realiza trabalho mecânico. Após esse processo, a pressão do vapor é reduzida e ele passa por um condensador, retornando ao estado líquido para reinício do ciclo (YU et al., 2021).

Na gaseificação da biomassa, o gás de síntese resultante pode ser queimado para produzir calor ou sintetizado para produzir combustíveis líquidos para transporte (HUYNH; KONG, 2013). Esse processo envolve diferentes agentes de gaseificação, mas o ar é o mais comum na indústria, porém resulta em gás com poder calorífico baixo, adequado apenas para aplicações de calor e energia (CANABARRO et al., 2013). No processo de gaseificação, estudos mostram que a redução do tamanho das partículas de biomassa aumenta o rendimento do gás produzido quase 16%, a eficiência da gaseificação diminui à medida que o teor de umidade aumenta e que maiores temperaturas de gaseificação levam a maiores eficiências energéticas do gás produzido (ZHANG et al., 2012; MOHAMMED et al., 2012; KERN; PFEIFER; HOFBAUER, 2013).

A pirólise consiste na decomposição térmica da matriz orgânica que pode obter produtos sólidos, líquidos e gasosos e que depende de vários fatores, como a composição do material lignocelulósico, a taxa de aquecimento, tempo de carbonização, assim como das quantidades de celulose, hemicelulose e lignina presentes na biomassa, o que implica em grande variação na eficiência entre os diferentes materiais e processos empregados (CANABARRO et al., 2013). Estudos sobre a pirólise de diferentes biomassas mostraram que maiores teores de lignina na biomassa produzem mais produto sólido e que altas temperaturas apresentam mais carbono e estabilidade térmica (SAHOO et al., 2021; PATRA et al., 2021).

A conversão bioquímica a partir da digestão anaeróbia, é um processo que resulta na produção de biogás – uma mistura formada principalmente por metano e dióxido de carbono, e que conter uma pequena quantidade de impurezas – em ambientes sem oxigênio por meio da ação de microrganismos (KAINTHOLA; KALAMDHAD; GOUD, 2019). Além da recuperação de energia de biogás, o processo gera como subproduto um biofertilizante que pode substituir fertilizantes químicos. Do ponto de vista técnico, destaca-se pela flexibilidade no uso de diferentes substratos e pela possibilidade de integração com outras fontes renováveis (OSMAN et al., 2021).

Outra rota bioquímica importante é a fermentação alcoólica, utilizada na produção de bioetanol. Essa fermentação é impulsionada por leveduras, capazes de converter açúcares simples em etanol e dióxido de carbono (OSMAN et al., 2021). Estudos sobre o bioetanol de segunda geração 2G mostram seu potencial promissor, no entanto, para que esse combustível se torne competitivo em relação aos combustíveis fósseis, é necessário reduzir seus custos de produção (ROSALES-CALDERON; ARANTES, 2019).

No processo de gestão e aproveitamento de resíduos lignocelulósicos, a briquetagem se destaca como uma estratégia de valorização eficiente, capaz de contribuir para a superação dos

desafios energéticos globais. Além disso, evidencia-se tanto vantagens econômicas quanto benefícios ambientais (BOT et al., 2022; ROMAN; GRZEGORZEWSKA, 2024). Os briquetes são combustíveis cuja conversão energética ocorre por meio da queima direta, podendo ser usados para aquecimento e cozimento, tanto para uso doméstico quanto industrial (MARREIRO et al., 2021). Muitos estudos sobre briquetes são conduzidos com diferentes tipos de biomassas, principalmente resíduos lignocelulósicos. É comum o uso de materiais como caule, casca, folhas, palha, madeira e serragem, provenientes de espécies como eucalipto, pinus, e resíduos de madeira cortada. Também são frequentes as combinações de casca de milho, sabugo, palha e outras biomassas, como casca de mandioca e de dendê (RASLAVIČIUS, 2012; ARAÚJO et al., 2016; MORALES-MÁXIMO et al., 2020; KPALO et al., 2020; WAHEED; AKOGUN, 2021).

Para integrar os resíduos lignocelulósicos à economia circular, é fundamental adotar uma abordagem intersetorial que conecte o conhecimento científico às oportunidades de negócio, o que exige a criação de sinergias locais entre cadeias produtivas agroindustriais, setores tradicionais de alimentos e outras indústrias, promovendo o uso eficiente de recursos (GONTARD et al., 2018). Nesse contexto, os avanços tecnológicos nas rotas de conversão da biomassa tornam-se essenciais para viabilizar esse aproveitamento integrado e sustentável dos resíduos lignocelulósicos (CHAUDHARY et al., 2025).

1.3.4 Densificação da biomassa

A densificação da biomassa é uma técnica adotada em diversos países como uma das alternativas mais promissoras para a produção de bioenergia, e consiste em compactar a biomassa em uma forma uniforme e predefinida, o que resulta na redução do seu volume original e em um aumento da densidade aparente. Esse processo facilita significativamente o manuseio, transporte e armazenamento da biomassa, rearranjando as partículas de matéria-prima e promovendo o intertravamento entre as partículas por meio de processos mecânicos (OBI et al., 2023).

Ao densificar a biomassa, pode-se obter briquetes e pellets (SANCHEZ-ROQUE et al., 2025). Esse processo proporciona maior densidade energética, resultando em uma qualidade aprimorada da composição através da aglutinação dos componentes. Além disso, possibilita a adaptação do produto às tecnologias específicas de conversão de energia (TUMULURU et al., 2011). Biomassas provenientes de diversas fontes, como resíduos agrícolas, dejetos animais, produtos florestais e resíduos sólidos urbanos, têm sido compactada em forma de briquetes e pellets, alcançando diferentes níveis de eficácia, sendo fortemente recomendados para

combustão em países com alto potencial agrícola, podendo desempenhar um papel significativo no cenário energético, particularmente em comunidades rurais (OBI et al., 2023; BOT; TAMBA; SOSSO, 2024).

Condições de processamento, como tempo, temperatura e umidade durante a compressão, bem como aditivos e ligantes, podem alterar as propriedades mecânicas do produto densificado (BAJWA et al., 2018). Estudos mostram que as condições ideais para fabricação de pellets e briquetes de alta qualidade incluem o condicionamento a um teor de umidade de 15 a 20% (base úmida) ou o pré-aquecimento a 75 °C com umidade de 10 a 15%, pois atingir uma temperatura de transição vítrea média de 75 °C é essencial para ativar os componentes de ligação dos materiais celulósicos (BAJWA et al., 2018).

Após a briquetagem, outras características também devem ser analisadas, a fim de verificar se o material realmente apresenta desempenho adequado para aplicações energéticas. Nesse sentido, as características mais importantes são a facilidade de manuseio e o poder calorífico, parâmetros que afetam a competitividade dos biocombustíveis sólidos no mercado, e se relacionam diretamente às propriedades térmicas e mecânicas (SANCHEZ-ROQUE et al., 2025).

Pesquisas têm explorado a combinação de diferentes tipos de biomassa na produção de briquetes com o objetivo de melhorar suas propriedades energéticas, especialmente o poder calorífico. Os briquetes podem ser produzidos a partir de uma única matéria-prima ou por meio da mistura de diversos resíduos agroindustriais, porém a combinação permite unir as características físicas e químicas dos materiais, resultando em briquetes de maior qualidade e melhor desempenho energético (SANCHEZ-ROQUE et al., 2025). Além disso, muitos dos resíduos com os quais os briquetes são produzidos, também podem ser usados aglutinantes, que influenciam a densidade e características da combustão (SANCHEZ-ROQUE et al., 2025).

Parâmetros como tamanho das partículas, densidade do biocombustível sólido e durabilidade são importantes de serem controlados, garantindo a qualidade mecânica do produto final (OSSEI-BREMANG et al., 2024; SANCHEZ-ROQUE et al., 2025). O formato e o tamanho das partículas da biomassa lignocelulósica afetam diretamente a área de superfície para transferência de calor assim como o comportamento do fluxo das partículas de biomassa, por isso, matérias-primas com diferentes granulometrias podem ter diferentes eficiências de conversão (CAI et al., 2017). Para otimizar esse desempenho, é comum realizar um pré-tratamento visando a redução do tamanho das partículas, uma vez que quanto menor a granulometria, maior a compactação e, conseqüentemente, a resistência do combustível sólido obtido (LABBÉ et al., 2020). Além disso, tratamentos como pré-tratamento por micro-ondas,

explosão a vapor e adição de ligantes, podem ser empregados para melhorar as características de durabilidade dos materiais (GAO et al., 2017), pois tendem a liberar a lignina da biomassa para melhorar a adesão entre suas partículas (BAJWA et al., 2018).

A densidade aparente é a razão entre a massa das partículas de biomassa e o volume total das partículas de biomassa, incluindo o volume do espaço poroso entre e dentro das partículas de biomassa (CAI et al., 2017). A densidade aparente de um biocombustível sólido é fundamental no projeto do sistema logístico para seu manuseio e transporte e está relacionada ao teor de umidade, densidade das partículas, procedimento da compactação e densidade aparente (BAJWA et al., 2018).

A qualidade do biocombustível está diretamente relacionada às características da matéria-prima, ao processo de densificação e aos parâmetros adotados durante a carbonização (SANCHEZ-ROQUE et al., 2025). Em muitos países, os briquetes já vêm substituindo o uso da lenha tradicional devido a suas vantagens (DINESHA; KUMAR; ROSEN, 2019) e, diante da previsão de crescimento de 60% na produção agrícola global entre 2005 e 2050, o aproveitamento desses resíduos para a fabricação de briquetes pode contribuir significativamente para atender à demanda energética em atividades residenciais como o aquecimento e o preparo de alimentos (RAO et al., 2012; PARDEY et al., 2014), fortalecendo a economia regional. Por isso, é fundamental o desenvolvimento de pesquisas voltadas à caracterização de biomassas com potencial para uso energético. Ressalta-se que a otimização das propriedades da biomassa densificada depende da interação entre a composição química do material, o uso de aditivos, as condições de processamento e os pré-tratamentos aplicados (SANCHEZ-ROQUE et al., 2025).

1.3.5 Espécie em estudo, atividade extrativa e aproveitamento energético de resíduos gerados

O Cerrado é o segundo maior bioma brasileiro, ocupando quase 25% do território, com uma biodiversidade rica e complexa, com mais de 1.000 espécies de árvores, entre as quais as frutíferas ocupam lugar de destaque na riqueza do ecossistema (FERREIRA et al., 2025). Parte do Cerrado, se situa na região norte de Minas Gerais. O norte de Minas Gerais, conhecido como Gerais, é formado por 89 municípios, onde moram os chamados geraizeiros, comunidades tradicionais que se concentram na região de transição entre o Cerrado e a Caatinga, dispersos pelo norte do estado (CEDEFES, 2022).

Nessa região, o agroextrativismo desempenha uma função crucial, relacionada aos valores de trabalho, acesso à terra para agricultores familiares e estratégias comerciais que visam a conservação ambiental. Em certos casos, os produtores coletam, processam e vendem

os frutos por meio de iniciativas coletivas em agroindústrias e cooperativas locais (DE MELO; CANGUSSU; ACYPRESTE, 2023). O pequi (Figura 1a), fruto nativo, é considerado o símbolo do Cerrado brasileiro. O fruto contém 75–84% de casca, 14–16% de endocarpo espinhoso, 4–7% de polpa e 0,5–1% de amêndoa, cujas quantidades variam de acordo com a região (NASCIMENTO-SILVA; NAVES, 2019; MORENO et al., 2025) e é amplamente explorado na região norte mineira (Figura 1b).

O pequi pode ser encontrado nas regiões da Amazônia, Caatinga, Cerrado e Mata Atlântica, com distribuição predominante nas regiões central e sudeste do Cerrado. Entre 16 espécies que compõem o gênero *Caryocar*, três se destacam (*C. brasiliense*, *C. villosum* e *C. coriaceum*), devido à importância econômica para famílias em pequenas comunidades do Cerrado brasileiro (GUEDES; ANTONIASSI; DE FARIA-MACHADO, 2017).

O pequizeiro (Figura 1c) é uma árvore que pode atingir 11 metros de altura e 83 cm de DAP (diâmetro à altura do peito, medido a 1,30 m do solo) na idade adulta. Seu tronco apresenta casca áspera, rugosa, fissurada e de coloração cinza-escura. A copa é composta por galhos longos, espessos e levemente inclinados. Suas flores (Figura 1d) têm coloração branco-amarelada e as folhas são compostas, trifoliadas e opostas, com folíolos ovais, verdes, brilhantes, sem presença de pelos ou glândulas. As margens das folhas podem ser serrilhadas (GARCIA et al., 2024).

Figura 1 – (a) Pequi (*Caryocar brasiliense*); (b) Comunidade extrativista coletando frutos de pequi; (c) Pequizeiro; (d) Flor do pequi; (e) Processamento do fruto para produção de polpas e derivados alimentícios; (f) Festa do Pequi em Montes Claros, Minas Gerais – 2024.





Fotos: (1a) André Dib/WWF; (1b) André Dib/WWF; (1c) Lilian Brandt/Cerratinga; (1d) Bento Viana/ISPN); (1e) André Dib/WWF; (1f) Fabio Marcal/Tempo.

Os frutos do pequi possuem coloração verde e contêm de um a quatro caroços. O mesocarpo interno, que envolve as sementes, apresenta coloração amarela, consistência pastosa, textura farinácea e é rico em óleo. Dessa polpa oleosa é extraído o conhecido azeite de pequi, amplamente utilizado como tempero em pratos típicos de diversas regiões brasileiras. Quando maduros, os frutos exalam um aroma característico e marcante (RAMOS et al., 2001; GARCIA et al., 2024).

A demanda pelo pequi é elevada tanto em nível estadual quanto nacional, o que reforça sua importância econômica e cultural. Diante desse valor, o pequi passou a ser protegido por lei desde 1987, sendo proibida a sua derrubada para preservar a espécie e garantir seu uso sustentável (RODRIGUES, 2020). Além disso, devido ao endemismo e a pressão humana, o Cerrado se tornou uma das áreas prioritárias para a conservação da biodiversidade no mundo. Nesse sentido, a Lei Nº 15.089, de 7 de janeiro de 2025, institui a Política Nacional para o manejo sustentável, plantio, extração, consumo, comercialização e transformação do pequi e

demais frutos e produtos nativos do Cerrado. Essa lei destaca a importância de preservar o Cerrado por meio do fortalecimento das comunidades tradicionais, do incentivo à pesquisa e da valorização cultural e econômica dos frutos. Além disso, a lei proíbe a derrubada e o uso predatório dos pequizeiros existentes no território nacional, exceto em situações específicas.

Valorizado devido sua versatilidade, o fruto desempenha um papel importante nas comunidades locais e é amplamente aproveitado pela indústria na produção de diversos itens presentes no cotidiano das famílias do Cerrado mineiro (Figura 1e), o que o torna altamente comercializável, com grande circulação no atacado, em feiras regionais e no setor industrial (RODRIGUES, 2020). Tal cenário está diretamente ligado aos hábitos alimentares da população do Norte de Minas, onde o pequi é amplamente consumido e reconhecido como símbolo cultural da região. Em Montes Claros, principal cidade da área, é realizada anualmente a "Festa Nacional do Pequi" (Figura 1f), que atrai visitantes de diversas localidades e celebra a importância econômica, cultural e culinária do fruto (RODRIGUES, 2020).

De acordo com os dados sobre produção agropecuária do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), no ano de 2022, a quantidade produzida de pequi no Brasil, foi de 47.698 toneladas, sendo o estado de Minas Gerais, o maior produtor. No entanto, uma vez que esse produto também está incluído em atividades informais como vendas em ruas, feiras e bancas ao longo das estradas, essa quantidade é ainda maior. Essa produção agrícola pode resultar em um considerável volume de resíduos orgânicos durante o processamento, que são descartados de maneira inadequada, acarretando problemas ambientais (Figura 2). Quando devidamente gerenciados, esses resíduos têm o potencial de minimizar o impacto negativo associado à sua emissão, descarte ou eliminação, podendo ser transformados em produtos úteis de alto valor agregado, que não apenas solucionam o problema, mas também geram renda (AGUIAR; ENRÍQUEZ ESTRELLA; UVIDIA CABADIANA, 2022).

Figura 2 – Cascas descartadas no Mercado Municipal de Montes Claros – MG.



Foto: Bárbara Lôpo de Lima.

Dentre os resíduos gerados pela comercialização do pequi, as amêndoas são as que mais têm sido reaproveitadas. Apesar de normalmente serem descartadas como subproduto da agroindústria, devido à sua estrutura rígida e espinhosa que dificulta o processamento, essas amêndoas possuem grande potencial energético (GUIMARÃES et al., 2022). Na maioria dos casos são utilizadas na produção de biocombustíveis líquidos, devido ao alto teor de óleo, que varia entre 45% e 50% e é rico em ácidos graxos livres (GUIMARÃES et al., 2022).

Embora a maior parte das pesquisas se concentre na produção de biodiesel, estudos mais recentes têm apontado as rotas termoquímicas como alternativas promissoras para o aproveitamento dos resíduos do pequi (GHESTI et al., 2022). Uma pesquisa recente aplicou modelagem cinética multicomponente, estimativas termodinâmicas e caracterização de produtos voláteis, com base em experimentos termogravimétricos realizados com amêndoas e cascas. Foram verificadas diferentes reações e perfis cinéticos entre os dois resíduos, indicando caminhos termoquímicos distintos, sendo que a pirólise das amêndoas é mais favorável do que a da casca do ponto de vista cinético e termodinâmico. Ainda assim, ambos demonstraram potencial energético devido à presença significativa de hidrocarbonetos e compostos oxigenados nos voláteis gerados (MUMBACH et al., 2024).

Estudos adicionais sobre a pirólise das cascas de pequi também indicam que essa biomassa é viável para o processo, conforme demonstrado pelas análises das curvas e derivadas termogravimétricas. Além disso, observou-se também que a temperatura influencia significativamente o rendimento dos produtos. Tais resultados mostraram que os produtos gerados foram considerados potenciais fontes de energia e matérias-primas promissoras para a indústria química, com alto valor agregado (GONÇALVES MARTINS et al., 2021).

O aproveitamento dos resíduos do pequi deve ser incentivado como estratégia para fortalecer a agricultura extrativista e aprimorar seus processos produtivos, visando promover o desenvolvimento econômico tecnológico e a responsabilidade social dos pequenos agricultores, bem como auxiliar na gestão de resíduos (GONÇALVES MARTINS et al., 2021). A oferta de soluções tecnológicas pode impulsionar o desenvolvimento rural sustentável devido sua diversidade e potencial produtivo, além de permitir a adoção de práticas que conciliem conservação ambiental e produção sustentável e que promovam a autonomia dos produtores familiares (GONÇALVES MARTINS et al., 2021).

1.3.6 Características da biomassa lignocelulósica para produção de biocombustíveis

Compreender as características físico-químicas da biomassa lignocelulósica com fins energéticos é essencial antes da aplicação de qualquer tecnologia de conversão termoquímica ou bioquímica, uma vez que essas propriedades afetam diretamente a eficiência do processo (CAI et al., 2017). A análise aproximada da biomassa, se refere ao seu teor de umidade, teor de matéria volátil, carbono fixo e cinzas. A umidade representa a quantidade de água presente na biomassa, que tem uma forte influência não apenas na colheita e preparação, mas também no transporte, armazenamento, processamento e nos produtos resultantes (KARUNANITHY; MUTHUKUMARAPPAN; DONEPUDI, 2013; CAI et al., 2017). No processo termoquímico da biomassa, a evaporação da umidade consome grande parte da energia disponível, por isso, baixos teores de umidade são desejáveis (CAI et al., 2017).

O percentual de material volátil da biomassa refere-se à fração de compostos orgânicos que são liberados na forma de gases e o vapores condensáveis quando a biomassa é aquecida a altas temperaturas (CAI et al., 2017). Esse valor depende das condições de aquecimento, incluindo a taxa de aquecimento, a temperatura e o tempo de residência, e é determinado após a remoção da umidade na análise imediata (CAI et al., 2017). O conteúdo de matéria volátil varia em um intervalo de 48-86% para as biomassas e se relaciona a presença de hidrocarbonetos leves, CO, CO₂, H₂, umidade e alcatrões (VASSILEV et al., 2010). Maiores valores de matéria volátil implicam em maiores quantidades bio-óleo (CHOUHAN; SARMA, 2013).

O carbono fixo corresponde à fração sólida da biomassa que permanece após a remoção da umidade e a transformação da matéria volátil (CAI et al., 2017) e representa a quantidade de carbono presente no material. Na biomassa lignocelulósica, seu percentual está positivamente relacionado ao poder calorífico. Em geral, esse teor pode variar no intervalo de 1 a 38% na biomassa, enquanto nas turfas e carvões, que passam por processos térmicos intensos capazes de fixar mais carbono, os valores podem alcançar de 20 a 72%. Biomassas como algumas cascas de madeira e resíduos agrícolas ou herbáceos apresentam teores elevados de carbono fixo, o que as torna atrativas para fins energéticos (VASSILEV et al., 2010).

As cinzas resultantes após a combustão são formadas principalmente por óxido de sílica, alumínio, ferro, cálcio, magnésio, titânio, sódio e potássio (VASSILEV et al., 2013) e seu valor é afetado significativamente pela temperatura de combustão (VASSILEV et al., 2010). O conhecimento de suas propriedades químicas e físicas é essencial para prever o risco de formação de depósitos nos componentes de caldeiras, já que esses materiais podem se incrustar,

elevando os custos com limpeza e manutenção. O rendimento de cinzas determinado termicamente para biomassa varia no intervalo de 0,1 a 46% e normalmente diminui na ordem de biomassa herbácea e agrícola, para gramíneas, madeira e biomassa lenhosa (VASSILEV et al., 2010). Dessa forma, conhecer de forma aprofundada tais propriedades da biomassa é indispensável para avaliar sua viabilidade energética e selecionar as rotas de conversão mais adequadas.

1.3.7 Processo de carbonização da biomassa lignocelulósica

A carbonização é uma tecnologia termoquímica na qual biomassa é decomposta e desvolatilizada para produzir produtos sólidos, líquidos e gasosos (ZHANG et al., 2025). Esse processo consiste em uma pirólise lenta, que ocorre em um ambiente controlado, descrito em fases de temperaturas que podem divergir na literatura. No primeiro estágio da carbonização, ocorre a secagem da madeira (100-150°C). Biomassas com baixo teor de umidade são preferíveis pois requerem menos energia para atingir a secagem completa. O segundo estágio consiste na pré-carbonização ou torrefação da madeira (150-275°C), seguido pela carbonização (275-400°C) e pela fixação de carbono (400-470°C) (OLIVEIRA et al., 2013).

A biomassa lignocelulósica é constituída por celulose (40-45%), hemiceluloses (25-35%) e lignina (20-30%), além de uma quantidade de extrativos, hidrocarbonetos e cinzas inorgânicas (K N et al., 2022). À medida que a temperatura aumenta, a biomassa lignocelulósica desidrata, e quando a temperatura atinge 220-315°C, a hemicelulose se decompõe em oligômeros e oligossacarídeos. Os oligossacarídeos podem se decompor em xilose e liberar CO₂ e H₂O (K N et al., 2022); (ZHANG et al., 2025). Na faixa de 315-400 °C, a celulose composta de polissacarídeos começa a se decompor em uma variedade de compostos de baixo peso molecular e substâncias voláteis por despolimerização e isomerização. A lignina, por ser a macromolécula polifenólica mais estável ao calor na biomassa, é principalmente decomposta e transformada a 160–900 °C (ZHANG et al., 2025).

Existem alguns fatores que afetam os produtos gerados durante o processo de pirólise. Entre eles, é possível citar a temperatura, a taxa de aquecimento e o tempo de residência (ZHANG et al., 2025). Com o aumento da temperatura de pirólise, a área superficial da fração sólida gerada aumenta, ao mesmo tempo em que as proporções de hidrogênio/carbono e oxigênio/carbono reduzem. Durante o aumento da temperatura, a biomassa produz gradualmente uma estrutura de anel aromático, e as unidades aromáticas menores se combinam para formar uma camada aromática para produzir uma estrutura de carbono. Assim, temperaturas mais elevadas resultam em estruturas de carbono mais estáveis. Em relação ao

tempo de residência, sua elevação favorece o desenvolvimento da porosidade e da área superficial do material, além de aumentar o teor de carbono fixo, embora reduza o rendimento do carbono sólido. Por fim, a taxa de aquecimento influencia principalmente o rendimento de carbono, sendo que taxas mais altas tendem a aumentar a produção de bio-óleo (ZHANG et al., 2025).

O controle do processo é um grande desafio, envolvendo variáveis que interagem entre si. No entanto, é possível alcançar uma carbonização menos variável controlando a temperatura e a taxa de aquecimento. Para isso, além de monitorar a temperatura, é necessário controlar o ar e os exaustores que influenciam principalmente a combustão, o fluxo de gases, a dinâmica dos fluidos e a temperatura do forno, que por sua vez ditam a carbonização. Encontrar um equilíbrio nesses aspectos é fundamental, ao passo que, uma taxa de aquecimento mais alta diminui o rendimento e a densidade aparente, mas também reduz o teor de matéria volátil, o que beneficia a qualidade geral da biomassa carbonizada (RODRIGUES; BRAGHINI JUNIOR, 2019).

A fração sólida da pirólise é considerada um produto ambientalmente limpo e apresenta vantagens significativas em comparação com outros materiais de carbono, que geralmente requerem processos complexos e de alto consumo energético para sua síntese (KULIKOVA et al., 2023). Estudos mostram que briquetes carbonizados apresentaram aproximadamente 56% de acréscimo no teor de carbono quando comparado com o dos briquetes *in natura*, melhorando a eficiência energética do material (PROTÁSIO et al., 2012). Dessa forma, essa transformação térmica, não apenas otimiza energeticamente o material, como também valoriza resíduos lignocelulósicos gerados de bioprocessamento, contribuindo para a redução do impacto ambiental (KULIKOVA et al., 2023).

1.4 Desenvolvimento da Prensa Briquetadeira

Para a produção dos briquetes, foi desenvolvida uma prensa briquetadeira de acionamento manual, utilizando um macaco hidráulico tipo garrafa da marca Fort G com capacidade de 10 toneladas. A estrutura foi construída em aço, com base de 42 cm x 40 cm e altura total de 1,2 m. O molde cilíndrico empregado na compactação da biomassa possuía 7,5 cm de diâmetro interno e 40 cm de altura. A escolha por esse modelo de prensa visou garantir uma tecnologia de baixo custo, de fácil construção e manutenção, com potencial de reaplicação em comunidades rurais ou cooperativas que busquem soluções energéticas sustentáveis a partir de resíduos lignocelulósicos. Essa abordagem contribui para a disseminação de tecnologias sociais e acessíveis voltadas à valorização de resíduos e geração de energia descentralizada.

Referências

- AGUIAR, S.; ENRÍQUEZ ESTRELLA, M.; UVIDIA CABADIANA, H. Resíduos agroindustriais: su impacto, manejo y aprovechamiento. **AXIOMA**, v. 1, n. 27, p. 5–11, 7 dez. 2022.
- AHMADIPOUR, M. et al. A comprehensive review on biomass energy system optimization approaches: Challenges and issues. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 106, p. 1167–1183, mar. 2025.
- ARAÚJO, S. et al. Effect of a mild torrefaction for production of eucalypt wood briquettes under different compression pressures. **Biomass and Bioenergy**, v. 90, p. 181–186, jul. 2016.
- BAJWA, D. S. et al. A review of densified solid biomass for energy production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 96, p. 296–305, nov. 2018.
- BAMISILE, O. et al. Renewable energy and electricity incapacitation in sub-Saharan Africa: Analysis of a 100% renewable electrification in Chad. **Energy Reports**, v. 9, p. 1–12, out. 2023.
- BOT, B. V. et al. Energetic and economic analysis of biomass briquettes production from agricultural residues. **Applied Energy**, v. 321, p. 119430, set. 2022.
- BOT, B. V.; TAMBA, J. G.; SOSSO, O. T. Assessment of biomass briquette energy potential from agricultural residues in Cameroon. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 14, n. 2, p. 1905–1917, 27 jan. 2024.
- BRASIL, **Lei N° 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; Altera a Lei n° 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e Dá Outras Providências. 2010. Disponível online: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm (Acesso em 07 de março de 2025).
- BRASIL. **Lei n° 15.089, de 7 de janeiro de 2025**. Institui a Política Nacional para o Manejo Sustentável, Plantio, Extração, Consumo, Comercialização e Transformação do Pequi (*Caryocar brasiliense*) e demais Frutos e Produtos Nativos do Cerrado. Disponível online: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2025/lei/115089.htm (Acesso de 07 de março de 2025).
- BRASIL. Serviço Florestal Brasileiro. Boletim IFN Cerrado: Biofísico. Brasília: SFB, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/florestal/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/boletins/boletim-ifn-cerrado-biofisico.pdf> (Acesso em 10 maio 2025).
- CAI, J. et al. Review of physicochemical properties and analytical characterization of lignocellulosic biomass. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 76, p. 309–322, set. 2017.
- CAMPOS, Letícia. Redução do pequi preocupa comunidades extrativistas do Cerrado. *WWF-Brasil*, 22 maio 2018. Disponível em: <https://www.wwf.org.br/?65582/Reduo-do-Pequi-preocupa-comunidades-extrativistas-do-Cerrado>. Acesso em: 20 mar. 2025.
- CANABARRO, N. et al. Thermochemical processes for biofuels production from biomass. **Sustainable Chemical Processes**, v. 1, n. 1, p. 22, 20 dez. 2013.
- CARNEIRO, R. et al. Struggling over Serra do Curral. **Cosmopolitan Civil Societies: An Interdisciplinary Journal**, v. 15, n. 1, p. 33–52, 26 mar. 2023.

CARTER, E. et al. Development of renewable, densified biomass for household energy in China. **Energy for Sustainable Development**, v. 46, p. 42–52, out. 2018.

Comunidades do Território Tradicional Geraizeiro recebem Secretarias do Estado de MG e equipe de estudiosos para abertura dos trabalhos do Relatório Antropológico. *CeDeFeS*, 09 maio 2022. Disponível em: <https://www.cedefes.org.br/comunidades-do-territorio-tradicional-geraizeiro-recebem-secretarias-do-estado-de-mg-e-equipe-de-estudiosos-para-abertura-dos-trabalhos-do-relatorio-antropologico/>. Acesso em: 20 mai. 2025.

CHATUANRAMTHARNGHAKA, B. et al. Reviewing Demand Response for Energy Management with Consideration of Renewable Energy Sources and Electric Vehicles. **World Electric Vehicle Journal**, v. 15, n. 9, p. 412, 8 set. 2024.

CHAUDHARY, A. et al. Recent technological advancements in biomass conversion to biofuels and bioenergy for circular economy roadmap. **Renewable Energy**, v. 244, p. 122714, maio 2025.

CHEN, H. et al. Thermodynamic and economic analyses of a solar-aided biomass-fired combined heat and power system. **Energy**, v. 214, p. 119023, jan. 2021.

CHOUHAN, A.; SARMA, A. Critical Analysis of Process Parameters for Bio-oil Production via Pyrolysis of Biomass: A Review. **Recent Patents on Engineering**, v. 7, n. 2, p. 98–114, 1 jul. 2013.

COELHO, U. R. DA S. et al. Evaluation of Biogas Energy from Co-Digestion of Organic Urban Solid Waste with Lime Mud. **Recycling**, v. 8, n. 4, p. 57, 1 jul. 2023.

Confira a Programação Gratuita da Festa Nacional do Pequi em Montes Claros. *Revista Tempo*, 04 dez. 2024. Disponível em: <https://revistatempo.com.br/2024/12/04/confira-a-programacao-gratuita-da-festa-nacional-do-pequi-em-montes-claros/>. Acesso em: 20 mar. 2025.

DE MELO, A. P. G.; CANGUSSU, R. R. DA C.; ACYPRESTE, A. P. EMPREENDIMENTOS ECONÔMICOS SOLIDÁRIOS E AGROEXTRATIVISMO EM UMA COMUNIDADE TRADICIONAL DO NORTE DE MINAS GERAIS. **Revista Contemporânea**, v. 3, n. 3, p. 2056–2070, 6 mar. 2023.

DINESHA, P.; KUMAR, S.; ROSEN, M. A. Biomass Briquettes as an Alternative Fuel: A Comprehensive Review. **Energy Technology**, v. 7, n. 5, 10 maio 2019.

DUC BUI, V. et al. Techno-economic assessment and logistics management of biomass in the conversion progress to bioenergy. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 55, p. 102991, fev. 2023.

Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). Balanço Energético Nacional 2024: Ano base 2023/ Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro : EPE, 2024.

ENVIRONMENTAL LITERACY COUNCIL. Does renewable energy cause pollution? Disponível em: <https://enviroliteracy.org/does-renewable-energy-cause-pollution/>. Acesso em: 27 maio 2025.

ERIXNO, O. et al. Energy management of renewable energy-based combined heat and power systems: A review. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 51, p. 101944, jun. 2022.

FERREIRA, M. O. et al. Factorial Optimization and Validation of Solid–Liquid Extraction with Low-Temperature Partitioning of Pesticide Residues from Pequi Pulp Using High-Performance

Liquid Chromatography with a Photodiode Array Detector (HPLC-DAD). **ACS Omega**, v. 10, n. 17, p. 18106–18115, 6 maio 2025.

FROESE, R. E. et al. An evaluation of greenhouse gas mitigation options for coal-fired power plants in the US Great Lakes States. **Biomass and Bioenergy**, v. 34, n. 3, p. 251–262, mar. 2010.

GIODA, Adriana et al. Evaluation of baseline firewood consumption for domestic cooking in low-income rural households in Bahia, Brazil. *Acta Botanica Brasilica*, v. 36, p. e2021abb0275, 2022.

GAO, W. et al. Optimization of biological pretreatment to enhance the quality of wheat straw pellets. **Biomass and Bioenergy**, v. 97, p. 77–89, fev. 2017.

GARCIA, L. S. et al. PEQUI (*CARYOCAR BRASILIENSE* E *CARYOCAR CORIACEUM*): IMPORTÂNCIA SOCIOECONÔMICA, PRINCIPAIS FITOQUÍMICOS E PROPRIEDADES BIOATIVAS. In: **Árvores, Plantas e Frutos do Cerrado: aplicações e possibilidades**. [s.l.] Editora Científica Digital, 2024. p. 97–114.

GHESTI, G. F. et al. Towards a sustainable waste-to-energy pathway to pequi biomass residues: Biochar, syngas, and biodiesel analysis. **Waste Management**, v. 143, p. 144–156, abr. 2022.

GONÇALVES MARTINS, J. P. et al. Study of pequi peel pyrolysis: Thermal decomposition analysis and product characterization. **Biomass and Bioenergy**, v. 149, p. 106095, jun. 2021.

GONTARD, N. et al. A research challenge vision regarding management of agricultural waste in a circular bio-based economy. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 48, n. 6, p. 614–654, 19 mar. 2018.

GUEDES, A. M. M.; ANTONIASSI, R.; DE FARIA-MACHADO, A. F. Pequi: a Brazilian fruit with potential uses for the fat industry. **OCL**, v. 24, n. 5, p. D507, 8 set. 2017.

GUIMARÃES, M. et al. Extraction and Characterization of Pequi Seed Oil for Biodiesel Production: A Green Management of Waste to Biofuel Using Ethanol and Heterogeneous Catalysis. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, 2022.

HETTIARACHCHI, H. et al. Municipal Solid Waste Management in Latin America and the Caribbean: Issues and Potential Solutions from the Governance Perspective. **Recycling**, v. 3, n. 2, p. 19, 10 maio 2018.

HUYNH, C. VAN; KONG, S.-C. Performance characteristics of a pilot-scale biomass gasifier using oxygen-enriched air and steam. **Fuel**, v. 103, p. 987–996, jan. 2013.

IRENA (2025), Renewable capacity statistics 2025, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

K N, Y. et al. Lignocellulosic biomass-based pyrolysis: A comprehensive review. **Chemosphere**, v. 286, p. 131824, jan. 2022.

KAINTHOLA, J.; KALAMDHAD, A. S.; GOUD, V. V. A review on enhanced biogas production from anaerobic digestion of lignocellulosic biomass by different enhancement techniques. **Process Biochemistry**, v. 84, p. 81–90, set. 2019.

KARUNANITHY, C.; MUTHUKUMARAPPAN, K.; DONEPUDI, A. Moisture Sorption Characteristics of Corn Stover and Big Bluestem. **Journal of Renewable Energy**, v. 2013, p. 1–12, 2013.

KAZA, S.; YAO, L.; BHADA-TATA, P.; VAN WOERDEN, F. What a Waste 2.0—A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050; World Bank Group: Washington, DC, USA, 2018; ISBN 9781464813290.

KERN, S.; PFEIFER, C.; HOFBAUER, H. Gasification of lignite in a dual fluidized bed gasifier — Influence of bed material particle size and the amount of steam. **Fuel Processing Technology**, v. 111, p. 1–13, jul. 2013.

KHAN, A. H. et al. Current solid waste management strategies and energy recovery in developing countries - State of art review. **Chemosphere**, v. 291, p. 133088, mar. 2022.

KPALO, S. Y. et al. Production and Characterization of Hybrid Briquettes from Corncobs and Oil Palm Trunk Bark under a Low Pressure Densification Technique. **Sustainability**, v. 12, n. 6, p. 2468, 21 mar. 2020.

KULIKOVA, M. V. et al. Mechanisms of Low-Temperature Processes of Biomass Conversion (A Review). **Petroleum Chemistry**, v. 63, n. 6, p. 633–647, 23 jun. 2023.

KYEI, S. K.; BOATENG, H. K.; FRIMPONG, A. J. Renewable energy innovations: fulfilling SDG targets. **Clean Energy**, v. 9, n. 2, p. 190–203, 3 fev. 2025.

LABBÉ, R. et al. Effect of feedstock particle size distribution and feedstock moisture content on pellet production efficiency, pellet quality, transport and combustion emissions. **Fuel**, v. 263, p. 116662, mar. 2020.

LAM, M. K. et al. Biohydrogen Production From Algae. In: **Biohydrogen**. [s.l.] Elsevier, 2019. p. 219–245.

MARREIRO, H. M. P. et al. Empirical Studies on Biomass Briquette Production: A Literature Review. **Energies**, v. 14, n. 24, p. 8320, 10 dez. 2021.

MOHAMMED, M. A. A. et al. Gasification of oil palm empty fruit bunches: A characterization and kinetic study. **Bioresource Technology**, v. 110, p. 628–636, abr. 2012.

MORALES-MÁXIMO, M. et al. Exploitation of Wood Waste of Pinus spp for Briquette Production: A Case Study in the Community of San Francisco Pichátaro, Michoacán, Mexico. **Applied Sciences**, v. 10, n. 8, p. 2933, 23 abr. 2020.

MORENO, I. F. et al. Sequential supercritical fluid and pressurized liquid extraction of pequi (*Caryocar brasiliense* Camb.) almonds. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v. 43, p. 101902, fev. 2025.

MUMBACH, G. D. et al. Unlocking the potential of pequi (*Caryocar brasiliense*) residues for bioenergy and renewable chemicals: Multicomponent kinetic modeling, thermodynamic parameter estimation, and characterization of volatile products through TGA and Py-GC/MS experiments. **Industrial Crops and Products**, v. 209, p. 117928, mar. 2024.

NASCIMENTO-SILVA, N. R. R. DO; NAVES, M. M. V. Potential of Whole Pequi (*Caryocar* spp.) Fruit—Pulp, Almond, Oil, and Shell—as a Medicinal Food. **Journal of Medicinal Food**, v. 22, n. 9, p. 952–962, 1 set. 2019.

Negi VS, Joshi BC, Pathak R, Rawal RS, Sekar KC. 2018. Assessment of fuelwood diversity and consumption patterns in cold desert part of Indian Himalaya: implication for conservation and quality of life. *Journal of Clean Production* 196: 23-31.

OBI, O. F. et al. Solid Biofuel Production from Biomass: Technologies, Challenges, and Opportunities for Its Commercial Production in Nigeria. **Energies**, v. 16, n. 24, p. 7966, 8 dez.

2023.

OBI, O. F.; PECENKA, R.; CLIFFORD, M. J. A Review of Biomass Briquette Binders and Quality Parameters. **Energies**, v. 15, n. 7, p. 2426, 25 mar. 2022.

OLIVEIRA, A. C. et al. Otimização da produção do carvão vegetal por meio do controle de temperaturas de carbonização. **Revista Árvore**, v. 37, n. 3, p. 557–566, jun. 2013.

OSMAN, A. I. et al. Conversion of biomass to biofuels and life cycle assessment: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 19, n. 6, p. 4075–4118, 23 dez. 2021.

OSSEI-BREMANG, R. N. et al. Effects of compression pressure, biomass ratio and binder proportion on the calorific value and mechanical integrity of waste-based briquettes. **Bioresource Technology Reports**, v. 25, p. 101724, fev. 2024.

PARDEY, P. G. et al. A Bounds Analysis of World Food Futures: Global Agriculture Through to 2050. **Australian Journal of Agricultural and Resource Economics**, v. 58, n. 4, p. 571–589, 17 out. 2014.

PARIMALA DEVI, R. et al. A review on renewable energy sources for production of bioethanol. **Plant Science Today**, v. 12, n. sp1, 22 fev. 2025.

PATRA, B. R. et al. Slow pyrolysis of agro-food wastes and physicochemical characterization of biofuel products. **Chemosphere**, v. 285, p. 131431, dez. 2021.

Pequi (Caryocar brasiliense). *Cerratinga*, n.d. Disponível em: <https://www.cerratinga.org.br/especies/pequi/>. Acesso em: 20 mar. 2025.

Produção Agropecuária | IBGE. Disponível online: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/pequi/br>. (acesso em 17 de março de 2024).

PROTÁSIO, T. DE P. et al. Torrefação e carbonização de briquetes de resíduos do processamento dos grãos de café. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 11, p. 1252–1258, nov. 2012.

PRZYCHODZEN, W.; PRZYCHODZEN, J. Determinants of renewable energy production in transition economies: A panel data approach. **Energy**, v. 191, p. 116583, jan. 2020.

QIN, F. et al. Lignocellulosic biomass carbonization for biochar production and characterization of biochar reactivity. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 157, p. 112056, abr. 2022.

RAHMAN, M. M.; ALAM, K.; VELAYUTHAM, E. Reduction of CO₂ emissions: The role of renewable energy, technological innovation and export quality. **Energy Reports**, v. 8, p. 2793–2805, nov. 2022.

RAMOS, M. I. L. et al. Efeito do cozimento convencional sobre os carotenoides próvitamínicos “a” da polpa do pequi (*Caryocar brasiliense* camb.). Boletim Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos-CEPPA, Curitiba-PR, v. 19, n. 1, p. 23-32, 2001.

RAO, S. et al. Environmental Modeling and Methods for Estimation of the Global Health Impacts of Air Pollution. **Environmental Modeling & Assessment**, v. 17, n. 6, p. 613–622, 14 dez. 2012.

RASLAVIČIUS, L. Characterization of the woody cutting waste briquettes containing absorbed glycerol. **Biomass and Bioenergy**, v. 45, p. 144–151, out. 2012.

RODRIGUES, Mauro Toledo Silva. Gerzeiros, guardiões do cerrado: conflito socioambiental na comunidade gerazeira de Catanduva - Norte de Minas Gerais. 2020. 214 f. Dissertação

(Mestrado em Ciências Sociais em Desenvolvimento, Agricultura e Sociedade) - Instituto de Ciências Humanas e Sociais, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

RODRIGUES, T.; BRAGHINI JUNIOR, A. Charcoal: A discussion on carbonization kilns. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 143, p. 104670, out. 2019.

ROMAN, K.; GRZEGORZEWSKA, E. Biomass Briquetting Technology for Sustainable Energy Solutions: Innovations in Forest Biomass Utilization. **Energies**, v. 17, n. 24, p. 6392, 19 dez. 2024.

ROSALES-CALDERON, O.; ARANTES, V. A review on commercial-scale high-value products that can be produced alongside cellulosic ethanol. **Biotechnology for Biofuels**, v. 12, n. 1, p. 240, 8 dez. 2019.

ROSS, M. L. The New Political Economy of Climate Change. **World Politics**, v. 77, n. 1, p. 155–194, jan. 2025.

SAHOO, S. S. et al. Production and characterization of biochar produced from slow pyrolysis of pigeon pea stalk and bamboo. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 3, p. 100101, jul. 2021.

SANCHEZ-ROQUE, Y. et al. Biomass briquettes: Raw material, technologies and densification parameters, quality and future challenges. **Scientia Agropecuaria**, v. 16, n. 2, p. 293–306, 15 abr. 2025.

SAXENA, R. C.; ADHIKARI, D. K.; GOYAL, H. B. Biomass-based energy fuel through biochemical routes: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 1, p. 167–178, jan. 2009.

SCARLAT, N.; FAHL, F.; DALLEMAND, J.-F. Status and Opportunities for Energy Recovery from Municipal Solid Waste in Europe. **Waste and Biomass Valorization**, v. 10, n. 9, p. 2425–2444, 19 set. 2019.

SILVA, Marcos Nicolau Santos; TUBALDINI, Maria Aparecida Dos Santos. O ouro do cerrado: a dinâmica do extrativismo do pequi no norte de Minas Gerais. **Revista Geoaraguaia**, v. 3, n. 2, p. 293-317, 2013.

SUBRAMANIAM, Y.; AL-MULALI, U. Biofuels, environment, and food security in Africa. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 18, n. 1, p. 203–210, 16 jan. 2024.

TUMULURU, J. S. et al. A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 5, n. 6, p. 683–707, 6 nov. 2011.

ULLAH, A. et al. Transition Towards Climate-Resilient Low-Carbon and Net-Zero Future Pathways: Investigating the Influence of Post-Paris Agreement and G-7 Climate Policies on Climate Actions in G-20 Using Quasi-Natural Experiments. **Sustainable Development**, 3 mar. 2025.

VASSILEV, S. V. et al. An overview of the chemical composition of biomass. **Fuel**, v. 89, n. 5, p. 913–933, maio 2010.

VASSILEV, S. V. et al. An overview of the composition and application of biomass ash. Part 1. Phase–mineral and chemical composition and classification. **Fuel**, v. 105, p. 40–76, mar. 2013.

VIGLIONI, M. T. D.; CALEGARIO, C. L. L.; FERREIRA, M. P. Exploring the link between

renewable energy policy and foreign direct investment in promoting renewable energy in Belt and Road Initiative countries. **Renewable Energy**, v. 246, p. 122915, jun. 2025.

WAHEED, M. A.; AKOGUN, O. A. Quality enhancement of fuel briquette from cornhusk and cassava peel blends for co-firing in coal thermal plant. **International Journal of Energy Research**, v. 45, n. 2, p. 1867–1878, 9 fev. 2021.

WEBER, K.; QUICKER, P. Properties of biochar. **Fuel**, v. 217, p. 240–261, abr. 2018.

YANG, X. et al. A review on renewable energy: Conversion and utilization of biomass. **Smart Molecules**, v. 2, n. 4, 10 dez. 2024.

YANG, Y. et al. Effects of Different Biomass Types on Pellet Qualities and Processing Energy Consumption. **Agriculture**, v. 15, n. 3, p. 316, 31 jan. 2025.

YU, Q. et al. An Overview on the Conversion of Forest Biomass into Bioenergy. **Frontiers in Energy Research**, v. 9, 2 jul. 2021.

ZHANG, P. et al. Nexus of institutional quality and technological innovation on renewable energy development: Moderating role of green finance. **Renewable Energy**, v. 214, p. 233–241, set. 2023.

ZHANG, Y. et al. Exergy analysis of biomass utilization via steam gasification and partial oxidation. **Thermochimica Acta**, v. 538, p. 21–28, jun. 2012.

ZHANG, Y. et al. A review of the conversion of wood biomass into high-performance bulk biochar: Pretreatment, modification, characterization, and wastewater application. **Separation and Purification Technology**, v. 361, p. 131448, jul. 2025.

CAPÍTULO 2

APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE CASCAS DE PEQUI NA PRODUÇÃO DE BRIQUETES

RESUMO

A utilização da biomassa lignocelulósica proveniente de resíduos domésticos tem se tornado uma escolha favorável na produção de bioenergia. No estado de Minas Gerais, a cadeia produtiva do pequi (*Caryocar brasiliense* Camb.) desempenha importante papel econômico e social. No entanto, a comercialização em grande escala desse produto pode gerar resíduos que, se não forem adequadamente gerenciados, representam um desafio ambiental significativo. Neste trabalho, foi avaliado o potencial energético da biomassa da casca de pequi para confecção de briquetes em diferentes proporções de umidade. Foram avaliadas propriedades físicas, mecânicas e térmicas da biomassa in natura em estudo. A caracterização imediata da biomassa revelou um alto teor de material volátil (74,41%), de carbono fixo (22,69%) e cinzas (2,90%), além de um poder calorífico de 14,23 MJ kg⁻¹, mostrando a eficácia do material para produção de energia. A análise química evidenciou 69,38% de extrativos, 10,27% de lignina e 20,35 % de holocelulose. A análise termogravimétrica da casca se mostrou similar com a termo decomposição de biomassas lignocelulósicas. A confecção dos briquetes foi realizada em uma prensa hidráulica em diferentes proporções de umidade (5%, 7,5% e 10%). Os testes de resistência à compressão mostraram que briquetes com menor umidade possuem maior resistência. Os resultados deste estudo sugerem que a densificação da casca de pequi não apenas reduz significativamente o volume dos resíduos, como também resulta em uma diminuição de aproximadamente 90,42% do peso total, facilitando seu manejo e armazenamento, mas também oferece uma solução sustentável para a produção de bioenergia.

Palavras-chave: Bioenergia; Biomassa lignocelulósica; Densificação; Energia renovável.

2.1 Introdução

As preocupações ambientais globais têm impulsionado esforços voltados à transição para fontes de energia renovável, especialmente em países em desenvolvimento (SHRESTHA et al., 2022). Dessa forma, a busca por alternativas energéticas renováveis tem ganhado destaque em resposta ao aumento da demanda por fontes alternativas (MARKS-BIELSKA et al., 2020). A utilização da energia proveniente da biomassa emerge como uma possibilidade às fontes não renováveis, visando crescimento econômico, estabilidade no fornecimento elétrico e combate as mudanças climáticas (WIRANARONGKORN et al., 2021).

O estado de Minas Gerais, se destaca pela sua longa história de dependência do extrativismo vegetal (CARNEIRO et al., 2023). O potencial de aproveitamento e exploração comercial dos recursos do Cerrado é vasto e diversificado, incluindo sementes, frutas, látex, óleos e resinas, que têm diversas aplicações, abrangendo desde alimentação e remédios até utensílios e artesanatos (FILIZOLA, 2013). O pequi (*Caryocar brasiliense*), pertencente à família botânica Caryocaraceae, possui diversas utilidades, que vão desde a alimentação humana a produtos medicinais até a fabricação de cosméticos e biodiesel (GOMES et al., 2022). Sua cadeia produtiva desempenha um importante papel econômico e social no extrativismo norte mineiro (FONSECA; NETO; MENDES, 2023). A comercialização se dá de diversas formas, incluindo a fruta in natura, polpa congelada, óleo, licores, doces e cosméticos, atendendo tanto ao mercado local quanto à indústria. No entanto, é importante considerar que a comercialização em grande escala desse produto pode gerar resíduos que, se não forem adequadamente gerenciados, podem representar um desafio ambiental.

Nesse sentido, é fundamental buscar alternativas para aproveitar esses resíduos de forma sustentável. A biomassa residual é uma opção promissora no contexto energético (SCAPIN et al., 2020), sendo a densificação uma das formas de aproveitamento. Esse processo envolve a reorganização das partículas da matéria-prima, alterando seus tamanhos e formas por meio mecânico, o que promove a interligação entre as partículas, resultando em melhorias na manipulação, transporte e armazenamento da biomassa (OBI et al., 2023; MESQUITA et al., 2024). Biomassas de diversas origens, como resíduos agrícolas, dejetos animais, produtos florestais e resíduos urbanos, são compactadas em forma de briquetes e pellets. Esses produtos são amplamente recomendados para combustão em países com alta atividade agrícola, podendo ter um impacto significativo no fornecimento de energia, especialmente em comunidades rurais (OBI et al., 2023; BOT; TAMBA; SOSSO, 2024).

O objetivo deste estudo é investigar o potencial energético dos resíduos da casca do Pequi, visando sua aplicação como fonte de energia na forma de briquetes. Com base nas preocupações ambientais globais e na crescente demanda por fontes de energia renovável, este estudo busca explorar alternativas sustentáveis para o aproveitamento de resíduos gerados pela comercialização em grande escala do produto, visando a sua valorização, o que pode representar uma oportunidade para impulsionar a transição para fontes renováveis de energia e promover o desenvolvimento sustentável regional. Além disso, empregar técnicas que reduzam o volume dos resíduos gerados é essencial, pois facilita seu armazenamento, transporte e manejo, torna sua utilização mais eficiente. Essa abordagem pode transformar passivos ambientais em ativos econômicos, proporcionando uma nova fonte de renda para as comunidades locais e contribuindo para a sustentabilidade ambiental.

2.2 Materiais e métodos

2.2.1 Obtenção e caracterização da biomassa

As cascas de pequi usadas como matéria-prima foram adquiridas em mercados e pontos de venda na cidade de Montes Claros, em Minas Gerais (16°42'56"S; 43°51'58"W; 624m). Foram coletados aproximadamente 135 kg de cascas, que após a triagem para retirada de materiais indesejados, reduziu para aproximadamente 120 kg. A biomassa foi seca em sombra por sete dias e triturada por um desintegrador Cremasco DPC-4, sendo posteriormente peneirada a 5 mm.

A umidade do material foi determinada com base nos procedimentos descritos na norma ASTM D1762 (2021) com estufa a 105 ± 2 °C, assim como os teores de cinzas e de materiais voláteis, enquanto o teor de carbono fixo foi obtido a partir da diferença ($100\% - \text{Teor de materiais voláteis} - \text{Teor de cinzas}$). O poder calorífico da biomassa foi determinado por aferição em bomba calorimétrica IKA C5003 Control, de acordo com a NBR 8633 (1984). O teor de extrativo em álcool tolueno foi determinado em conformidade com os métodos da norma T204 cm-97 (1997), ao passo que a análise do teor de lignina Klason foi realizada segundo a norma T222 om-98 (1997), ambas da Associação Técnica da Indústria de Papel e Celulose. A Figura 3 evidencia o resumo gráfico do estudo.

Figura 3 – Resumo gráfico do estudo.



Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

2.2.2 Análise termogravimétrica da biomassa

Os estudos termogravimétricos foram realizados usando um analisador térmico DTG-60H. Aproximadamente 5g da biomassa foi colocada em um cadinho de alumina e aquecida de 28 a 900 °C, em diferentes razões de aquecimento de 5, 10, 15, 20 °C min⁻¹. A análise foi realizada em duplicata para cada razão de aquecimento. O nitrogênio foi usado como um gás inerte com uma vazão de 50 mL min⁻¹.

2.2.3 Produção e avaliação dos briquetes

Os briquetes foram produzidos em três diferentes condições. O primeiro tratamento (T1) utilizou 500 g de biomassa in natura à qual foram adicionados 25 ml de água, resultando em 5% de umidade em relação ao peso. O segundo tratamento (T2) aplicou 37,5 ml de água, correspondendo a 7,5% de umidade, enquanto o terceiro tratamento (T3) utilizou 50 ml de água, totalizando 10% de umidade. Esses valores representam a umidade adicionada antes da compactação para a confecção dos briquetes. Para o processo de briquetagem, foi usada uma prensa manual, com tubos de 7,5 cm de diâmetro, e que utiliza um macaco hidráulico para efetuar a pressão necessária para a compactação das partículas (Figura 4). Para a produção de cada briquete, foi usada aproximadamente 500 g de matéria-prima e um tempo de residência de cinco minutos. Após a briquetagem, os briquetes foram expostos à sombra para que a umidade

evaporasse e atingissem peso constante, o que aconteceu cerca de 7 dias após sua fabricação. Depois desse período, a umidade dos briquetes variou entre 8% e 8,7%.

Figura 4 – Equipamento confeccionado para a produção dos briquetes.



Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

A densidade aparente dos briquetes foi calculada dividindo a massa, medida em uma balança analítica, pelo volume, que foi obtido a partir dos diâmetros dos briquetes medidos com um paquímetro digital. A densidade energética de cada tratamento foi determinada com base no poder calorífico da biomassa multiplicada pela densidade aparente. As propriedades mecânicas dos briquetes foram avaliadas por ensaios da norma NBR 7190 (1997), que permitiram determinar a compressão paralela e a força máxima. Esses ensaios foram realizados em uma máquina universal de ensaios Emic DL10000, com um sistema de aquisição de dados automatizado.

2.2.4 Análise estatística dos dados

Os valores referentes às propriedades mecânicas dos briquetes foram tabulados e apresentados como médias de três repetições. Para a densidade aparente e demais variáveis, os dados serão apresentados como a média calculada a partir de três medições realizadas em triplicata, proporcionando uma representação precisa da variação entre as amostras, com exceção da análise termogravimétrica, que foi realizada em duplicata. A normalidade dos resíduos foi verificada preliminarmente (teste de Shapiro-Wilk a 5% de probabilidade) para análise de variância (ANOVA), que foi realizada em delineamento inteiramente casualizado para avaliar o grau de significância das variáveis analisadas. Quando os resultados foram

considerados significativos, os dados foram submetidos ao teste Tukey a 5% de probabilidade para a comparação de médias entre os diferentes tratamentos, assegurando uma análise confiável.

2.3 Resultados e discussões

2.3.1 Caracterização química da biomassa

A análise imediata da casca do pequi (Tabela 1) demonstra que o resíduo possui uma excelente capacidade de ignição, evidenciada pelo seu alto teor de material volátil e baixo teor de cinzas. Esses fatores não apenas facilitam a combustão, mas também reduzem os impactos ambientais relacionados aos resíduos pós-combustão e diminuem os custos de manutenção e limpeza dos equipamentos (MISHRA; MOHANTY, 2018).

Tabela 1 – Análise imediata da casca do pequi.

	TU	VM	Ash	FC	TE	TL	TH	PCS
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(MJ kg ⁻¹)
Biomassa	84,35	74,41	2,90	22,69	69,38	10,27	20,35	14,23

TU: teor de umidade; VM: teor de matéria volátil; Ash: teor de cinzas; FC: teor de carbono fixo; TE: teor de extrativos; TL: teor de lignina Klason; TH: teor de holocelulose; PCS: poder calorífico superior.

Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

O conhecimento sobre a composição de uma biomassa é importante para otimizar seu uso como fonte de energia. Neste estudo, o valor de 84,35% para a umidade, demonstra que a biomassa de pequi, quando seca e compactada, pode concentrar uma grande quantidade de matéria por área, tornando-a uma fonte eficiente para aproveitamento energético. Estudos relatam que a maioria das biomassas verdes possuem cerca de 50% do seu peso em umidade, demonstrando que a biomassa de pequi possui uma umidade consideravelmente maior (ASADULLAH et al., 2007).

No que se refere à análise imediata, os resultados encontrados nesse estudo se assemelham aos da literatura. Estudo sobre a pirólise da casca e semente de pequi, com foco em cinética, termodinâmica e caracterização de produtos voláteis, evidenciou 71,56%, 2,38% e 26,06% para os teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo, respectivamente (MUMBACH et al., 2024).

Quanto à composição química, o teor de extrativos da biomassa de pequi apresentou-se

elevado. Estudos com outras biomassas, como bagaço-de-cana (27,7%), casca de café (34,5%), talo de algodão (14,6%), casca de amendoim (22,6%) e casca de arroz (14,7%) (KUMAR et al., 2020) mostram valores inferiores aos observados para o pequi. O alto teor de extrativos dessa biomassa pode estar associado às suas características marcantes, como cheiro e sabor, uma vez que os extrativos interferem na cor, odor e durabilidade do material (KUMAR et al., 2020).

A lignina, que interfere diretamente no poder calorífico e na resistência mecânica de combustíveis sólidos, apresentou altos valores na biomassa de pequi. Percentuais elevados de lignina são benéficos para a resistência dos materiais densificados, além de impactarem positivamente os rendimentos dos processos de conversão termoquímica (DE SOUZA et al., 2020); (NAM et al., 2020). O teor de holocelulose de 20,35% indica uma menor proporção de celulose e hemicelulose em comparação com outras biomassas lignocelulósicas, como espiga de milho (71,45%) e bagaço de cana (70,26%) (KUMAR et al., 2020). A holocelulose é crucial para os processos de degradação térmica e bioquímica, pois esses componentes são responsáveis pela liberação de açúcares durante a conversão bioquímica e influenciam diretamente a estabilidade térmica da biomassa.

O poder calorífico da biomassa de casca de pequi se mostrou inferior comparado com os resíduos de outras biomassas da região, como o babaçu, que apresentou 19,07 e 19,03 MJ kg⁻¹, para mesocarpo e endocarpo (RAMBO et al., 2015). O epicarpo das biomassas de castanha-do pará, pequi e agave, apresentaram poder calorífico superior variando entre 17,2 e 17,8 MJ kg⁻¹ (RAMBO et al., 2015). O valor de 14,23 MJ kg⁻¹, se explica pelo fato de ser usado a casca nesse estudo, material mais carnoso do fruto e com alto teor de umidade.

2.3.2 Análise termogravimétrica da biomassa

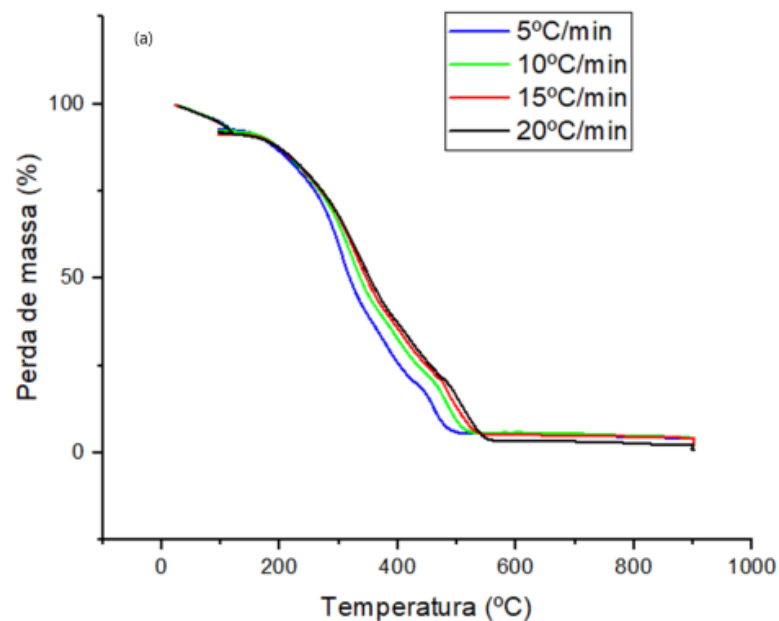
As curvas termogravimétricas obtidas para a casca de pequi (Figura 5a) mostraram que, mesmo com diferentes razões de aquecimento, a perda de massa manteve um padrão semelhante. Observou-se uma perda inicial de aproximadamente 10% até 180°C, atribuída à evaporação de água e compostos de baixo ponto de ebulição (SANTOS et al., 2020).

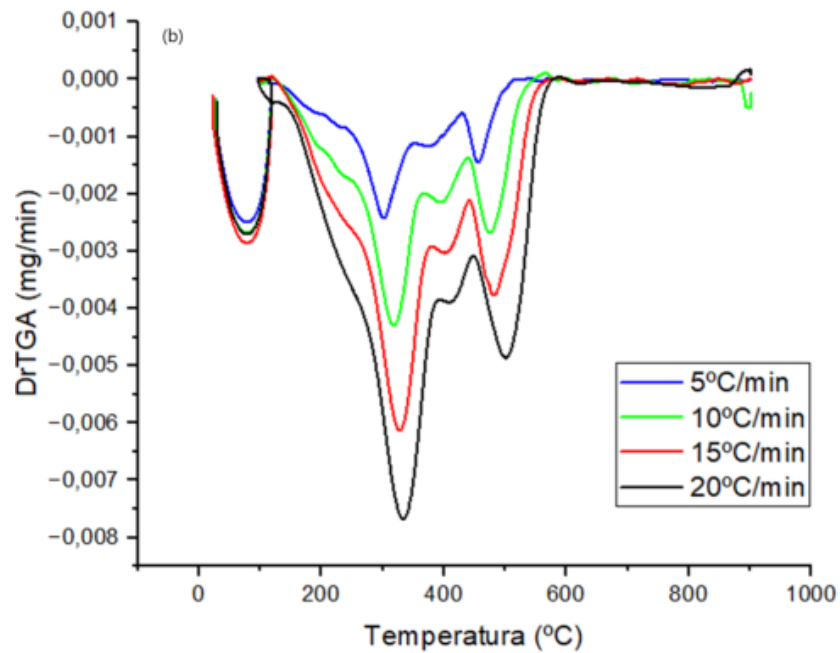
Aproximadamente 70% da perda de massa ocorreu na faixa de temperatura de 180°C a 450°C, referente à decomposição térmica conjunta da hemicelulose e celulose. Durante essa faixa de temperatura, foram registrados dois picos de decomposição na curva DTG: para a razão de aquecimento de 5°C min⁻¹, os picos ocorreram a 300°C e 385°C; para 10°C min⁻¹, a 320°C e 400°C; para 15°C min⁻¹, a 325°C e 410°C; e para 20°C min⁻¹, a 330°C e 450°C. No último estágio, com aproximadamente 20% de massa restante, observou-se a decomposição da lignina

e a carbonização da biomassa, com picos a 460°C, 480°C, 485°C e 505°C para as razões de 5°C min⁻¹, 10°C min⁻¹, 15°C min⁻¹ e 20°C min⁻¹, respectivamente.

A decomposição térmica da hemicelulose e da celulose seguiu o comportamento esperado para biomassas lignocelulósicas. A hemicelulose, devido ao seu baixo grau de polimerização, se degradou a temperaturas mais baixas, entre 190°C e 320°C. Já a celulose, sendo um polímero de cadeia longa, se decompôs a partir de 300°C, necessitando de maior energia para quebrar suas ligações (SANTOS et al., 2020). Além disso, a intensidade e a posição dos picos variaram com a taxa de aquecimento, demonstrando que uma taxa mais alta acelera a decomposição, elevando ligeiramente os picos e indicando menor eficiência na transferência de calor durante a pirólise da amostra (YAMAN; ÖZBAY, 2023).

Figura 5 – Curvas termogravimétricas (a) e Derivadas da curva termogravimétrica (b) da biomassa da casca do pequi em diferentes razões de aquecimento.





Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

2.3.4 Densificação da biomassa

Logo após o processo de densificação, foram produzidos 24 briquetes. Na Figura 6, pode-se observar os briquetes de cada tratamento. Ao atingirem peso constante, o peso total dos 24 briquetes foi aproximadamente 11,5 kg.

Figura 6 – Vista frontal (a) e superior (b) dos briquetes produzidos de biomassa de casca de pequi.



T1: Briquetes produzidos com 5% de umidade; T2: Briquetes produzidos com 7.5% de umidade; T3: Briquetes produzidos com 10% de umidade.

Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

A densificação da casca de pequi se mostrou eficaz na redução do volume de resíduos que, de outra forma, seriam descartados na natureza. As densidades aparentes médias obtidas foram de $0,946 \text{ g cm}^{-3}$, $0,987 \text{ g cm}^{-3}$ e $1,104 \text{ g cm}^{-3}$ para os tratamentos 1, 2 e 3, respectivamente. A densidade energética média dos briquetes foi de $2,294 \text{ MJ m}^{-3}$, $3,059 \text{ MJ m}^{-3}$ e $3,354 \text{ MJ m}^{-3}$, para os respectivos tratamentos. A variação entre os tratamentos, indica que o tratamento da umidade influenciou significativamente tais propriedades. O tratamento 3, apresentou a maior densidade aparente média e conseqüentemente a maior densidade energética, indicando uma maior compactação e potencial energético dos briquetes produzidos nesse tratamento.

Esses dados mostram que a redução de volume proporcionada pela densificação facilita o manejo e o armazenamento dos resíduos, além de minimizar o impacto ambiental. Comparando com outros resíduos agrícolas amplamente utilizados no Brasil, como o bagaço de cana-de-açúcar e a palha de cana, cujas densidades variam entre $0,870$ e $0,950 \text{ g cm}^{-3}$, os briquetes de casca de pequi demonstram valores próximos ou superiores (C. SILVA et al., 2021). Entretanto, ao comparar com briquetes de bambu, que apresentam uma densidade energética de $7,030 \text{ MJ m}^{-3}$, é importante notar que o processo de fabricação industrial utilizado para o bambu gera maior compactação, diferindo do processo manual empregado neste estudo (KRISHNAMOORTHY et al., 2023). Ademais, a densidade dos briquetes apresentou comportamento similar ao encontrado em outros estudos que utilizou diferentes porcentagens de umidade para compactação de briquetes, corroborando a tendência de que um maior teor de umidade na biomassa resulta em briquetes mais densos (ABDEL AAL et al., 2023).

2.3.5 Análise de resistência dos briquetes

Os briquetes submetidos aos diferentes tratamentos apresentaram variações na resistência à compressão. Após a aplicação do teste de Tukey, conclui-se que o tratamento 1 obteve a maior resistência à compressão, com uma média significativamente superior à do tratamento 3, enquanto o tratamento 2 apresentou uma média intermediária, que não é significativamente diferente das médias de T1 e T3. Em termos de valores, T1 apresentou a maior resistência à compressão, com $1,57 \text{ MPa}$, seguido teor T2 e T3 com resistências de $1,27 \text{ MPa}$ e $1,18 \text{ MPa}$, respectivamente. Os resultados indicam que, embora todos os briquetes tenham uma resistência suficiente para aplicações práticas, há uma diferença na capacidade de suportar compressão entre os tratamentos.

Em um trabalho que utilizou resíduos de poda urbana de *Ficus nitida* para a produção

de briquetes, também foi observada uma relação entre a umidade e a resistência à compressão. Os briquetes foram produzidos com umidades de 8%, 10% e 15%, apresentando a maior resistência à compressão para a umidade de 8%, que foi de 18,5 MPa. Em comparação, o briquete com 15% de umidade teve resistência de 15,8 MPa, evidenciando o impacto negativo da umidade na resistência do material (ABDEL AAL et al., 2023).

No presente estudo, o método de briquetagem manual resultou em valores de resistência significativamente menores quando comparados aos obtidos em trabalhos que utilizaram processos de compactação mecanizada. Essa diferença pode ser explicada pela menor aplicação de força, o que resulta em briquetes com menor resistência. É importante destacar que o método de briquetagem manual foi escolhido neste estudo com o objetivo de desenvolver uma técnica simples e acessível, que possa ser facilmente replicada por pequenas comunidades, permitindo a produção de biocombustíveis a partir de resíduos abundantes na região.

A densidade e a resistência à compressão são os dois parâmetros mais importantes do briquete, e são controladas por uma série de parâmetros de qualidade que afetam a capacidade dos materiais densificados de permanecerem intactos durante todo o armazenamento e transporte (ALI et al., 2024). Dessa forma, os resultados obtidos demonstram a necessidade de otimizar o processo de compactação, buscando aumentar a resistência mecânica dos briquetes sem comprometer a simplicidade da técnica.

2.4 Conclusão

Os resíduos da casca de pequi foram eficazes para a produção de briquetes que apresentaram boa resistência mecânica e propriedades físico-químicas adequadas, garantindo um bom potencial energético. Além de otimizar a logística de transporte e armazenamento, a briquetagem da casca de pequi representa uma alternativa promissora para o desenvolvimento de bioenergia sustentável. Esse processo beneficia comunidades extrativistas ao agregar valor a subprodutos e incentivar a economia local, proporcionando uma fonte de renda adicional. Além disso, contribui para a otimização da cadeia produtiva do setor e amplia o conhecimento acadêmico sobre o desempenho físico e energético de biocombustíveis regionais, transformando a biomassa residual em uma fonte útil de energia aliada à preservação ambiental. Contudo, uma limitação do estudo foi o processo manual de briquetagem. O uso de um maquinário industrial poderia aprimorar a qualidade dos briquetes. Assim, para estudos futuros sugere-se explorar métodos mecanizados para otimizar esses resultados.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7190: Projeto de Estruturas de Madeiras**. Rio de Janeiro, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8633: Carvão vegetal: determinação do poder calorífico**. Rio de Janeiro, 1984.
- ABDEL AAL, A. M. K. et al. Impact of Biomass Moisture Content on the Physical Properties of Briquettes Produced from Recycled *Ficus nitida* Pruning Residuals. **Sustainability**, v. 15, n. 15, p. 11762, 31 jul. 2023.
- ALI, A. et al. Insight into the Biomass-Based Briquette Generation from Agro-Residues: Challenges, Perspectives, and Innovations. **BioEnergy Research**, v. 17, n. 2, p. 816–856, 23 jan. 2024.
- ASADULLAH, M. et al. Production of bio-oil from fixed bed pyrolysis of bagasse. **Fuel**, v. 86, n. 16, p. 2514–2520, nov. 2007.
- ASTM D 1762-84. Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal. **ASTM International**, v. 84, n. Reapproved 2007, p. 1–2, 2011.
- BOT, B. V.; TAMBA, J. G.; SOSSO, O. T. Assessment of biomass briquette energy potential from agricultural residues in Cameroon. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 14, n. 2, p. 1905–1917, 27 jan. 2024.
- CARNEIRO, R. et al. Struggling over Serra do Curral. **Cosmopolitan Civil Societies: An Interdisciplinary Journal**, v. 15, n. 1, p. 33–52, 26 mar. 2023.
- C. SILVA, N. et al. Characterization and Energy Densification of Agroindustrial Residues Blends. **Revista Virtual de Química**, v. 13, n. 6, p. 1251–1256, 2021.
- FILIZOLA, B. DE C. **Boas práticas de manejo para o extrativismo sustentável da fava d'anta**. Brasília: Instituto Sociedade, População e Natureza, 2013.
- FONSECA, A.; NETO, N.; MENDES, J. Modeling logistics applied to extraction of pequi. **REVISTA DE TRANSPORTE Y TERRITORIO**, n. 26, p. 338–358, 2023.
- GOMES, B. H. et al. Genetic diversity and correlation between morphological traits of pequi fruits (*Caryocar brasiliense* Camb.) with and without thorns at the endocarp. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 94, n. suppl 4, 2022.
- KRISHNAMOORTHY, S. et al. Production and Characterization of Sustainable Biomass Briquettes from Selected Bamboo Species. **Journal of Biobased Materials and Bioenergy**, v. 17, n. 5, p. 650–661, 1 out. 2023.
- KUMAR, R. et al. Effect of Extractive Content on Fuelwood Characteristics of Certain Woody and Non-Woody Biomass. **Current Science**, v. 118, n. 6, p. 966, 25 mar. 2020.
- MARKS-BIELSKA, R. et al. The Importance of Renewable Energy Sources in Poland's Energy Mix. **Energies**, v. 13, n. 18, p. 4624, 5 set. 2020.
- MESQUITA, J. G. et al. Wood waste pellets from sustainable forest management in the Amazon as an energy source. **Caderno Pedagógico**, v. 21, n. 6, p. e4769, 6 jun. 2024.

MISHRA, R. K.; MOHANTY, K. Pyrolysis kinetics and thermal behavior of waste sawdust biomass using thermogravimetric analysis. **Bioresource Technology**, v. 251, p. 63–74, mar. 2018.

MUMBACH, G. D. et al. Unlocking the potential of pequi (*Caryocar brasiliense*) residues for bioenergy and renewable chemicals: Multicomponent kinetic modeling, thermodynamic parameter estimation, and characterization of volatile products through TGA and Py-GC/MS experiments. **Industrial Crops and Products**, v. 209, p. 117928, mar. 2024.

OBI, O. F. et al. Solid Biofuel Production from Biomass: Technologies, Challenges, and Opportunities for Its Commercial Production in Nigeria. **Energies**, v. 16, n. 24, p. 7966, 8 dez. 2023.

RAMBO, M. K. D. et al. Characterization of biomasses from the north and northeast regions of Brazil for processes in biorefineries. **Food Science and Technology**, v. 35, n. 4, p. 605–611, 15 set. 2015.

SANTOS, V. O. et al. Pyrolysis of acai seed biomass: Kinetics and thermodynamic parameters using thermogravimetric analysis. **Bioresource Technology Reports**, v. 12, p. 100553, dez. 2020.

SCAPIN, E. et al. Production of Furanic Compounds and Organic Acids from Brazilian Pequi (*Caryocar brasiliensis* Camb.) Residues Using Green Chemistry. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, 2020.

SHRESTHA, A. et al. Evolution of energy mix in emerging countries: Modern renewable energy, traditional renewable energy, and non-renewable energy. **Renewable Energy**, v. 199, p. 419–432, nov. 2022.

TECHINICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. TAPPI – T204cm-97: Solvent extractives of wood and pulp: Standards Regulations and Style Guidelines. Atlanta: TAPPI Press, 1997d.

TECHINICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. TAPPI – T222om-98: Acid Insoluble Lignin in Wood and Pulp. Atlanta: TAPPI Press, 1997d.

WIRANARONGKORN, K. et al. Assessment and analysis of multi-biomass fuels for sustainable electricity generation. **Renewable Energy**, v. 180, p. 1405–1418, dez. 2021.

YAMAN, E.; ÖZBAY, N. Effect of different pre-treatment techniques on thermogravimetric characteristics and kinetics of lignocellulosic biomass pyrolysis. **Journal of the Energy Institute**, v. 111, p. 101419, dez. 2023.

CAPÍTULO 3

PROPRIEDADES ENERGÉTICAS DE BRIQUETES PRODUZIDOS A PARTIR DA CASCA DE PEQUI (*Caryocar brasiliense* CAMB.): INFLUÊNCIA DA UMIDADE E DA TEMPERATURA DE CARBONIZAÇÃO

RESUMO

Os resíduos agroindustriais têm se tornado uma escolha favorável para produção de bioenergia. No estado de Minas Gerais, a cadeia produtiva do pequi (*Caryocar brasiliense* Camb.) exerce contribuição econômica e social, no entanto, a coleta e o processamento do fruto, acarreta o acúmulo de resíduos, como a casca, cujo descarte inadequado pode gerar impactos ambientais significativos. Esse estudo avaliou como a umidade de produção e a temperatura de carbonização influenciam as propriedades energéticas de briquetes de resíduos de casca de pequi. As carbonizações foram realizadas em duas temperaturas finais (360°C e 480°C) com uma taxa de 1,5°C min⁻¹. Para avaliar os efeitos dessas variáveis, determinou-se o rendimento gravimétrico com base na massa seca, a caracterização dos briquetes carbonizados por meio da análise imediata, poder calorífico superior (PCS), densidade aparente, densidade energética e índice de quebra. O experimento seguiu um delineamento inteiramente casualizado em arranjo fatorial, considerando a umidade de produção dos briquetes e a temperatura final da carbonização. Os resultados revelaram que a temperatura de carbonização exerceu maior influência sobre as propriedades do briquete carbonizado do que a umidade inicial. A temperatura de 480 °C promoveu um aumento no teor de carbono fixo e no PCS dos briquetes, embora tenha resultado em menor rendimento gravimétrico. Por outro lado, os efeitos da umidade foram mais evidentes nas carbonizações conduzidas a 360 °C, indicando uma interação dependente da temperatura. Os achados evidenciam o potencial da casca de pequi como matéria-prima para a produção de biocombustíveis sólidos de alto desempenho, contribuindo para o aproveitamento de resíduos agroindustriais e para o avanço de estratégias voltadas à bioeconomia circular e à descarbonização da matriz energética.

Palavras-chave: Biomassa adensada; Energia de biomassa; Temperatura de carbonização.

3.1 Introdução

A ampliação do debate sobre a transição energética exige dos países maiores esforços para promoção da utilização de fontes renováveis de energia de forma alinhada ao desenvolvimento econômico sustentável. Nesse cenário, os resíduos extrativistas emergem como uma alternativa promissora para a produção de bioenergia, contribuindo para a mitigação dos impactos ambientais e o aproveitamento sustentável dos recursos, favorecendo a economia circular (KUMBA et al., 2024). Além de seu uso tradicional como fertilizantes, forragens e matéria-prima industrial, a conversão da biomassa em biocombustíveis se destaca como uma estratégia eficiente para mitigar as mudanças climáticas, reforçar a segurança energética e impulsionar o desenvolvimento econômico regional (AZADBAKHT; SAFIEDDIN ARDEBILI; RAHMANI, 2023).

O pequi (*Caryocar brasiliense* Camb.), é uma árvore da família das cariocaráceas e um dos símbolos do Cerrado brasileiro. Constitui uma base importante para a economia regional e para a subsistência de diversas famílias, sendo explorado principalmente por meio do extrativismo. O fruto do pequi é comercializado de diferentes formas, como *in natura*, polpa, óleo, licores, doces e cosméticos, atendendo tanto ao mercado local quanto à indústria. No entanto, a alta demanda pelo fruto gera grandes volumes de resíduos, especialmente cascas, que podem se tornar um problema ambiental caso não sejam devidamente gerenciados (BRITO CANGUSSU et al., 2021).

A densificação dessas cascas na forma de briquetes é uma das técnicas de aproveitamento desse resíduo que além de melhorar suas propriedades energéticas, facilita questões logísticas como manipulação, transporte e armazenamento. Diante disso, integrar a gestão de resíduos com estratégias de produção de energia renovável é fundamental para promover a economia circular, agregando valor à cadeia produtiva do pequi. Essa abordagem não apenas mitiga os impactos do descarte inadequado, mas também contribui para os objetivos de desenvolvimento sustentável (KUMBA et al., 2024).

Neste contexto, a carbonização, processo que resulta principalmente em carvão vegetal e gera subprodutos como gases não condensáveis e líquidos condensáveis, se destacaria como um método eficaz para aprimorar as propriedades energéticas dos resíduos de pequi após seu adensamento. Esse processo complementa os benefícios da produção de briquetes, como o aumento do poder calorífico e do teor de carbono (KIPNGETICH et al., 2023). A temperatura de carbonização e a taxa de aquecimento influenciam diretamente a proporção dos produtos sólidos e dos subprodutos gasosos e líquidos (KORKMAZ, 2022), tornando-se importante

investigar como que carbonização dos biocombustíveis em diferentes temperaturas pode influenciar suas propriedades físicas e químicas, determinando sua eficiência como biocombustível sólido.

Este estudo tem como objetivo analisar a influência da umidade de produção dos briquetes e da temperatura de carbonização sobre os parâmetros químicos, térmicos e físicos da biomassa de casca de pequi, analisando também os efeitos dessas variáveis combinadas no rendimento gravimétrico e na formação de subprodutos durante o processo. Em resposta às crescentes preocupações ambientais e à necessidade de atender aos objetivos de desenvolvimento sustentável, a pesquisa visa explorar alternativas para o reaproveitamento desses resíduos, promovendo a economia circular e integrando a cadeia produtiva do pequi, transformando resíduos ambientais em ativos econômicos.

3.2 Metodologia

3.2.1 Material Utilizado

As cascas de pequi utilizadas como matéria-prima foram coletadas em mercados e pontos de venda na cidade de Montes Claros, em Minas Gerais (16°42'56"S; 43°51'58"W; 624m). Os briquetes de pequi destinados à carbonização foram compactados utilizando uma prensa manual equipada com tubos de 7,5 cm de diâmetro e operada por um macaco hidráulico, que garantiu a pressão necessária para a formação das partículas (Figura 7). A pressão aplicada não foi monitorada ou quantificada, uma vez que o processo foi conduzido manualmente, devido à natureza do equipamento.

Figura 7 – Prensa manual utilizada na compactação da biomassa e produção dos briquetes.



Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

O tempo de prensagem foi fixado em cinco minutos. Conforme descrito por Lima et al. (2024), os briquetes foram confeccionados sob três condições experimentais distintas, diferenciadas exclusivamente pela umidade da biomassa no momento da compactação. Para cada unidade do briquete, foram utilizados aproximadamente 500 g de casca de pequi in natura. A umidade da biomassa foi ajustada por meio da adição de volumes específicos de água. No primeiro tratamento (T1), foram adicionados 25 mL, resultando em uma umidade de 5% (base úmida); no segundo (T2), 37,5 mL, elevando a umidade para 7,5%; e no terceiro (T3), 50 mL, alcançando 10% de umidade. É importante destacar que esses valores referem-se à umidade da biomassa imediatamente antes do processo de compactação, não representando a umidade final dos briquetes no momento da carbonização. Após a prensagem, os briquetes foram dispostos à sombra, em ambiente ventilado, para secagem natural até atingirem massa constante, o que ocorreu aproximadamente sete dias após a fabricação. Ao final do processo de secagem, a umidade residual dos briquetes variou entre 8,0% e 8,7.

3.2.2 Carbonização dos briquetes e rendimentos da carbonização

As carbonizações foram realizadas em triplicata, utilizando dois briquetes de cada tratamento, em uma mufla de laboratório com aquecimento elétrico adaptada para recuperar o licor pirolenhoso. O aquecimento foi realizado com uma taxa de $1,5^{\circ}\text{C min}^{-1}$ até atingir as temperaturas finais de 360°C e 480°C . Na Tabela 2 estão as condições de aquecimento, em função do tempo e a temperatura utilizados para a carbonização dos briquetes.

Tabela 2 – Marcha de carbonização em função do tempo e temperatura de carbonização.

Marcha	Temperatura (°C)							Tempo total (min)
	120	180	240	300	360	420	480	
1	40	40	40	40	80	-	-	240
	min	min	min	min	min			
2	40	40	40	40	40	40	80	320
	min	min	min	min	min	min	min	

Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

O rendimento gravimétrico foi calculado com base na razão entre a massa seca do briquete carbonizado obtido e a massa seca do briquete antes da carbonização, conforme Equação (1). Para isso, os briquetes foram previamente secos em estufa até massa constante antes da carbonização, de modo a eliminar a influência da umidade na determinação do rendimento. Da mesma forma, após a carbonização, os briquetes carbonizados também foram secos antes da pesagem, garantindo que o cálculo do rendimento refletisse apenas a perda de massa relacionada à degradação térmica dos componentes orgânicos, e não à evaporação da água.

$$RG = \frac{MBC}{MB} * 100 \quad (1)$$

Em que:

RG: rendimento gravimétrico (%);

MBC: massa seca do briquete carbonizado (g);

MB: massa seca do briquete (g).

O rendimento de licor pirolenhoso foi calculado pela divisão da massa de líquido pela massa seca como na Equação (2)

$$RLP = \frac{ML}{MB} * 100 \quad (2)$$

Em que:

RLP: rendimento em líquido pirolenhoso (%);

ML: massa do líquido (g);

MB: massa seca do briquete (g).

O rendimento em gases não condensáveis foi obtido por diferença, utilizando a Equação (3)

$$RGNC = 100 - RG - RLP \quad (3)$$

Em que:

RGNC: rendimento em gases não condensáveis (%);

RG: rendimento gravimétrico (%);

RLP: rendimento em líquido pirolenhoso (%).

3.2.3 Propriedades do Briquete Carbonizado

A densidade aparente dos briquetes foi calculada a partir da relação entre a massa e o volume conforme descrito pela norma ISO 18847 (2016). A massa foi obtida por pesagem em balança analítica, enquanto o volume foi determinado com base nas medições dos diâmetros dos briquetes, realizadas com um paquímetro digital.

O índice de quebra do briquete carbonizado foi aferido seguindo os procedimentos descritos na norma ABNT NBR 7416 (1984). O índice de quebra foi calculado a partir da Equação (1):

$$IQ = \left(1 - \frac{Pf}{PF}\right) * 100 \quad (4)$$

Em que:

IQ: índice de quebra (%);

Pf: massa do fragmento após o ensaio (g);

PF: massa da amostra antes do ensaio (g).

A umidade do material foi determinada conforme os procedimentos estabelecidos pela norma ASTM D1762 (2021). Os teores de cinzas e de materiais voláteis também foram analisados seguindo esse procedimento, enquanto o teor de carbono fixo foi calculado pela diferença entre 100% e a soma dos teores de materiais voláteis e de cinzas. O poder calorífico foi medido por meio de calorímetro adiabático, seguindo os critérios estabelecidos pela NBR 8633 (1984).

A densidade energética foi determinada para cada tratamento com base no produto entre os valores do poder calorífico e da densidade aparente.

3.2.4 Análise Estatística

O delineamento experimental adotado foi o inteiramente casualizado, em arranjo fatorial 3x2, considerando dois fatores: os tratamentos de umidade utilizados na confecção dos briquetes e as duas marchas de carbonização aplicadas. Antes da análise estatística, a normalidade dos dados foi verificada por meio do teste de Shapiro-Wilk. Para os valores que não violaram a normalidade ($p > 0,05$), foram realizadas as análises paramétricas para comparação dos tratamentos. Entre os dados analisados, apenas o rendimento do licor pirolenhoso não apresentou distribuição normal, mesmo após a aplicação de transformações estatísticas. Diante disso, optou-se pela remoção de dois valores considerados outliers, ambos pertencentes ao tratamento com 7,5% de umidade (tratamento 2), sendo um referente à marcha de carbonização com temperatura final de 360 °C e o outro à de 480 °C. Nas interações significativas entre os fatores, foi aplicado o teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade, para a comparação das médias e realização dos devidos desdobramentos, a fim de compreender melhor os efeitos individuais e combinados dos tratamentos.

3.3 Resultados

3.3.1 Rendimentos da Carbonização dos briquetes da casca de pequi

De acordo com os valores obtidos para o rendimento gravimétrico (Tabela 3), a interação entre umidade da biomassa na confecção dos briquetes e marcha de carbonização não foi significativa ($p = 0,3846$), o que indicou que o efeito da marcha de carbonização no rendimento gravimétrico não depende do nível de umidade. A marcha de carbonização foi altamente significativa ($p < 0,0001$), evidenciando que a temperatura final da carbonização afetou o rendimento. A umidade, isoladamente, não teve efeito estatisticamente significativo ($p = 0,7593$), sugerindo que sua alteração, dentro das faixas testadas, não influencia o rendimento.

Tabela 3 – Valores médios e desvio padrão para rendimento gravimétrico, licor pirolenhoso e gases não condensáveis após carbonização dos briquetes.

Variável	Marcha (°C)	Tratamento			CV(%)
		1	2	3	
RG (%)	360	39,18 ± 0,41 Aa	39,16 ± 0,42 Aa	39,32 ± 0,11 Aa	1,22

	480	33,25 ± 0,08 Ba	33,36 ± 0,10 Ba	32,84 ± 0,14 Ba	
RLP (%)	360	37,17 ± 0,41 Aa	43,32 ± 0,79 Ab	37,66 ± 0,59 Aa	2,43
	480	39,17 ± 0,82 Aa	38,67 ± 0,54 Ba	39,95 ± 0,14 Ab	
RGNC (%)	360	23,65 ± 0,65 Aa	20,10 ± 2,26 Aa	23,02 ± 0,52 Aa	9,86
	480	27,58 ± 0,82 Ba	30,50 ± 2,45 Ba	27,21 ± 0,07 Ba	

Legenda: T1 – briquetes produzidos com 5% de umidade; T2 – briquetes produzidos com 7.5% de umidade; T3 – briquetes produzidos com 10% de umidade; RG – rendimento gravimétrico; RLP – rendimento de licor pirolenhoso; RGNC – rendimento de gases não condensáveis. Médias e desvio padrão de uma mesma variável em uma coluna seguidas de letras maiúsculas iguais não diferem entre si quanto a marcha e médias em uma mesma linha seguidas de letras minúsculas iguais não diferem entre si quanto ao tratamento, a 5% de probabilidade, pelo teste Tukey.

Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

Os resultados da análise fatorial indicam que a interação entre umidade e marcha de carbonização teve influência significativa sobre a porcentagem de licor pirolenhoso. No desdobramento da interação, o efeito da marcha de carbonização dentro de cada nível de umidade apresentou diferença significativa para todos os níveis sendo $p = 0,0275$; $p = 0,0006$; $p = 0,0144$ para umidade 1, 2 e 3, respectivamente. Ao analisar o efeito da umidade dentro de cada marcha de carbonização, foi observada uma diferença significativa apenas para a marcha 1 ($p = 0,0001$), enquanto na marcha 2 a diferença entre os níveis de umidade não foi estatisticamente significativa ($p = 0,3501$).

A análise de variância para a porcentagem de gases não condensáveis não revelou efeitos estatisticamente significativos da umidade inicial ($p = 0,9415$) indicando que variações no teor de umidade da biomassa, isoladamente, não influenciaram a quantidade de licor obtido. A interação entre umidade e marcha também não foi significativa ($p = 0,0760$). Em contrapartida, a marcha de carbonização isoladamente foi estatisticamente significativa ($p = 0,0002$), demonstrando que diferentes marchas de aquecimento influenciaram de forma expressiva a produção de gases não condensáveis.

3.3.2 Propriedades do Briquete Carbonizado

A carbonização dos briquetes a 480°C resultou em maior teor de carbono fixo e maior poder calorífico superior, com valores de até 76,38% de carbono fixo e 25,31 MJ kg⁻¹ de PCS (Tabela 4), indicando maior eficiência energética em comparação aos briquetes carbonizados a 360°C.

Tabela 4 – Propriedades dos briquetes carbonizados

Variável	Mar cha (°C)	Tratamento			CV (%)
		1	2	3	
TMV (%)	360	25,85 ± 0,18 Aa	22,76 ± 0,10 Ab	27,55 ± 0,83 Aa	3,77
	480	11,49 ± 0,37 Ba	11,79 ± 0,32 Ba	11,81 ± 0,10 Ba	
TC (%)	360	13,72 ± 1,12 Aa	9,50 ± 0,27 Aa	9,09 ± 0,54 Aa	23,17
	480	12,12 ± 2,91 Aa	13,95 ± 2,14 Aa	13,08 ± 0,77 Aa	
TCF (%)	360	60,42 ± 1,25 Ba	67,74 ± 0,29 Ba	63,36 ± 0,34 Ba	4,12
	480	76,38 ± 2,82 Aa	74,25 ± 2,45 Aa	75,10 ± 0,79 Aa	
IQ (%)	360	38,63 ± 0,31 Ab	56,56 ± 0,48 Aa	58,43 ± 1,21 Aa	2,65
	480	60,67 ± 1,58 Bb	75,77 ± 0,06 Ba	63,23 ± 0,75 Bb	
DA (g cm⁻³)	360	0,045 ± 0,0008 Ba	0,036 ± 0,0023 Ba	0,046 ± 0,0039 Ba	7,42
	480	0,055 ± 0,0022 Aa	0,062 ± 0,0010 Aa	0,058 ± 0,0008 Aa	
PCS (MJ kg⁻¹)	360	24,06	24,46	24,42	-
	480	25,10	25,31	25,09	
DE (GJ m⁻³)	360	1,0827 ± 0,0192 Ba	0,8806 ± 0,0563 Ba	1,1233 ± 0,1465 Ba	7,42
	480	1,3805 ± 0,0552 Aa	1,5692 ± 0,0253 Aa	1,4552 ± 0,0200 Aa	

Legenda: T1 – briquetes produzidos com 5% de umidade; T2 – briquetes produzidos com 7.5% de umidade; T3 – briquetes produzidos com 10% de umidade; TMV – teor de materiais voláteis; TC – teor de cinzas; TCF – teor de carbono fixo; DA – densidade aparente; IQ – índice de quebra; DE – densidade energética. Médias e desvio padrão de uma mesma variável em uma coluna seguidas de letras maiúsculas iguais não diferem entre si quanto a marcha e médias em uma mesma linha seguidas de letras minúsculas iguais não diferem entre si quanto ao tratamento, a 5% de probabilidade, pelo teste Tukey.

Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

A análise de variância para o teor de cinzas nos briquetes não revelou efeitos estatisticamente significativos da umidade inicial, da marcha de carbonização, nem da interação entre esses fatores.

Os resultados da análise fatorial indicam que a interação entre umidade e marcha de carbonização teve influência significativa sobre os teores de voláteis, mas apenas na marcha 1. Nessa condição, foi observada uma diferença altamente significativa entre os tratamentos de umidade ($p < 0,0001$), sugerindo que a umidade inicial do material afeta diretamente a liberação de compostos voláteis durante a pirólise. Por outro lado, na marcha 2, esse efeito não foi significativo ($p = 0,8238$), indicando que o tempo maior de exposição ao calor pode limitar a influência da umidade sobre os voláteis.

O teor de carbono fixo foi significativamente influenciado pela marcha ($p < 0,0001$), enquanto a umidade isoladamente não apresentou efeito significativo ($p = 0,3117$). No entanto, houve interação significativa entre umidade e marcha ($p = 0,0439$), indicando que o efeito da marcha sobre o carbono fixo depende do nível de umidade. O desdobramento da interação mostrou que, para a marcha 1, os níveis de umidade influenciaram significativamente o teor de carbono fixo ($p = 0,0268$), enquanto para a marcha 2, essa diferença não foi significativa ($p = 0,6658$). Por outro lado, o efeito da marcha dentro de cada tratamento de umidade foi significativo nas três condições avaliadas: umidade 1 ($p < 0,0001$), umidade 2 ($p = 0,0165$) e umidade 3 ($p = 0,0003$). Esses resultados demonstram que o efeito da marcha sobre o carbono fixo varia de acordo com o teor de umidade, reforçando a importância da análise conjunta desses fatores na otimização do processo.

A análise estatística revelou efeitos significativos dos fatores umidade, marcha e da interação entre ambos sobre o índice de quebra, indicando que esses fatores não atuam de forma isolada. A interação significativa ($p < 0,0001$) evidencia que o impacto da umidade no índice de quebra depende do nível da marcha aplicada, e vice-versa. O desdobramento dos fatores, reforçaram isso: dentro da marcha 1, os diferentes níveis de umidade foram significativos sobre o índice de quebra ($p < 0,0001$), o que também ocorreu dentro da marcha 2. A marcha também teve efeito significativo dentro de cada tratamento de umidade — sendo $p < 0,0001$ para os tratamentos 1 e 2 e $p = 0,0026$ para o tratamento 3. Os resultados mostram que as variáveis são interdependentes, tornando necessária a análise conjunta para entender corretamente os efeitos no índice de quebra e definir condições mais adequadas.

A densidade aparente dos briquetes foi significativamente influenciada pela marcha de carbonização ($p < 0,0001$), enquanto o fator umidade isolado não apresentou efeito estatisticamente significativo ($p = 0,4202$). No entanto, a interação entre umidade e marcha foi significativa ($p = 0,0089$), indicando que o efeito da marcha sobre a densidade varia conforme o teor de umidade do material. A análise revelou que a marcha influenciou a densidade em todos os níveis de umidade analisados ($p < 0,05$). Por outro lado, ao analisar o efeito da umidade dentro de cada marcha, apenas na marcha 1 ($p = 0,0211$) houve significância, enquanto na marcha 2 o efeito da umidade não foi significativo ($p = 0,1081$).

Nesse estudo, verificou-se que o aumento da temperatura da pirólise, resultou no aumento do poder calorífico e da densidade energética. A partir dos resultados do teste de Tukey ($p < 0,05$) observou-se que as carbonizações a $480\text{ }^{\circ}\text{C}$ formaram grupos estatisticamente superiores, evidenciando o impacto da temperatura de carbonização no desempenho energético dos briquetes.

3.4 Discussão

3.4.1 Rendimento da Carbonização

Verificou-se que o aumento da temperatura de carbonização reduziu o rendimento gravimétrico, enquanto a geração de licor pirolenhoso aumentou, o que indica que temperaturas mais elevadas promovem uma maior decomposição da biomassa, resultando em menor quantidade do briquete carbonizado e aumento dos subprodutos líquidos e gasosos. Esse comportamento é consistente com um estudo sobre a carbonização de *Eucalyptus microcorys*, que mostrou uma redução de 5% no rendimento gravimétrico do carvão vegetal quando a temperatura final de carbonização aumentou de 500°C para 900°C (VIEIRA et al., 2013). Resultados semelhantes mostraram que o aumento da temperatura de pirólise reduz o rendimento de carvão vegetal e eleva os rendimentos de gases condensáveis e não condensáveis (COSTA et al., 2020).

Durante a carbonização com temperatura final de 360°C, observou-se a presença de licor pirolenhoso, fumaça e formação da chama nas temperaturas de 241°C, 323°C e 360°C, respectivamente. Já para a carbonização com temperatura final de 480°C, esses fenômenos ocorreram nas temperaturas de 240°C, 333°C e 360°C, respectivamente. Um estudo similar que utilizou *Eucalyptus* spp relatou que os picos máximos de emissão de gases e licor pirolenhoso ocorreram na faixa de temperaturas entre 300°C e 450°C (CANAL et al., 2016).

A decomposição dos principais constituintes da biomassa, está diretamente relacionada aos produtos gerados durante a carbonização, já que cada componente se degrada em faixas de temperatura distintas. A celulose e a hemicelulose se decompõem em temperaturas relativamente mais estreitas, enquanto a lignina apresenta uma degradação em faixas mais altas. Essa diferença na pirólise explica a variação na formação dos produtos, pois a lignina tende a produzir mais carvão vegetal, enquanto a celulose e hemicelulose favorecem a geração de líquidos e gases (R. CHANDRARATNE; G. DAFUL, 2022). Em concordância com isso, Shrivastava et al. (2021) relatam que há maior rendimento líquido da biomassa lenhosa do que da biomassa não lenhosa, devido à decomposição térmica dos altos teores de celulose e hemicelulose na biomassa lenhosa.

Além disso, as quantidades relativas de carvão vegetal, gases e líquidos dependem não apenas da composição da biomassa, mas também das condições do processo, como temperatura, taxa e duração do aquecimento. Temperaturas mais baixas combinadas com tempos longos favorecem a formação de produtos sólidos, temperaturas elevadas e tempos prolongados aumentam a emissão de gases, e temperaturas moderadas com curtos tempos de residência

tendem a gerar mais líquidos. Assim, a faixa de temperatura em que os produtos aparecem está ligada tanto à degradação térmica dos constituintes da biomassa quanto às condições operacionais da carbonização (R. CHANDRARATNE; G. DAFUL, 2022).

Um aumento na temperatura leva a um aumento do rendimento de gás não condensável pois em temperaturas mais elevadas os gases condensáveis são convertidos em licor pirolenhoso (SHRIVASTAVA et al., 2021). Palamanit et al. (2019) ao estudar biomassas lenhosas e não lenhosas, verificaram que os rendimentos dos produtos do licor pirolenhoso, da fração sólida e gás de pirólise mantiveram-se nas faixas de 32,96 - 45,99, 23,41 - 37,51 e 25,23 - 37,58% em peso, respectivamente, valores semelhantes aos desse estudo. No que se refere ao licor pirolenhoso, estudos de Vilas-Boas et al. (2024) mostram que para a mesma taxa de aquecimento, o aumento da temperatura pode resultar em um aumento de até 15% em média no rendimento de licor pirolenhoso. Para os dados desse estudo, os valores se encontram dentro do limite verificado. Esse incremento pode ser explicado pelo aumento da extensão das reações de decomposição termoquímica primária que promovem a formação de mais vapores de pirólise (VILAS-BOAS et al., 2024).

3.4.2 Propriedades do Briquete Carbonizado

Verificou-se o aumento na temperatura de pirólise diminuiu o teor de material volátil, exibindo uma tendência semelhante com o rendimento, enquanto uma tendência oposta foi encontrada para o teor de carbono fixo. Estudo sobre o efeito da temperatura nas propriedades estruturais e físico-químicas em galhos de macieira carbonizados tiveram os mesmos achados (ZHAO; TA; WANG, 2017), corroborando com esse trabalho. Esse comportamento se explica pela intensificação da degradação térmica dos compostos voláteis em temperaturas mais elevadas, o que promoveu sua conversão em líquidos e gases, ao invés da permanência no material carbonizado (RONSSE et al., 2013; ZHAO; TA; WANG, 2017).

Um briquete que apresente elevados níveis de carbono fixo e baixos teores de substâncias voláteis e cinzas é preferível. Isso ocorre porque com essas características tendem a queimar de forma mais gradual, o que implica um maior tempo de permanência no forno até a combustão total, resultando em uma melhoria no seu consumo específico (LOUREIRO et al., 2021). Estudos relatam que o aumento da temperatura de pirólise leva a um maior teor de cinzas, resultado da concentração progressiva de minerais remanescentes e da degradação térmica das frações lignocelulósicas, que são volatilizadas à medida que a temperatura se eleva (RAFIQ et al., 2016), o que se verifica para a marcha de 480 °C neste estudo.

Um teor elevado de cinzas compromete o poder calorífico e exige cuidados adicionais no uso como biocombustível, como maior frequência de remoção de resíduos sólidos e manutenção de equipamentos térmicos (YANG et al., 2017). Assim, embora os valores encontrados neste trabalho estejam dentro de uma faixa aceitável para aplicações energéticas e mesmo a análise fatorial não indicando influência significativa da temperatura nesse parâmetro, a escolha da temperatura ideal de carbonização deve considerar o equilíbrio entre propriedades energéticas, rendimento e teor de cinzas, visando uma maior eficiência do sistema.

A temperatura pirolítica está diretamente relacionada ao percentual de carbono fixo e isso ocorre devido a um maior grau de polimerização do carbono (DOMINGUES et al., 2017). Os resultados deste estudo estão de acordo com os de pesquisas anteriores que observaram o aumento do teor de carbono fixo com o aumento da temperatura de pirólise, que foi verificado em diferentes tipos de materiais carbonizados, como os derivados de resíduos de fibras, folhas e pecíolos de tamareiras; de resíduos de tomateiros; de plantas de pepino; e de resíduos vegetais de *conocarpus* (ALMUTAIRI et al., 2023).

Considerando a cadeia produtiva do pequi e a aplicação dos briquetes carbonizados no preparo de alimentos e no aquecimento residencial, a temperatura de 480 °C se mostra mais adequada por resultar em materiais com maior poder calorífico e teor de carbono fixo. Em contextos residenciais, essas características são mais importantes do que o rendimento gravimétrico, pois proporcionam uma queima mais eficiente, desejável em usos domésticos.

Como observado em estudos anteriores, a dureza dos materiais vegetais diminui à medida que a temperatura final de carbonização aumenta (ABREU NETO et al., 2018). O índice de quebra se relaciona inversamente com a resistência. Neste estudo, constatou-se que, com o aumento da taxa de aquecimento, houve maior degradação da estrutura do briquete carbonizado, o que reduziu sua resistência física e elevou o índice de quebra. Essa diminuição da resistência pode estar associada à maior liberação de gases voláteis durante a carbonização, o que compromete a integridade estrutural do material (COSTA et al., 2017). Estudo com temperatura de carbonização variando de 300 a 700°C mostrou que a resistência do carvão de madeira de *Eucalyptus* diminui conforme a temperatura aumenta. Contudo, a degradação térmica dos componentes da madeira não explica completamente as mudanças na resistência física do carvão vegetal, outros fatores, como a densidade e a estrutura morfológica, também desempenham um papel importante (SIEBENEICHLER et al., 2017).

Os resultados de densidade não são considerados tão satisfatórios e potenciais para utilizações energéticas, especialmente na siderurgia, que necessita de materiais mais densos (LOUREIRO et al., 2021). No entanto, é importante ressaltar que a compactação foi realizada

em prensa de acionamento manual, o que pode ter influenciado os valores obtidos. Caso os briquetes tivessem sido produzidos em maquinário industrial, é provável que os valores de densidade após o processo de carbonização fossem mais elevados.

Os valores de densidade aparente mostram que o aumento da temperatura, resultou no aumento da densidade. Esse comportamento também foi observado por Vaiškūnaitė, Mažeikienė e Mohammadi (2024), que utilizaram faixas finais de temperatura de 300°C, 400°C, 500°C e 600°C. De forma semelhante, Suresh Babu et al. (2024) verificaram o mesmo padrão ao realizar a pirólise de biomassa residual composta por resíduos mistos de madeira e casca de coco, com temperatura pirolítica variando entre 400 e 800°C. Isso ocorre, pois, temperaturas mais elevadas promovem uma maior compactação das partículas do material carbonizado, ao reduzir a umidade e concentrar o material em um volume menor (VAIŠKŪNAITĖ; MAŽEIKIENĖ; MOHAMMADI, 2024).

O poder calorífico superior é um dos principais parâmetros nas avaliações energéticas, sendo definido como a quantidade de energia liberada por unidade de massa ou volume do combustível após sua combustão completa (YANG et al., 2017). Outro aspecto relevante para a utilização energética, é a densidade energética, que representa a quantidade de energia contida por unidade de volume (PROTÁSIO et al., 2012).

Neste estudo, o aumento da temperatura da pirólise, resultou no aumento do poder calorífico, assim como o que foi relatado por Rambhatla et al. (2025) para resíduos de serragem mista de madeira, e consequentemente o aumento da densidade energética. Esses autores observaram que o poder calorífico aumentou em 5,72% ao aumentar a temperatura de pirólise de 400 para 900 °C devido ao aumento da composição elementar do biochar. Esse comportamento evidencia que o elevado poder calorífico do biochar obtido em temperaturas mais altas reforça seu potencial uso como combustível sólido em sistemas de aquecimento (SURESH BABU et al., 2024).

Resíduos de macaúba quando carbonizados a uma temperatura de 550°C apresentaram densidade energética variando entre 3,64 e 10,45 GJ m⁻³, valores superiores aos encontrados no nosso estudo, mas que se justificam devidos aos teores elevados de lignina na biomassa de macaúba (EVARISTO et al., 2016). De forma semelhante, briquetes de resíduos de processamento de grãos de café carbonizados a uma temperatura de 450°C também apresentaram valores superior aos briquetes de casca de pequi carbonizados no nosso estudo. Os autores relatam uma densidade energética de 22,8 GJ m⁻³, associado ao alto valor de densidade aparente de 0,793 g cm⁻³ (PROTÁSIO et al., 2012). No entanto, os valores menores

de densidade aparente e conseqüentemente de densidade energética estão relacionados ao processo de compactação dos briquetes empregados nesse estudo.

Os resultados desse estudo mostram que a casca de pequi apresenta viabilidade para produção de briquetes carbonizados, o que representa uma vantagem para comunidades extrativistas e pequenos produtores, ao facilitar o aproveitamento local do resíduo, agregando valor e promovendo o fechamento da cadeia produtiva do pequi dentro dos princípios da economia circular, além de melhorar as características energéticas do biocombustível. Os briquetes carbonizados a 480°C proporcionaram maior poder calorífico e teor de carbono fixo, o que favorece sua aplicação em atividades residenciais, como o cozimento de alimentos. No entanto, esse ganho em qualidade energética vem acompanhado de maior teor de cinzas e menor rendimento gravimétrico, o que exige atenção quanto à frequência de limpeza e à eficiência do processo. Já os briquetes carbonizados a 360°C, apesar de apresentar valores menores de poder calorífico e carbono fixo, apresentam melhor rendimento, podendo ser vantajosos em contextos nos quais a produtividade é mais relevante que o desempenho térmico.

Dessa forma, os resultados obtidos neste estudo contribuem para o avanço do conhecimento sobre o aproveitamento energético de resíduos agroindustriais, em especial a casca de pequi, reforçando seu potencial como insumo viável para a produção de biocombustíveis sólidos. A compreensão da influência das variáveis do processo sobre o rendimento e as propriedades do briquete carbonizado permite otimizar condições de produção conforme a utilização final pretendida, seja priorizando eficiência energética ou produtividade. Além disso, os resultados encontrados indicam caminhos promissores para o desenvolvimento de tecnologias sociais voltadas à valorização de resíduos regionais, integrando ciência, sustentabilidade e geração de renda em comunidades extrativistas.

3.5 Conclusão

A temperatura final da carbonização teve maior influência sobre a qualidade dos briquetes carbonizados do que os tratamentos de umidade empregados para a compactação da biomassa. A carbonização a 480 °C gerou briquetes carbonizados com boas propriedades físicas e energéticas, embora com menor rendimento gravimétrico e maior teor de cinzas. Esses resultados evidenciam o potencial da casca de pequi na produção sustentável de biocombustíveis sólidos. Além disso, considerando os princípios da bioeconomia e o contexto de utilização local do resíduo, a valorização da casca de pequi por meio da produção de briquetes carbonizados representa uma alternativa estratégica para comunidades

agroextrativistas, agregando valor a subprodutos regionais e promovendo soluções energéticas mais limpas e acessíveis. Estudos futuros podem explorar o escalonamento do processo, o comportamento em diferentes sistemas de carbonização e a caracterização mais aprofundada do licor pirolenhoso, visando ampliar as possibilidades de utilização integral da biomassa no contexto da bioeconomia circular.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8633: Carvão vegetal: determinação do poder calorífico**. Rio de Janeiro, 1984.
- ABREU NETO, R. DE et al. Dynamic Hardness of Charcoal Varies According to the Final Temperature of Carbonization. **Energy & Fuels**, v. 32, n. 9, p. 9659–9665, 20 set. 2018.
- ALMUTAIRI, A. A. et al. Variations in composition and stability of biochars derived from different feedstock types at varying pyrolysis temperature. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v. 22, n. 1, p. 25–34, jan. 2023.
- ASTM D1762 – 84 Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal. ASTM Internacional, West Conshohocken, PA, 2021.
- AZADBAKHT, M.; SAFIEDDIN ARDEBILI, S. M.; RAHMANI, M. A study on biodiesel production using agricultural wastes and animal fats. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 13, n. 6, p. 4893–4899, 26 abr. 2023.
- BRITO CANGUSSU, L. et al. Profile of bioactive compounds in pequi (Caryocar brasiliense Camb.) peel flours. **Food Chemistry**, v. 350, p. 129221, jul. 2021.
- CANAL, W. D. et al. Comportamento térmico, emissão de gases condensáveis e não condensáveis no processo de carbonização da madeira. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 36, n. 87, p. 261, 30 set. 2016.
- COSTA, J. M. F. N. et al. Influência da temperatura de pirólise nas emissões gasosas, rendimentos e densidade do carvão vegetal. **Revista Ciência da Madeira - RCM**, v. 11, n. 1, p. 53–62, 23 mar. 2020.
- COSTA, L. J. et al. Caracterização mecânica do carvão vegetal de clones Corymbia. **Scientia Forestalis**, v. 45, n. 116, 1 dez. 2017.
- DOMINGUES, R. R. et al. Properties of biochar derived from wood and high-nutrient biomasses with the aim of agronomic and environmental benefits. **PLOS ONE**, v. 12, n. 5, p. e0176884, 11 maio 2017.
- EVARISTO, A. B. et al. POTENCIAL ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS DO FRUTO DA MACAÚBA E SUA UTILIZAÇÃO NA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 2, p. 571–577, 20 jun. 2016.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 18847:2016 — Solid biofuels — Determination of bulk density. Geneva: ISO, 2016.
- KIPNGETICH, P. et al. Effects of carbonization on the combustion of rice husks briquettes in a fixed bed. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 13, p. 100608, abr. 2023.
- KORKMAZ, A. A. Determination of energy value and ash-sulfur content of clean fuel obtained from lignite carbonization at different heating rates. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, v. 44, n. 1, p. 44–56, 31 mar. 2022.
- KUMBA, H. et al. Towards Circular Economy: Integrating Waste Management for Renewable Energy Optimization in Zimbabwe. **Sustainability**, v. 16, n. 12, p. 5014, 12 jun. 2024.
- LIMA, B. L. DE et al. Aproveitamento energético de cascas de pequi na produção de briquetes.

Caderno Pedagógico, v. 21, n. 12, p. e10513, 12 nov. 2024.

LOUREIRO, B. A. 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, n. 1, p. 214–232, 15 mar. 2021.

PALAMANIT, A. et al. Investigation of yields and qualities of pyrolysis products obtained from oil palm biomass using an agitated bed pyrolysis reactor. **Biofuel Research Journal**, v. 6, n. 4, p. 1065–1079, 1 dez. 2019.

PROTÁSIO, T. DE P. et al. Torrefação e carbonização de briquetes de resíduos do processamento dos grãos de café. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 11, p. 1252–1258, nov. 2012.

R. CHANDRARATNE, M.; G. DAFUL, A. Recent Advances in Thermochemical Conversion of Biomass. In: **Recent Perspectives in Pyrolysis Research**. [s.l.] IntechOpen, 2022.

RAFIQ, M. K. et al. Influence of Pyrolysis Temperature on Physico-Chemical Properties of Corn Stover (*Zea mays* L.) Biochar and Feasibility for Carbon Capture and Energy Balance. **PLOS ONE**, v. 11, n. 6, p. e0156894, 21 jun. 2016.

RAMBHATLA, N. et al. Biomass pyrolysis for biochar production: Study of kinetics parameters and effect of temperature on biochar yield and its physicochemical properties. **Results in Engineering**, v. 25, p. 103679, mar. 2025.

RONSSSE, F. et al. Production and characterization of slow pyrolysis biochar: influence of feedstock type and pyrolysis conditions. **GCB Bioenergy**, v. 5, n. 2, p. 104–115, 16 mar. 2013.

SHRIVASTAVA, P. et al. Comparative Investigation of Yield and Quality of Bio-Oil and Biochar from Pyrolysis of Woody and Non-Woody Biomasses. **Energies**, v. 14, n. 4, p. 1092, 19 fev. 2021.

SIEBENEICHLER, E. A. et al. Influência de temperatura e taxas de aquecimento na resistência mecânica, densidade e rendimento do carvão da madeira de *Eucalyptus cloeziana*. **Revista Ciência da Madeira - RCM**, v. 8, n. 2, p. 82–94, 5 maio 2017.

SURESH BABU, K. K. B. et al. Production of biochar from waste biomass using slow pyrolysis: Studies of the effect of pyrolysis temperature and holding time on biochar yield and properties. **Materials Science for Energy Technologies**, v. 7, p. 318–334, 2024.

VAIŠKŪNAITĖ, R.; MAŽEIKIENĖ, A.; MOHAMMADI, K. Effects of Pyrolysis Temperature on Biochar Physicochemical and Microbial Properties for H₂S Removal from Biogas. **Sustainability**, v. 16, n. 13, p. 5424, 26 jun. 2024.

VIEIRA, R. DA S. et al. Influência da temperatura no rendimento dos produtos da carbonização de *Eucalyptus microcorys*. **CERNE**, v. 19, n. 1, p. 59–64, mar. 2013.

VILAS-BOAS, A. C. M. et al. Valorisation of residual biomass by pyrolysis: influence of process conditions on products. **Sustainable Energy & Fuels**, v. 8, n. 2, p. 379–396, 2024.

YANG, X. et al. Thermal Properties of Biochars Derived from Waste Biomass Generated by Agricultural and Forestry Sectors. **Energies**, v. 10, n. 4, p. 469, 2 abr. 2017.

ZHAO, S.-X.; TA, N.; WANG, X.-D. Effect of Temperature on the Structural and Physicochemical Properties of Biochar with Apple Tree Branches as Feedstock Material. **Energies**, v. 10, n. 9, p. 1293, 30 ago. 2017.

Limitações do estudo

Apesar dos resultados positivos encontrados neste estudo, algumas limitações devem ser consideradas. A briquetagem das cascas de pequi foi realizada de forma manual, sem controle da pressão exercida sobre a biomassa. Ao utilizar equipamentos industriais, seria possível melhorar a compactação e conseqüentemente, o desempenho energético dos briquetes. Além disso, como a pesquisa explorou apenas três níveis de umidade de produção e duas temperaturas finais de carbonização, a adoção de mais tratamentos experimentais ofereceria uma compreensão mais abrangente sobre o comportamento energético da biomassa. Por fim, a ausência de análises sobre a fração gasosa e líquida da pirólise, limita a avaliação do aproveitamento integral das cascas de pequi.

Considerações finais

Os resultados deste estudo indicam que os resíduos da casca de pequi apresentam propriedades energéticas promissoras. A briquetagem desse material gerou biocombustíveis sólidos com boa resistência mecânica e características físico-químicas adequadas. Quando submetidos à carbonização, os briquetes carbonizados a 480 °C apresentaram desempenho energético superior, com maior poder calorífico e maior teor de carbono fixo. Além de facilitar o transporte e o armazenamento, o aproveitamento da casca de pequi por meio da briquetagem agrega valor a um subproduto regional e contribui para o fortalecimento da cadeia produtiva. O aproveitamento desse subproduto e a consolidação de rotas tecnológicas podem contribuir não apenas para o aproveitamento eficiente de resíduos lignocelulósicos, mas também para a diversificação da matriz energética em pequenas escalas. Assim, reforça-se a importância de iniciativas interdisciplinares que integrem aspectos técnicos, ambientais e socioeconômicos na busca por sistemas produtivos mais sustentáveis.

Sugestões para futuros trabalhos

Como perspectivas para estudos futuros, recomenda-se o escalonamento do processo produtivo e a avaliação do desempenho da biomassa em diferentes sistemas de carbonização. Também se indica a caracterização do licor pirolenhoso obtido, visando ampliar o aproveitamento integral dos subprodutos no contexto da bioeconomia circular. Além disso, sugere-se a análise dos gases emitidos durante a queima dos briquetes, com o objetivo de avaliar possíveis efeitos tóxicos. Um balanço comparativo entre a quantidade de resíduos de casca gerados e o volume de briquetes produzidos também é recomendado, como forma de estimar o

potencial de aproveitamento. Por fim, seria importante realizar um levantamento regional sobre o consumo de lenha nas comunidades locais, a fim de avaliar a viabilidade de substituição total ou parcial por briquetes, contribuindo assim para a transição energética em contextos rurais.