

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOCOMBUSTÍVEIS

SHORAIA GERMANI WINTER

**CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE USO DOS RESÍDUOS
DA CAFEICULTURA NA PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS SÓLIDOS**

Uberlândia, MG

2025

SHORAIA GERMANI WINTER

**CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE USO DOS RESÍDUOS
DA CAFEICULTURA NA PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS SÓLIDOS**

Dissertação apresentada ao Instituto de Química da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Biocombustíveis.

Área de concentração: Biomassas energéticas: Ciência e tecnologia

Orientador: Dr. Antônio José Vinha Zanuncio

Uberlândia, MG

2025

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

W784 Winter, Shoraia Germani, 1999-
2025 CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE USO DOS
RESÍDUOS DA CAFEICULTURA NA PRODUÇÃO DE
BIOCOMBUSTÍVEIS SÓLIDOS [recurso eletrônico] / Shoraia
Germani Winter. - 2025.

Orientador: Antônio José Vinha Zanuncio.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Pós-graduação em Biocombustíveis.
Modo de acesso: Internet.
DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2025.439>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Biocombustível. I. Zanuncio, Antônio José Vinha ,1987-
(Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação
em Biocombustíveis. III. Título.

CDU: 662.756

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091

Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Biocombustíveis
Av. João Naves de Ávila, 2121 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
Telefone: (34) 3239-4385 / 4208 - www.iq.ufu.br - ppbic@iq.ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Biocombustíveis			
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 054, PPBGBIOPCOM			
Data:	18 de julho de 2025	Hora de início:	09:00	Hora de encerramento:
Matrícula do Discente:	12322PGB005			
Nome do Discente:	Shoraia Germani Winter			
Título do Trabalho:	Caracterização e Avaliação do potencial de uso dos resíduos da cafeicultura na produção de biocombustíveis sólidos			
Área de concentração:	Biocombustíveis			
Linha de pesquisa:	Biomassas energéticas: Ciência e tecnologia			
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Economia Circular na Produção de Energia: Biocombustíveis Sólidos a partir de Diferentes Biomassa			

Reuniu-se em ambiente virtual com link <https://conferenciaweb.rnp.br/sala/antonio-jose-vinha-zanuncio>, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Biocombustíveis, assim composta pelos Professores Doutores: Olivia Pereira Lopes, da Universidade Federal de Uberlândia; Solange de Oliveira Araujo, da Universidade de Liboa; e Antônio José Vinha Zanuncio, orientador(a) do(a) candidato(a).

Iniciando os trabalhos o(a) presidente da mesa, Dr(a). Antônio José Vinha Zanuncio, apresentou a Comissão Examinadora e o(a) candidato(a), agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(as) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovada.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Antônio José Vinha Zanuncio, Professor(a) do Magistério Superior**, em 21/07/2025, às 12:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Olivia Pereira Lopes, Técnico(a) de Laboratório**, em 21/07/2025, às 12:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Solange de Oliveira Araújo, Usuário Externo**, em 21/07/2025, às 21:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6456326** e o código CRC **49A8E2B4**.

Referência: Processo nº 23117.043479/2025-23

SEI nº 6456326

Dedico este trabalho aos meus pais e irmãs,
por todo apoio, carinho e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Antônio por todo o incentivo, motivação e orientação nesta caminhada, onde apresentou um novo caminho que pode ser seguido para a construção de um futuro mais sustentável.

Aos colegas e demais professores do Programa de Pós-graduação em Biocombustíveis pelas trocas de experiências, conhecimentos e auxílios.

Agradeço a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pela bolsa concedida durante os anos de curso.

RESUMO

O café é uma cultura de grande destaque no agronegócio do Brasil, que é o maior produtor desde o século XIX, e do estado de Minas Gerais, que é responsável por cerca de um terço do café nacional. Essa grande produção de café, que deve manter em crescimento para acompanhar as tendências do mercado, leva a uma alta geração de resíduos e quando observado que para cada 1 quilograma de café é gerado 1 quilograma de casca de café e 0,3 quilogramas de pergaminho, é possível vislumbrar o impacto que esses resíduos podem trazer ao meio ambiente caso seu descarte seja realizado de maneira incorreta. Ao encontro da preocupação com o descarte incorreto de resíduos, existe uma crescente necessidade de ampliar as formas de produção de energia, em especial formas que produzam energia renovável e limpa, para que assim o mercado energético seja atendido e que não haja maior liberação de gases do efeito estufa e a dependência de fontes fósseis de energia. A partir dessas duas visões, a grande quantidade de resíduos da cafeicultura e a necessidade de geração de energia, este estudo visa a transformação da casca de café e do pergaminho por meio da compactação em pellets, uma opção de biocombustível sólido que permite diversos usos e aplicações. Para garantir a qualidade dos pellets produzidos a biomassa foi analisada quanto a composição elementar e estrutural, poder calorífico e termogravimétrica, os pellets passaram por análises de umidade, densidade, durabilidade e comparados com as normativas vigentes. Os resultados obtidos demonstram que a casca de café e o pergaminho tem grande potencial no uso como matéria prima para pellet, de forma que o pergaminho apresenta qualidades superiores e não necessita do acréscimo de etapas para adequação nas normativas vigentes, enquanto os pellets de casca de café necessitam de um maior processo de secagem pós-produção, desta forma, é possível incluir os pellets de casca de café e pergaminho como fontes renováveis de energia e como uma possibilidade de adequada destinação dos resíduos da cafeicultura.

Palavras-chave: casca de café; pergaminho; pellets; energia renovável; sustentabilidade.

ABSTRACT

Coffee is a highly prominent crop in Brazilian agribusiness, with Brazil being the world's largest producer since the 19th century and the state of Minas Gerais accounting for about one-third of the country's coffee production. This large-scale coffee production, which is expected to continue growing to meet market demands, results in significant waste generation. Considering that for every 1 kilogram of processed coffee, 1 kilogram of coffee husks and 0.3 kilograms of parchment are produced, it is clear how improper disposal of these byproducts could harm the environment. Aligning with concerns about waste management, there is a growing need to expand energy production methods, particularly those that generate renewable and clean energy, to meet energy market demands while reducing greenhouse gas emissions and dependence on fossil fuels. Combining these two perspectives, the abundance of coffee farming residues and the demand for sustainable energy, this study focuses on transforming coffee husks and parchment into pellets through compaction. Pellets are a solid biofuel option with versatile applications. To ensure quality, the biomass was analyzed for elemental and structural composition, calorific value, and thermogravimetric properties, while the pellets underwent tests for moisture, density, and durability, complying with current standards. The results demonstrate that coffee husks and parchment have significant potential as raw materials for pellet production. Parchment pellets exhibited superior qualities and required no additional processing to meet regulatory standards, whereas coffee husk pellets needed extended post-production drying. Thus, both types of pellets can be considered viable renewable energy sources and a sustainable solution for coffee farming waste disposal.

Keywords: coffee husk; parchment; pellets; renewable energy; sustainability.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: UMA VISÃO SOBRE A CAFEICULTURA, BIOMASSAS ENERGÉTICAS E BIOCOMBUSTÍVEIS SÓLIDOS

1.	INTRODUÇÃO	10
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
2.1.	Fontes de energia.....	11
2.1.1.	Fontes renováveis	11
2.1.2.	Fontes não renováveis.....	12
2.2.	A cafeicultura	12
2.2.1.	A cafeicultura no Brasil	13
2.2.2.	A cafeicultura em Minas Gerais	13
2.3.	Biomassas na geração de energia	14
2.3.1.	Biomassas da cafeicultura.....	14
2.4.	Produção de biocombustíveis sólidos.....	15
2.4.1.	Produção de biocombustíveis sólidos por compactação.....	15
2.4.2.	Produção de pellets	16
2.5.	Fatores que impactam na qualidade do pellet.....	16
2.5.1.	Teor de umidade	16
2.5.2.	Tamanho da partícula.....	17
2.5.3.	Composição da biomassa.....	17

CAPÍTULO 2: VALORIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DA CAFEICULTURA ATRAVÉS DA PRODUÇÃO DE PELLETS

1.	INTRODUÇÃO	21
2.	OBJETIVOS.....	22
2.1.	Objetivos gerais	22
2.2.	Objetivos específicos.....	23
3.	MATERIAL E MÉTODOS	23
3.1.	Material biológico	23

3.2. Caracterização da Biomassa	24
3.3. Produção dos pellets	25
3.4. Caracterização dos pellets	25
3.5. Análise estatística	26
4. RESULTADOS	26
4.1. Biomassa.....	26
4.2. Pellets	32
5. CONCLUSÃO	34
REFERÊNCIAS	35

**CAPÍTULO 1: UMA VISÃO SOBRE A CAFEICULTURA, BIOMASSAS
ENERGÉTICAS E BIOCOMBUSTÍVEIS SÓLIDOS**

1. INTRODUÇÃO

O mundo está em constante crescimento, desta forma diversos setores procuram formas de se adaptar e crescer frente aos constantes desafios entre o crescimento e a necessidade de cuidado com o meio ambiente. O setor de energia espera um crescimento de demanda próximo a 30% até o ano de 2040, o que demonstra a necessidade do desenvolvimento de opções de energia renovável e limpa, podendo assim garantir que o setor energético não dependa apenas de fontes fósseis que tem alta liberação de gases (Nath et.al., 2025; Awogbemi e Kallon, 2022).

Diversas formas de energia limpa estão sendo estudadas, como geotérmica, hidrelétrica, solar e o uso de biomassa. O uso da biomassa tem chamado a atenção, devido a diversidade de materiais e produtos em que podem ser convertidos, como polímeros, moléculas bioativas e energia, além de garantir um destino ambientalmente correto para os resíduos agrícolas (Vincenvica-Gaile et. al., 2025).

O uso de biomassas energéticas pode advir de plantações florestais, em que há produção de madeira, de resíduos da indústria e resíduos agrícolas. O Brasil apresenta uma grande produção agrícola, o que garante uma diversidade de biomassas residuais que podem ser aplicadas para a produção de energia e uma das formas é o uso na produção de biocombustíveis sólidos, os quais podem ser usados para diversas funções, como geração de energia e calor (de Souza et. al., 2020).

Estudos mostram que o uso de biomassas agrícolas e agroindustriais como biocombustíveis sólidos além de serem uma ótima fonte de energia alternativa, ainda são fáceis de transportar, manusear e armazenar, contribuem para o desenvolvimento da economia circular, auxiliam na realização dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, diminuem problemas ambientais advindos de má gestão e destinação, e é considerado a melhor maneira de atribuir valor aos resíduos (Chen et.al., 2025; Kadjo et. al., 2024; Ângulo-Mosquera et.al., 2021).

Existem diversas particularidades que afetam a qualidade dos biocombustíveis sólidos, sendo assim, é de grande importância observar as características do material desejado antes de utilizar na produção. Aspectos como teor de umidade alto diminuem o poder calorífico útil, teor de cinzas alto levam a formação de escória e corrosão de fornos e trocadores de calor, enquanto altos teores de carbono e hidrogênio aumentam o poder calorífico do material (Endriss et.al., 2023).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Fontes de energia

O Brasil é um país que está em constante aumento da necessidade energética, onde em 2023 foi disponibilizado 313,9Mtep, o que significou um aumento de 3,5% em relação a 2022, e esta necessidade continua a crescer. Desta energia, 49,1% foram provenientes de fontes renováveis e 50,9% são de fontes não renováveis, com um aumento de 1,7% na participação das fontes renováveis em relação a 2022. Este crescimento no uso de fontes renováveis é benéfico quando observado que o setor de energia foi responsável pela emissão de 428 milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente em 2023 (Ministério de Minas e Energia, 2024).

2.1.1. Fontes renováveis

Existem diversas fontes renováveis que podem ser a alternativa para uma maior produção energética e a redução da dependência de combustíveis fósseis, como é o caso da energia hidrelétrica, solar, eólica e proveniente do uso de biomassa vegetal e animal (Sherestha et.al., 2022; Østergaard et.al., 2022). Pablo-Romero, Sánchez-Braza e Romero, 2022, mostram como o uso de energia de fontes renováveis é importante para a América Latina, possuindo um consumo percentual de energia renovável acima de outros continentes, desta forma contribuindo para a redução do uso de fontes fósseis e a segurança energética. Ceglia et.al., 2023, ainda salienta que 40% das emissões de gases de efeito estufa são provenientes da produção de energia a nível mundial.

A biomassa apresenta potencial para produção de diversos tipos de biocombustíveis, mas uma grande preocupação é em decorrência do uso de biomassas que tenham competição direta com o uso alimentar, sendo assim surge a opção do uso de biomassas não alimentares e de resíduos da agricultura (Yang et.al., 2022). Mesmo com o potencial da biomassa em gerar energia, a biomassa de resíduos agrícolas de forma bruta apresenta algumas restrições, como dito por Setyawan et al., 2024, que traz sobre altos níveis de umidade, baixa densidade energética volumétrica e dificuldade de manter uma queima constante, o que muito reduz a

eficiência, sendo assim é possível perceber a necessidade de pré-tratamentos ou processamento antes do uso como biocombustíveis.

O Brasil conta com uma matriz energética com alta participação de fontes renováveis, sendo superior à média mundial e a outros países pertencentes a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico. Desta matriz renovável, no ano de 2023, 16,9% é de biomassa de cana, 12,1% de hidráulica, 8,6% de lenha e carvão vegetal, 7,2% de licor preto e outras fontes (biodiesel, biogás, gás industrial de carvão vegetal e outras biomassas), 2,6% de energia eólica e 1,7% de solar (fotovoltaica e térmica), alcançando assim um aumento de 7,4% no uso de fontes renováveis em relação a participação delas em 2022 (Ministério de Minas e Energia, 2024).

2.1.2. Fontes não renováveis

O uso de fontes não renováveis cresceu após a Revolução Industrial no início do século XIV, pois as formas de produção automatizadas necessitavam de grandes quantidades de energia e afim de acompanhar essa necessidade e impulsionar o crescimento econômico, diversos países adotaram o uso de combustíveis fósseis. Desta forma, atualmente 70% das emissões de gases de efeito estufa são provenientes do setor energético, produção, transporte e uso, e 85,3% da energia mundial é de fontes não renováveis (Azan et. al., 2021; Beal e King, 2021; Ministério de Minas e Energia, 2024).

A matriz energética do Brasil conta com 50,9% de fontes não renováveis, em que 35,1% são de petróleo e derivados, 9,6% de gás natural, 4,4% de carvão mineral, 1,2% de urânio e 0,6% de outras fontes não renováveis, mesmo longe de ser o ideal, quando comparado a parcela não renovável de 2022, houve um aumento de apenas 0,2%, visto que a única fonte que teve aumento no consumo foi petróleo e seus derivados (Ministério de Minas e Energia, 2024).

2.2. A cafeicultura

O café é uma planta originária da área central da África, sendo da divisão das Fanerógamas, Classe Angiosperma, Subclasse Eudicoidedônea, ordem Rubiales, família Rubiaceae, tribo

Coffeae, subtribo *Caffeinae* e gênero *Coffea*, possuindo dezenas de espécies e variedades, em que as espécies que apresentam maior relevância mundial são a *Coffea arábica* L. e *Coffea canefora*, que são originárias da região centro-oeste do continente africano (Alixandre et. al., 2022).

Os primeiros registros do consumo do café datam de 1440 pelos árabes, sendo que o cultivo se iniciou no século XVI no Iêmen de sementes obtidas na Etiópia da espécie *C. arabica*. No Brasil as primeiras mudas e sementes chegaram em 1727 no Pará onde se adaptou muito bem e em 1732 já era feita a primeira exportação (Carvalho, 2007). A partir deste momento, entre altos e baixos, o café ganhou espaço na agricultura nacional e no consumo interno e externo, sendo uma das commodities mais relevantes ao país.

2.2.1. A cafeicultura no Brasil

O café é uma commodity de grande de grande importância para o Brasil, sendo que desde 1840 se mantém como maior produtor e atualmente é responsável por cerca de 39% da produção mundial, que corresponde a aproximadamente 54,944 milhões de sacas. Atualmente o Brasil conta com três espécies comercialmente produzidas, o *C. arábica*, o qual é conhecido como café arábica e o *C. canefora* e *C. conillon*, conhecidos como café robusta (Fernandes et.al, 2025; Ministério da Agricultura e Pecuária, 2023).

2.2.2. A cafeicultura em Minas Gerais

O estado de Minas Gerais é reconhecido como estado de maior importância na produção de café, visto que é responsável por cerca de um terço da produção nacional e a região do Triângulo Mineiro, onde está localizada Uberlândia, foi responsável por aproximadamente 22% do café produzido no estado. A grande produção de café no estado, em parte, se deve à classificação dada pelo zoneamento agrícola, que considera grande parte do estado como apto à cafeicultura e as áreas com restrição são passíveis de uso com a implantação de sistemas de irrigação, o que acarreta cerca de 42% da área agricultável destinada a cafeicultura (Ministério da Agricultura e Pecuária, 2023; Atlas da Biomassa de Minas Gerais, 2017).

2.3. Biomassas na geração de energia

A biomassa utilizada para geração de energia pode advir de inúmeras matérias-primas, ela pode ser proveniente de biomassa da agricultura, como resíduos de colheita, bagaço, culturas energéticas, cascas e diversas outras, assim como da silvicultura, como a lenha, carvão, resíduos e subprodutos da exploração de lenha, papel e celulose, além de resíduos industriais e urbanos, como resíduos alimentares, resíduos da indústria e a fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (Sarker et.al., 2023; Ige e Łaska, 2025).

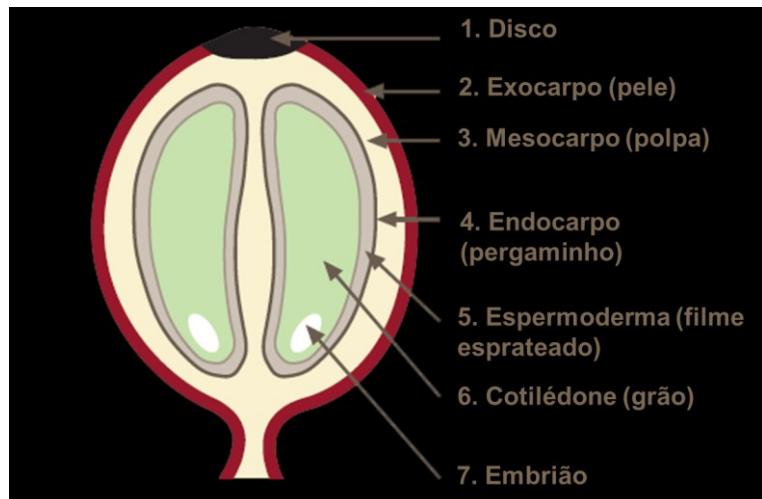
2.3.1. Biomassas da cafeicultura

Na Figura 1 é possível observar a anatomia do fruto do café, e para fins de pesquisa, a casca de café compreende o Exocarpo e o Mesocarpo (pele e polpa) e o pergaminho compreende o Endocarpo e o Espermoderma (pergaminho e filme prateado) (Yara Brasil, 2020). Com a grande produção de café, que apresenta tendência de crescimento nos próximos anos, há também uma grande produção de resíduos, os quais são gerados na proporção de 1: 1: 0,5, sendo grão de café, casca e pergaminho (Gil-Gómez, Florez-Prado, Leguizamón-Vargas, 2024; Silva et. al., 2024). Dal-Bó, 2016, traz que, que para cada saca (60kgs) de grãos de café beneficiado é gerada a mesma quantidade de resíduos durante o processo de beneficiamento, os quais muitas vezes não tem destino adequado, podendo trazer prejuízos ao meio ambiente. Sendo assim, é necessário encontrar formas para o destino correto e que apresentem aproveitamento.

Devido a quantidade de resíduos gerados, a destinação incorreta pode acarretar em uma série de problemas ambientais e mesmo a destinação mais comum para a casca de café, uso como adubo na área de cafeicultura, pode apresentar riscos para o solo e fontes de água próximos, como inibição do crescimento de raízes, emissão de gases de efeito estufa por decomposição descontrolada, acidificação do solo, desbalanceamento da demanda bioquímica de oxigênio, e aumento de sólidos suspensos totais e sólidos suspensos sedimentáveis, enquanto o pergaminho é queimado de forma solta por não ter destinação adequada (Gil-Gómez, Florez-Prado, Leguizamón-Vargas, 2024; Fernandes et al., 2025). Tendo em vista esse fator, é importante que sejam encontradas destinações adequadas para os resíduos do café e neste ponto

entra a produção de pellets e briquetes, os quais podem ser uma fonte secundária de recursos para o agricultor, como também um insumo para secagem dos grãos.

Figura 1: Anatomia fruto do café



Fonte: Yara Brasil

2.4. Produção de biocombustíveis sólidos

2.4.1. Produção de biocombustíveis sólidos por compactação

A produção de pellets e briquetes transforma a biomassa em biocombustíveis sólidos através da compactação, processo que traz diversos benefícios quando se observa o uso das biomassas de forma descompactada, além de auxiliar questões logísticas que também devem ser levadas em consideração (Shu et.al., 2015; Waziri et al., 2024; Pawaree et al., 2024). O Brasil apresenta grande potencial na produção de biocombustíveis sólidos, cerca de 765 mil toneladas por ano, o que garante um aproveitamento integral de diversos resíduos agrícolas, valorização e geração de substituintes a lenha e demais fontes de geração de calor (Lima Filho, 2022), além de que a transformação em pellets e briquetes permite uma gestão local dos resíduos, pois é de fácil manejo e não apresenta necessidade de pré-tratamento, substâncias químicas ou estruturas complexas.

A principal diferença observada entre os pellets e os briquetes é quando se observa suas dimensões, os pellets têm diâmetro entre 6 e 16 mm e comprimento de 25 a 30 mm, enquanto os briquetes tem diâmetro de 60 a 96 mm e comprimento de 25 a 300 mm, mesmo que não haja

uma resolução fixa para a diferença entre ambos quanto ao tamanho, sendo assim apenas uma divisão para diferenciar material compactado de maior e menor tamanho (Obi, Pecenka e Clifford, 2022; Embrapa Agroenergia, 2012).

2.4.2. Produção de pellets

A produção de pellets de madeira no Brasil no ano de 2021 foi de 658 mil toneladas, mesmo que o potencial de produção fosse de 765 mil toneladas ano, onde 52,4% foi exportado. Observando os dados de 2015 a 2021, o crescimento dos pellets exportados foi de 1315,4% e o consumo interno de 490,5%, além de que é esperado que o crescimento da área seja de 16,3% ao ano. Sendo assim, se faz necessário encontrar maneiras de aumentar a quantidade da produção de pellets que possuam as qualificações necessárias para a exportação (Lima Filho, 2022).

A transformação de biomassas em pellets por densificação apresenta uma série de benefícios, como o aumento da densidade e por consequência a densidade energética, além disso os briquetes possuem menor umidade de equilíbrio higroscópico, o que incrementa o poder calorífico líquido do material, por fim, a homogeneidade do material facilita a queima (de Souza et. al., 2020).

2.5. Fatores que impactam na qualidade do pellet

2.5.1. Teor de umidade

Uma biomassa com alto teor de umidade irá produzir pellets com menor durabilidade e resistência mecânica, além de aumentar os custos com armazenamento, transporte, também suscetível ao ataque de microrganismos que degradam o material e diminuindo o poder calorífico útil e a eficiência da combustão. É importante salientar que a biomassa necessita de um teor conter umidade para o processo de compactação, uma vez que a água presente irá auxiliar no processo de aglutinação do material e assim na ligação entre partículas (Minajeva et. al., 2021; Sarker et. al., 2023).

2.5.2. Tamanho da partícula

A forma e tamanho das partículas da biomassa vão influenciar durante a sua compactação, o que influência diretamente na durabilidade mecânica e na densidade. Partículas menores, por terem uma maior área de contato, permitem que durante a compressão a organização e ligação dentro do pellet seja mais eficaz, aumentando a eficiência e o custo de peletização, mas partículas muito pequenas acabam por travar a peletizadora e assim reduzir a capacidade de produção (Yilmaz e. al., 2021; Sarker et. al., 2023).

2.5.3. Composição da biomassa

A composição química da biomassa irá influenciar durante o processo de fabricação do pellet, como a lignina que auxilia no processo de ligação entre partículas, e no processo da queima, como um alto teor de oxigênio que diminui o poder calorífico útil, sendo assim, é importante que antes da decisão de escolha seja visualizado a composição da biomassa para saber se ela tem as características necessárias para o uso como matéria-prima de pellets. O teor de cinzas da biomassa tem impacto negativo no processo de queima, uma vez que ele atrapalha a combustão, aumenta a necessidade de manutenção no equipamento de queima e a emissão de poeira, além de que em muitos casos não apresenta destinação correta (Mortadha et.al., 2025; Sarker et. al., 2023)

Os teores de carbono (C) e hidrogênio (H) estão ligados ao poder calorífico da biomassa e devido ao maior potencial energético do hidrogênio, o interessante é que a relação C/H se mantenha baixa para maximizar o poder calorífico. Frente a isso, o teor de oxigênio (O) tende a diminuir o potencial energético do material, visto que durante a queima parte dele se liga ao hidrogênio aumentando o teor de umidade no pellet. Os teores de enxofre (S) e nitrogênio (N) não tem ligação direta com potencial energético da biomassa, mas eles influenciam na liberação de gases tóxicos ao meio ambiente e na integridade do local de queima, visto que durante a combustão se transformam em óxidos de enxofre e óxidos de nitrogênio (Pereira et. al., 2024).

O uso de biomassas lignocelulósicas em grande escala para a produção de pellets e briquetes se deve em parte a natureza da constituição do material, pois durante o desenvolvimento de todas as plantas é necessário a presença de lignina e holocelulose (celulose

e hemicelulose), que apresentam propriedades termoquímicas, em especial a lignina que tem poder calorífico superior a holocelulose, além de auxiliar no processo de ligação entre partículas no momento da compactação (Kumar et. al., 2022; He et. al., 2024).

**CAPÍTULO 2: VALORIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DA CAFEICULTURA
ATRAVÉS DA PRODUÇÃO DE PELLETS**

RESUMO

O Brasil é o maior produtor de café do mundo, com destaque para o estado de Minas Gerais. Esta grande produção gera resíduos que muitas vezes não tem destinação adequada, visto que para cada 1 kg de grão de café é gerado 1 kg de casca e 0,5 kg de pergaminho. A partir da grande quantidade de biomassa e a constante necessidade de produção de energia, o presente estudo traz a possibilidade de utilização do resíduo para produção de pellets. Amostras de casca de café e do pergaminho foram coletadas, a biomassa foi caracterizada a partir da umidade, química imediata, poder calorífico, análise elementar e termogravimétrica e a caracterização dos pellets com a umidade, densidade aparente, densidade energética, durabilidade mecânica, porcentagem de finos e dureza. Os resultados foram comparados com a norma EN 14961-6 (DIN, 2012). O pergaminho apresentou maior teor de carbono, relação C/N e ligninas e menor teor de cinzas, e extractivos, resultando em maior poder calorífico. Os pellets produzidos com o pergaminho apresentaram maior densidade e menor umidade, resultando em maior poder calorífico. Os pellets do pergaminho se enquadram em todos os parâmetros da EN 14961-6 (DIN, 2012), enquanto o pellet da casca de café não se enquadrou apenas para a umidade. Ambas as biomassas apresentaram potencial para a produção de pellets, entretanto aqueles produzidos com o pergaminho atingiram a melhor classificação.

Palavras-chave: Biocombustíveis sólidos; Bioenergia; Biomassa; Sustentabilidade.

1. INTRODUÇÃO

A cafeicultura é importante para o Brasil desde sua chegada, quando ainda era uma colônia de Portugal e desde essa época apresenta grande importância social, econômica e política. Segundo dados do Ministério da Agricultura e Pecuária (2024) a área destinada para café na Safra 2024 foi de 1,9 milhões hectares alcançando uma produção de 54 milhões sacas beneficiadas, um aumento de 1,4% e queda de 0,5% relativo à Safra 2023 respectivamente. Frente a esse aumento de produção, a Associação Brasileira da Indústria de Café (2024) traz que o consumo per capita de café, considerando Novembro/2023 a Outubro/2024, está em 6,26 kg/habitante.ano⁻¹ de café em grão cru e 5,01 kg/habitante.ano⁻¹ de café torrado e moído, uma queda de 2,22% do ano anterior, deixando o Brasil como líder de consumo per capita de café e consumidor de 40,4% do café nacional.

A Companhia Nacional de Abastecimento (2025) apresenta que a estimativa de colheita para a Safra 2025 seja de 51,8 milhões de sacas beneficiadas, colhidas de uma área de 2,25 milhões de hectares, frente a isso, existe a estimativa que 50 a 60% da produção de grão verde seja de resíduos, cerca de 6 milhões de toneladas por ano (Silva et.al., 2024). O fruto cereja, estágio onde o café está pronto para a colheita, é constituído pela casca, polpa, mucilagem, pergaminho, película prateada e o grão, onde após o beneficiamento, para 1 kg de grão de café, teremos 1 kg de casca (casca, polpa e mucilagem) e 0,5 kg de pergaminho (pergaminho e película prateada) (Goulart et.al., 2007; Silva et.al., 2024; Gil-Gómez, Florez-Prado, Leguizamón-Vargas, 2024). O estado de Minas Gerais é o estado com maior produção de café e consequentemente maior geração de subprodutos, os quais estão presentes em 42% de toda área agrícola do estado. (Atlas da biomassa de Minas Gerais, 2017)

Diversos fins têm sido estudados para que os resíduos agrícolas tenham uma destinação adequada, assim como um aproveitamento de forma eficaz das biomassas disponíveis. Shu et.al. (2015) mostra que a ideia de transformação de resíduos agrícolas advindos da extração de óleo de *Jatropha curcas* e *Pongamia pinnata* em biogás, além de minimizar os impactos negativos da agricultura no meio ambiente, pode ser uma nova fonte de recursos e energia. Outro meio é a partir da produção de Etanol de 2G, o qual se utiliza de biomassa lignocelulósica para transformar em um biocombustível de ampla utilização, principalmente para energia e a retirada de substâncias bioativas de alto valor agregado (Bernardi et. Al., 2023; Silva et. al., 2024). Além do uso da biomassa para produzir biocombustíveis gasoso, biogás, e líquido, etanol, entre tantos

outros, existe a possibilidade da produção de pellets, em que a biomassa passa por um processo de adensamento e tem diversas utilidades, em especial a queima em caldeiras e fornos (Siyal et.al., 2022; Rabichi et.al., 2024)

A transformação da biomassa em pellets permite uma gestão local, visto que sua fabricação é de fácil manejo e não depende de pré-tratamentos, manejo de substâncias químicas ou estruturas complexas. Lima Filho (2022) e He et. al. (2024) mostram que existem diversos benefícios do uso de pellets frente a lenha, como a melhoria operacional, diminuição da mão de obra, menor espaço de transporte e armazenagem, e uma maior uniformidade de temperatura, além de que o Brasil conta com um potencial de produção de pellets de mais de 765 mil toneladas/ano e uma crescente demanda para o mercado interno e externo. Estudos como de Mack et.al (2022), Kamperidou (2022) e He et. al. (2024) ainda demonstram que os aspectos de qualidade da matéria prima e as propriedades físicas do pellet para combustível tem influência significativa na combustão, durabilidade, poder calorífico e formação de cinzas, de forma que é importante se ater a qualidade da biomassa utilizada, assim como as propriedades após fabricação, como o tamanho, compreensão do material e umidade.

Partindo dos pontos apresentados, o presente estudo tem como objetivo estudar a produção de pellets a partir de duas biomassas advindas da cafeicultura, a casca de café e o pergaminho, afim de se produzir um pellet que esteja dentro das especificações e que possa ser produzido pelos produtores e empresas de beneficiamento para a geração de energia e ampliação das fontes de renda, visto que o café é uma planta que apresenta bianualidade e maioria dos produtores ainda não tem um destino adequado para a grande quantidade de resíduos gerados.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivos gerais

O objetivo deste trabalho foi produzir pellets de casca de café e pergaminho, resíduos gerados no beneficiamento de café, voltados para a geração de energia limpa e valorização dos resíduos.

2.2. Objetivos específicos

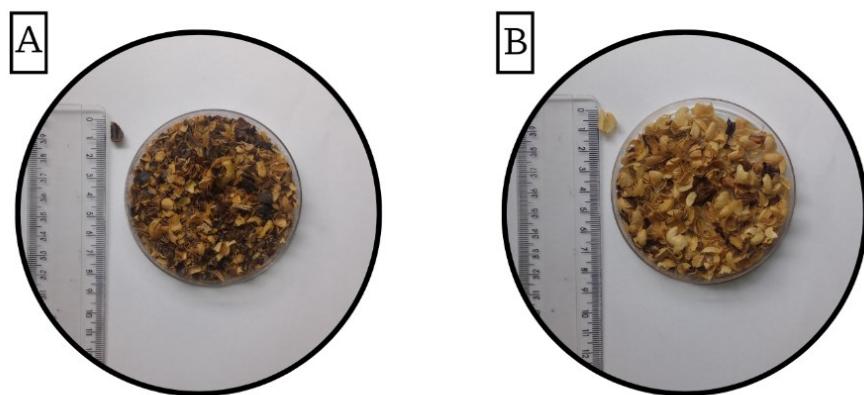
- Avaliar as características físico-químicas da casca de café e do pergaminho.
- Avaliar a possibilidade de produção de pellets de casca de café e pergaminho sem a presença de ligantes e aditivos.
- Avaliar as características físicas dos pellets produzidos.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Material biológico

O resíduo de café foi obtido a partir de propriedades cafeeiras de *Coffea arabica* na cidade de Monte Carmelo, no estado de Minas Gerais, Brasil ($18^{\circ}44'5''$ Sul, $47^{\circ}29'47''$ Oeste). O resíduo foi dividido em casca de café, que é retirada no primeiro processamento após a coleta do fruto e o pergaminho, retirado após a secagem do grão (Figura 1).

Figura 2: Casca de café (A) e pergaminho (B)



Fonte: Arquivo pessoal

3.2. Caracterização da Biomassa

A casca de café e o pergaminho foram secos ao sol, após isso passaram por caracterização física e química. As amostras foram trituradas e passadas em peneira de 200 mesh, o material retido foi utilizado para o cálculo de umidade e o que passou foi usado para os demais testes. A umidade na base seca foi calculada pela equação abaixo com os dados obtidos após o material permanecer em estufa a 105°C até estabilizar a massa.

$$Umidade = \frac{(Massa \text{ úmida} - Massa \text{ seca})}{Massa \text{ seca}}$$

A análise de química imediata foi realizada através da metodologia descrita na Normativa Brasileira (NBR) 8112 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) de 1986, o qual determinou os valores do teor de cinzas, material volátil e carbono fixo. O poder calorífico superior (PCS) foi mensurado através da metodologia adaptada da NBR 8633 da ABNT (1983).

O poder calorífico inferior (PCI) e o poder calorífico útil (PCU) foi calculado a partir de cálculos retirados de Golçalves, Satori e Leão (2009) de acordo com as equações:

$$PCI = PCS - 600 \times \left(\frac{9 \times \text{teor de hidrogênio}}{100} \right)$$

$$PCU = PCI \times (1 - \text{umidade em base úmida}) - 600 \times \text{umidade em base úmida}$$

A análise elementar (CHNS) foi feita através do equipamento CHNS-O Flash EA 1112 Series, com o uso de 2,5 g de casca de café e pergaminho que passou da peneira de 200 mesh. A análise termogravimétrica foi realizada pelo equipamento DTG-60H da marca Shimadzu em atmosfera oxidativa, com fluxo de 50 cm³ min⁻¹, em intervalo de temperatura de 25 a 600 °C, com varredura de 10 °C min⁻¹.

Os índices de combustão (S) e de ignição (D_{ig}) foram calculados de acordo com as Equações 1 e 2, adaptadas de Moon et. al., 2013, apresentadas abaixo com os dados encontrados através da análise termogravimétrica.

$$S = \frac{(\frac{dm}{dt})_{max} \times (\frac{dm}{dt})_{med}}{T_i^2 \times T_f} \quad (1)$$

$$D_{ig} = \frac{(\frac{dm}{dt})_{max}}{t_C \times t_i} \quad (2)$$

Em que $(dm/dt)_{\max}$ representa a taxa máxima de combustão ($\% \text{ min}^{-1}$), $(dm/dt)_{\text{med}}$ denota a média da taxa de perda de massa na faixa de temperatura da ignição ao completo “burnout” do seu resíduo de carbono ($\% \text{ min}^{-1}$), T_i é a temperatura de ignição ($^{\circ}\text{C}$), T_f é a temperatura de “burnout” ($^{\circ}\text{C}$), t_c é o tempo correspondente à taxa máxima de combustão (min) e t_i é o tempo de ignição.

3.3. Produção dos pellets

Os pellets foram produzidos em dois tratamentos, casca de café e pergaminho. Dentre esses resíduos, a casca do café tem maior concorrência com seu uso para a cobertura do solo, enquanto o pergaminho não apresenta destinação conhecida.

A produção dos pellets ocorreu através da densificação do material, desta forma, foi utilizada a peletizadora 0200v da marca Eng-Maq®, capaz de produzir 110 kg de pellets por hora e matriz plana horizontal de 6,0 mm de diâmetro. Para o estudo foram produzidos 10 kg de pellets de casca de café e pergaminho e a peletizadora trabalhou na temperatura de 80 a 95°C e pressão de compactação de 300 kgf por cm^2 . Após a saída da máquina, foram levados a uma câmara climatizada em 25°C e 50% de umidade relativa para que ocorresse o resfriamento e estabilização da massa.

3.4. Caracterização dos pellets

As dimensões, diâmetro (mm) e comprimento (mm), dos pellets foram mensuradas a partir da norma DIN EN 16127 (2012). A densidade aparente foi realizada a partir da razão entre a massa após climatização e o volume deslocado após imersão em mercúrio e densidade energética a partir da razão entre o poder calorífico superior e a densidade aparente.

O teor de umidade de equilíbrio foi encontrado após a submissão a secagem em estufa a 103°C por 24 horas e nova pesagem, após isso foi encontrado através do cálculo:

$$\text{Teor de umidade em equilíbrio} = \frac{(\text{Massa úmida} - \text{Massa seca})}{\text{Massa seca}}$$

A durabilidade mecânica e a porcentagem de finos, partículas menores que 3,15 mm, foram determinadas de acordo com a norma DIN EN 15210-1 (2010) através do equipamento Ligno-Tester da marca Holmen®. A dureza foi encontrada a partir de um ensaio de compressão diametral utilizando um durômetro manual da marca Amandus Kahl de escala até 100 kgf, em que foi aplicada uma força até a fratura.

3.5. Análise estatística

Os testes de caracterização da casca de café e pergaminho foram submetidos a teste de Tukey a 5% de significância, enquanto a caracterização dos pellets foi submetida ao teste t-Student com nível de confiança de 95% de confiança.

4. RESULTADOS

4.1. Biomassa

A Tabela 1 apresenta uma análise comparativa detalhada dos parâmetros físico-químicos da casca de café e do pergaminho. Foi possível observar diferença para a maioria dos parâmetros físico-químicos utilizados (Tabela 1). Este fato se deve a diferença de funcionalidade de ambas as biomassas, assim como a diferença de posição (Silva et.al, 2024).

Tabela 1: Valores médios de parâmetros físico-químicos da casca de café e do pergaminho.

Parâmetro	Casca de café	Pergaminho
Densidade a granel (Kg/m ³)	215,4 ^{3,3} a	104,2 ^{3,8} b
Umidade (%)	17,48 ^{2,4} a	10,82 ^{2,2} b
Carbono (%)	46,5 ^{4,5} a	49,6 ^{4,1} b
Oxigênio (%)	45,3 ^{3,0} a	42,45 ^{2,8} b
Hidrogênio (%)	6,33 ^{2,8} a	6,7 ^{2,9} a
Nitrogênio (%)	1,77 ^{5,5} b	1,1 ^{5,2} a
Enxofre (%)	0,181 ^{3,4} a	0,149 ^{3,5} b
O/C (%)	0,97 ^{4,6} b	0,85 ^{5,5} a
H/C (%)	0,13 ^{3,2} a	0,15 ^{4,4} a
C/N (%)	26,3 ^{5,5} b	45,1 ^{4,4} a
Extrativos (%)	34,3 ^{4,5} a	14,2 ^{4,8} b
Lignina insolúvel (%)	22,3 ^{5,5} b	24,4 ^{4,3} a

Lignina solúvel (%)	2,28 ^{4,2} a	1,75 ^{4,8} b
Lignina total (%)	24,6 ^{5,7} b	26,2 ^{5,0} b
Holocelulose (%)	41,14 ^{3,8} a	59,7 ^{4,4} b
Carbono fixo (%)	23,3 ^{3,2} a	20,7 ^{3,6} b
Material volátil (%)	71,2 ^{3,8} a	76,7 ^{4,5} b
Cinzas (%)	5,5 ^{15,6} a	2,8 ^{16,2} b
Poder calorífico superior (MJ/Kg)	17,51 ^{5,6} b	19,86 ^{3,2} a
Poder calorífico inferior (MJ/Kg)	16,08 ^{2,8} a	18,39 ^{3,5} b

Médias na horizontal seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste de Turkey a 5% de probabilidade.

Valores subscritos nas médias correspondem aos coeficientes de variação.

As densidades a granel das biomassas demonstraram que a casca de café apresenta média superior ao pergaminho, onde tem 215,4 Kg/m³ frente a 104,2Kg/m³, a densidade tem influência no manejo de transporte e de armazenamento, além da produção dos pellets, uma vez que uma densidade menor resulta em um maior volume de biomassa para produção dos pellets.

Na análise química, o pergaminho apresentou o maior teor de carbono, com 49,6% de sua constituição enquanto a casca do café ficou em 46,5%. Díaz-Jiménez e Moya (2022) encontraram 41 % de carbono para a casca do café e Otoni et. al. (2024) obtiveram o valor de 45,9%, de forma que Wondemagegnehu, Gupta e Habtu (2019) encontraram para o pergaminho o teor de carbono em 43,5 % e Campos et. al. (2021) encontrou 46,3%. Tais diferenças podem ser resultado da diferença genética entre os cultivares, climáticas e de condução da lavoura. A análise do oxigênio da casca de café apresentou o maior teor, sendo de 45,3 %, o que está próximo ao encontrado por Díaz-Jiménez e Moya (2022), obtiveram o valor de 44,9 %, Otoni et. al. (2024) de 35,5% e o pergaminho ficando abaixo com 42,45 %, valor este bem abaixo do encontrado por Wondemagegnehu, Gupta e Habtu (2019) de 50,12% e Campos et.al. (2021) de 46,2%. O teor de hidrogênio foi estatisticamente igual, alcançando 6,7% e 6,33%, teores mais altos que o encontrado por Wondemagegnehu, Gupta e Habtu (2019) que foi de 5,3% e próximos aos encontrado por Campos et. al. (2021) de 6,4%, Díaz-Jiménez e Moya (2022) e no Atlas da biomassa de Minas Gerais, ambos com teor de hidrogênio em 6,3%, mas que diferem do encontrado por Otoni et.al. (2024) de 7,93%. Os teores de carbono e hidrogênio estão ligados ao poder calorífico da biomassa, uma vez que ambos contribuem para uma maior produção de energia, desta forma quanto menor a relação C/H mais vantajoso será na hora da queima, frente a isso altos teores de oxigênio diminuem o poder calorífico (Pereira et. al., 2024).

No nitrogênio a casca de café apresentou o maior valor, de 1,77% sendo próximo ao valor de Díaz-Jiménez e Moya (2022) e Otoni et. al. (2024) em que ambos encontraram 1,9%, para isso o valor para o pergaminho foi de 1,1%, valor bem acima do encontrado por Wondemagegnehu, Gupta e Habtu (2019) e Campos et. al. (2021) que foi de 0,5% e 0,4%

respectivamente. O enxofre foi maior para a casca de café, 0,181%, semelhante ao encontrado por Otoni et.al. (2024) de 0,18%, enquanto o pergaminho foi de 0,149%, ambos abaixo de seus respectivos comparativos de 0,32% por de Díaz-Jiménez e Moya (2022) e 0,2 % de por Wondemagegnehu, Gupta e Habtu (2019). O teor de enxofre e nitrogênio estão diretamente relacionados a geração de óxidos de enxofre e óxidos de nitrogênio, os quais apresentam um risco ambiental devido a toxicidade e também podem formar compostos ácidos após resfriamento que levam ao rápido desgaste do equipamento de queima (Pereira et.al., 2024)

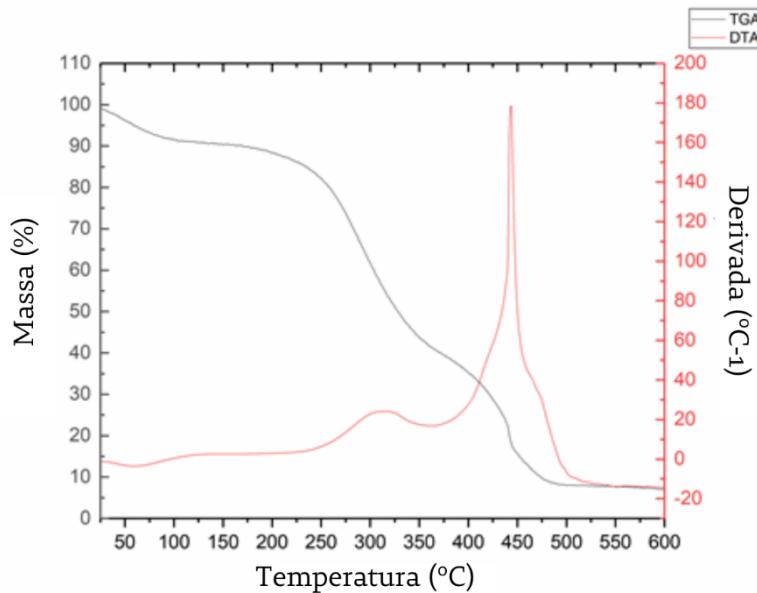
O carbono fixo é a parte da biomassa que fica após a saída do material volátil, umidade e se retirando as cinzas, ele é um importante indicador do potencial energético, uma vez que está ligado ao teor de lignina e tem influência positiva no poder calorífico, além de que maiores valores resultam em uma combustão mais lenta e consequentemente mais eficaz (Poyilil, Palatel e Chandrasekharan, 2022, Setter et.al., 2021). A casca de café apresentou carbono fixo de 23,3%, valor acima do encontrado por Poyilil, Palatel e Chandrasekharan, 2022, de 14% e Setter et. al., 2020 de 19,36%, enquanto o pergaminho foi de 20,7%, o que mostra que ambos os materiais têm potencial para fins energéticos.

O pergaminho apresentou os maiores valores para lignina total, 26,2%, holocelulose, 59,7%, e material volátil, 76,7%, enquanto a casca de café apresentou os maiores valores para extrativos, 34,4%, carbono fixo, 23,3%, e cinzas, 5,5%. Arango-Agudelo et. al., 2023, encontraram valores diferentes para o pergaminho, sendo 7,87% de lignina solúvel, 17,66% de lignina Klason, 22,7% de celulose, 4,2% de hemicelulose 7,95% de cinzas e 7,87% de extrativos em água. Frente a isso Reis et.al. ,2020, demonstram valores para o material lignocelulósico do pergaminho de 7% de extrativos, 53% de lignina e 22% de celulose. Para a casca de café o teor de cinzas difere do encontrado por Otoni et.al., 2024, de 7,8%, assim como também dos valores encontrados por Díaz-Jiménez e Moya (2022) para celulose de 34%, lignina total de 78,2% e carbono fixo de 2,4%. Um alto teor de material volátil é indicativo de que haverá maior facilidade para ignição do material e tendo em vista que os materiais apresentaram valores acima de 70%, é possível prever que os pellets produzidos serão combustíveis altamente reativos (Setter, 2021).

Os resultados da análise termogravimétrica com termogravimetria derivada (TGA/DTG) mostram resultados diferentes para as biomassas, apresentados nas Gráficos 1 e 2, esse fato corrobora com os dados que foram encontrados na análise química, pois mesmo sendo

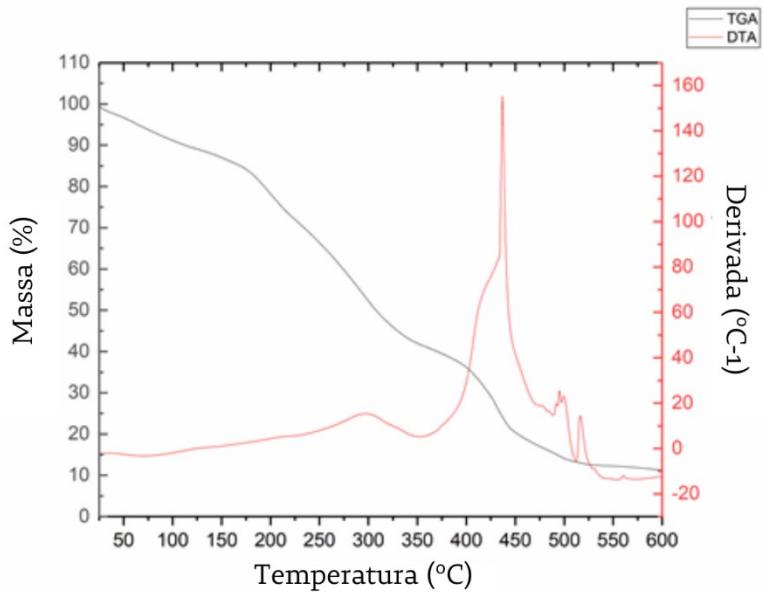
componentes do fruto do café, suas diferenças morfológicas e funcionais trazem diferenças na composição e consequentemente, na degradação térmica.

Gráfico 1: Curva TGA e DTA do pergaminho.



Fonte: Arquivo pessoal.

Gráfico 2: Curva TGA e DTA da casca de café.



Fonte: Arquivo pessoal.

Para melhor comparação e compreensão dos dados foi montada a Tabela 2, através dos dados encontrados nas curvas TGA/DTG do pergaminho e casca de café.

Tabela 2: Dados termogravimétricos encontrados a partir das curvas de TGA e DTA para casca de café e pergaminho.

Amostra	Casca de café	Pergaminho
% H ₂ O	12,00	8,03
T máx H ₂ O (°C)	-	120,77
T início ₁ (°C)	174,28	248,54
% perda de massa ₁	39,41	39,01
T máx ₁ (°C)	296,56	313,09
T final ₁ (°C)	323,30	341,49
T inicial ₂ (°C)	402,04	341,49
% perda de massa ₂	16,14	27,89
T máx ₂ (°C)	436,80	443,26
T final ₂ (°C)	446,63	443,84
% resíduo (a 600°C)	11,14	7,00

A casca de café apresenta uma primeira perda de massa que corresponde a cerca de 12% que engloba a saída de água e parte dos materiais voláteis, visto que não foi possível encontrar a T_{máx} H₂O (°C), o que não acontece com o pergaminho, em que a primeira perda de massa foi próxima de 8,03%, com a T_{máx} H₂O (°C) pronunciada em 120,77 °C, massa essa que se aproxima da umidade encontrada na caracterização da biomassa. Ambos os materiais passam por dois eventos mais bem definidos no processo de degradação, o primeiro que compreende à degradação das porções celulósicas e hemicelulósicas do material lignocelulósico e o segundo evento em que a fração de lignina, que por ter uma cadeia heterogênea e mais complexa, em arranjo tridimensional, se degrada a temperaturas mais elevadas (Suraj P, Arun P, C. Muraleedharan, 2025). Porém, observando a porcentagem de resíduos final e o teor de cinzas da análise da química, é possível observar que mesmo atingindo 600 °C não foi possível que todo material fosse consumido, demonstrando que seria necessário realizar a análise com temperaturas superiores para consumo total do material.

Os índices de combustibilidade (S) e ignição (D_{ig}) para as amostras de casca de café e pergaminho estão apresentados na Tabela 3, onde são comparados com outros três resíduos de biomassa já investigados na literatura quanto a seu potencial de aplicação na geração de energia.

Tabela 3: Parâmetros de combustibilidade para as amostras de pergaminho e casca de café.

Amostras	Casca de café	Pergaminho	Cana-de-açúcar	Palha de cereal	Carvão
T_i (°C)	145,1	221,2	255	249,2	360,4
T_f (°C)	500,2	483,2	400	481,3	587,3
t_c (min)	28,46	28,12	--	55,0	72,9
t_i (min)	12,95	20,81	--	51,6	62,7
$(dm/dt)_{max}$ (% min ⁻¹)	3,12	5,05	19,73	7,4	3,7
$(dm/dt)_{med}$ (% min ⁻¹)	2,1016	3,0251	--	--	--
S (% ² min ⁻² °C ⁻³) × 10 ⁷	6,2396	6,460	0,49	1,77	0,34
D_{ig} (% min ⁻² °C ⁻¹) × 10 ²	0,8465	0,8630	1,70	0,026	0,015
Referências	Este trabalho	Este trabalho	Aniza et al., 2024	Wnorowska et al., 2021	Wnorowska et al., 2021

O parâmetro S, também chamado índice comprehensivo de combustão devido a este considerar todas as fases de combustão, incluindo as de ignição e burnout, indica que valores mais altos de S, quando se compara diferentes biocombustíveis, estão relacionados a uma melhor performance da combustão deste biocombustível através da simples ignição e efetivo burnout (Aniza et al., 2024). Dessa forma, pode-se inferir que os valores de S do pergaminho e da casca de café são muito próximos e se apresentam superiores aos das biomassas e carvão comparadas, indicando o potencial de uso dessas duas fontes.

Enquanto isso, os índices de ignição (D_{ig}) obtidos para a casca de café e pergaminho também foram bem próximos entre si e, apesar de menores que a cana de açúcar, se apresentam maiores do que as amostras de carvão e palha de cereal investigadas por Wnorowska et al., 2021. Como o D_{ig} é comumente relacionado à estabilidade da combustão do biocombustível, em que altos valores indicam que um material tem uma característica de combustão mais estável, pode-se dizer que ambos os resíduos do café investigados se apresentam mais estáveis que alguns tipos de carvão, por exemplo.

4.2. Pellets

Foi possível observar que para a maioria dos parâmetros pesquisados para os pellets não houve diferença significativa (Tabela 4). Tal fato pode ser compreendido devido a padronização da produção com ambas as biomassas.

Tabela 4: Valores médios dos parâmetros dos pellets com casca de café e pergaminho.

Parâmetro	Casca de café	Pergaminho
Densidade a granel (Kg/m ³)	574 ^{2,3} a	622 ^{3,8} b
Umidade (%)	15,6 ^{4,3} b	10,5 ^{5,7} a
Poder calorífico útil (MJ/Kg)	13,48 ^{3,7} b	16,51 ^{3,2} a
Comprimento (mm)	19,67 ^{3,6} a	20,06 ^{3,4} a
Diâmetro (mm)	6,14 ^{4,5} a	6,14 ^{5,5} a
Finos (%)	0,046 ^{5,4} a	0,169 ^{4,5} b
Durabilidade (%)	99,3 ^{5,5} a	98,0 ^{4,5} a

Médias na horizontal seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste de Turkey a 5% de probabilidade. Valores sobreescritos nas médias correspondem aos coeficientes de variação.

No Poder calorífico útil foi possível visualizar que os pellets produzidos a partir do pergaminho apresentaram maior média, onde tem 16,51 MJ/Kg, enquanto a casca de café apresenta 13,48 MJ/Kg. Segundo o Atlas da biomassa de Minas Gerais (2017) o poder calorífico útil da biomassa do café (casca de café + pergaminho) é de 14,90 MJ/Kg, o que pode ser explicado pelo fato de que o resultado compreende análise dos dois tipos de resíduos misturados e quando observadas de forma separada, encontram-se logo acima e abaixo do que é informado. É importante que a biomassa a qual se deseja transformar em biocombustível sólido apresente altos valores de PCU, pois é ele que terá real impacto na geração de calor deste material, pois já foi retirada a energia necessária para retirada de umidade e da água formada no processo de combustão.

O comprimento, diâmetro e durabilidade de ambos os pellets produzidos com casca de café e pergaminho obtiveram médias estatisticamente iguais, tendo apenas diferença no teor de finos, onde o pergaminho apresentou o menor valor. Mack et.al., 2022, trazem em sua pesquisa que o tamanho do pellet tem grande influência em seu comportamento na queima, desde o fluxo de massas a produção de gases durante a queima, além de trazer sobre a importância de que o material tenha baixo teor de finos, uma vez que estes podem levar a extinção da queima caso estejam em grande volume. A durabilidade é um fator que ganha importância quando se é

necessário realizar o transporte dos pellets, uma vez que é a partir dela que se torna possível visualizar se o material apresentará resistência a aplicações de forças externas que podem levar a sua quebra e posterior aumento no teor de finos.

De forma a ter melhor visualização dos resultados obtidos com os pellets, a Tabela 5 demonstra como os resultados se comportam frente a EN 14961-6 (DIN, 2012), a qual foi utilizada de base visto a falta de uma normativa nacional.

Tabela 5: Classificação dos pellets de acordo com a norma de qualidade EN 14961-6 (DIN, 2012).

Propriedade	Unidade	Palha de			café	Pergaminho
		A	B			
Diâmetro	mm	06 a 25 ± 1	06 a 25 ± 1		A	A
Comprimento	mm	3,15 < L < 40	3,15 < L < 40		A	A
Umidade	%	< 12	< 15		X	A
Cinzas	%	< 5	< 10		B	A
Durabilidade						
mecânica	%	> 97,5	> 96,0		A	A
Finos	%	< 2,0	< 3,0		A	A
Poder calorífico						
superior	MJ/kg	> 14,1	> 13,2		A	A
Densidade a						
granel	kg/m ³	> 600	> 600		A	A
Nitrogênio	(%)	< 1,5	< 2,0		B	A

A partir do demonstrado é possível visualizar que os pellets produzidos com pergaminho podem ser comercializados no mais alto nível de qualidade da EN 14961-6 (DIN, 2012), enquanto os produzidos a partir da palha do café se enquadram na categoria B devido a seus valores de nitrogênio serem maior que 1,5% e o teor de cinzas que ficou acima de 5%, porém para efetiva possibilidade de comercialização é necessário que o teor de umidade seja reduzida a valores abaixo de 15%, o que pode ser alcançado através de secagem prévia do material antes da produção dos pellets ou da secagem do pellet após densificação.

5. CONCLUSÃO

A casca de café e o pergaminho se mostraram promissores no uso como matéria prima para a produção de pellets voltados para a geração de energia. Os parâmetros físico-químicas das biomassas demonstraram que elas são propícias a transformação em biocombustíveis sólidos, apresentando bons teores de carbono e hidrogênio que contribuem positivamente para o poder calorífico da biomassa, além de baixo teor de oxigênio, que tende a diminuir o poder calorífico, e nitrogênio e enxofre, que durante a queima se transformam em gases tóxicos. Os pellets foram produzidos a partir da biomassa pura, sem a necessidade de acréscimos de ligantes, aditivos e pré-tratamentos, o que demonstra que é possível produzir os pellets de casca de café e pergaminho sem a necessidade de um grande investimento e etapas pré-produção, sendo assim possível que a produção seja feita de maneira direta e simples. Os pellets produzidos a partir do pergaminho atingiram a mais alta qualificação na EN 14961-9, o que demonstra que é um material de alta qualidade e que se encaixa nos padrões de qualidade necessários para a exportação e para os pellets de casca de café é necessário que após a produção eles passem um período maior em processo de secagem, pois devido a característica de maior absorção de água, o teor de umidade dos pellets foi acima do aceitável para a normativa, mas este fator é simples de resolver para que atinja os parâmetros mínimos de qualidade. Os pellets produzidos a partir do estudo demonstram que o uso de biomassas residuais da agricultura tem um grande potencial para a aplicação em biocombustíveis sólidos e que com baixo investimento tecnológico é possível iniciar a produção, sendo assim uma opção para a geração de energia verde e sustentável, utilizando de toda a biomassa produzida na agricultura sem que haja desperdício ou destinação incorreta, além de possibilitarem o uso nas propriedades ou venda como substituto a lenha. O estudo de pellets deve continuar para otimizar os processos produtivos, ampliar as biomassas utilizadas e os protocolos para que essas biomassas atinjam os parâmetros de normas internacionais, afim de demonstrar a possibilidade de implantação em larga escala e que o Brasil tem espaço de mercado para os pellets de biomassa residual.

REFERÊNCIAS

Alixandre, R. D.; Lima, P. A. M. De; Alixandre, F. T.; Macette, H. A.; Krohling, C. A.; Ferreira, C. C.; Catem, D. De S. B. Ciências Agrárias: O Avanço da ciência no Brasil. In: Melo, J. O. F. Ciências Agrárias: o avanço da ciência no Brasil. Sã Paulo: Editora Científica Digital, 2022, Vol. 5. ISBN 978-65-5360-233-5. <https://doi.org/10.37885/221010702>

Angulo-Mosquera, L. S.; Alvarado-Alvarado, A. A.; Rivas-Arrieta, M. J.; Cattaneo, C. R.; Rene, E. R.; García-Depraect, O. Production of solid biofuels from organic waste in developing countries: A review from sustainability and economic feasibility perspectives. *Science of the Total Environment*, 795, 2021, 148816.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148816>

Arango-Agudelo, E., Rendón-Muñoz, Y., Cadena-Chamorro, E., Santa, J. F., Buitrago-Sierra, R. Evaluation of Colombian Coffee Waste to Produce Antioxidant Extracts. *BioResources*, 18(3), 2023, 5703-7723. <https://doi.org/10.15376/biores.18.3.5703-5723>

Associação Brasileira da Indústria do Café (ABIC). Indicadores da Indústria do Café – 2024. Disponível em: <https://estatisticas.abic.com.br/estatisticas/indicadores-da-industria/indicadores-da-industria-de-cafe-2024/> . Acesso em: 14 de fev. de 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8112: carvão vegetal: análise imediata. Rio de Janeiro, 1986. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8633: carvão vegetal: determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1983. 13 p

Atlas de Biomassa de Minas Gerais. Ruibran Januário dos Reis e Luciano Sather dos Reis (Org.). Belo Horizonte, 2017. Rona Gráfica e Editora. 100 pgs.: ilust.

Awogbemi, O.; Kallon, D. V. V. Valorization of agricultural wastes for biofuel applications. *Heliyon*, vol. 8, 2022, e11117. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11117>

Azan, A. Rafiq, M. Shafique, M., Zhang, H., Yuan, J. Analyzing of natural gas, nuclear energy and renewable energy on GDP and carbon emissions: A multi-variate panel data analysis. *Energy*, 219, 2021, 119592. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119592>

Beal, C. M., King, C. W. The zero-emissions cost of energy: a policy concept. *Progress in Energy*, 3, 2021, 023001. <https://doi.org/10.1088/2516-1083/abef1f>

Bernardi, A. V., Gerolamo, L. E., Dinamarco, T. M., Tapia-Blácido, D. R. Optimization of biomass saccharification processes with experimental design tools for 2G ethanol production: a review. *Biofuels, Bioproducts & Biorefining*. 17:1789 – 1806 (2023).
<https://doi.org/10.1002/bbb.2534>

Brasil. Ministério da Agricultura e Pecuária. Sumário Executivo Café. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe/boletim-da-safra-de-cafe> . Acesso em: 14 de fev. de 2025.

Campos, G. A. F., Perez, J. P. H., Block, I., Sagu, S. T., Celis, P. S., Taubert, A., Rawel, H. M. Preparation of Activated Carbons from Spent Coffee Grounds and Coffee Parchment and Assessment of Their Adsorbent Efficiency. *Processes*, 2021, 9, 1396.
<https://doi.org/10.3390/pr9081396>

Carvalho, A. Histórico do desenvolvimento do cultivo do café no Brasil. Instituto Agronômico de Campinas (IAC), Documentos IAC, 34, 2007, 14 p. ISSN: 1809-7693

Ceglia, F. Marrasso, E., Roselli, C., Sasso, M. Energy and environmental assessment of a biomass-based renewable energy community including photovoltaic and hydroelectric systems. Energy, 282, 2023, 128348. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128348>

Chen, M.; Lin, Y.; Xu, T.; Yan, X.; Jiang, H.; Leng, L.; Zeng, Z.; Wang, X., Zhan, H. Valorization of alcohol industry residues into solid, gaseous and liquid biofuels: A comprehensive review. Renewable Energy, 238, 2025, 121981.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121981>

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira de café, Brasília, DF, v.12, n. 1 primeiro levantamento, janeiro 2025, ISSN: 2318-7913

DAL-BÓ, V. Potencialidades para o aproveitamento de biomassa de casca de café robusta para a geração de energia. Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus. 2016.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. EN 14961-6: Solid biofuels – Fuel specifications and classes- Non-wood pellets for non-industrial use. Berlin, 2012. 16 p.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. EN 15210-1: Solid biofuels – Determination of mechanical durability of pellets and briquettes. Berlin, 2010. 12 p.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. EN 16127: Solid biofuels – Determination of length and diameter of pellets. Berlin, 2012. 11 p.

De Souza, H. J. P.L.; Arantes, M. D. C.; Vidaurre, G. B.; Andrade, C. R.; Carneiro, A. de C. O., de Souza, D. P. L., Protássio, T. de P. Pelletization of eucalyptus wood and coffee

growing wastes: Strategies for biomass valorization and sustainable bioenergy production. Renewable Energy, 149, 2020, 128-140. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.015>

Díaz-Jiménez, E., Moya, R. The Effects of Jatropha curcas and Ricinus communis Seeds Addition on Cofee Pulp Waste Pellets as Fuel. Waste and Biomass Valorization, 2022, 13:3071- 3084. <https://doi.org/10.1007/s12649-022-01701-4>

Embrapa Agroenergia. Briquetagem e Peletização de Resíduos Agrícolas e Florestais. Embrapa Agroenergia, Brasília, 2012. Disponível em <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/932713> >. Acessado em dez. 2024

Endriss, F.; Kuptz, D.; Hartmann, H.; Brauer, S.; Kirchhof, R.; Kappler, A.; Thorwarth, H. Analytical Methods for the Rapid Determination of Solid Biofuel Quality. Chemie Ingenieur Technik, 95, 10, 1503-1525, 2023. <https://doi-org.ez34.periodicos.capes.gov.br/10.1002/cite.202200214>

Fernandes, M. A. de O.; Baêta, B. E. L.; Adarme, O. F. H.; Fonseca, A. LCA-based carbon footprint analysis of anaerobic digestion of coffee husk waste. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 207, 2025, 114993. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114993>

Gil-Gómez, J. A., Florez-Prado, L. M., Leguizamón-Vargas, Y. C. Valorization of cofee by-products in the industry, a vision towards circular economy. Discover Applied Sciences, 2024, 6:480. <https://doi.org/10.1007/s42452-024-06085-9>

Gonçalves, J. E.; Sartori, M. M. P.; Leão, A. L.. Energia de briquetes produzidos com resíduos de resíduos sólidos urbanos e madeira de Eucalyptus grandis. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 13, n. 5, p. 657–661, set. 2009.

Goulart, P. de F.P., Alves, J. D., Castro, E. M. de, Fries, D. D., Magalhães, M. M., Melo, H. C. de. Histological and morphological aspects of different grain coffee qualities. Ciência Rural, Santa Maria, v. 37, n. 3 p. 662-666, mai-jun, 2007. ISSN 0103-8478

He, H., Wang, Y., Sun, W., Sun, Y., Wu, K. Effects of different biomass feedstocks on the pelleting process and pellet qualities. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 69, 2024, 103912. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.103912>

Ige, A. R.; Łaska, G. Production of antioxidant additives and biochar pellets from the Co-pyrolysis of agricultural biomass: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 208, 2025, 115037. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115037>

Kadjo, B. S.; Sako, M. K.; Diango, K. A.; Perilhon, C.; Hauquier, F.; Danlos, A. Production of a high-energy solid biofuel from biochar produced from cashew nut shells. Cleaner Engineering and Technology, 21, 2024, 100776. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2024.100776>

Kamperidou, V. Quality Analysis of Commercially Available Wood Pellets and Correlations between Pellets Characteristics. Energies, 2022, 15, 2865.
<https://doi.org/10.3390/en15082865>

Kumar, P.; Subbarao, P. M. V., Kala, L., Vijay, V. K. Influence of physical, mechanical, and thermal properties of biomass pellets from agriculture residue: Pearl millet cob and mix. Bioresource Technology Reports, 20, 2022, 101278.
<https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101278>

Lima Filho, R. R. de. Nota Técnica: Conjuntura e expectativas: pellets de madeira e madeira para lenha. Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA), nº 30, 2022. Disponível em <<https://cnabrasil.org.br/storage/arquivos/files/dtec.nt-30.Conjuntura-e-expectativas.Pellets-de-madeira-e-lenha.28set2022.vf.pdf>>. Acessado em jun. 2024

Mack, R., Schön, C., Kuptz, D., Hartmann, H., Brunner, T., Obernberger, I., Behr, H. M. Influence of pellet length, content of fines, and moisture content on emission behavior of wood pellets in a residential pellet stove and pellet boiler. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2022. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-03302-6>

Minajeva, A.; Jasinskas, A.; Dmeika, R.; Vaiciukevicius, E.; Lemanas, E.; Bielski, S. The Study of the Faba Bean Waste and Potato Peels Recycl for Pellet Production and Usage for Energy Conversion. *Energies*, 2021, 14, 2954. <https://doi.org/10.3390/en14102954>

Ministério de Minas e Energia. BEN – Balanço Energético Nacional – Ano base 2023. Brasília: MME (on-line), 2024. Disponível em:< [https://www.gov.br/mme/pt
br/assuntos/secretarias/sntep/publicacoes/balanco-energetico-nacional/ben-2024](https://www.gov.br/mme/pt_br/assuntos/secretarias/sntep/publicacoes/balanco-energetico-nacional/ben-2024) > Acesso em mai. 2025

Mortadha, H.; Kerrouchi, H. B.; Al-Othman, A.; Tawalbeh, M. A Comprehensive Review of Biomass Pellets and Their Role in Sustainable Energy: Production, Properties, Environment, Economics, and Logistics. *Waste and Biomass Valorization*, 2025. <https://doi.org/10.1007/s12649-024-02873-x>

Moon, C., Sung, Y., Ahn, S., Kim, T., Choi, G., & Kim, D. Effect of blending ratio on combustion performance in blends of biomass and coals of different ranks. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 47(1), 232-240, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2013.01.019>

Nath, B.; Chen, G.; Bowtell, L.; Nguven-Huy, T. Enhancement of wheat straw pellet quality for bioenergy through additive blending. *Jounal of the Air & Waste Management Association*, vol. 75, no. 5, 387-404. <https://doi.org/10.1080/10962247.2024.2447480>

Obi, O. F.; Pecenka, R.; Clifford, M. J. A Review of Biomass Briquette Binders and Quality Parameters. *Energies*, 2022, 15, 2426. <https://doi.org/10.3390/en15072426>

Otoni, J. P., Matoso, S. C. G., Pérez, X. L. O., Silva, V. B. da. Potential for agronomic and environmental use of biochars derived from different organic waste. *Journal of Cleaner Production*, 449, 2024, 141826. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141826>

Østergaard, P. A., Duic, N., Noorollahi, Y., Kalogirou, S. Renewable energy for sustainable development. *Renewable Energy*, 199, 2022, 1145-1152.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.09.065>

Pablo-Romero, M. P., Sánchez-Braza, A., Romero, M. G.-P. Renewable energy in Latin America. *AIMS Energy*, 10(4), 2022, 695-717. <https://doi.org/10.3934/energy.2022033>

Pawaree, N., Phokha, S., Phukapak, C. Multi-response optimization of charcoal briquettes process for green economy using a novel TOPSIS linear programming and genetic algorithms based on response surface methodology. *Results in Engineering*, 22, 2024, 102226.
<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102226>

Perreira, A. B.; Zanuncio, A. J. V.; Carvalho, A. G.; Carneiro, A. de C. O.; Castro, V. R. de; Carvalho, A. M. M. L.; Assunção, R. M. N. de; Araujo, S. de O. Sustainable Solid Biofuel Production: Transforming Sewage Sludge and *Pinus* sp. Sawdust into Resources for the Circular Economy. *Sustainability*, 2024, 16, 4554. <https://doi.org/10.3390/su16114554>

Poyilil, S., Palatel, A., Chandrasekharan, M. Physico-chemical characterization study of coffee husk for feasibility assessment in fluidized bed gasification process. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29: 51021-51053. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17048-7>

Rabichi, I., Yaacoubi, F. E., Ennaciri, K., Sekkouri, C., Bacaoui, A., Yaacoubi, A. Transforming olive-processed waste and almond shells into high-quality Biofuels: a comprehensive development and evaluation approach, 2024, v.46, n. 1, 8671–8685. <https://doi.org/10.1080/15567036.2024.2374747>

Sarker, T. R.; Nanda, S.; Meda, V.; Dalai, A. K. Densification of waste biomass manufacturing solid biofuel pellets: a review. Environmental Chemistry Letters, 2023, 21, 231-264. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01510-0>

Setter, C., Borges, C. R., Mendes, R. F., Oliveira, T. J. P. Energy quality of pellets produced from coffee residue: Characterization of the products obtained via slow pyrolysis. Industrial Crops & Products 2020, 154, 112731. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112731>

Setter, C. Ataíde, C.H., Mendes, R. F., Oliveira, T. J. P. de. Influence of particle size on the physico-mechanical and energy properties of briquettes produced with coffee husks. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28: 8215-8223. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11124-0>

Setyawan, H. Y., Sunyoto, N. M. S., Choirun, A., Musyaroh, M. Arwani, M. The potential of biochar-slurry fuel from agricultural wastes in Indonesia. Cogent Engineering, 11:1, 2024, 2307201. <https://doi.org/10.1080/23311916.2024.2307201>

Sherestha, A.; Mustafa, A. A.; Htike, M. M.; You, V.; Kakinaka, M. Evolution of energy mix in emerging countries: Modern renewable energy, traditional renewable energy, and non-renewable energy. Renewable <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.09.018>

Shu, H., Zhang, P., Chang, C., Wang, R., Zhang, S.. Agricultural Waste. Water Environment, v. 87, n. 10, 2015. <https://doi.org/10.2175/106143015X14338845155660>

Silva, I. G. C.B., Antonio, A. da S., Carvalho, E. M. de, Santos, G. R. C. dos, Pereira, H. M. G., Veiga Júnior, V. F. da. Method optimization for the extraction of chlorogenic acids from coffee parchment: An ecofriendly alternative. Food Chemistry 458 (2024) 139842. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139842>

Siyal, A. A., Liu, Y., Babar, A., Mao, X., Hussain, S., Fu, J., Ao, W., Zhou, C., Wang, L., Liu, G., Dai, J.. Pyrolysis of pellets prepared from pure and blended biomass feedstocks: Characterization and analysis of pellets quality. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 161 (2022) 105422. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105422>

Vincevica-Gaile, Z.; Zhyolina, M.; Shishkin, A.; Ansone-Bertina, L.; Klavis, L.; Arbidans, L.; Dobkevica, L. Zekker, I.; Klavins, M. Selected residual biomass valorization into pellets as a circular economy-supported end-of-waste. Cleaner Materials, 15, 2025, 100295. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2025.100295>

Waziri, S. A., Singh, K. Maina, U. A., Jime, A., Mustapha, M., Goel, G., Dubale, M., Tripathi, J. P. Investigating the feasibility of agro-waste briquettes as a sustainable energy source in Borno state Nigeria as pathways for post-conflict and instability recovery. Discover Sustainability, 2024, 5:314. <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00488-9>

Wondemagegnehu, E. B., Gupta, N. K., Habtu, E. Coffee parchment as potential biofuel for cement industries of Ethiopia. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. 44:2, 5004-5015, 2019. <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1656682>

Yang, J, Gao, C., Wang, X., Fu, H., Xu, C., Wang, Y. Assessing the development potential of non-food biofuel crops under the water-land-biofuel nexus perspective. *Science of the Total Environment*, 847, 2022, 157659. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157659>

Yara Brasil. Glossário da cultura do café. 30 de out. de 2020. Disponível em <<https://www.yarabrasil.com.br/conteudo-agronomico/blog/glossario-da-cultura-do-cafe/>>. Acessado em 21 de jul. de 2025.

Yilmaz, H.; Çanakci, M.; Topakci, M.; Karayel, D. The effect of raw moisture and particle size on agro-pellet production parameters and physical properties: A case study for greenhouse melon residues. *Biomass and Bioenergy*, 150, 2021, 106125.

<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106125>