



Faculdade de Engenharia
Departamento de Engenharia Química
Licenciatura em Engenharia Química

RELATÓRIO DE TRABALHO DE LICENCIATURA

**UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE COCO SECO CARBONIZADOS PARA A
PRODUÇÃO DE BRIQUETES**

Autora:
Jéssica Ussumane Taquidir

Supervisor:
Doutor Carlos Lucas, Eng.º

Co-supervisores:
Doutor Adolfo Condo, Eng.º
Eng.^a Karina Motani

Maputo, Maio de 2024



Faculdade de Engenharia
Departamento de Engenharia Química
Licenciatura em Engenharia Química

RELATÓRIO DE TRABALHO DE LICENCIATURA

**UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE COCO SECO CARBONIZADOS PARA A
PRODUÇÃO DE BRIQUETES**

Autora:
Jéssica Ussumane Taquidir

Supervisor:
Doutor Carlos Lucas, Eng.º

Co-supervisor:
Doutor Adolfo Condo, Eng.º
Eng.^a Karina Motani

Maputo, Maio de 2024

DECLARAÇÃO SOB PALAVRA DE HONRA

Eu, Jéssica Ussumane Taquidir, declaro por minha honra que o presente Trabalho de Licenciatura foi realizado inteiramente por mim, no Departamento de Engenharia Química da Faculdade de Engenharia da Universidade Eduardo Mondlane, no âmbito da conclusão do curso de Licenciatura em Engenharia Química.

Maputo, _____ de _____ de 20 _____

(Jéssica Ussumane Taquidir)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho com profundo amor e gratidão aos meus queridos pais, Taquidir Taquidir e Sandra Taquidir, e às minhas irmãs, Marla Taquidir, Yedda Taquidir e Pietra Taquidir. Foram vocês que com amor, apoio e paciência infinitos, me inspiraram a alcançar este marco na minha vida. Suas palavras de encorajamento e confiança em mim moldaram quem sou hoje. Às minhas irmãs, obrigada por serem fontes inesgotáveis de alegria e apoio incondicional. Pai e mãe, a vossa dedicação e sacrifícios não têm preço e eu dedico este trabalho a vocês como uma pequena forma de expressar minha eterna gratidão. Espero que este seja o início de um legado de conquistas inspiradas em vocês.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Senhor, meu Deus, a fonte da minha força e inspiração, por me guiar e sustentar, ao longo desta jornada académica. Sua graça e orientação constante foram fundamentais, em cada etapa deste processo.

Agradeço ao meu Pai, Taquidir Taquidir, pois a sua orientação e exemplo me inspiraram a alcançar esta conquista. Seu apoio financeiro e emocional foram a âncora que me sustentou nas tempestades da vida académica. Este trabalho é uma pequena expressão da minha profunda gratidão por tudo que fez por mim.

À minha Mãe, Sandra Taquidir, expresso a minha gratidão pelas suas palavras de incentivo e pelo apoio incansável que depositou em mim, sendo essa a minha maior fonte de motivação. Sua presença constante e cuidado tornaram todas as dificuldades mais suportáveis. Este trabalho é uma pequena homenagem à mulher extraordinária que tu és mãe. Obrigada por ser minha luz e meu exemplo.

À minha irmã mais velha, Marla Taquidir, agradeço por ser minha fonte constante de inspiração. A sua presença, incentivo e sabedoria foram fundamentais, nesta jornada académica. Te agradeço por seres uma irmã incrível, que sempre esteve do meu lado, tornando esta conquista mais significativa.

Às minhas irmãs mais novas, Yedda Taquidir e Pietra Taquidir, agradeço por serem partes fundamentais da minha jornada. Espero que ao trilhar este caminho académico tenha demonstrado que com determinação, esforço e amor pelo que fazemos, podemos alcançar os nossos objectivos.

Aos meus estimados supervisores, Prof. Doutor Eng.ºCarlos Lucas, Prof. Doutor Eng.ºAdolfo Condo e Eng.^a Karina Motani, é com profunda gratidão que expresso meu reconhecimento pela orientação valiosa que me proporcionaram, ao longo deste percurso académico. Seu comprometimento, sabedoria e apoio foram fundamentais, para o desenvolvimento e conclusão bem-sucedida deste trabalho. Cada orientação, correcção e conselho contribuíram, significativamente, para o aprimoramento deste trabalho.

Aos meus colegas, especialmente ao Chris Mongo, à Stela Timóteo, ao Yunus Amuji, à Felizarda Romão, à Lile Ndzevo, à Ébe da Silva e à Zenilda Uchavo, agradeço imensamente

pela colaboração, apoio e solidariedade ao longo desta jornada. Sem a ajuda de cada um de vocês, esta conquista não seria possível.

Aos meus colegas e amigos, quero expressar meu profundo agradecimento por todo apoio, seja directo ou indirecto, ao longo desta jornada. Cada gesto de amizade e colaboração contribuiu significativamente para o meu percurso académico. Obrigada por fazerem parte desta trajectória!

Resumo

O presente trabalho tem como objectivo principal a utilização de resíduos de coco seco carbonizados para a produção de briquetes. Os resíduos de coco seco foram colectados nas proximidades do mercado da Malanga. Para a produção dos briquetes, foi necessário o processo de carbonização das amostras, que ocorreu a 400°C, seguido pela etapa de densificação energética à pressão constante de 10 Mpa, para uma massa de 60 g de amostra. Utilizaram-se películas de castanha de cajú e resíduos de processamento de algodão como aglutinantes. As análises físico-químicas e térmicas da biomassa e dos briquetes mostraram que o endocarpo apresentou melhores propriedades em comparação ao mesocarpo. Foram utilizados dois tipos de aglutinantes: a película de castanha de cajú e resíduos de processamento de algodão. A película de castanha de cajú foi considerada o melhor aglutinante em relação aos resíduos de processamento de algodão. O poder calorífico superior dos briquetes de endocarpo (23,71 MJ/kg) e mesocarpo (22,19 MJ/kg) é próximo ao do carvão vegetal (26,73 MJ/kg). Os briquetes de endocarpo apresentaram maior densidade energética (23,44 GJ/m³) em relação aos briquetes de mesocarpo (18,20 GJ/m³). Ambos os tipos de briquetes mostraram-se pouco friáveis, com um índice de combustão de 0,66 para o endocarpo e 0,61 para o mesocarpo. No teste de fervura de água, verificou-se um rendimento de 23,63% para os briquetes de endocarpo e 23,34% para o mesocarpo, valores muito próximos ao do carvão vegetal (24,13%), o que indica que os resíduos seleccionados neste estudo são ideais para a produção de briquetes com alto teor energético. O teste de emissões de CO e partículas finas mostrou valores acima dos níveis recomendados, sugerindo a necessidade de otimizar o processo de combustão.

Palavras-chave: Carbonização de Resíduos de Coco seco, Briquetes de biomassa, Coco seco, Endocarpo de coco seco e Mesocarpo de coco seco.

Abstract

The main objective of this work is the utilization of carbonized dry coconut residues for briquette production. Dry coconut residues were collected near the Malanga market. For the production of briquettes, the carbonization process of the samples was carried out at 400°C, followed by the energy densification step at a constant pressure of 10 MPa for a sample mass of 60 g. Cashew nutshell and cotton processing residues were used as binders. Physico-chemical and thermal analyses of the biomass and briquettes showed that the endocarp exhibited better properties compared to the mesocarp. Two types of binders were used: cashew nutshell and cotton processing residues. Cashew nutshell was considered the better binder compared to cotton processing residues. The higher calorific value of endocarp briquettes (23.71 MJ/kg) and mesocarp briquettes (22.19 MJ/kg) is close to that of charcoal (26.73 MJ/kg). Endocarp briquettes showed higher energy density (23.44 GJ/m³) compared to mesocarp briquettes (18.20 GJ/m³). Both types of briquettes proved to be low in friability, with a combustion index of 0.66 for the endocarp and 0.61 for the mesocarp. In the water boiling test, a yield of 23.63% was observed for endocarp briquettes and 23.34% for mesocarp, values very close to that of charcoal (24.13%), indicating that the residues selected in this study are ideal for the production of high-energy content briquettes. The CO and fine particle emissions test showed values above the recommended levels, suggesting the need to optimize the combustion process.

Keywords: Carbonization of Dry Coconut Residues, Biomass Briquettes, Dry Coconut, Dry Coconut Endocarp, Dry Coconut Mesocarp.

Índice

1. Introdução.....	1
1.1. Objectivos.....	2
1.1.1. Objectivo Geral	2
1.1.2. Objectivos Específicos.....	2
1.2. Justificativa.....	3
2. Revisão Bibliográfica	3
2.1. Biomassa.....	4
2.2. Biomassa tradicional	4
2.3. Biomassa moderna.....	5
2.4. Energia da biomassa no mundo e em Moçambique.....	5
2.5. Vantagens da energia da biomassa	6
2.6. Desvantagens da energia da biomassa	7
2.7. Coco seco	7
2.8. Produção do coco seco a nível mundial	9
2.9. Produção do coco seco em Moçambique.....	9
2.10. Briquetagem.....	10
2.10.1. Vantagens no uso de briquetes	11
2.10.2. Desvantagens no uso dos briquetes.....	12
2.11. Factores que influenciam na produção e qualidade dos briquetes	13
3. Materiais e Métodos.....	13
3.1. Materiais.....	14
3.2. Métodos.....	14
3.2.1. Metodologia	14
3.2.2. Preparação das amostras.....	15
3.2.3. Caracterização física, química e térmica das amostras.....	17

3.2.4. Caracterização física, mecânica e térmica dos briquetes	23
4. Resultados e discussão	29
4.1. Pirólise lenta ou Carbonização	30
4.2. Análise granulométrica	33
4.3. Teor de humidade	34
4.4. Densidade granel	35
4.5. Teor de cinzas	36
4.6. Teor de voláteis	38
4.7. Teor de Carbono fixo	39
4.8. Poder calorífico	41
4.9. Produção dos briquetes	43
4.10. Estabilidade dimensional	45
4.11. Densidade aparente e energética	46
4.12. Friabilidade	48
4.13. Índice de Combustão	48
4.14. Teste de fervura	51
4.15. Questões ambientais: Emissões	55
5. Conclusões e Recomendações	59
5.1. Conclusões	59
5.2. Recomendações	60
Referências bibliográficas	61

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

ALER – Associação Lusófona de Energias Renováveis

ASTM – American Society for Testing and Materials

A.P – Alta potência

B.P – Baixa potência

BECT – Biomass Energy Certification and Testing Center

cm – centímetros

COV – Compostos Orgânicos Voláteis

CO₂ – Dióxido de Carbono

ρ – Densidade

EDENR – Estratégia de Desenvolvimento de Energias Novas e Renováveis

Frb – Friabilidade

GW – GigaWatt

g – Grama

°C – Graus Celcius

ha – hectares

Hz – Hertz

m – Massa

MJ – Megajoule

MPa – Megapascal

m³ – Metro cúbico

µg – Microgramas

µm – Micrómetros

ml – Mililitro

mm – Milímetros

min – Minutos

CO – Monóxido de Carbono

PM2,5 – Partículas em suspensão com diâmetro menor ou igual a 2,5 μm

PCI – Poder calorífico inferior

PCS – Poder calorífico superior

PCU – Poder calorífico útil

kcal – Quilocaloria

kg – Quilograma

kJ – Quilojoule

kW – Quilowatt

η – Rendimento

RGC – Rendimento gravimétrico de carbonização

rpm – Rotações por minuto

t – Tempo

TC – Teor de cinzas

TCF – Teor de carbono fixo

TH – Teor de humidade

TV – Teor de voláteis

WBT – Water boiling test

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura do coco seco.....	9
Figura 2: Produção do Coqueiro em Moçambique.	11
Figura 3: Resíduos de coco seco colectados.	14
Figura 4: Resíduos do coco seco carbonizados à 400 °C.	16
Figura 5: Moinho ultra centrífugo usado para a moagem das amostras.....	16
Figura 6: Analisador de humidade.....	18
Figura 7: Mufla e cadinhos utilizados na determinação do teor de cinzas.....	19
Figura 8: Mufla e cadinhos utilizados na determinação do teor de voláteis.....	20
Figura 9: Equipamento utilizado na briquetagem.	22
Figura 10: Moinho de bolas utilizado no teste de friabilidade.	24
Figura 11: Equipamento utilizado para o teste de índice de combustão.	25
Figura 12: Equipamento utilizado para realização do teste de fervura de água.	27
Figura 13: Equipamento utilizado para a medição dos poluentes.	29
Figura 14: Distribuição granulométrica das amostras.....	33
Figura 15: Briquetes feitos a partir da mistura do Mesocarpo e Endocarpo com películas de castanha de cajú com teor de humidade de 12%.....	35
Figura 16: Teste de friabilidade dos briquetes usando as películas de castanha de cajú e os resíduos do processamento de algodão como aglutinantes.	44
Figura 17: Briquetes produzidos a partir de cascas de coco seco carbonizadas.	44
Figura 18: Expansão longitudinal dos briquetes.	45
Figura 19: Resultados do teste de friabilidade.....	48
Figura 20: Variação da temperatura em função do tempo no teste de ICOM.....	50
Figura 21: Variação da massa em função do tempo no teste de ICOM.	51
Figura 22: Variação da temperatura da água em função do tempo no teste de fervura dos briquetes de endocarpo e mesocarpo.	53
Figura 23: Variação da temperatura da água em função do tempo no teste de fervura do carvão vegetal e da lenha.....	54
Figura 24: Emissões de CO ₂ e CO durante a combustão dos briquetes.....	55
Figura 25: Emissões de CO ₂ e CO durante a combustão do carvão vegetal e da lenha... ..	56

LISTA DE TABELA

Tabela 1: Caracterização química dos resíduos do coco seco.....	8
Tabela 2: Teste de proporções das amostras em estudo com películas de castanha de cajú e os resíduos de processamento de algodão.	21
Tabela 3: Tempo de residência no processo de carbonização e o respectivo teor de carbono fixo das amostras em estudo.	31
Tabela 4: Rendimento gravimétrico de carbonização.....	31
Tabela 5: Densidade a granel das amostras.	35
Tabela 6: Teor de cinzas das amostras.....	36
Tabela 7: Teor de voláteis das amostras.....	38
Tabela 8: Teor de Carbono fixo das amostras.....	39
Tabela 9: Poder calorífico das amostras.	42
Tabela 10: Densidade aparente dos briquetes e densidades energéticas dos resíduos e dos briquetes.	46
Tabela 11: Índice de combustão dos briquetes, do carvão vegetal e da lenha.	49
Tabela 12: Resultados do teste de fervura da água.	51

1. Introdução

Actualmente, a busca por fontes de energia sustentáveis e alternativas aos combustíveis fósseis tem sido uma prioridade global devido à preocupação com as mudanças climáticas, o aquecimento global e a escassez de recursos naturais. Isso tem impulsionado a pesquisa e o desenvolvimento de soluções inovadoras no campo de energia renovável. A dependência contínua de fontes não renováveis de energia leva à diminuição dos reservatórios, tornando-os mais escassos e elevando os preços. O uso de combustíveis fósseis tem desvantagens relacionadas aos problemas ambientais, como emissão de gases poluentes à atmosfera, contribuindo, por exemplo, para o aumento do efeito estufa.

Diante do cenário ambiental e energético a nível mundial, a biomassa surge como uma fonte de energia promissora, por ser uma fonte de energia limpa e renovável, e seu uso contribui para a preservação dos recursos naturais e a independência da utilização de combustíveis fósseis, que são grandes responsáveis pela emissão de gases de efeito estufa (Carvalho et al., 2022). A biomassa é toda matéria vegetal ou animal que pode ser reaproveitada como fonte para produzir energia, incluindo resíduos de indústrias alimentícias ou agrícolas, entre outros (Teixeira, 2010).

A densificação de biomassas florestais e agrícolas, por meio de briquetagem ou peletização, é uma estratégia eficaz para melhorar a sustentabilidade e a viabilidade energética desses materiais. Essa técnica reduz as desvantagens associadas ao uso de biomassa na sua forma in natura como fonte de energia, tornando-a mais amigável ao meio ambiente, económica e eficiente em termos energéticos (Nakashima et al., 2014). A densificação mecânica aumenta a densidade energética da biomassa, diminuindo os custos de transporte e otimizando o armazenamento, e esse processo pode ser aplicado tanto à biomassa natural quanto à biomassa carbonizada.

A carbonização, um processo termoquímico que envolve a decomposição controlada da biomassa em condições de alta temperatura e na ausência de oxigênio ou na presença limitada de oxigênio, é a etapa-chave que precede a briquetagem. Esse processo converte a biomassa em um material carbonizado de alto poder calorífico, conhecido como bio-carvão, que apresenta vantagens significativas em relação à biomassa convencional, tornando-se assim uma opção atraente para a produção de briquetes. Os briquetes são

unidades compactas de biomassa que podem ser utilizadas como combustível em várias aplicações, desde o aquecimento doméstico e geração de electricidade até os processos industriais. Sua forma e densidade tornam o transporte, o armazenamento e a queima mais convenientes, contribuindo para a redução do impacto ambiental.

O coco (*Cocos nucifera* L.) é uma cultura amplamente cultivada nas regiões tropicais e subtropicais, desempenhando um papel significativo na economia agrícola de muitos países. No entanto, a produção e o processamento do coco geram uma quantidade substancial de resíduos, incluindo o endocarpo e o mesocarpo, que frequentemente são descartados indevidamente. Essa prática resulta na perda de recursos potenciais, representando uma oportunidade desperdiçada de valorização desses materiais.

Neste contexto, este trabalho visa estudar a utilização de resíduos do coco seco carbonizados para a produção de briquetes. Nesse sentido, a determinação das características físicas, químicas e térmicas desses resíduos é de suma importância, uma vez que influenciam as propriedades e a qualidade dos briquetes gerados, possibilitando prever o seu comportamento durante a combustão. Para alcançar esse fim, foram conduzidas pesquisas bibliográficas, experimentos laboratoriais meticulosos, análise crítica dos resultados experimentais e, por fim, a elaboração deste relatório final.

1.1. Objectivos

O presente trabalho tem como objectivos:

1.1.1. Objectivo Geral

- Utilizar resíduos de coco seco carbonizados para produzir briquetes.

1.1.2. Objectivos Específicos

- Descrever o processo de carbonização dos resíduos de coco seco;
- Determinar as características físicas e químicas das amostras carbonizadas;
- Produzir os briquetes;
- Determinar as características físicas, mecânicas e térmicas dos briquetes produzidos;
- Fazer testes de combustão de combustíveis sólidos;
- Medir emissões durante a combustão dos briquetes.

1.2. Justificativa

A crescente preocupação mundial com as mudanças climáticas e a necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa tornam essencial a busca por fontes de recursos energéticos disponíveis e alternativos. A pesquisa busca fornecer uma alternativa sustentável para a gestão de resíduos, reduzindo a quantidade de resíduos descartados em aterros sanitários e promovendo a reutilização de materiais. Muitas indústrias e processos agrícolas, incluindo o sector doméstico, geram uma quantidade significativa de diferentes resíduos orgânicos, como cascas de frutas, serragem e bagaço, etc.

Moçambique possui recursos energéticos substanciais, que vão desde os combustíveis fósseis até as energias renováveis. No entanto, a exploração destes recursos para uso nacional é limitada. A maior parte do consumo de energia primária de Moçambique é satisfeita por biomassas tradicionais, como a madeira, o carvão vegetal e os resíduos agrícolas ou animais (Chambal, 2010).

Moçambique tem cerca de 2 GW de potencial de biomassa (FUNAE, 2015). Existem cerca de 17 milhões de hectares de floresta, e a maior parte desta área está localizada nas províncias da Zambézia, Sofala e Niassa. A biomassa traz vantagens na atenuação da dependência de combustíveis fósseis e na diversificação da matriz energética do país. A biomassa pode ser utilizada para conversão em energia térmica, que pode ocorrer por meio de diferentes processos, tais como a gaseificação, o processo de digestão anaeróbica e a combustão, que pode ser directa ou sob a forma de briquetes (Filho, 2021).

Dentre os resíduos de biomassa produzidos em Moçambique, encontra-se a casca de coco, que causa transtornos, quer seja descartada de forma adequada ou inadequada. Quando descartada de forma inadequada, contribui para a proliferação de vetores causadores de doenças, o que, por sua vez, gera custos indirectos para o sector público, incluindo despesas adicionais com saúde e programas de controle de vetores. Se descartada de forma adequada, representa um custo considerável na limpeza pública, além de ser um contribuinte de emissão de metano, um dos principais gases do efeito estufa (Dias et al., 2019).

As cascas de coco têm um período longo de decomposição, que varia entre 8 e 12 anos. Além disso, devido à sua forma e à dificuldade de compactação, exige mais espaço de

armazenamento. Esses factores contribuem para a redução da vida útil dos aterros sanitários onde geralmente são descartados (Silva e Ruggero, 2014). A utilização desses resíduos na forma de briquetes não só é muito importante na perspectiva de que adiciona-se valor, como também contribui na redução de quantidades de resíduos inadequadamente descartados e na redução da emissão de gases poluentes durante o processo de queima, além de aumentar a densidade e a concentração do seu teor energético (Silveira, 2008).

A produção de briquetes a partir de resíduos carbonizados resulta em um combustível de alta qualidade. A carbonização possibilita um aumento no poder calorífico da biomassa, tornando-a uma fonte de energia mais eficiente e competitiva. Esse combustível pode ser utilizado em diversas aplicações, desde aquecimento residencial até aos processos industriais (Protásio et al., 2011).

Portanto, esta pesquisa é justificada pela sua relevância na promoção da sustentabilidade energética, na gestão de resíduos, no desenvolvimento económico e na mitigação das mudanças climáticas, contribuindo significativamente para um futuro mais limpo, sustentável e economicamente viável.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Biomassa

A biomassa é todo recurso renovável oriundo de matéria orgânica (de origem animal ou vegetal) que pode ser utilizada para a produção de energia (Seye, 2003). A biomassa pode ser transformada em energia mecânica, térmica ou eléctrica, representando uma fonte de energia renovável com potencial de exploração em áreas rurais. Dependendo da localização, ela pode oferecer diferentes vantagens, explorando recursos locais e melhorando a situação económica dessas comunidades por meio da independência energética.

A biomassa pode ser classificada em dois grandes grupos: a biomassa tradicional, composta essencialmente pela lenha e resíduos naturais, e a biomassa moderna, produzida a partir de processos tecnológicos avançados e eficientes, como biocombustíveis líquidos e gasosos, briquetes e pellets (Marafon et al., 2016). As biomassas mais significativas, em relação à energia, são aquelas obtidas de culturas energéticas e de resíduos agrícolas.

Diversas formas de energia podem ser produzidas a partir da biomassa, incluindo a produção de biocombustíveis sólidos para a geração de energia térmica (carvão e resíduos agroflorestais), biocombustíveis líquidos (biodiesel) e geração de energia eléctrica (combustão directa, gaseificação, entre outras tecnologias) (Nonhebel, 2007).

2.2. Biomassa tradicional

As fontes tradicionais de energia, como a lenha e o carvão vegetal, representam mais de 80% do uso total de energia na África Subsaariana, uma região composta por 47 países e localizada geograficamente abaixo do Deserto do Saara. O carvão vegetal é responsável pela maior parte da demanda total, sendo que Moçambique é um dos dez principais países da África Subsaariana que contribuíram com cerca de dois terços do consumo de lenha em África (Falcão, 2013).

O consumo de combustíveis lenhosos (lenha e carvão) foi estimado em cerca de 9.3 e 5.5 milhões de toneladas por ano, na zona rural e urbana, respectivamente, totalizando 14.8 milhões de toneladas a nível nacional (Macuácuá, 2014). No entanto, o uso crescente desses combustíveis lenhosos tem levado a um elevado nível de desmatamento, devido à pressão sobre as florestas exercida pelas comunidades rurais na busca de lenha e carvão para satisfazer suas necessidades energéticas e como fonte de renda.

Neste contexto, a Estratégia de Desenvolvimento de Energias Novas e Renováveis (EDENR): 2011-2025 estabeleceu estratégias para desacelerar os processos de desflorestação. Isso inclui melhorar o acesso a serviços energéticos de melhor qualidade a partir de fontes renováveis, desenvolver a tecnologia de uso e conversão das fontes de energia renováveis, e reduzir o dano ambiental associado ao consumo de biomassa lenhosa e de combustíveis fósseis. Essa abordagem visa promover práticas sustentáveis no sector de energia, contribuindo para a conservação das florestas e mitigação dos impactos ambientais negativos.

2.3. Biomassa moderna

O sector de geração de biocombustíveis a partir da biomassa moderna é uma área que necessita de uma maior exploração, considerando a escala ainda limitada da produção. A

geração de electricidade a partir da biomassa é actualmente reduzida, com estimativas indicando que em Moçambique não ultrapassa os 5 MW (ALER, 2017). Os resíduos provenientes da produção agrícola industrial, como algodão, cana-de-açúcar, coco, arroz e outros, são fontes abundantes para a geração de energia. Esses resíduos podem ser transformados em combustíveis sólidos, como briquetes e pellets, para uso tanto no sector industrial quanto doméstico. A utilização desses resíduos na forma de biocombustíveis contribui não apenas para a gestão sustentável de resíduos, mas também para a diversificação da matriz energética, reduzindo a dependência de fontes não renováveis.

A expansão da geração de biocombustíveis a partir da biomassa moderna pode desempenhar um papel fundamental no aumento da capacidade energética renovável, promovendo práticas mais sustentáveis e mitigando os impactos ambientais associados ao uso de fontes tradicionais de energia. Além disso, a exploração mais efectiva dessas fontes de biomassa pode impulsionar o desenvolvimento económico local, criando oportunidades de emprego e fomentando a independência energética.

2.4. Energia da biomassa no mundo e em Moçambique

As energias renováveis têm experimentado um aumento significativo na procura e importância devido à sua menor emissão de poluentes, natureza "inesgotável", acessibilidade e custos mais baixos, além da capacidade de substituir os combustíveis fósseis, tornando-se ideais para mitigar parte dos problemas ambientais globais. Aproximadamente 11% da energia produzida globalmente tem origem na biomassa. Nos países em desenvolvimento, a biomassa é a fonte predominante de energia, contribuindo com 35% do total, e essa percentagem aumenta para 90% nos países em desenvolvimento mais pobres (Genovese et al., 2006).

O sucesso de qualquer nova forma de energia proveniente da biomassa depende da utilização de tecnologias relativamente avançadas. Para que a energia proveniente da biomassa seja sustentável a longo prazo, ela deve ser capaz de fornecer formas de energia acessíveis, limpas e eficientes (Rosille-Calle, 2006). No futuro, a biomassa tem o potencial de proporcionar um aprovisionamento energético sustentável e eficaz em termos de custos, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa (Balat e Ayar, 2005).

O potencial total de Energias Renováveis em Moçambique é de 23.026 GW, com a energia solar sendo a mais abundante (23.000 GW), seguida pela fonte hídrica (19 GW), eólica (5 GW), biomassa (2 GW, incluindo a lenhosa, etanol e biodiesel), geotérmica (0,1 GW) e oceânica (10 kW) (ALER, 2017). Moçambique tem implementado vários projectos para integrar as energias renováveis na matriz energética nacional, enfrentando os problemas socio-ambientais e económicos associados aos combustíveis fósseis. O uso da biomassa é uma excelente alternativa, trazendo inúmeros benefícios ambientais, económicos e sociais, além de permitir a produção sustentável de energia (Fortes e Raimundo, 2020).

2.5. Vantagens da energia da biomassa

A utilização da energia proveniente da biomassa pode contribuir significativamente para a redução da emissão excessiva de gases poluentes na atmosfera, que são responsáveis pelo efeito estufa (Mantovani et al., 2022). A produção sustentável de bioenergia promove o uso mais eficiente da biomassa sólida, desempenhando um papel crucial no aumento da diversidade da oferta de energia. Isso não apenas contribui para a produção de energia sustentável a longo prazo, mas também para a redução da dependência de importações de combustíveis convencionais (Fortes e Raimundo, 2020). Essa abordagem não apenas beneficia o meio ambiente, mitigando os impactos negativos das emissões de gases de efeito estufa, mas também fortalece a segurança energética e promove práticas mais sustentáveis no sector energético.

2.6. Desvantagens da energia da biomassa

A consequência do uso da biomassa proveniente de árvores lenhosas (carvão vegetal e lenha) é o impacto que isso pode gerar no meio ambiente, mais precisamente na cobertura vegetal, uma vez que o uso desse tipo de biomassa leva ao desmatamento, provocando uma série de impactos negativos ao meio ambiente. A demanda por alimentos também é uma das preocupações, pois pode ser afectada caso a produção agrícola seja destinada à obtenção de matéria-prima para a produção de energia. Nesse contexto, é necessário encontrar formas de aumentar o uso da energia proveniente da biomassa sem que isso afecte as necessidades alimentares.

2.7. Coco seco

O coco é um fruto do coqueiro (*Cocos nucifera* L.), espécie pertencente à família *Arecaceae* (família das palmeiras), cujas espécies são reconhecidas dentro de um único gênero (*Cocos*) (Silva et al., 2021). A palmeira que origina o fruto tem origem no sudeste da Ásia (Malásia, Filipinas e Indonésia) e nas ilhas localizadas entre os oceanos Pacífico e Índico. Dessa região, acredita-se que o fruto do coqueiro tenha sido levado para a Índia, e depois para a África Oriental. O coco pode ser colhido nos estágios de maturação verde (6 a 8 meses) e maduro/seco (11 a 13 meses) (Lima et al., 2015).

O coco seco é constituído por uma fracção de fibras (70%) e a restante é denominada de pó. As fibras do coco seco apresentam até duas vezes mais lignina, quando comparadas com outras fibras vegetais (Silva et al., 2006). As fibras do coco seco caracterizam-se pela sua dureza e durabilidade, devido ao alto teor de lignina, quando comparadas com outras fibras naturais (como a casca de arroz e os resíduos de eucalipto) (Marafon et al., 2019).

Marafon et al. (2019) analisaram algumas das características químicas dos resíduos do coco seco, que demonstram a sua boa qualidade para a produção de biocombustíveis sólidos (Tabela 1).

Tabela 1: Caracterização química dos resíduos do coco seco (Fonte: Marafon et al., 2019).

Característica	Endocarpo do coco seco	Mesocarpo do coco seco
Celulose (%)	42.91	35.52
Hemicelulose (%)	16.76	33.41
Lignina (%)	30.95	22.28

Segundo Silva et al. (2021), o coco seco é constituído pelo epicarpo (camada externa e fina que cobre o mesocarpo fibroso), pelo mesocarpo (camada rica em fibras, localizada entre o epicarpo e o endocarpo), pelo endocarpo (camada dura e marrom que envolve a parte comestível) e pelo endosperma sólido (parte comestível do coco, rica em nutrientes).

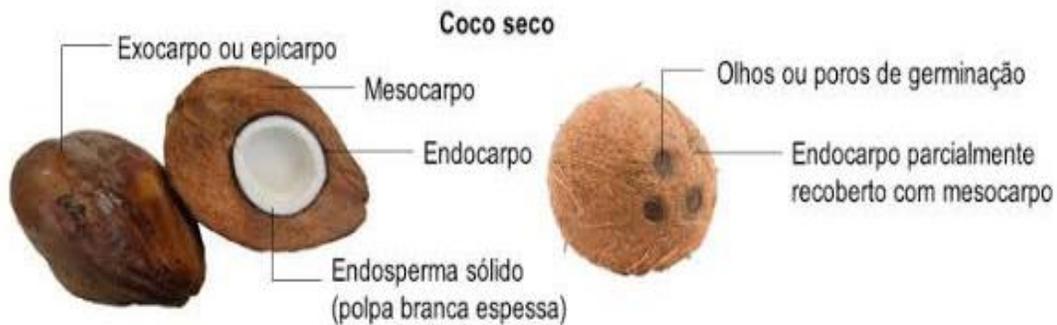


Figura 1: Estrutura do coco seco (Fonte: Silva et al.,2021).

A utilização dos resíduos provenientes da cultura do coqueiro para fins energéticos surge como uma oportunidade para minimizar o descarte inadequado dos resíduos gerados nos diferentes processos industriais e comerciais. Nessa perspectiva, é necessário propor estratégias sustentáveis para o aproveitamento de rejeitos de coco, visando a redução do consumo de lenha, carvão vegetal e combustíveis fósseis, contribuindo assim para a diminuição de impactos negativos ao ambiente (Bitencourt, 2008). É importante compreender que o aproveitamento dos resíduos do coco é crucial para a preservação do meio ambiente, uma vez que, quando descartados, esses resíduos demoram cerca de 8 anos para se decompor (Minucel, 2018). Segundo Pompêu (2019), as cascas de coco apresentam altos teores de lignina, conferindo-lhes elevado poder calorífico, o que indica que o aproveitamento energético dessas cascas como combustível sólido é uma alternativa para diversificar a matriz energética mundial.

2.8. Produção do coco seco a nível mundial

Em 1998, a produção mundial de coco atingiu cerca de 49 milhões de toneladas em uma área de 11.2 milhões de hectares. No ano de 2008, essa produção aumentou significativamente, atingindo aproximadamente 60.7 milhões de toneladas na mesma área, indicando um crescimento expressivo da produtividade global. A maior parte da área plantada com coqueiro está concentrada na Ásia, principalmente na Índia, Filipinas, Indonésia, Sri-Lanka e Tailândia, correspondendo a aproximadamente 80% da área mundial. A distribuição restante abrange áreas em África, América Latina, Oceânia e Caribe. A Indonésia é reconhecida como o maior produtor mundial de coco, seguida pelas Filipinas e Índia. No entanto, em termos de área colhida, as Filipinas se destacam, possuindo uma

extensão cultivada superior a 500 mil hectares de coqueiro, superando a Indonésia nesse aspecto (Mataruca, 2014; Martins e Jesus Júnior, 2014).

2.9. Produção do coco seco em Moçambique

Há 30 anos, a província da Zambézia era a principal produtora de coco em Moçambique, destacando-se como uma das maiores produtoras a nível mundial. No entanto, actualmente, uma parte significativa das extensas plantações de coqueiros que eram a base da economia da província foi devastada por uma doença que se manifesta pelo amarelecimento das folhas do coqueiro (Mueia, 2017). Em Moçambique, a introdução da cultura do coqueiro foi liderada por grandes empresas no início do século XX, com o sector familiar surgindo posteriormente em áreas adjacentes às das empresas. As plantações de coqueiros em Moçambique abrangem uma área de aproximadamente 160.000 hectares distribuídos por quatro províncias (Cabo Delgado, Nampula, Zambézia e Inhambane). Na Zambézia, especificamente, essas plantações ocupam cerca de 110.000 hectares, representando mais de 70% da área total nacional dedicada ao cultivo de coco (Forte, 2010). A Figura 2 apresenta a produção do coqueiro no país ao longo dos anos.

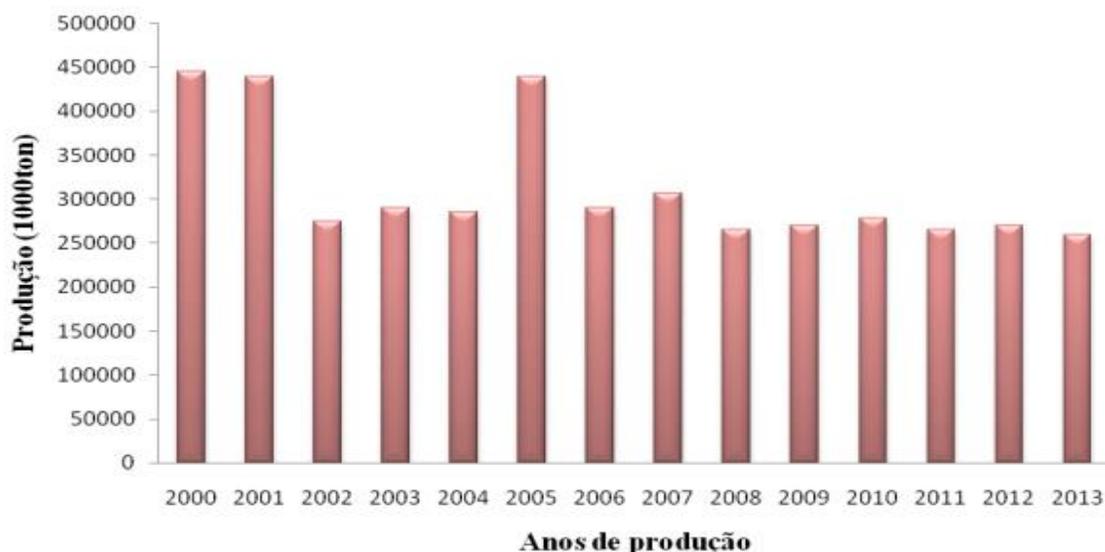


Figura 2: Produção do Coqueiro em Moçambique (Fonte: Mataruca, 2014).

2.10. Briquetagem

Briquetes são blocos cilíndricos compostos por resíduos de origem vegetal agroindustriais, madeiras, entre outros, que são compactados mecanicamente em alta pressão, resultando

em uma alta densidade. Diante da crescente necessidade de encontrar alternativas para substituir os combustíveis fósseis devido aos problemas ambientais, os briquetes têm ganhado espaço tanto nas indústrias quanto na sociedade em geral (Fernandes, 2012).

Quirino (2002) afirma que todo resíduo de origem vegetal pode passar pelo processo de briquetagem, desde que atenda às necessidades de granulometria e ao teor de humidade exigido pelo processo. A briquetagem envolve a compactação de materiais lignocelulósicos a altas pressões e temperaturas, podendo ou não contar com aglomerantes, resultando em um produto compacto. É crucial que o material a ser compactado tenha uma quantidade de humidade entre 8% e 15%, e o tamanho das partículas seja inferior a 10 mm (Dias et al., 2012).

As cascas de coco podem ser transformadas em briquetes de alto poder calorífico para geração de energia, representando uma alternativa sustentável aos combustíveis fósseis, substituindo fontes vegetais tradicionais como carvão vegetal e lenha, que precisam ser preservadas (Barros, 2012).

A briquetagem é uma maneira eficiente de concentrar a energia disponível na biomassa, uma vez que 1,00 m³ de briquetes contém pelo menos 5 vezes mais energia do que 1,00 m³ de resíduos, considerando a densidade a granel e o poder calorífico desses materiais (Quirino e Brito, 1991). Devido à queima rápida e uniforme dos briquetes, eles podem ser empregados em diversos sectores, como cervejarias, hospitais, hotéis, pizzarias, indústrias de óleo, lacticínios, metalurgia e panificadoras (Gentil, 2008).

Conforme Moro (1987), o processo de briquetagem pode ser dividido em sete etapas:

- ✓ **Escolha do material:** Esta etapa envolve a selecção da matéria-prima desejada, considerando o tipo de briquete que se pretende produzir, e as características específicas do material a ser utilizado. Isso inclui avaliar o tamanho das partículas, a densidade e a humidade do material, aspectos essenciais para o sucesso do processo de briquetagem.
- ✓ **Secagem:** Essa etapa tem como objectivo remover a humidade dos resíduos, garantindo que o material atinja o nível de humidade adequado para a realização eficaz do processo de briquetagem.

- ✓ **Moagem:** Esta etapa tem como objectivo reduzir o tamanho das partículas da matéria-prima, facilitando o processo de briquetagem. A redução do tamanho das partículas proporciona uma uniformidade no material, favorecendo a compactação durante as fases subsequentes do processo.
- ✓ **Peneiração:** Essa etapa visa a separação das partículas resultantes da moagem em diferentes granulometrias. A peneiração contribui para garantir a uniformidade do material e otimizar a qualidade dos briquetes produzidos, uma vez que permite a escolha das partículas mais adequadas para o processo de compactação.
- ✓ **Mistura com aglutinante (caso se aplique):** Nesta etapa, realiza-se a mistura da matéria-prima previamente preparada com um aglutinante, se necessário. O aglutinante desempenha o papel de promover a aderência das partículas dos resíduos. Vale destacar que essa etapa nem sempre é essencial, pois alguns resíduos possuem níveis de lignina suficientes para promover a ligação das partículas em ambientes de alta pressão e temperatura durante o processo de briquetagem.
- ✓ **Prensagem:** Realizada em equipamentos específicos, onde a matéria-prima é submetida a altas pressões e temperaturas. O formato e o tamanho do briquete podem variar, dependendo do molde utilizado;
- ✓ **Estocagem e embalagem:** Os briquetes devem ser armazenados para manter um estoque intermediário entre a produção e a distribuição.

2.10.1. Vantagens no uso de briquetes

A citação de Oliveira (2016) destaca algumas vantagens excepcionais dos briquetes, tais como:

- ✓ Os briquetes são produzidos em tamanhos padronizados e com uma geometria que facilita seu transporte, manipulação e armazenamento;
- ✓ São fabricados a partir de resíduos agrícolas, tornando-os uma fonte de energia mais sustentável em comparação com o carvão vegetal;
- ✓ O poder calorífico dos briquetes é 2,5 vezes maior do que o da lenha, apresentando regularidade térmica e maior temperatura de chama. Geralmente, os briquetes apresentam baixa humidade, e durante a queima, a temperatura se eleva rapidamente em comparação com a lenha.

2.10.2. Desvantagens no uso dos briquetes

Os briquetes têm a tendência de se desfazerem quando expostos à água ou submetidos a ambientes com elevados teores de humidade. Portanto, o local de armazenamento deve ser fechado e a humidade recomendável deve ser garantida. Contudo, o principal constrangimento é a falta de produção local de briquetes, decorrente principalmente da ausência de equipamentos apropriados para a produção, associada à falta de acesso ao mercado e de demanda. Por outro lado, a falta de conhecimento sobre o produto e as barreiras relacionadas à tradição e aos costumes dos usuários Moçambicanos também contribuem significativamente (Energylopedia, 2022).

2.11. Factores que influenciam na produção e qualidade dos briquetes

Morey e Kaliyan (2009) analisaram como o produto final pode ser afectado pelo pré-tratamento e pelas características iniciais da biomassa, tais como:

- ✓ **Tamanho das Partículas e Teor de humidade:** O tamanho das partículas e o teor de humidade do material influenciam na capacidade de formar briquetes. Partículas muito grandes podem dificultar a compactação, enquanto um teor de humidade muito alto ou muito baixo pode afectar a coesão.
- ✓ **Aglutinantes:** Em alguns casos, é necessário adicionar ligantes, sobretudo quando se trata de materiais com baixo teor de lignina. A escolha do tipo de ligante influencia directamente nas propriedades físicas do briquete.
- ✓ **Pressão:** Pressões mais altas geralmente resultam em briquetes mais densos e resistentes. Pressões consistentes e uniformes garantem que os briquetes mantenham uma forma adequada e que o processo de briquetagem seja eficiente.
- ✓ **Temperatura:** À medida que a temperatura aumenta, a lignina começa a amolecer e tornar-se mais viscosa, e isso auxilia na coesão das partículas de biomassa, possibilitando a formação de briquetes mais compactos. Reed et al. (1980) demonstraram que o esforço de compactação e a pressão podem ser reduzidos pela metade se a matéria-prima for pré-aquecida antes de ser compactada.

3. Materiais e Métodos

Neste capítulo estão apresentados os materiais utilizados neste estudo, assim como a descrição dos procedimentos experimentais aplicados para o alcance dos objectivos propostos.

3.1. Materiais

Os resíduos de coco seco usados para o desenvolvimento deste trabalho foram colectados nos arredores do mercado da Malanga, na cidade de Maputo. Esses resíduos foram transportados para o Laboratório de Controlo Automático, localizado no Departamento de Engenharia Química da Faculdade de Engenharia da Universidade Eduardo Mondlane, para dar início à execução das actividades laboratoriais.



Figura 3: Resíduos de coco seco colectados.

3.2. Métodos

3.2.1. Metodologia

A metodologia adotada para a realização deste trabalho foi composta pelas seguintes etapas: pesquisa bibliográfica, obtenção da matéria-prima, trabalho laboratorial, tratamento e organização dos dados experimentais, análise e discussão dos resultados, e, por fim, a elaboração do relatório final.

- **Pesquisa bibliográfica:** Essa etapa envolveu a colecta da informação necessária para o desenvolvimento do trabalho, utilizando literatura disponível na forma de livros, artigos científicos, trabalhos de licenciatura e dissertações de mestrado.
- **Trabalho laboratorial:** As actividades laboratoriais foram conduzidas nos laboratórios do Departamento de Engenharia Química, na Faculdade de Engenharia

da Universidade Eduardo Mondlane. Os ensaios em equipamentos de combustão de combustíveis sólidos e a medição das emissões durante a combustão dos combustíveis em estudo, foram realizados no BECT (Biomass Energy Certification and Testing Center), localizado no campus da Universidade Eduardo Mondlane. O trabalho laboratorial seguiu as seguintes etapas: preparação das amostras das cascas de coco seco; caracterização física e química das amostras a briquetar; produção dos briquetes; caracterização física, química, mecânica e térmica dos briquetes obtidos; ensaios em equipamentos de combustão de combustíveis sólidos; e medição das emissões durante a combustão dos combustíveis em estudo.

- **Elaboração do relatório final:** Esta etapa envolveu a produção do presente documento, que contém todas as informações relevantes obtidas durante a pesquisa bibliográfica, bem como os dados colectados durante as actividades laboratoriais. Os dados foram posteriormente tratados com as análises e discussões necessárias, culminando nas considerações finais da pesquisa.

3.2.2. Preparação das amostras

Foram removidas impurezas das amostras de endocarpo e mesocarpo de coco seco. Em seguida, utilizando um martelo para o endocarpo e uma tesoura para o mesocarpo, as partículas foram reduzidas de tamanho para facilitar o processo de carbonização.

I. Pirólise lenta ou Carbonização

Para a carbonização das amostras, utilizou-se um pequeno reactor de ferro galvanizado com as seguintes dimensões: altura de 10 cm e diâmetro de 17 cm. As amostras foram colocadas no reactor e tampadas para evitar a entrada de oxigênio. Em seguida, o reactor foi inserido em uma mufla (marca: Termolab – Fornos Elétricos; modelo: MLM). O processo de carbonização ocorreu a uma temperatura de 400 °C, com uma taxa de aquecimento de 2,08 °C/min e um tempo de residência de 3 horas. O rendimento do processo de carbonização, denominado rendimento gravimétrico, representa a quantidade de carvão gerada por unidade de massa a partir da biomassa in natura (Rodrigues, 2019). O RGC foi calculado da seguinte forma:

$$\text{RGC} = \frac{m_{\text{final}}}{m_{\text{inicial}}} \times 100\% \quad (1)$$

Onde: RGC - rendimento gravimétrico de carbonização (%); m_{final} – massa final (g) e m_{inicial} – massa inicial (g).



Figura 4: Resíduos do coco seco carbonizados à 400 °C.

II. Moagem

A moagem é essencial para reduzir o tamanho das partículas, aumentando a área de contacto entre elas. Isso facilita os mecanismos de ligação durante o processo de densificação, garantindo que os briquetes tenham boas propriedades mecânicas. No entanto, antes da moagem, os endocarpos e mesocarpos carbonizados tiveram seus tamanhos reduzidos usando um martelo e uma tesoura, respectivamente, para obter partículas com o tamanho adequado para o processo.



Figura 5: Moinho ultra centrífugo usado para a moagem das amostras.

Posteriormente, as biomassas foram moídas no moinho ultra centrífugo Restch ZM 200, conforme ilustrado na Figura 5. As amostras foram introduzidas gradualmente no moinho para evitar sobrecarregar o equipamento. Após a moagem, as amostras foram cuidadosamente retiradas do moinho para evitar perdas de matéria-prima.

III. Peneiração e Granulometria

A peneiração visa separar as partículas geradas na moagem com diferentes tamanhos. Para isso, aproximadamente 100 g da amostra foram pesados em uma balança analítica (marca: Denver Instrument; modelo: M-310) e colocados em peneiros com aberturas de 0.35, 0.5, 0.6, 1 mm, respectivamente. Esses peneiros foram previamente montados no peneirador vibratório orbital da marca Tampson, modelo VS 1000. O processo de peneiração ocorreu durante 15 minutos com uma amplitude de 80 Hz. Após a peneiração, as massas retidas em cada peneiro foram pesadas, e as respectivas frações retidas foram calculadas da seguinte forma:

$$x_i = \frac{\text{massa retida}}{\text{massa total}} \quad (2); \quad \text{Onde: } x_i - \text{fracção retida.}$$

3.2.3. Caracterização física, química e térmica das amostras

I. Densidade a granel

A densidade a granel é de extrema importância, pois fornece informações essenciais para logística, transporte e armazenamento da biomassa. Isso ocorre porque leva em consideração os espaços vazios entre as partículas da biomassa, além de fornecer dados reais sobre o volume necessário para o transporte. Além disso, é usada no cálculo da densidade energética (Garcia et al., 2013). Para determinar a densidade a granel da amostra, pesa-se o balão volumétrico vazio com capacidade de 100 ml e, em seguida, introduz-se a amostra até preenchê-lo. Posteriormente, pesa-se o balão contendo a amostra para obter a massa da amostra contida nele. Este procedimento foi repetido três vezes, e a densidade a granel foi determinada pela seguinte expressão:

$$\rho_{\text{granel}} = \frac{m}{V} \quad (3)$$

Onde: m – massa (g); ρ – densidade a granel [g/cm³] e V – volume [cm³].

II. Teor de Humidade

A humidade é um parâmetro crucial, uma vez que pode influenciar as propriedades mecânicas e energéticas dos briquetes. A determinação do teor de humidade das amostras em estudo foi realizada a uma temperatura de 105°C, utilizando um analisador de humidade (modelo: MA 100; marca: Sartorius), conforme ilustrado na Figura 6. Todos os ensaios foram conduzidos em triplicata para cada amostra. Em casos em que o valor da humidade das amostras estava abaixo do intervalo recomendado, água foi adicionada com o auxílio de um borrifador. Por outro lado, para amostras com valores elevados de humidade, estas foram submetidas a uma secagem em uma estufa por alguns minutos até atingir a humidade desejada.



Figura 6: Analisador de humidade.

III. Teor de Cinzas

O teor de cinzas representa a fracção inorgânica não combustível que permanece após a queima da biomassa (Ribeiro, 2015). Para determinar o teor de cinzas, recorreu-se à Norma ASTM D-1102. Amostras com granulometria inferior a 0.475 mm foram pré-secas na estufa por 24 horas a 105°C. Em seguida, foram pesados dois cadinhos de porcelana vazios. Em cada cadinho, foram introduzidos 2 g da amostra. Posteriormente, os cadinhos contendo as amostras foram colocados na mufla (marca: Termolab – Fornos Elétricos; modelo: MLM) para o processo de queima, conforme apresentado na Figura 7. A temperatura foi elevada a uma taxa de aquecimento de 10°C/min até atingir 600°C, permanecendo nessa temperatura por 15 horas para garantir a queima completa da matéria orgânica. Os cadinhos foram removidos da mufla a 170°C e transferidos para um dessecador para continuar o resfriamento até atingir a temperatura ambiente. Os cadinhos contendo as cinzas foram

pesados, para permitir a determinação do teor de cinzas. Esse procedimento foi realizado em triplicata para cada amostra. O teor de cinzas foi determinado pela seguinte equação:

$$\text{Teor de Cinzas} = \frac{m_2 - m_1}{m_0} \times 100\% \quad (4)$$

Onde: m_2 – cadinho + cinzas [g]; m_1 – cadinho vazio [g] e m_0 – amostra fresca [g]



Figura 7: Mufla e cadinhos utilizados na determinação do teor de cinzas.

IV. Teor de Voláteis

O teor de voláteis corresponde à quantidade de substâncias voláteis contidas na biomassa, incluindo a humidade, libertados quando a biomassa é submetida a elevadas temperaturas. Para a determinação do teor de voláteis, recorreu-se à Norma ASTM E-872. Para a determinação do teor de voláteis foi usada uma amostra previamente secada numa estufa por 24 horas a uma temperatura de 105°C, com a granulometria inferior a 0,475 mm. Cerca de 1 g de amostra seca foi introduzida em cada cadinho de níquel e tampados para evitar contacto com o ar durante a devolatilização. De seguida, os cadinhos cobertos foram colocados na mufla a uma temperatura de 950°C durante 7 minutos. As amostras foram removidas e arrefecidas num dessecador até a temperatura ambiente. Os cadinhos foram posteriormente pesados para determinar a perda de massa devido à devolatilização. O teor de voláteis foi determinado pela seguinte fórmula:

$$\text{Teor de Voláteis} = \frac{m_{\text{inicial}} - m_{\text{final}}}{m_{\text{amostra}}} \times 100\% \quad (5)$$

Onde: m_{inicial} – cadinho + amostra [g]; m_{final} – cadinho – voláteis [g] e m_{amostra} – massa da amostra [g].



Figura 8: Mufla e cadinhos utilizados na determinação do teor de voláteis.

V. Teor de Carbono fixo

O teor de carbono fixo representa a massa restante, após a libertação dos compostos voláteis, excluindo as cinzas e teores de humidade (Mckendry, 2002). O carbono fixo foi determinado pela diferença entre a massa total da amostra e os teores de materiais voláteis e cinzas:

$$\text{Teor de carbono fixo} = 100 - \text{TC} - \text{TV} \quad (6)$$

Onde: TC - teor de cinzas [%] e TV - teor de voláteis [%].

VI. Poder Calorífico

O poder calorífico é definido como a quantidade total de energia libertada durante a combustão completa de um combustível por unidade de massa (MJ/kg) ou volume (MJ/m³). O poder calorífico superior (PCS, MJ/kg) pode ser estimado por meio de correlações empíricas, baseadas em resultados experimentais da análise imediata feito por Parikh et al.(2005), sendo que o poder calorífico superior é a soma da energia liberada, na forma de calor, e a energia gasta na vaporização da água. Por sua vez, o poder calorífico inferior é definido como a quantidade de energia libertada durante a combustão completa de um combustível por unidade de massa (MJ/kg) ou volume (MJ/m³), sem considerar o calor latente de condensação da água vaporizada durante a combustão, e foi calculado de acordo com a fórmula citada por Gomes (2019) e por fim, o poder calorífico útil refere-se à quantidade de calor que efectivamente é utilizada para gerar energia útil num determinado processo ou sistema. Geralmente, nem todo calor gerado num determinado processo é convertido em energia útil devido a muitas perdas térmicas, baixa eficiência dos dispositivos

de conversão energética, etc, e foi calculado por meio da correlação citada por Vale et al. (2007). As equações que permitiram determinar estes parâmetros foram as seguintes:

$$PCS = 0,3536 (TCF) + 0,1559 (TV) - 0,0078 (TC) \quad (7)$$

$$PCI = PCS - 600 (9H/100) \quad (8)$$

$$PCU = PCI (1-TH) - 600 (TH) \quad (9)$$

Onde: PCS – poder calorífico superior [MJ. kg⁻¹]; PCI – poder calorífico inferior [kcal. kg⁻¹]; PCU – poder calorífico útil [kcal. kg⁻¹]; TC – teor de cinzas [%]; TCF – teor de carbono fixo [%]; TV– teor de voláteis [%]; TH – teor de humidade (base húmida) [%]; H – Teor de Hidrogênio ≈ 6%, segundo Cortez et al. (2009).

VII. Produção dos briquetes: Briquetagem

Para a produção dos briquetes, foi utilizada uma prensa laboratorial e um molde cilíndrico feito de aço inoxidável de diâmetro 50 mm e altura 33 mm, no qual 60 g de amostra foram introduzidas, neste molde, e colocadas na prensa. A placa superior e a placa inferior são usadas para elevar a temperatura, nas partes superiores e inferiores da amostra, e a camisa é usada para revestir o molde e aquecer a amostra lateralmente, garantindo a distribuição uniforme da temperatura, ao redor de toda amostra. Dois termopares foram colocados, nos dois orifícios existentes no molde, para monitorar a temperatura. A compactação foi realizada aplicando-se uma pressão constante de 10 MPa e uma temperatura de 150°C. Feita a compactação, usou-se um ventilador, para garantir um arrefecimento mais rápido. Para a confecção dos briquetes, a partir de finos de carvão de resíduos de coco seco (endocarpo e mesocarpo), foi necessário o uso de aglutinante, para garantir que os briquetes tivessem ótimas propriedades físicas, assim como mecânicas. Para o efeito, fez-se o uso de dois tipos de aglutinantes (películas de castanha de cajú e resíduos do processamento de algodão), e testou-se vários tipos de proporções, em triplicata, para cada tipo de aglutinante, tomando em consideração que quanto maior for a quantidade de carvão, na mistura (carvão + aglutinante), maior será a quantidade de carbono fixo.

De acordo com Figueroa e Moraes (2009), durante o processo de aquecimento, a biomassa atinge uma temperatura chamada "temperatura vítrea", que normalmente varia de 60 a 95 °C. Nesse ponto, a lignina na biomassa se torna uma cadeia flexível e desorganizada.

No entanto, quando o briquete é resfriado, ou seja, após atingir a sua "temperatura de cura", a lignina volta a ficar rígida e adquire uma textura semelhante ao vidro, processo conhecido como "transição vítrea". Essa característica é muito benéfica na produção de briquetes, pois permite que o material seja remodelado e mantenha sua forma sólida e definida. Portanto, a retirada do briquete só deve ocorrer após atingir a temperatura de cura, que neste caso considerou-se 60°C. Os briquetes foram nomeados segundo o tipo de matéria-prima e do tipo de aglutinante usado. Com auxílio ao teste de friabilidade, fez-se a escolha do melhor aglutinante, e das proporções da mistura dos finos de carvão do coco seco e aglutinante.

Tabela 2: Teste de proporções das amostras em estudo com películas de castanha de cajú e os resíduos de processamento de algodão.

Tipo de aglutinante	N	Proporção (%)	
		Finos de carvão vegetal (Endocarpo/Mesocarpo)	Aglutinante
Películas de castanha de cajú	1	80	20
	2	70	30
	3	65	35
	4	60	40
	5	50	50
Resíduos do processamento de algodão	1	80	20
	2	70	30
	3	65	35
	4	60	40
	5	55	45
	6	50	50
	7	45	55
	8	40	60



A - Prensa laboratorial



B - Painel de controlo temperatura



C - Molde cilíndrico

Figura 9: Equipamento utilizado na briquetagem.

3.2.4. Caracterização física, mecânica e térmica dos briquetes

I. Estabilidade dimensional

Após o processo de briquetagem, fez-se a medição da altura do briquete com auxílio de um paquímetro digital (marca: *Mitutoyo*; modelo: CD-6"CSX), num intervalo de (0, 1, 2, 24, 48 e 72) horas e (7 e 15) dias, com a finalidade de monitorar a expansão longitudinal dos briquetes, até que não se verificassem alterações significativas nas suas dimensões. Estas medições possibilitaram a determinação dos valores da expansão longitudinal, fornecendo conclusões sobre a estabilidade dimensional e indicando também a qualidade de compactação dos briquetes. Para tal, foram seleccionados três briquetes de cada amostra, e fez-se o controlo das respectivas alturas. Para determinar a expansão longitudinal do briquete no tempo (t), utilizou-se a seguinte expressão:

$$\text{Expansão}_{t=t} = \frac{h_{t=t} - h_{t=0}}{h_{t=0}} \times 100\% \quad (10)$$

Onde: h – altura do briquete (mm) e t – tempo (minutos ou horas).

II. Densidade aparente

Segundo Quirino e Brito (1991), a partir da densidade aparente do briquete é que se determina a quantidade de energia acumulada neste material com volume definido. A determinação da massa específica (densidade) aparente consiste na razão entre a massa dos briquetes e o volume deles, obtido a partir das dimensões dos briquetes após estabilização. Por meio destes parâmetros, foi possível calcular a densidade aparente, com a seguinte expressão:

$$\rho_{\text{aparente}} = \frac{m}{V} \quad (11)$$

Onde: ρ_{aparente} – densidade aparente [g/cm^3]; m – massa [g] e V – volume [cm^3].

III. Densidade energética

Segundo Pinheiro et al. (2005), a densidade energética ou quantidade de calor por unidade de volume (Gcal/m^3 ou GJ/m^3) é a propriedade que avalia o desempenho da biomassa, como combustível, pois resume as características físicas e químicas, e é definida como o produto entre o poder calorífico e a densidade. E para o cálculo da densidade energética,

tanto para o resíduo assim como para os briquetes, fez-se a aplicação das correlações (12) e (13), respectivamente.

$$\text{Densidade energética do resíduo: } \rho_{\text{energética}} = \rho_{\text{granel}} \times \text{PCU} \quad (12)$$

$$\text{Densidade energética do briquete: } \rho_{\text{energética}} = \rho_{\text{aparente}} \times \text{PCU} \quad (13)$$

Onde: $\rho_{\text{energética}}$ – densidade energética (MJ/m³); ρ_{granel} – densidade a granel (kg/m³); ρ_{aparente} – densidade aparente (kg/m³) e PCU – poder calorífico útil [MJ/kg].

IV. Friabilidade

A friabilidade de um material refere-se à propriedade ou capacidade que certos materiais tem de se desintegrar ou fragmentar em partículas menores com relativa facilidade devido a forças mecânicas durante o manuseio. Para a análise da resistência a impactos, foi realizado o ensaio de friabilidade nos briquetes, utilizando-se o método de “Tamboramento”, que consistiu na pesagem de três briquetes de cada amostra e, de seguida, introduziu-se os briquetes num moinho de bolas (marca: *Anand A.C Induction Motor*), submetendo-se os briquetes à acção mecânica de 40 rotações por minuto (rpm), durante 5 minutos, totalizando-se 200 rotações para cada amostra. E por fim, os briquetes foram retirados do moinho e pesados novamente, para determinar a sua perda de massa, de acordo com a seguinte fórmula:

$$\text{Frb} = \frac{m_{i_b} - m_{f_b}}{m_{i_b}} \times 100\% \quad (14)$$

Onde: Frb – friabilidade; m_{i_b} – massa inicial do briquete [g] e m_{f_b} – massa do briquete depois da acção mecânica [g].



Figura 10: Moinho de bolas utilizado no teste de friabilidade.

V. Índice de Combustão

O índice de combustão tem como objectivo avaliar qualitativamente o desempenho dos briquetes, durante a sua combustão. Este teste possibilita monitorar a variação da temperatura e da massa que está sendo consumida a cada instante, durante a combustão. A partir dessas informações pode-se construir gráficos de temperatura e massas versus tempo (Oliveira, 2013). Para realizar o teste e avaliar o comportamento dos briquetes durante a combustão, construiu-se um sistema semelhante ao desenvolvido por Quirino e Brito (1991). O procedimento experimental consistiu em inicialmente, colocar-se a base de madeira (para minimizar a transferência de calor do combustor para a balança) e o combustor sob a balança com a precisão de 5 g (Linha Ranger 3000, marca Ohaus), a fim de controlar a perda de massa. Introduziram-se os combustíveis em estudo no fogão e deu-se início à ignição. Em seguida, posicionou-se o termopar, para a medição da temperatura ao longo do tempo, conforme ilustra a Figura 11. O teste foi realizado em triplicata para cada tipo de briquete, utilizando também carvão vegetal e lenha para comparação com os briquetes.



Figura 2: Equipamento utilizado para o teste de índice de combustão.

Este teste permitiu avaliar o comportamento dos combustíveis em estudo durante sua queima. Isso foi feito verificando a temperatura e a massa consumida a cada minuto ao longo de 120 minutos do ensaio, resultando na elaboração das curvas de temperatura em função do tempo e de massa em função do tempo. A partir desses dados, foi possível determinar a temperatura máxima de combustão, o tempo necessário para atingir a

temperatura máxima, o consumo de massa do combustível e calcular o ICOM. O índice de combustão foi calculado pela seguinte fórmula:

$$ICOM = \frac{A \times B}{C \times 100} \quad (15)$$

Onde:

A = representa a percentagem do tempo de teste no qual a temperatura permaneceu acima de 150°C, considerando o tempo total de 120 min;

B = é a percentagem da temperatura máxima atingida no teste, em relação a temperatura de 150 °C;

C = é a percentagem da massa total consumida gerando temperaturas acima de 150°C.

VI. Ensaios em equipamentos de combustão de combustíveis sólidos (Teste de Fervura da água)

O teste de fervura da água, também conhecido como WBT (Water Boiling Test), simula o procedimento padrão de cozimento de alimentos e é utilizado para comparar o desempenho de diferentes combustíveis. Seguindo o protocolo WBT 4.2.3, no teste utiliza-se 2,5 kg de água e consiste em três fases: Alta Potência (partida a frio), Alta potência (partido a quente) e Baixa Potência. Durante o teste de fervura da água, as emissões são medidas durante a combustão dos combustíveis. Os procedimentos detalhados para este teste são os seguintes:

1. Medir e registar as condições ambientais;
2. Encher o fogão com combustível, pesar e registar o peso do combustível;
3. Pesar duas panelas, encher cada uma delas com 2,5 kg de água e registar o peso total. Em seguida, fixar o termopar no interior da panela (através do orifício na tampa) e registar a temperatura inicial da água;
4. Iniciar a medição das emissões utilizando o LEMS (dispositivo responsável pelo tempo, temperatura e emissões), e esperar 10 minutos para iniciar o teste;
5. Três minutos antes dos 10 minutos, acender o combustível com o auxílio de querosene (para briquetes e carvão) ou papel (para lenha). Assim que os 10 minutos passarem e o combustível estiver aceso, colocar a panela no fogão e registar o tempo

- de início do teste;
- Quando a água na panela começar a ferver, registrar o tempo na qual a água atinge a temperatura de ebulição e registrar a respectiva temperatura. Após isso, pesar novamente a panela e o fogão separadamente;
 - De seguida, colocar a segunda panela no fogão e repetir o processo do ponto 6;
 - Em seguida, colocar novamente a segunda panela no fogão e deixar decorrer o teste por mais 45 minutos a uma temperatura o mais próximo possível de 3 °C abaixo do ponto de ebulição, pois o teste é considerado inválido se a temperatura da água na panela cair mais de 6°C abaixo da temperatura de ebulição;
 - Após os 45 minutos, repetir os passos descritos no ponto 6;
 - Ao finalizar o teste, medir e registrar novamente as condições ambientais.

Três repetições por cada tipo de briquete foram realizadas, de modo a garantir a reprodutibilidade dos ensaios. Para efeitos de comparação, este ensaio também foi realizado para o carvão e para a lenha.



Figura 12: Equipamento utilizado para realização do teste de fervera de água.

Para a avaliação do desempenho dos combustíveis, foram necessários os seguintes cálculos:

- **Calor libertado durante a combustão (Q_L , kJ):** é a quantidade de calor libertado durante a combustão de uma unidade de massa de combustível.

$$Q_L = PCI \times m_{cc} \quad (16)$$

Onde: PCI – poder calorífico inferior do combustível [kJ/kg]; m_{cc} – massa de combustível consumido [kg].

- **Calor absorvido pela água (Q_{ab} , kJ):** é o calor necessário para elevar a temperatura da água até atingir a temperatura de ebulição.

$$Q_{ab} = m_{ic} \times c_a \times (T_f - T_i) \quad (17)$$

Onde: m_{ic} – massa da água no início do teste [kg]; c_a – calor específico da água; $c_a=4,2$ kJ/kg·K; T_f – temperatura final da água (K) e T_i – temperatura inicial da água (K).

- **Calor latente de vaporização (Q_{vap} , kJ):** é a quantidade de calor necessário para transformar uma certa quantidade de água em vapor.

$$Q_{vap} = \Delta m_a \times L \quad (18)$$

Onde: Δm_a – massa de água evaporada [kg]; L – calor latente de vaporização da água ($L=2,26 \times 10^6$ J/kg).

- **Rendimento (η , %):** é uma grandeza que caracteriza a eficiência do sistema e é dado pela razão entre o calor efectivamente utilizado para o fim previsto e a quantidade de calor libertado pelo combustível, durante a combustão.

$$\eta = \frac{Q_{ab} + Q_{vap}}{Q_L} \times 100\% \quad (19)$$

- **Potência (P, kW):** exprime a quantidade de calor libertado pelo combustível, por unidade de tempo.

$$P = \frac{Q_L}{t} \quad (20)$$

Onde: Q_L – calor libertado durante a combustão [kJ]; t – duração do teste [s].

- **Consumo específico:** é razão entre a massa de combustível consumido e a massa de água evaporada.

$$C_c = \frac{m_{cc}}{\Delta m_a} \quad (21)$$

Onde: Δm_a – massa de água evaporada [kg]; m_{cc} – massa de combustível consumido [kg].

VII. Questões ambientais: Medição das emissões

A utilização de biomassa para a produção dos briquetes é uma das alternativas que geram menos poluentes, em comparação com os combustíveis fósseis, uma vez que o CO₂ emitido

na atmosfera, durante a combustão, será absorvido pelas plantas, durante o seu crescimento, tornando as emissões de dióxido de carbono (CO₂) nulas (Korzenowski et al., 2023 e Santana, 2019). No entanto, é importante medir as emissões para entender os tipos de gases que são libertados durante a combustão dos briquetes e suas quantidades. O equipamento utilizado para medir as emissões foi o LEMS (Laboratory Emissions Measurement System), um sistema usado para avaliar a quantidade e a composição de emissões de poluentes libertados durante a combustão. O funcionamento do LEMS envolve as seguintes etapas:

1. O LEMS colecta amostras dos gases ou partículas libertadas pelas fontes de emissão e isso é feito usando-se um sistema que contém filtros.
2. Análise de Gases: As amostras colectadas são analisadas para determinar a concentração de poluentes.
3. Com base nas análises, o LEMS calcula a taxa de emissões de poluentes em unidades apropriadas. E por fim, os dados são registrados e armazenados.

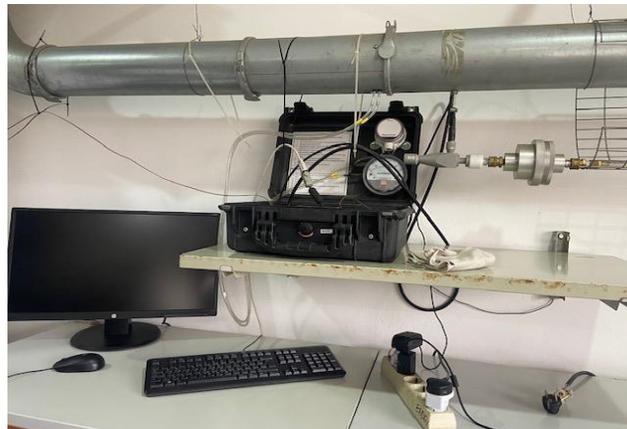


Figura 13: Equipamento utilizado para a medição dos poluentes.

4. Resultados e discussão

Neste capítulo, estão apresentados os resultados do presente estudo, e as respectivas discussões em relação à caracterização das amostras, produção dos briquetes e suas características físicas, mecânicas e térmicas, assim como os resultados dos ensaios em equipamentos de combustão de combustíveis sólidos.

4.1. Pirólise lenta ou Carbonização

Na carbonização ocorre a degradação térmica da biomassa, na ausência ou presença controlada de oxigênio, geralmente entre as temperaturas de 350 e 600 °C. No processo de carbonização, ocorre a degradação térmica parcial dos três principais componentes da biomassa (celulose, hemicelulose e lignina), sendo que a decomposição térmica da hemicelulose geralmente ocorre em temperaturas que variam entre 200 °C a 400 °C, da celulose ocorre entre 300 °C a 400 °C e a de lignina, acima dos 400 °C (Carvalho, 2022). Processos de carbonização a temperaturas mais baixas possíveis, geralmente exigem menos energia para aquecer a biomassa até a temperatura de carbonização. Isso pode resultar em economias significativas de energia, o que é benéfico, em termos de custos operacionais.

No entanto, numa primeira fase submeteu-se as biomassas a uma temperatura de 300 °C, e infelizmente não ocorreu a carbonização, e isto é devido às características da composição química do material. O coco seco contém uma quantidade significativa de lignina, celulose e hemicelulose, que são compostos orgânicos complexos. Para que esses compostos se decomponham e formem carvão vegetal, são necessárias temperaturas mais elevadas. Segundo Katyal et al. (2003), estes compostos sofrem a degradação num intervalo que varia de 350 a 500 °C. De seguida, submeteu-se a biomassa a uma temperatura de 400 °C, com tempo de residência de 1 hora, e verificou-se que ocorreu a carbonização das amostras. Neste caso, decidiu-se manter a temperatura de 400 °C como forma a evitar elevado consumo de energia. Porém, de forma a obter o melhor resultado, para o tempo de residência, testou-se 1, 2 e 3 horas e verificou-se através do teor de carbono fixo, qual o tempo de residência que melhor se adequa para realizar a carbonização das biomassas em estudo. O tempo de residência do processo de carbonização e o teor de carbono fixo das amostras em estudo estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Tempo de residência no processo de carbonização e o respectivo teor de carbono fixo das amostras em estudo.

Amostra	Tempo de residência (h)	Teor de carbono fixo (%)
Endocarpo	1	46,18
	2	52,37
	3	55,77
Mesocarpo	1	45,43
	2	51,45
	3	53,08

Da Tabela 3, verifica-se que há um aumento do teor de carbono fixo, em relação ao aumento do tempo de residência, no processo de carbonização para o endocarpo e o mesocarpo. O tempo de residência de 3 horas possui maior valor de teor de carbono fixo para as duas amostras, pois a biomassa, que passou por um processo de carbonização mais longo, tende a ter um teor de carbono fixo mais elevado e isso significa que os briquetes resultantes terão uma concentração maior de carbono, tornando-os mais eficientes como fonte de energia. O carbono tem a capacidade de aumentar a capacidade de queima dos materiais devido à sua propriedade de ser um bom combustível, pois quando o carbono está presente em uma substância, ele fornece carbono elementar, que pode reagir com o oxigênio do ar, durante a queima, e isso cria uma reacção de oxidação exotérmica, libertando muito calor. Combustíveis com alto teor de carbono fixo apresentam queima mais lenta, resultando, desta forma, um maior tempo de residência, nos equipamentos de queima (Barros, 2012).

No processo de carbonização, há uma relação inversa entre o tempo de carbonização, o teor de carbono fixo e o rendimento de carbonização (Pereira, 2012). O rendimento de carbonização refere-se à quantidade de carvão vegetal produzida, em relação à quantidade de biomassa de entrada. O rendimento gravimétrico do processo de carbonização é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4: Rendimento gravimétrico de carbonização.

Amostra	Tempo de residência (h)	Rendimento gravimétrico da carbonização (%)	Desvio padrão
Endocarpo	1	62,31	1,08
	2	54,89	0,67
	3	44,98	0,55
Mesocarpo	1	67,45	0,51
	2	56,37	0,57
	3	45,62	0,98

Na Tabela 4, pode-se verificar que o rendimento gravimétrico do mesocarpo é superior ao do endocarpo, e acredita-se que isto tenha acontecido devido ao facto do mesocarpo ter uma estrutura mais porosa e menos densa, em comparação com o endocarpo, e essa estrutura porosa permite uma melhor penetração dos gases, durante a carbonização, o que facilita a conversão da biomassa em carvão vegetal. Quando o tempo de carbonização é maior, mais componentes da biomassa são convertidos em carvão vegetal, o que resulta em um maior teor de carbono fixo, mas também em um rendimento de carbonização menor. Isso significa que se obtém mais carvão de alta qualidade, mas em uma quantidade total menor.

Andrade et al. (2017), em seus estudos de caracterização do biocarvão obtido a partir da pirólise do endocarpo do coco, obtiveram, para o endocarpo do coco seco, um rendimento de 37,17%, realizando a carbonização a 400 °C e um tempo de residência de 2 horas, enquanto que Silveira (2018), em seu estudo de viabilidade técnica da pirólise da biomassa do coco, obteve 44,67% e 32,88%, para o mesocarpo e endocarpo, respectivamente, realizando a carbonização também a 400 °C e a um tempo de residência de 2 horas.

Segundo Moura et al. (2011), durante a carbonização da biomassa, os produtos resultantes podem incluir:

- a) **Bio-carvão** ou **Carvão Vegetal**: O principal produto desejado da carbonização é o carvão vegetal, que é uma forma sólida de carbono com alto teor de carbono fixo.

b) Gases: Vários gases são libertados durante o processo de carbonização, incluindo os seguintes:

- Hidrogênio (H₂): O hidrogênio pode ser libertado como um dos produtos gasosos da carbonização. É um combustível leve e inflamável.
- Monóxido de Carbono (CO): O monóxido de carbono é comumente gerado durante a carbonização, é um gás tóxico e pode ser inflamável.
- Dióxido de Carbono (CO₂): O dióxido de carbono é produzido como resultado da oxidação parcial da biomassa. É um dos principais gases de efeito estufa.
- Metano (CH₄): Em condições de baixo oxigênio, como nas fases iniciais da carbonização, pode ocorrer a formação temporária de metano. No entanto, isso é geralmente minimizado em reactores fechados.
- Gases Voláteis Orgânicos: Durante a decomposição térmica, vários compostos orgânicos voláteis (COVs) podem ser libertados. Esses COVs podem incluir hidrocarbonetos, aldeídos, cetonas e outros compostos.

c) Água (H₂O): A água é libertada na forma de vapor durante a carbonização decorrente da decomposição da matéria orgânica na biomassa.

d) Resíduos Sólidos: Durante a carbonização, também podem ser produzidos resíduos sólidos, como cinzas, que consistem em minerais e impurezas presentes na biomassa original.

4.2. Análise granulométrica

A distribuição granulométrica após a moagem e peneiração das amostras, é ilustrada na Figura 14.

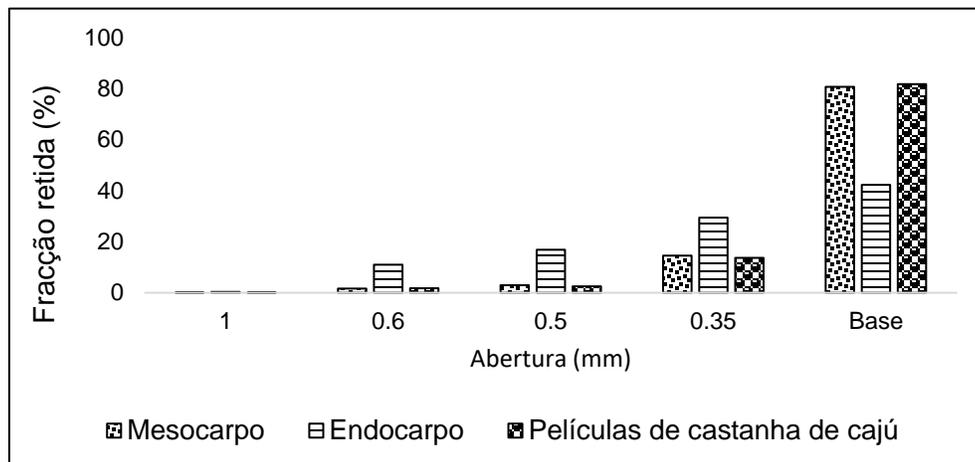


Figura 14: Distribuição granulométrica das amostras.

Na Figura 14, pode-se verificar que, depois da moagem, há uma maior retenção das partículas na base, o que significa que as três amostras (endocarpo, mesocarpo e películas de castanha de caju) são majoritariamente compostas por partículas com diâmetro menor que 0,35 mm.

Holzmann e Dallamuta (2021) produziram briquetes, a partir da borra de piaçava, com três configurações granulométricas: B1 (0,841 a 0,297 mm), B2 (0,297 a 0,149 mm) e B3 (0,841 a 0,149 mm). Os resultados demonstraram que as configurações B2 e B3 obtiveram melhores propriedades mecânicas, comparativamente ao B1.

Dias et al. (2012), em seus estudos sobre a produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais, afirmam que o tamanho das partículas é muito importante, para determinar-se a qualidade e durabilidade de um briquete. As partículas de tamanho menor facilitam a formação de briquetes compactos e coesos, pois estas têm mais superfície disponível para interagir e unir-se, durante o processo de compactação. Quanto menor for o tamanho das partículas, menor será a porosidade do produto final e a baixa porosidade do briquete pode, entretanto, dificultar a queima, devido ao menor número de espaços livres para difusão de calor, e em partículas maiores, o processo de prensagem não produz um material bem compactado, podendo existir espaços vazios, dentro da estrutura (Petricoski, 2017; Kaliyan e Morey, 2009).

4.3. Teor de humidade

Segundo Nakashima et al. (2014), o intervalo recomendado de teor de humidade para a briquetagem, varia de 8 a 12%. Portanto, numa primeira fase, usou-se a humidade de 12%, para as duas amostras, mas obteve-se briquetes com rachaduras, o que significa que o teor de humidade era elevado. De seguida, testou-se o intervalo de humidade de 9 a 11%, para as duas amostras, e para o endocarpo obteve-se um bom resultado, ou seja, o briquete não tinha nenhuma rachadura, enquanto o mesocarpo ainda tinha a presença de pequenas rachaduras, então, decidiu-se usar o intervalo de humidade de 8% a aproximadamente 9%, obtendo-se assim um briquete com ausência de rachaduras. Para os briquetes feitos a partir da mistura do carvão do endocarpo do coco seco e películas de castanha de caju, o intervalo de humidade adequado variou de 9,49 a 10,86%, enquanto para briquetes feitos a partir da

mistura do carvão do mesocarpo do coco seco e películas de castanha de cajú, o intervalo de humidade adequado variou de 8 a 9,43%.



A. Mesocarpo



B. Endocarpo

Figura 15: Briquetes feitos a partir da mistura do Mesocarpo e Endocarpo com películas de castanha de cajú com teor de humidade de 12%.

Segundo Silva et al. (2017), a humidade é um factor que pode reflectir-se nas propriedades mecânicas e energéticas do produto final. A humidade actua como um agente ligante entre as partículas e facilita o processo de compactação, o que pode resultar em menor consumo de energia durante a produção de briquetes. Entretanto, a quantidade de água é um ponto limitante, na formação e durabilidade de briquetes. O alto teor de humidade contribui na redução da resistência mecânica, e também reduz o poder calorífico dos materiais densificados, devido à evaporação da água, no início da combustão.

4.4. Densidade granel

Os resultados obtidos de densidade a granel estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Densidade a granel das amostras.

Tipo de amostra	Densidade a granel (kg/m³)
Endocarpo e Películas de castanha de cajú (50%/50%)	619,11 ± 0,82
Mesocarpo e Películas de castanha de cajú (50%/50%)	255,07 ± 0,61

Os resultados de densidade das amostras encontrados neste estudo, com humidades entre 9,49 a 10,86% para a mistura do endocarpo e as películas de castanha de cajú, e 8 a 9,43% para a mistura do mesocarpo e as películas de castanha de cajú, com granulometria menor que 1 mm, demonstraram que a densidade do endocarpo (619,11 kg/m³) é cerca de três vezes maior que a densidade do mesocarpo (255,07 kg/m³), isso quer dizer que maiores volumes serão ocupados, durante o transporte e armazenamento dos briquetes feitos a partir do mesocarpo.

Os resultados obtidos são próximos aos do estudo feito por Matos et al. (2021), em que obteve-se 596,23 kg/m³, para o endocarpo e 161,29 kg/m³, para o mesocarpo. Por sua vez, Quirino e Brito (1991) encontraram valores de densidade a granel compreendidos entre 133 a 557 kg/m³ para amostras de carvão de diferentes fontes.

A densidade a granel está directamente relacionada com a qualidade dos briquetes, pois briquetes de alta densidade tendem a ser mais resistentes, duráveis e capazes de manter a sua forma, durante o manuseio e armazenamento. Segundo Pereira (2014), é necessária a densificação das biomassas lignocelulósicas devido às baixas densidades do material in natura. O material não compactado não apenas eleva os custos de logística, mas também pode dificultar o seu uso nos equipamentos de queima devido à falta de uniformidade no tamanho e na forma das biomassas não densificadas.

4.5. Teor de cinzas

Os resultados de teor de cinzas estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Teor de cinzas das amostras.

Amostra	Teor de cinzas (%)
Endocarpo	2,76 ± 0,17
Endocarpo e películas de castanha de cajú	3,07 ± 0,32
Mesocarpo	7,39 ± 0,34
Mesocarpo e películas de castanha de cajú	8,03 ± 0,29
Películas de castanha de cajú	3,35 ± 0,05
Carvão vegetal	12,48 ± 0,13

Na Tabela 6, pode-se verificar que o teor de cinzas da mistura do endocarpo e as películas de castanha de cajú (3,07%) é consideravelmente maior que o teor de cinzas do endocarpo (2,76%) e isto aconteceu devido a contribuição das cinzas presentes nas películas de castanha de cajú. A mesma tendência se observa para o caso da mistura do mesocarpo e as películas de castanha de cajú (8,03%), o teor de cinzas da mistura é maior que do mesocarpo (7,39 %) e isto pode ter acontecido, também, devido à presença das cinzas nas películas de castanha de cajú.

O valor de teor de cinzas obtido para o endocarpo do coco seco (2,76%) é próximo dos resultados obtidos no estudo feito por Andrade et al. (2017) e Silveira (2018), em que o teor de cinzas foi de 1,12% e 2,90%, respectivamente, para o carvão do endocarpo do coco, realizando a carbonização a temperatura de 400 °C.

O valor de teor de cinzas do mesocarpo de coco seco (7,39%) é próximo do obtido no estudo feito por Silveira (2018), para o carvão do mesocarpo do coco seco, em que o teor de cinzas foi de 9,70%, realizando-se a carbonização à temperatura de 400°C, mas, o mesmo é superior ao obtido por Figueiredo (2011), onde obteve teor de cinzas de 1,76% para amostra de carvão do mesocarpo do coco seco carbonizada à uma temperatura de 400°C. Porém, pode-se dizer que o teor de cinzas do mesocarpo é elevado, porque durante a sua colecta e/ou manuseio, pode ter havido uma mistura da amostra com fragmentos do solo influenciando assim, de forma negativa, no seu teor de cinzas (Rendeiro et al., 2008).

Conforme citado por Moreira (2015), o intervalo admissível para o teor de cinzas nas películas de castanha de cajú varia de 5,3 a 7,9%, o que indica que o resultado obtido (3,35%) está próximo do valor mínimo (5,3%) considerado pelo autor.

Neste sentido, comparando o teor de cinzas do carvão vegetal (12,48 %), com o que Quirino e Brito (1991) obtiveram nos seus estudos (0,88 a 37,04%), verifica-se que o resultado deste estudo está dentro do intervalo admitido pelos autores anteriormente citados. De realçar que o teor de cinzas varia dependendo do tipo e da espécie de árvore usada para a produção do carvão vegetal. No entanto, ao comparar os 4,43% obtidos por Rosa (2010), nota-se que o valor de 12,48% é significativamente elevado. Essa disparidade pode estar associada às diferentes origens das árvores utilizadas para a produção do carvão vegetal, às condições de produção e armazenamento do carvão.

Briquetes com baixo teor de cinzas tendem a queimar mais eficientemente, uma vez que as cinzas podem interferir na combustão, reduzindo o calor gerado e produzindo resíduos sólidos. Como as cinzas não sofrem combustão, briquetes com baixos teores de cinzas são os mais recomendados, principalmente quando o teor de cinzas está abaixo de 4% (Akowuah et al., 2012; Chen et al., 2009).

4.6. Teor de voláteis

Os resultados de teor de voláteis estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Teor de voláteis das amostras.

Amostra	Teor de voláteis (%)
Endocarpo	41,47 ± 0,44
Endocarpo e películas de castanha de cajú	53,31 ± 0,17
Mesocarpo	39,53 ± 0,65
Mesocarpo e películas de castanha de cajú	51,92 ± 0,03
Películas de castanha de cajú	68,11 ± 0,16
Carvão vegetal	20,82 ± 0,34

A partir da Tabela 7, pode-se verificar que o teor de voláteis da mistura do endocarpo e as películas de castanha de cajú (53,31%) é maior que o teor de voláteis do endocarpo (41,47 %) e isto é devido à elevada quantidade de voláteis que está presente nas películas de castanha de cajú. O mesmo ocorre com o teor de voláteis da mistura do mesocarpo e das películas de castanha de cajú (51,92%), que é superior ao teor de voláteis do mesocarpo (39,53 %), e isto aconteceu, também, devido ao elevado teor de voláteis na composição das películas de castanha de cajú.

O teor de voláteis do carvão do endocarpo, obtido a 400°C por 3 horas, foi de 41,47%, que é substancialmente inferior aos 98,12% registrados por Andrade et al. (2017) para o carvão do endocarpo do coco, obtido por meio de carbonização a 400 °C com um tempo de residência de 2 horas. Figueiredo (2011) obteve um teor de voláteis de 77,83% para o carvão do mesocarpo do coco, também obtido por meio da carbonização a 400 °C com um tempo de residência de 2 horas, um valor superior aos 39,53% encontrados neste estudo para o mesmo tipo de carvão, mas com um tempo de residência de 3 horas.

A diferença entre os resultados obtidos e os da literatura para o teor de voláteis do carvão do endocarpo e mesocarpo pode ser atribuída a diversas variáveis, tais como áreas de plantações distintas, métodos de preparação das amostras, local e condições em que a amostra foi recolhida, entre outros factores.

Segundo Moreira (2015), o intervalo admissível para o teor de voláteis nas películas de castanha de caju varia entre 69,8 a 70,9%, indicando deste modo que o resultado obtido (68,11%) está próximo do intervalo considerado pelo autor.

Ao comparar o teor de voláteis do carvão vegetal (20,82 %) com os resultados obtidos por Quirino e Brito (1991) em seus estudos (20,46 a 31,63%), observa-se que o valor deste estudo está dentro da faixa admitida pelos autores. No entanto, o valor de 20,82% é superior aos 19,06 % obtidos por Rosa (2010). Vale ressaltar que o teor de voláteis também varia conforme o tipo e a espécie de árvore utilizada na produção do carvão vegetal.

Altos teores de materiais voláteis na biomassa causam uma queima rápida e emissão elevada de gases durante a combustão, dificultando o alcance de altas temperaturas nos equipamentos de queima, podendo contribuir para uma baixa eficiência energética. Por outro lado, biomassa com baixo teor de voláteis resulta em combustões lentas e incompletas, gerando fumaça e gases tóxicos (Chaves et al., 2013; Nakashima et al., 2014).

4.7. Teor de Carbono fixo

Os resultados de teor de carbono fixo estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Teor de Carbono fixo das amostras.

Amostra	Teor de carbono fixo (%)
Endocarpo	55,77
Endocarpo e películas de castanha de caju	43,62
Mesocarpo	53,08
Mesocarpo e películas de castanha de caju	40,05
Películas de castanha de caju	28,54
Carvão vegetal	66,70

Na Tabela 8, é possível verificar que o endocarpo de coco seco possui maior teor de carbono fixo (55,77%) em comparação com a mistura do endocarpo e películas de castanha de caju (43,62%), facto que se deve à influência do baixo teor de carbono fixo das películas de castanha de caju (28,54%). Os resultados encontrados neste estudo para o carvão do endocarpo do coco seco são ligeiramente maiores comparando com os obtidos em estudos feitos por Rendeiro et al. (2008) e Matos et al. (2021), que obtiveram 19,30% e 20,95%, respectivamente, para o endocarpo do coco seco in natura.

Ainda na Tabela 8, pode-se observar que o mesocarpo do coco seco possui um maior teor de carbono fixo (53,08%), em comparação com a mistura do mesocarpo e películas de castanha de caju (40,05%), e este decréscimo aconteceu devido a influência do baixo teor de carbono fixo das películas de castanha de caju. Jenkins (1990) e Matos et al. (2021), obtiveram 23,80% e 27,47%, respectivamente, para o mesocarpo do coco seco in natura, os quais são inferiores ao obtido no presente estudo para o carvão do mesocarpo do coco seco (53,08%).

De uma forma geral, verificou-se que os resultados dos teores de carbono fixo do endocarpo e mesocarpo carbonizados foram muito maiores, em comparação com o que Rendeiro et al. (2008), Matos et al. (2021) e Jenkins (1990) obtiveram, nos seus estudos para o endocarpo e mesocarpo in natura, o que significa que o processo de carbonização favorece o aumento do carbono fixo. Contudo, ao comparar esses valores de carbono fixo do endocarpo e mesocarpo carbonizados, com o obtido para o carvão vegetal (66,70%), observa-se que o carvão apresenta um teor mais elevado de carbono fixo. Isso pode ser atribuído ao baixo conteúdo de voláteis presente no carvão vegetal, em comparação com as amostras do endocarpo e mesocarpo do coco seco. Quando o teor de voláteis é reduzido, permite um aumento significativo na concentração de carbono fixo no material.

Moreira (2015) registrou valores de teor de carbono fixo compreendidos entre 22,3 a 23,8% para as películas de castanha de caju, enquanto que neste presente estudo foi obtido um valor maior de 28,54%. Essa discrepância pode ser atribuída ao menor valor de teor de cinzas obtido neste estudo (3,35%) em comparação com o obtido pelo autor (5,3%), resultando em uma maior concentração de carbono fixo no material.

Comparando o teor de carbono fixo do carvão vegetal (66,70%), com o obtido por Quirino e Brito (1991) em seus estudos (42,50 a 75,84%), verifica-se que o resultado deste estudo está dentro da faixa encontrada pelos autores anteriormente citados. Contudo, o valor de 66,70% é inferior aos 75,08 % obtidos por Rosa (2010), e essa diferença significativa pode ser atribuída à produção de carvão, que, além de depender do tipo e da espécie da árvore, também depende da temperatura de carbonização. Geralmente, a produção do carvão é mais comum em zonas rurais, onde a proximidade da matéria-prima facilita o processo, mas muitas vezes há falta de controle preciso da temperatura, resultando no desconhecimento da temperatura de carbonização.

Conforme Santos et al. (2015) destacam, o carbono fixo é um parâmetro crucial na biomassa como combustível, proporcionando uma combustão mais prolongada que aumenta a eficiência e o rendimento energético nos sistemas de queima. Materiais com elevado teor de carbono fixo tendem a apresentar maior poder calorífico devido à maior disponibilidade de carbono para a oxidação durante a combustão. Nesse processo, a oxidação do carbono resulta na libertação de uma quantidade significativa de calor, tornando-o uma fonte de energia mais eficaz quando utilizado como combustível.

4.8. Poder calorífico

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 9, o PCS da mistura do endocarpo de coco seco carbonizado e a película de castanha de cajú, foi de 23,71 MJ/kg, enquanto que a mistura de mesocarpo de coco com a película apresentou um valor de 22,19 MJ/kg. A mistura do endocarpo de coco com a película de castanha de cajú apresentou valores elevados de PCS devido ao seu elevado teor de carbono fixo (43,62%), comparado-se com a mistura do mesocarpo com a película de castanha de cajú (40,05%). Padilla et al. (2016), também verificaram, nos seus estudos de produção e caracterização físico-mecânica de briquetes, que quanto maior for o teor de carbono fixo da amostra, maior será o seu poder calorífico. A mesma tendência se verificou para os valores do PCI e PCU.

Na Tabela 9, observa-se que os valores de PCS do endocarpo e do mesocarpo do coco seco obtidos neste estudo (26,16 e 24,87 MJ/kg, respectivamente), são relativamente inferiores aos obtidos por Silveira (2018), que realizou a carbonização a 400 °C (31,06 MJ/kg, para o endocarpo e 26,59 MJ/kg, para o mesocarpo). O mesmo ocorreu para o PCI

e o PCU, como evidenciado na Tabela 9. A discrepância dos poderes caloríficos entre este trabalho e a literatura pode estar relacionada ao tempo de residência durante a carbonização e ao teor de voláteis, factores não especificados por Silveira (2018). Quanto mais prolongado for o tempo de residência da amostra na carbonização, maior será a concentração de carbono fixo, resultando em um poder calorífico mais elevado.

Tabela 9: Poder calorífico das amostras.

Amostra	PCS (MJ/kg)		PCI (MJ/kg)		PCU (MJ/kg)	
	Endocarpo	26,16	31,06 (Silveira, 2018)	24,76	30,77 (Silveira, 2018)	23,13
Endocarpo e películas de castanha de cajú	23,71	-	22,31	-	19,86	-
Mesocarpo	24,87	26,59 (Silveira, 2018)	23,47	26,29 (Silveira, 2018)	21,95	24,62 (Silveira, 2018)
Mesocarpo e películas de castanha de cajú	22,19	-	20,80	-	18,74	-
Películas de castanha de cajú	20,68	20,7 - 21,3 (Moreira, 2015)	19,29	19,4 - 20,0 (Moreira, 2015)	17,54	-
Carvão vegetal	26,73	27,18 (Matos et al.,2021)	25,33	23,94 (Matos et al.,2021)	23,71	21,10 (Matos et al.,2021)
Lenha (pinheiro) (Silva, 2004)	15,15	-	13,81	-	13,63	-
PCS- Poder Calorífico Superior; PCI- Poder Calorífico Inferior e PCU- Poder Calorífico Útil.						

A partir da Tabela 9 pode-se observar que os poderes caloríficos (PCS, PCI e PCU) do carvão vegetal são próximos aos resíduos do coco seco carbonizados (endocarpo e mesocarpo), indicando que esses resíduos têm a energia necessária para substituir o carvão vegetal. E ainda na Tabela 9, verifica-se que os resultados do carvão vegetal são próximos dos obtidos por Matos et al. (2021), sabendo que o poder calorífico também varia de acordo com o tipo e espécie da árvore utilizada na produção do carvão vegetal.

Os resultados para os poderes caloríficos das películas de castanha de cajú coincidem com as faixas de poder calorífico encontradas por Moreira (2015), em seu estudo, onde pode-se observar na Tabela 9, porém, o mesmo não especifica os seus valores de PCU.

Os resultados obtidos por Silva (2004), para a lenha, conforme evidenciado na Tabela 9, revelaram valores consideravelmente mais baixos, em comparação com as demais amostras analisadas nesta pesquisa, conforme detalhado na mesma tabela.

Para garantir a aceitação no mercado, os briquetes devem atender aos padrões desejados de poder calorífico para várias aplicações, como caldeiras, fornalhas e geração de electricidade. O teor elevado de carbono fixo está associado a um maior poder calorífico, enquanto que a humidade presente nos briquetes pode reduzir esse poder, pois parte da energia é usada para evaporar a humidade, antes de gerar calor. Altos teores de cinzas e voláteis também podem afectar negativamente o poder calorífico, pois não contribuem, efectivamente, para a geração de calor e podem interferir na combustão (Gonçalves et al., 2009).

4.9. Produção dos briquetes

Para a produção dos briquetes, recorreu-se a dois tipos de aglutinantes (películas de castanha de cajú e resíduos do processamento de algodão). Ao final do processo de produção dos briquetes, a selecção do aglutinante e a proporção (aglutinante + resíduo de coco) mais adequados para este estudo foi feita por meio do teste de friabilidade.

A Figura 16 foi elaborada com o objectivo de determinar o melhor aglutinante e a proporção ideal para sua utilização na composição do briquete. Esta decisão baseou-se no briquete que apresentou menor perda de massa no teste de friabilidade. Constatou-se que a película de castanha de cajú, na proporção de 50%, proporcionou as melhores condições. Além disso, na Figura 16, observa-se que foram testadas mais proporções para os briquetes com

os resíduos de algodão, uma vez que estes ainda demonstravam ser sensíveis ao teste de friabilidade, mesmo quando utilizadas as mesmas proporções comparadas aos briquetes das películas de castanha de cajú.

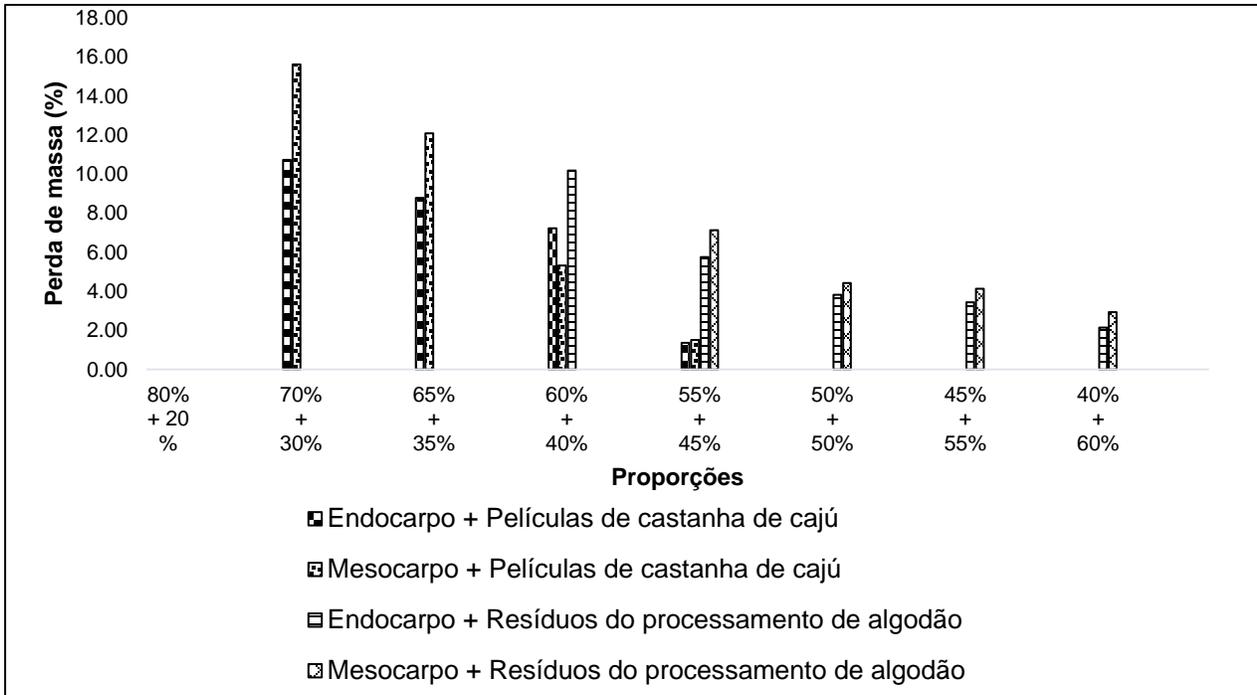


Figura 16: Teste de friabilidade dos briquetes usando as películas de castanha de cajú e os resíduos do processamento de algodão como aglutinantes.

No presente estudo, foram produzidos briquetes com finos de carvão dos resíduos do coco seco usando películas de castanha de cajú como aglutinante, com humidade variando de 8 à 10,86%, granulometria inferior a 1 mm, pressão de 10 MPa e temperatura de 150°C.



Figura 17: Briquetes produzidos a partir de cascas de coco seco carbonizadas.

Matos et al. (2021) e Makonya (2022) realizaram tentativas de produzir briquetes com diferentes combinações de temperatura (100 °C e 150 °C) e pressão (10 MPa), durante a briquetagem, e verificaram que a compactação dos materiais com temperaturas abaixo de 150°C e pressões acima de 10 MPa resultavam em briquetes pouco resistentes e com rachaduras. Paralelamente verificaram que a combinação de temperatura de 150°C e pressão de 10 MPa possibilitou a formação de briquetes sem rachaduras e resistentes.

4.10. Estabilidade dimensional

Após a produção dos briquetes, estes sofrem alterações com o tempo nas suas dimensões. A Figura 18 mostra os resultados da expansão longitudinal resultantes da medição da altura de vários briquetes produzidos.

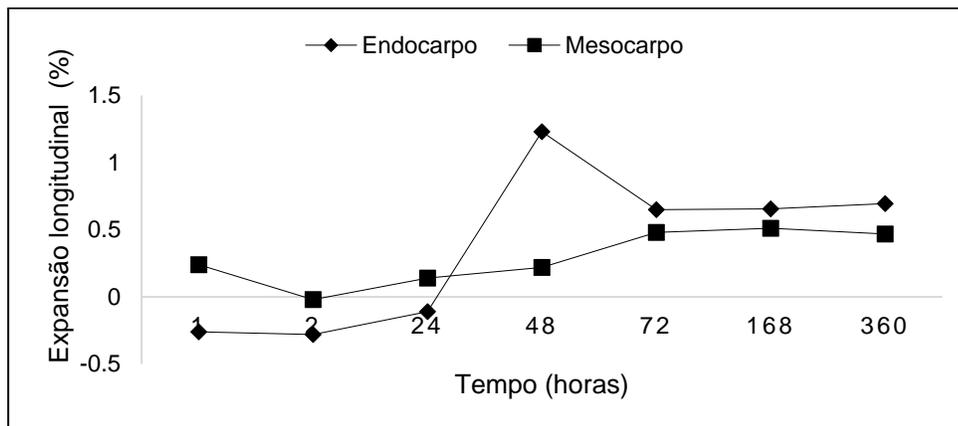


Figura 18: Expansão longitudinal dos briquetes.

Foi verificado tanto para os briquetes produzidos a partir de endocarpo de coco com as películas de castanha de cajú assim como para os briquetes produzidos a partir do mesocarpo com as películas de castanha de cajú que, após passarem 72 horas, já não havia alterações significativas, nas dimensões destes. Este facto foi confirmado a partir das medições realizadas 7 dias (168 horas) e 15 dias (360 horas) após a produção dos mesmos. Os briquetes do endocarpo sofreram uma expansão de até 1.2%, nas primeiras 48 horas, e nas horas seguintes (até 72 horas) sofreu compressão de até 0.6%. Os briquetes do mesocarpo só comprimiram até as primeiras 2 horas, após a sua produção, e nas horas seguintes (até 72 horas), sofreram uma expansão até 0.5%.

De uma forma geral, os briquetes sofreram uma expansão de 0.5% a 1.2%, resultados estes que são muito inferiores, em comparação com os 7,40 a 9,68% obtidos por Carvalho et al.

(2020), e os 5,02 a 13,70% que Fernandez et al. (2017) obtiveram. Porém, são próximos aos resultados obtidos por Matos et al. (2021), que obteve variações de 0,24 a 3,10%.

Na produção dos briquetes, o mais esperado é que haja mais compressão e menos expansão, pois a expansão pode indicar que o briquete absorve facilmente humidade que desfavorece a eficiência energética do combustível. A variação brusca do tamanho do briquete pode ocorrer devido à capacidade que a biomassa tem de absorver humidade, ao relaxamento natural das suas fibras ou mesmo a uma menor adesão entre as partículas compactadas (Yamaji et al., 2013). A expansão dos briquetes afecta negativamente as propriedades mecânicas, reduzindo a resistência destes (Fernandez et al., 2017). Factores como absorção de humidade do ambiente e variações de temperatura durante o armazenamento podem causar expansão, afectando a qualidade dos briquetes. Práticas adequadas de armazenamento e controle ambiental são essenciais para minimizar esse problema e manter a qualidade dos briquetes. Os briquetes podem também sofrer compressão devido à humidade que estes contém após a sua produção. A evaporação da humidade com o tempo durante o seu armazenamento ou manuseio, promove a compressão dos briquetes.

4.11. Densidade aparente e energética

Os resultados das densidades aparente e energética estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10: Densidade aparente dos briquetes e densidades energéticas dos resíduos e dos briquetes.

Amostra	Densidade aparente (kg/m³)	Densidade energética dos resíduos (MJ/m³)	Densidade energética dos briquetes (MJ/m³)
Endocarpo	1.180	12.388,86	23.438,38
Mesocarpo	970	4.953	18.179,74

1. Densidade aparente

Na Tabela 10, observa-se que os resultados de densidade aparente, 1.180 e 970 kg/m³ para o endocarpo e mesocarpo, respectivamente, são superiores em comparação com os de densidade a granel, 619,11 e 255,07 kg/m³ (conforme Tabela 5) para o endocarpo e mesocarpo, respectivamente. Em outras palavras, a densidade dos briquetes (densidade

aparente) é 2 a 3 vezes maior do que a densidade dos resíduos antes da briquetagem (densidade a granel). Isso significa que, no processo de produção de briquetes, o volume da massa reduziu de 2 a 3 vezes, ou seja, o volume dos briquetes é de 2 a 3 vezes menor em comparação com o volume da biomassa antes da briquetagem.

Os resultados de densidade aparente obtidos estão alinhados com o intervalo mencionado por Protásio et al. (2011), que varia de 934 a 1.248 kg/m³, para diferentes tipos de biomassa (casca de café, resíduos de madeira e da colheita de milho). Além disso, estão próximos dos valores de 1.181 a 1.343 kg/m³ que foram obtidos por Quirino et al. (2012), que utilizaram resíduos de madeira na produção de briquetes.

O tamanho das partículas tem uma influência significativa na produção de briquetes, conforme descrito por Kaliyan e Morey (2009). Partículas menores resultam em uma melhor compactação e aumento da densidade aparente, de acordo com os autores. Isso ocorre porque as partículas menores possuem uma área de superfície maior e uma interação mais eficiente entre elas. Briquetes com alta densidade aparente ocupam menos espaço, tornando-os mais eficientes em termos de armazenamento e transporte. Além disso, briquetes com alta densidade geralmente são mais resistentes mecanicamente e menos propensos a quebrar ou se desfazer durante o manuseio, transporte e aplicação.

2. Densidade energética

Na Tabela 10, verifica-se que a densidade energética dos briquetes é de 2 a 4 vezes maior do que a densidade energética dos resíduos, indicando uma maior concentração de energia por unidade de volume nos briquetes. Além disso, destaca-se que a densidade energética do endocarpo (23.438,38 MJ/m³) é significativamente superior à do mesocarpo (18.179,74 MJ/m³), devido à maior densidade aparente e poder calorífico, propriedades que têm uma relação directa com a densidade energética. Os resultados da densidade energética superam os 14.131 a 18.859 MJ/m³ obtidos por Barros (2012), para diferentes tipos de resíduos (coco, sabugo de milho, a casca de maracujá, casca de laranja e a casca de mandioca). Isso era previsível devido aos baixos valores de poder calorífico útil obtidos por Barros (2012), variando de 12,43 a 14,71 MJ/kg, em comparação com os 18,74 a 23,13 MJ/kg obtidos neste presente estudo. Quanto maior o poder calorífico, maior é a densidade energética. Uma densidade energética mais elevada, indicando maior quantidade de

energia em um determinado volume, é vantajosa para diversas aplicações, como geração de energia e processos de combustão. A composição química, especialmente teores mais elevados de carbono fixo, influencia positivamente a densidade energética dos briquetes.

4.12. Friabilidade

Os resultados do teste de friabilidade estão apresentados na Figura 19.

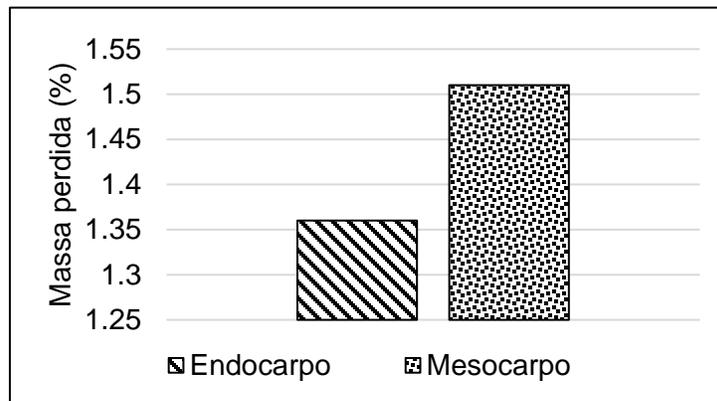


Figura 19: Resultados do teste de friabilidade.

Observa-se pela Figura 19 que os briquetes do mesocarpo (1,51%) possuem um índice de friabilidade maior em comparação com os briquetes do endocarpo (1,36%). Isso pode ser atribuído à diferença na composição das amostras, uma vez que o mesocarpo contém fibras que podem não se ligar tão firmemente durante a briquetagem, resultando em uma estrutura mais friável.

Segundo Zanella (2018), briquetes com perdas menores que 10% são considerados muito pouco friáveis, indicando que os briquetes produzidos neste presente estudo são classificados como muito pouco friáveis. Em contrapartida, Quirino e Brito (1991), obtiveram valores com intervalo variando de 2,48 a 56,44% para briquetes feitos de carvão vegetal de diferentes origens, considerados muito friáveis. A principal desvantagem de briquetes com alta friabilidade é a perda da integridade dos mesmos, dificultando o manuseio, transporte e aplicação. Em aplicações de queima, briquetes muito friáveis podem desintegrar-se prematuramente durante a combustão, resultando em uma queima inadequada e instável, e essa situação pode afectar a eficiência do processo.

4.13. Índice de Combustão

Os resultados do ICOM estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11: Índice de combustão dos briquetes, do carvão vegetal e da lenha.

Amostra	ICOM
Endocarpo e películas de castanha de cajú	0,66 ± 0,01
Mesocarpo e películas de castanha de cajú	0,61 ± 0,03
Carvão vegetal	0,79 ± 0,01
Lenha (pinheiro)	0,31 ± 0,02

Os valores de Índice de combustão obtidos para os briquetes de endocarpo (0,66) e mesocarpo (0,61) indicam que os briquetes feitos a partir do endocarpo apresentam um ICOM maior em comparação com os feitos a partir do mesocarpo. Essa disparidade pode ser atribuída à maior perda de massa dos briquetes de mesocarpo, reflectindo um maior consumo durante a combustão, como evidenciado na Figura 21, em comparação com os briquetes de endocarpo.

Em relação ao carvão vegetal, o valor de 0,79 obtido encontra-se dentro do intervalo de ICOM identificado por Quirino e Brito (1991), que varia de 0,3124 a 1,2307. Por outro lado, a lenha exhibe o ICOM mais baixo (0,31) entre todos os combustíveis mencionados, indicando uma combustão menos eficiente e completa, caracterizada pela produção de mais resíduos e menos calor em comparação com os outros combustíveis. As Figuras 20 e 21 ilustram o comportamento dos combustíveis em estudo em relação à temperatura e à perda de massa ao longo do tempo e durante a combustão, respectivamente.

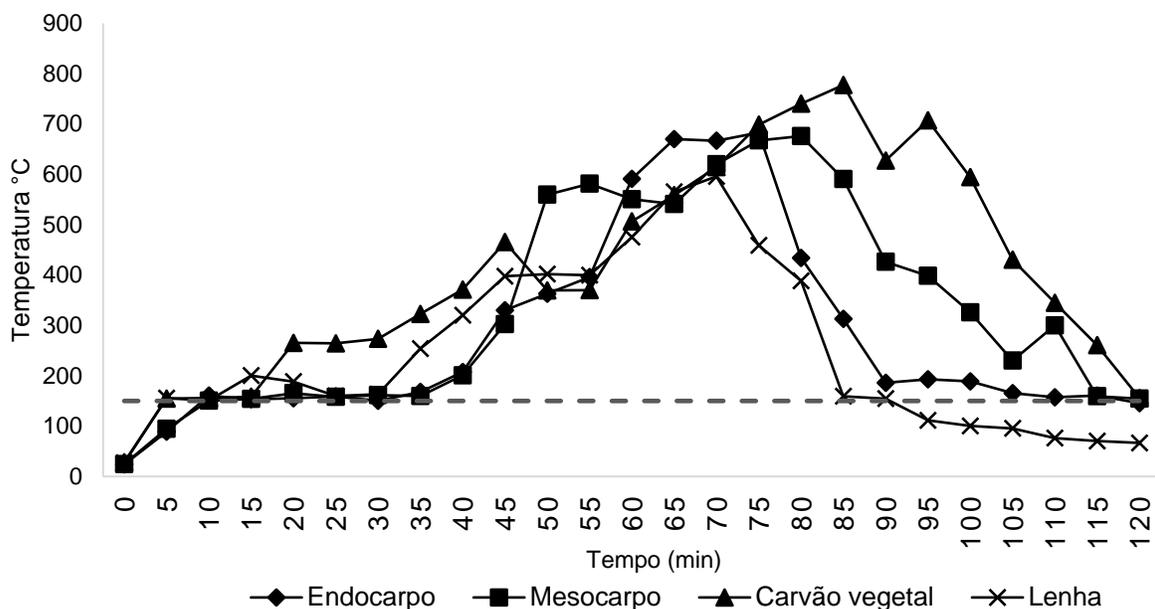


Figura 20: Variação da temperatura em função do tempo no teste de ICOM.

Na Figura 20, observa-se que os briquetes exigiram um período de tempo mais prolongado para atingir a temperatura de 150°C. Isso pode ser atribuído a diversos factores, incluindo a presença de humidade residual nos briquetes, o que retarda o processo de ignição e aquecimento devido à energia inicial necessária para evaporar essa humidade. Além disso, a eficiência do processo de ignição desempenha um papel importante, pois uma ignição inadequada pode prolongar o tempo necessário para o aquecimento dos briquetes. Outro factor relevante é a alta densidade dos briquetes, que pode dificultar a penetração do calor em seu interior devido à sua baixa porosidade, resultando em menos espaços vazios para a propagação do calor.

A partir da Figura 20 pode-se observar que os briquetes atingiram temperaturas próximas às do carvão vegetal durante o teste de combustão. No entanto, a temperatura máxima do carvão vegetal, registrada em 777 °C, é significativamente superior às temperaturas de 683 °C e 676 °C, obtidas para os briquetes de endocarpo e mesocarpo, respectivamente. Isso pode ser atribuído à menor volatilidade do carvão vegetal em comparação com os briquetes, pois segundo Oberberger e Thek (2004), a presença de altos teores de voláteis em um combustível pode resultar em uma queima mais acelerada e dificultar a obtenção de altas temperaturas durante a combustão. A temperatura alcançada durante a combustão pode ser influenciada por diversos factores além do teor de voláteis. Mesmo que os

briquetes de endocarpo apresentem maior teor de voláteis em comparação com os briquetes de mesocarpo, conforme ilustrado na Tabela 7, a temperatura mais alta alcançada pelos briquetes de endocarpo pode ser atribuída ao seu maior poder calorífico, conforme mostrado na Tabela 9. Outros factores como a eficiência de queima e a distribuição de calor também podem ter desempenhado papéis importantes na determinação da temperatura alcançada durante a combustão.

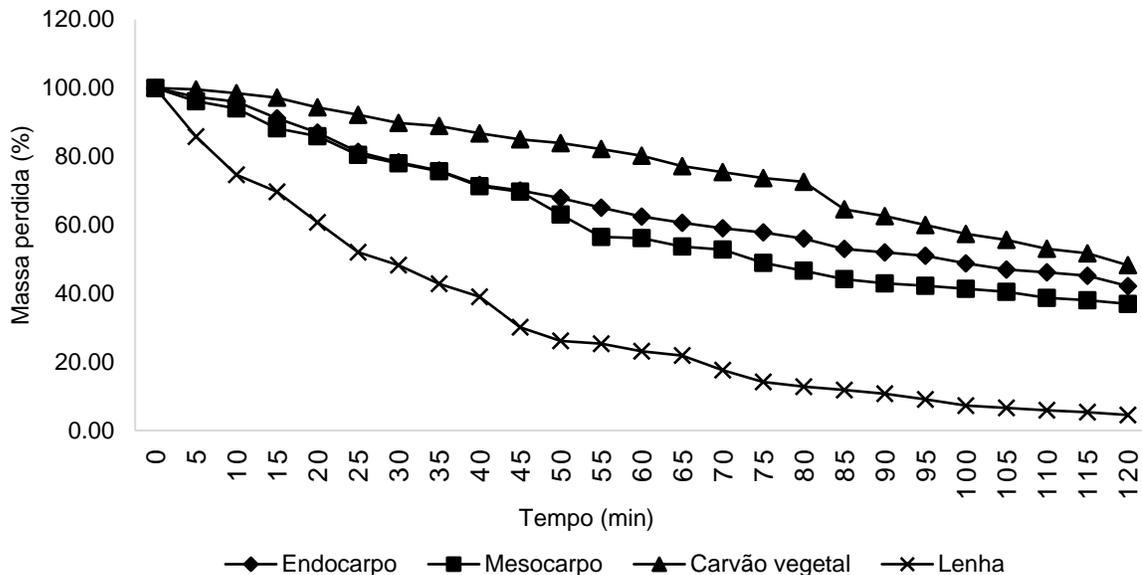


Figura 21: Variação da massa em função do tempo no teste de ICOM.

Na figura 21, verifica-se que o consumo da massa da lenha é mais rápido em comparação com os outros combustíveis em estudo. Isso pode ser devido ao seu menor teor de carbono fixo em comparação com os outros combustíveis (os briquetes e o carvão vegetal). Conforme indicado por Vale e Gentil (2008), combustíveis com maior teor de carbono fixo tendem a queimar mais lentamente, resultando em um maior tempo de residência nos equipamentos de queima.

4.14. Teste de fervura

Os resultados dos cálculos para o teste de fervura dos combustíveis em estudo estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12: Resultados do teste de fervura da água.

Material	t (min)			P (kW)			Cc			η (%)
	A.P _F	A.P _Q	B.P	A.P _F	A.P _Q	B.P	A.P _F	A.P _Q	B.P	
Endocarpo	24	11	45	3,07	2,98	0,40	2,71	1,42	0,35	23,63
Mesocarpo	17	10	45	4,81	3,12	0,31	3,93	3,21	0,20	23,34
Carvão vegetal	25	10	45	3,04	2,53	0,47	2,65	1,67	0,29	24,13
Lenha	12	10	45	3,84	3,45	1,44	4,17	3,41	1,21	21,55

Legenda: A.P_F - Alta Potência (partida a frio); A.P_Q- Alta Potência (partida quente); B.P = baixa potência; t = duração do teste; P = potência; Cc = consumo específico e η = rendimento.

Na Tabela 12, os valores das potências variam de 0,31 a 4,81 kW, sendo consistentes com os dados de Victorino (1995) para o carvão vegetal, que obteve 4,3 kW (alta potência) e 1,5 kW (baixa potência). Na faixa de alta potência, há um maior fornecimento de energia para elevar a temperatura da água e iniciar o processo de ebulição.

Os valores de consumo específico e rendimento obtidos por Victorino (1995), 2,1 e 22,30% respectivamente, são inferiores aos encontrados neste estudo (conforme a Tabela 12). Essas discrepâncias podem ser atribuídas a variações nos procedimentos do teste, eficiência da queima da biomassa, quantidade de água utilizada e poder calorífico. Comparando o consumo específico dos quatro tipos de combustíveis usados, observa-se que a lenha apresenta o maior consumo específico tanto na fase de alta quanto de baixa potência. No entanto, ao analisar o consumo específico dos briquetes de mesocarpo e endocarpo, verifica-se que o mesocarpo possui um maior valor de consumo, indicando que uma quantidade maior desses briquetes é necessária para produzir uma quantidade determinada de calor suficiente para ferver a água. Sendo assim, valores menores de consumo específico são desejáveis.

Em relação ao rendimento, os briquetes apresentaram valores próximos aos do carvão vegetal, sugerindo que os briquetes possuem uma eficiência comparável à do carvão, como combustível. Isso indica que os briquetes têm boa qualidade e um poder calorífico

comparável ao do carvão, tornando-os uma alternativa viável em situações onde se busca uma opção mais sustentável.

Embora o carvão vegetal tenha um poder calorífico superior aos combustíveis em estudo, isso não significa que ele leve menos tempo para iniciar a ferver da água. Na verdade, conforme observado na Tabela 12, a água levou mais tempo para atingir a temperatura de ebulição quando o carvão foi utilizado. O tempo necessário para ferver água é influenciado por vários factores, como a quantidade de água, eficiência na transferência de calor, potencia de aquecimento e temperatura inicial da água. O comportamento dos combustíveis em estudo durante o teste de ferver da água estão ilustrados nas Figuras 22 e 23.

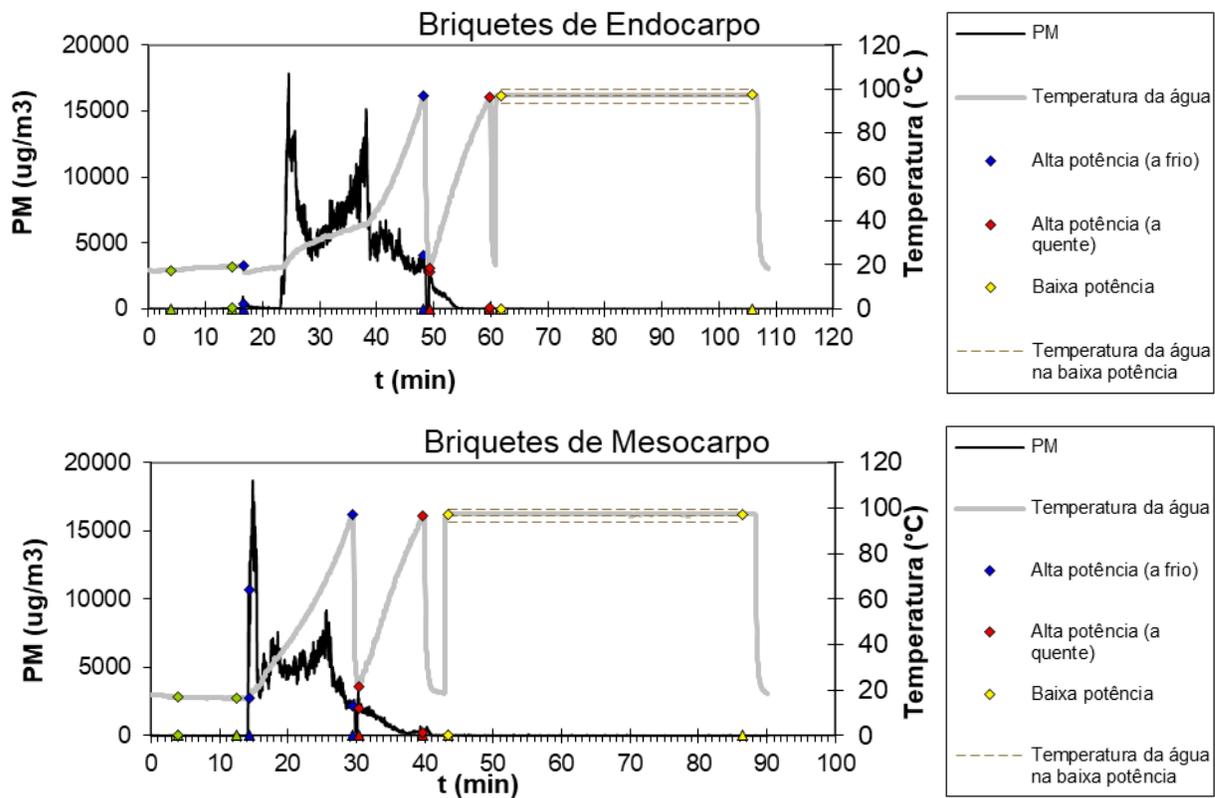


Figura 22: Variação da temperatura da água em função do tempo no teste de ferver dos briquetes de endocarpo e mesocarpo.

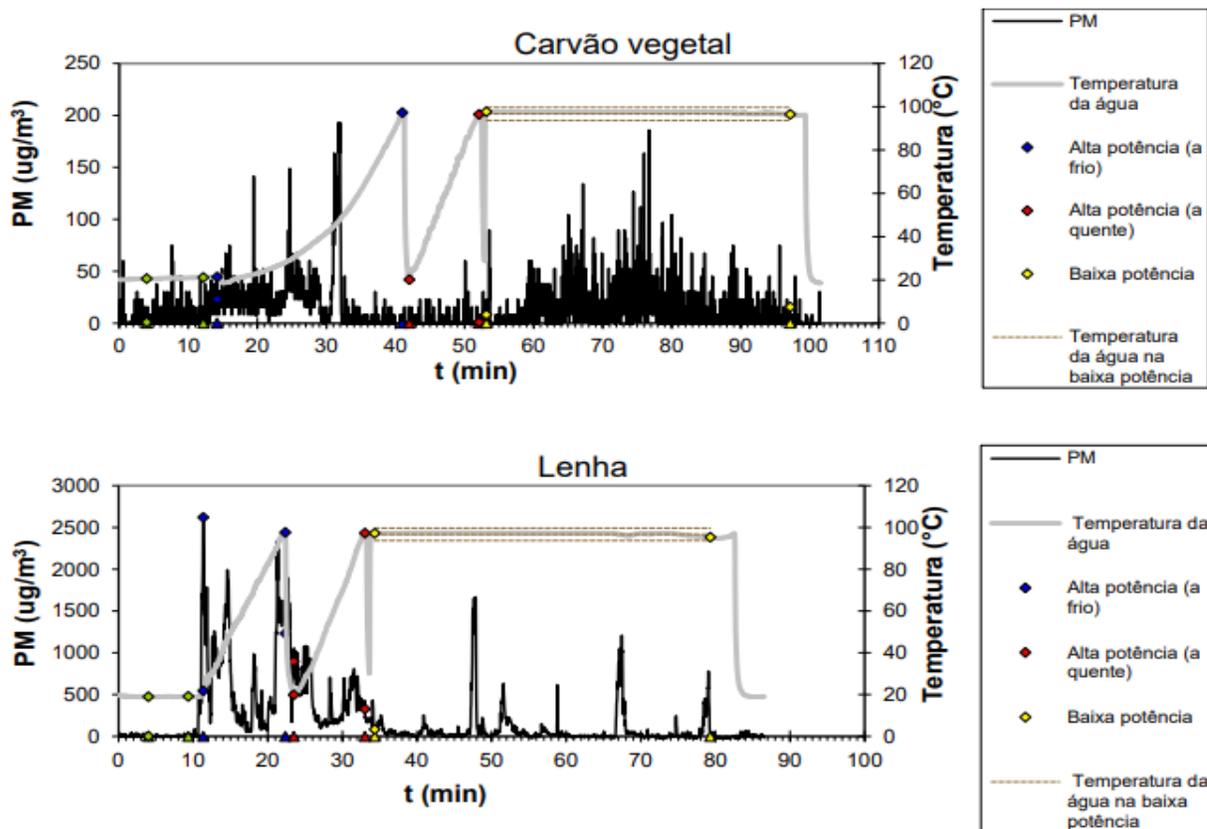


Figura 23: Variação da temperatura da água em função do tempo no teste de fervura do carvão vegetal e da lenha.

Na primeira fase (alta potência a frio), tanto o briquete do endocarpo quanto o carvão vegetal levaram mais tempo para iniciar a fervura da água, apesar de possuírem um poder calorífico superior aos demais combustíveis testados. No entanto, é importante destacar que o poder calorífico não é o único factor que determina o tempo de fervura da água. A eficiência da ignição também desempenha um papel significativo, já que uma ignição eficiente gera calor de forma mais rápida e consistente, acelerando o processo de aquecimento. No caso do carvão vegetal e do briquete do endocarpo, que foram os primeiros a serem utilizados no teste, a falta de experiência na ignição eficiente pode ter contribuído para o tempo prolongado.

Na fase subsequente (alta potência a quente), todos os combustíveis levaram aproximadamente 10 a 11 minutos para atingir a fervura da água. Isso sugere que, uma vez que os combustíveis estavam em um estado de queima estabilizado, o poder calorífico de cada um tornou-se menos relevante para o tempo de fervura da água. Nessa fase, outros

factores, como a manutenção do fogo e a eficiência do processo de aquecimento, podem ter contribuído para a uniformidade do tempo de fervura entre os combustíveis.

Na fase de baixa potência, a temperatura permaneceu relativamente constante devido ao calor gerado ser principalmente usado para vaporizar a água, mantendo-a próxima ao ponto de ebulição. Nesse contexto, nota-se que o desempenho dos briquetes durante o teste de fervura da água é comparável ao do carvão e da lenha. Essa observação é significativa, pois sugere a viabilidade dos briquetes como uma alternativa eficaz no cenário energético.

4.15. Questões ambientais: Emissões

De acordo com o Decreto n.º 18/2004 de 2 de Junho, os padrões da qualidade do ar são os seguintes:

- **Partículas em suspensão (PM):** 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24 horas);
- **Monóxido de carbono (CO):** 40.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1 hora) e 10.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (8 horas).

As emissões, durante a combustão dos combustíveis em estudo, estão apresentadas nas Figuras 22, 23, 24 e 25.

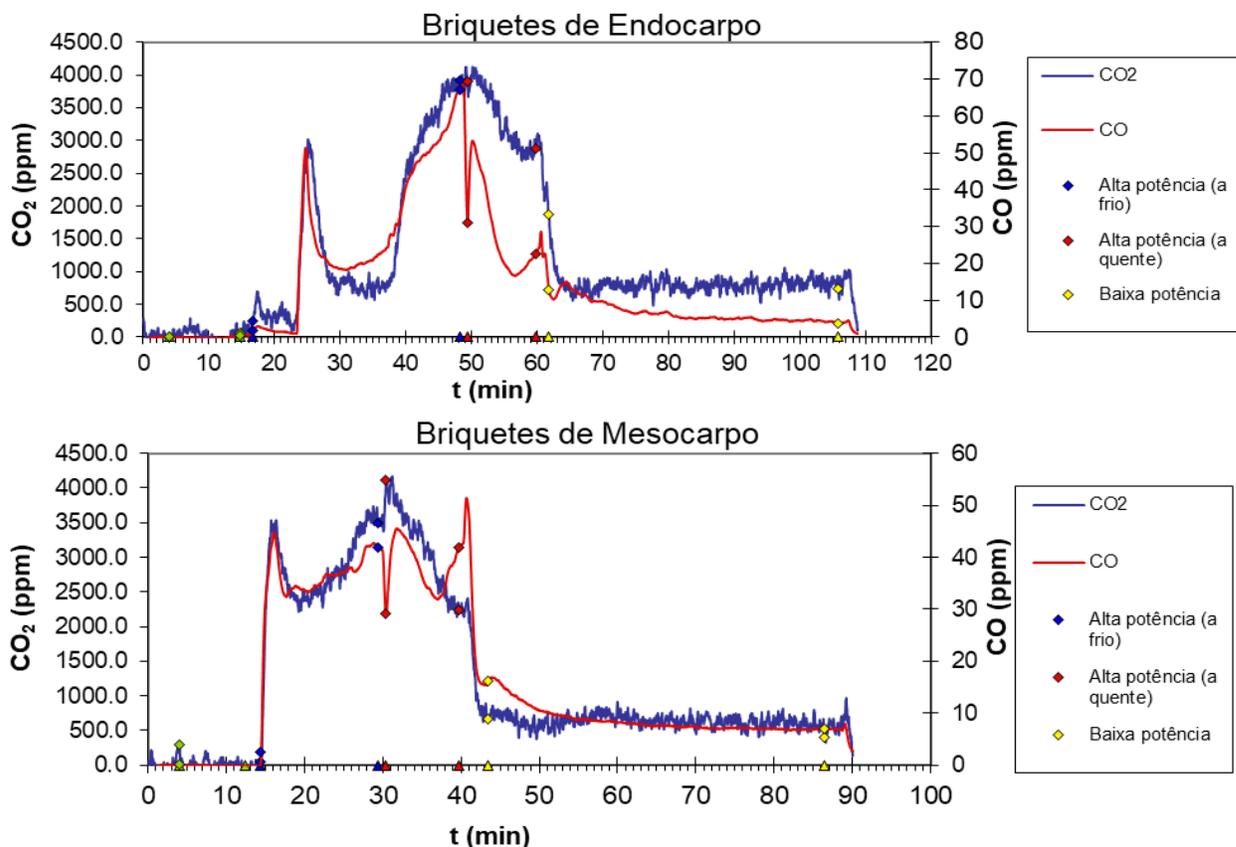


Figura 24: Emissões de CO₂ e CO durante a combustão dos briquetes.

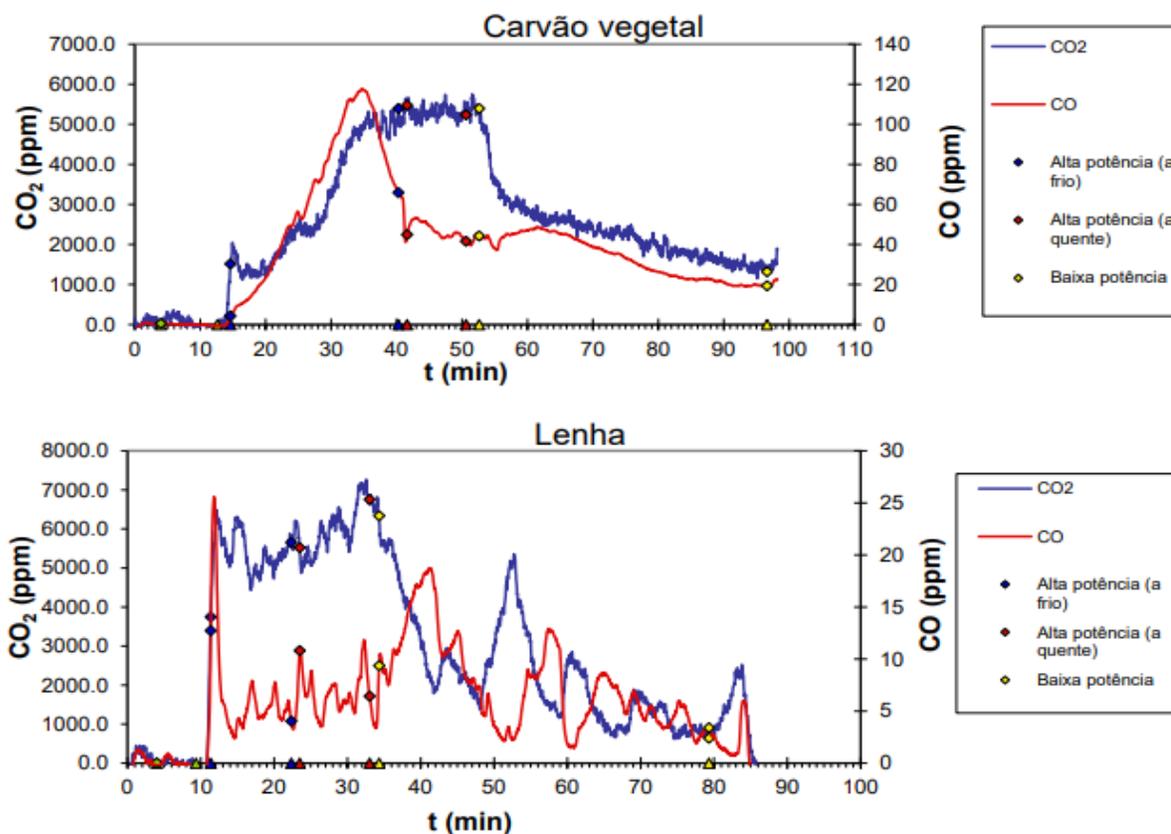


Figura 25: Emissões de CO₂ e CO durante a combustão do carvão vegetal e da lenha.

a) Monóxido de Carbono (CO):

Para os briquetes, conforme evidenciado na Figura 24, as emissões de monóxido de carbono foram significativas, atingindo 70 ppm (80.150 µg/m³) para o endocarpo e 53 ppm (60.685 µg/m³) para o mesocarpo, valores consideravelmente superiores ao máximo recomendado pelo Decreto n.º 18/2004 de 2 de junho. Essa alta emissão de CO pode ser atribuída a vários factores, incluindo os altos teores de voláteis na biomassa, que contribuem para a formação de CO durante a combustão, pois os voláteis se decompõem em altas temperaturas e libertam gases (incluindo o CO). Além disso, a insuficiência de oxigénio durante a combustão pode aumentar as emissões de CO, assim como um teor significativo de humidade nos briquetes, que pode afectar negativamente a eficiência da combustão e aumentar as emissões de CO.

Ao comparar os dois tipos de briquetes, observou-se que os briquetes de endocarpo apresentaram uma emissão de CO mais alta em relação aos briquetes de mesocarpo. Isso

pode ser atribuído ao facto do endocarpo possuir um teor de voláteis maior em comparação com o mesocarpo (conforme a Tabela 7). Como mencionado anteriormente, briquetes com alto teor de voláteis podem libertar mais CO durante a queima.

Na figura 25, observa-se que o carvão vegetal apresentou uma emissão de CO de 120 ppm ($137.400 \mu\text{g}/\text{m}^3$), um valor muito superior ao obtido para os briquetes de endocarpo e mesocarpo. Embora o carvão tenha um teor de voláteis mais baixo em comparação com os briquetes, a emissão de CO durante a combustão depende de diversos factores, incluindo a eficiência da combustão e as condições de queima. Se a queima do combustível não for eficiente, parte do carbono presente no carvão pode ser convertida em CO em vez de CO₂ (dióxido de carbono). As condições em que o carvão é queimado, como temperatura e quantidade de oxigênio disponível, afectam a formação de CO, pois combustões de alta temperatura e baixo teor de oxigênio favorecem a formação de CO (Francisco, 2012).

Além disso, na Figura 25, foi registada uma emissão máxima de 12 ppm ($13.740 \mu\text{g}/\text{m}^3$) de CO para a lenha, um valor muito menor do que o obtido para os briquetes. No entanto, apesar da baixa emissão de CO durante a combustão da lenha, há libertação de CO₂, o que contribui para o aumento do efeito estufa e, conseqüentemente, para as mudanças climáticas (Taccini, 2010).

De maneira geral, observa-se uma maior emissão de CO durante a fase de alta potência, tanto a frio quanto a quente, durante o teste de fervura da água. Nesta fase, o combustível e o sistema de combustão estão aquecendo, o que pode resultar em uma combustão inicial menos eficiente e uma maior libertação de CO. Nas fases iniciais da combustão, pode ocorrer uma combustão incompleta, resultando em maior formação de CO em vez de CO₂. Além disso, a mistura inadequada de ar e combustível durante as fases iniciais da combustão pode levar a uma combustão menos eficiente e maior emissão de CO.

b) Partículas em suspensão PM_{2,5}:

A partir da Figura 22, observou-se um máximo de 17.900 e $18.800 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para os briquetes de endocarpo e mesocarpo respectivamente, valores significativamente superiores ao recomendado no Decreto n.º 18/2004 de 2 de junho. A elevada emissão de partículas em suspensão pode ser atribuída à presença de cinzas ou impurezas consideráveis, como areia ou outros materiais não combustíveis, contribuindo para a emissão de partículas finas.

Ao comparar a emissão de PM_{2,5} entre os dois tipos de briquetes, notou-se uma maior emissão de partículas em suspensão com diâmetro menor ou igual a 2,5 (µm) durante a combustão dos briquetes de mesocarpo. Isso pode ser atribuído ao maior teor de cinzas no mesocarpo em comparação com o endocarpo. Como mencionado anteriormente, briquetes com alto teor de cinzas tendem a libertar uma maior quantidade de partículas finas durante a queima.

Na Figura 23, observou-se uma emissão de PM_{2,5} com um máximo de 190 µg/m³ para o carvão e 2.600 µg/m³ para a lenha, valores significativamente menores do que os obtidos para os briquetes. No entanto, tanto o carvão quanto a lenha continuaram a emitir partículas de forma significativa durante todo o teste de fervura da água. Em contraste, os briquetes, embora tenham atingido valores máximos de emissão maiores do que o carvão e a lenha, quase não emitiram partículas após a segunda fase do teste (alta potência a quente).

No caso do carvão, essa emissão contínua pode ser atribuída ao alto teor de cinzas. Já para a lenha, a presença de uma quantidade considerável de humidade pode ter contribuído para a produção de menos calor e maior emissão de poluentes, incluindo partículas finas. No entanto, a alta emissão de partículas finas pelos briquetes nas fases iniciais do teste pode ser resultado da libertação inicial de cinzas e impurezas presentes nos briquetes, uma vez que a queima inicial pode libertar essas cinzas, resultando em uma concentração mais alta de partículas finas.

De maneira geral, as emissões excessivas de CO (monóxido de carbono) e PM_{2,5} (partículas finas), durante a combustão de briquetes, podem ter várias causas. No entanto, a seguir são apresentadas algumas medidas que podem reduzir a emissão excessiva desses poluentes, nomeadamente:

1. Controle de Temperatura e Oxigenação Adequada: É crucial manter a combustão, dentro da faixa ideal de temperatura, para evitar emissões indesejadas, conforme destacado por Coentro (2015), Lira (2018) e Silva (2018). A ventilação adequada e a entrada de ar são essenciais, para evitar altas emissões de CO, devido à falta de oxigênio.
2. Melhorar a Qualidade da Matéria-Prima: A busca por matérias-primas de alta qualidade, com baixo teor de impurezas, é fundamental, para reduzir emissões

elevadas de CO e PM_{2,5}, durante a combustão.

3. Rever o Processo de Produção: Avaliar minuciosamente todas as etapas do processo de produção de briquetes, desde a moagem até à compactação, para evitar falhas que possam afectar a eficiência da combustão.
4. Secar a Matéria-Prima: Manter a humidade adequada na matéria-prima é essencial, uma vez que a humidade alta pode levar à formação de vapores e fumaça, durante a combustão, libertando CO e outras partículas indesejadas.

5. Conclusões e Recomendações

5.1. Conclusões

Os resultados apresentados evidenciam a viabilidade da utilização de resíduos de coco seco carbonizados para a produção de briquetes. A análise das amostras permitiu obter informações cruciais sobre suas características físicas e químicas, incluindo teor de cinzas, teor de voláteis, teor de carbono fixo e poder calorífico, dentro das faixas recomendadas.

Observou-se que um tempo de carbonização mais longo (3 horas) resultou em maior teor de carbono fixo nas amostras de resíduos de coco seco carbonizados, indicando que o prolongamento do tempo de carbonização permite o aumento do carbono fixo, embora reduza o rendimento total do carvão vegetal.

Cada matéria-prima apresentou um intervalo de humidade adequado. Para os briquetes de endocarpo, essa variação foi de 9,49% a 10,86%, enquanto para os de mesocarpo foi de 8% a 9,43%. Os briquetes de endocarpo exibiram características energéticas relativamente superiores em comparação com os de mesocarpo, sendo os dois tipos de briquetes classificados como "muito pouco friáveis" conforme a classificação de Zanella (2018).

Os resultados do teste de índice de combustão indicaram a viabilidade da produção de briquetes a partir de resíduos de coco seco carbonizados, resultando em um combustível eficiente comparável ao carvão e à lenha. Notavelmente, os briquetes de endocarpo destacaram-se com melhor desempenho em termos de índice de combustão e densidade energética, sugerindo uma alternativa sustentável para atender às necessidades energéticas.

Os resultados do rendimento dos briquetes durante o teste de fervura da água, aproximando-se do rendimento do carvão vegetal, indicaram uma eficiência comparável à do carvão como combustível. Isso particularmente é relevante quando pretende-se buscar por alternativas mais sustentáveis ao carvão vegetal e à lenha, uma vez que esses briquetes podem oferecer uma fonte de energia eficaz, sem depender de combustíveis fósseis.

Os resultados das emissões ressaltam a importância de avaliar e controlar as emissões de CO e partículas finas durante combustão de briquetes. Isso reforça a necessidade de otimizar o processo de combustão e considerar tanto o impacto ambiental quanto a eficiência energética ao seleccionar fontes de combustível.

5.2. Recomendações

Com base nos resultados apresentados e nas limitações observadas durante a realização do trabalho, recomendam-se as seguintes directrizes para estudos futuros:

- Priorizar a produção de briquetes de endocarpo devido ao seu melhor desempenho em termos de índice de combustão e densidade energética, desde que seja viável em termos de disponibilidade de matéria-prima;
- É crucial otimizar o processo de combustão e implementar tecnologias para reduzir as emissões de CO e partículas finas durante a queima dos briquetes, visando minimizar os impactos ambientais negativos;
- Explorar técnicas para melhorar a eficiência da combustão e reduzir as emissões de poluentes, considerando também a viabilidade económica da produção em larga escala dos briquetes e sua aceitação no mercado;
- Analisar a influência da granulometria das amostras na produção de briquetes, visando melhorar a qualidade e uniformidade dos produtos;
- Implementar um sistema de ventilação mais potente para acelerar o processo do resfriamento do molde e das placas superior e inferior durante o processo de briquetagem, otimizando assim o tempo de produção;
- Considerar a instalação de uma estufa no laboratório onde são realizados os testes de fervura da água, pois isso possibilitaria a secagem eficaz das placas, reduzindo a humidade residual que pode afectar os resultados dos testes.

Referências bibliográficas

- AKOWUAH, J. O.; KEMAUSUOR, F.; MITCHUAL, S. J. (2012). Physico-chemical characteristics and market potential of sawdust charcoal briquette. *International Journal of Energy and Environmental Engineering.*, p.1-6.
- ALER (2017). Energias renováveis em Moçambique: Relatório Nacional do ponto de situação, Associação Lusófona de Energias Renováveis, 2ª ed., Maputo.
- ANDRADE, R. G. S. A.; MELO, K. R. B.; SOLETTI, J. I.; CARVALHO, S. H. V.; e MEILI, L. (2017). Caracterização do biocarvão obtido a partir da pirólise do endocarpo do coco (Cocos Nucifera L.). *Anais do XII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica*, São Paulo.
- BALAT, M. e AYAR, G. (2005). Biomass Energy in the World, Use of Biomass and Potential Trends. *Energy sources*, vol.27, n.10, p.931-940.
- BARROS, L. O. (2012). Densidade energética de briquetes produzidos a partir de resíduos agrícolas. *Monografia (Licenciatura em Engenharia Florestal)*, Universidade de Brasília, Brasília.
- BITENCOURT, D. V. (2008). Potencialidades e estratégias sustentáveis para o aproveitamento de rejeitos de coco (Cocus nucifera L.).
- CARVALHO, A. S.; SOUSA, D. A.; e FERNANDES, J. P. F. (2022). O uso da biomassa como fonte de energia renovável, *Revista UNA*.
- CARVALHO, N. R.; BARROS, J. L.; SILVA, D. A.; NAKASHIMA, G. T.; e YAMAJI, F. M. (2020). Caracterização física e química da biomassa usada como combustível sólido em uma caldeira. *Química Nova*, p.35 - 40.
- CARVALHO, N. R. (2022). ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA DA BIOMASSA E SEUS COMPOSTOS, *Dissertação (Pós-graduação em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis)*, Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba.
- CHAMBAL, H. (2010). Energy Security in Mozambique, *International Institute for Sustainable Development*, Canada.

- CHAVES, A. M. B; VALE, A. T.; MELIDO, R. C. N.; e ZOCH, V. P. (2013). Características energéticas da madeira e carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* spp, vol.9, n.17, p. 533, Goiânia.
- CHEN, L.; XING, L.; e HAN, L. (2009). Renewable energy from agro-residues in China: Solid biofuels and biomass briquetting technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.*, p.2689-2695.
- COENTRO, S. R. (2015). Qualidade do Ar Interior em habitações: Fontes emissoras de poluentes, *Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente)*, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- CORTEZ, L. A.B.; PEREZ, J. M. M.; ROCHA, J. D.; JORDAN, R. A.; e MESA, H. R. M. (2009). Processamento de casca e fibra de coco verde por carbonização para agregação de valor. *Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas*, v.3, p.21-30.
- DECRETO n.º 18/2004 de 2 de Junho: Regulamento sobre Padrões de Qualidade Ambiental e de Emissão de Efluentes.
- DIAS, J. D. S.; SANTOS, D. T.; BRAGA, M.; ONOYAMA, M. M.; MIRANDA, C. H.; BARBOSA, P. F.; e ROCHA, J. D. (2012). Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais, *Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária: Embrapa Agroenergia*, Brasília.
- DIAS, N. B., SCHNEIDER, P. Z., CHAVES, G. L. D., CELESTE, W. C. (2019). Aproveitamento da casca de coco para uso energético. *Brasilian Journal of Production Engineering*, vol.5, p.179-195, Brasil.
- ENERGYEDIA (2022). Produção de Briquetes a partir da Biomassa Proveniente das Industrias Madeireiras em Moçambique.
- FALCÃO, D. M. (2013). Produção e Consumo Doméstico de Combustíveis Lenhosos em Moçambique. *Dissertação (Mestrado em Energia e Bioenergia)*, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- FERNANDES, C. R. (2012). PRODUÇÃO DE BRIQUETE INDUSTRIAL: ENERGIA LIMPA E SUSTENTÁVEL, *III Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental*, Goiânia.

- FERNANDEZ, B. O.; GONÇALVES, B. F.; PEREIRA, A. C. C.; HANSTED, A. L. S.; PÁDUA, F. A.; DA RÓZ, A. L.; e YAMAJI, F. M. (2017). Características Mecânicas e Energéticas de Briquetes Produzidos a partir de Diferentes Tipos de Biomassa. *Revista Virtual de Química*, vol.9, p. 29 - 38.
- FIGUEIREDO, A. L. (2011). Pirólise termoquímica de pós da fibra de coco seco em um reator de cilindro rotativo para a produção de bio-óleo. *Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia do Petróleo)*, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN.
- FIGUEROA, M. J. M. E MORAES, P. D. D. (2009). Comportamento da madeira a temperaturas elevadas. *Ambiente construído*, vol. 9, p.157-174.
- FILHO, B. B. (2021). Coco seco, *Companhia de Entrepósitos e Armazéns Gerais de São Paulo (CEAGESP)*, São Paulo.
- FORTES, A. G. e RAIMUNDO, B. (2020). Bioenergia em Moçambique: tecnologias de produção, uso e aspetos sustentáveis. *Revista Desenvolvimento Socioeconômico em Debate*, vol.6, p.60-77.
- FORTE, J. (2010). Oportunidades de investimento no sector do coqueiro em Moçambique, Zambézia.
- FRANCISCO, R. P. (2012). Estudo termoquímico da queima de combustíveis em caldeiras usando balanços de energia. *Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia)*, Universidade Federal de São João Del-Rei, São João Del-Rei.
- FUNAE- FUNDO DE ENERGIA (2015). Atlas de Energias Renováveis de Moçambique, *Energia para Moçambique*, Estoril.
- GARCIA, D. P.; CARASCHI, J. C.; e VENTORIM, G. (2013). Caracterização energética de pellets de madeira. *Revista da madeira*, vol.24, n.135, p.14 -16.
- GENOVESE, A. L.; UDAETA, M. E. M.; e GALVÃO, L. C. R. (2006). Aspectos energéticos da biomassa como recurso no Brasil e no mundo. Campinas (São Paulo, Brasil).
- GENTIL, L. V. (2008). Tecnologia e economia do briquete de madeira, *Tese (Doutorado em Engenharia Florestal)*, Universidade de Brasília, Brasília.

- GOMES, T. S. C. (2019). Modelagem de equações alométricas para estimativa do poder calorífico útil de *Eucalyptus sp*, *Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia florestal)*, Instituto Federal de Minas Gerais, São João Evangelista.
- GONÇALVES, J. E.; SARTORI, M. M. P.; e LEÃO, A. L. (2009). Energia de briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de *Eucalyptus grandis*, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.13, n.5, p.657–661.
- HOLZMANN, H., A. e DALLAMUTA, J. (2021). Caracterização da borra de piaçava (*attalea funifera*) para produção de briquetes. *Engenharia mecânica: a influência de máquinas, ferramentas e motores no cotidiano do homem*, vol.2, p.18-30, Atena Editora, Paraná.
- JENKINS, B. M. (1990). Fuel properties for biomass materials. *In International symposium on application and management of energy in agriculture: the role biomass fuels*, p. 21-23, Punjab Agricultural University, Ludhiana.
- KATYAL, S.; THAMBIMUTHU, K.; e VALIX, M. (2003). Carbonisation of bagasse in a fixed bed reactor: influence of process variables on char yield and characteristics. *Renewable Energy*, vol.28, p.713-725.
- KORZENOWSKI, C.; SOUZA, C. B. S.; AGUERO, R. R.; e SANTOS, M. G. (2023). Reaproveitamento de cascas de cupuaçu para a produção de energia através da sua transformação em briquetes, *International Seven Journal of Multidisciplinary*, vol.2, n.2, p.189-220.
- LIMA, E.B.C.; SOUSA, C.N.S.; MENESES, L.N.; XIMENES, N.C.; SANTOS-JUNIOR, M.A. e VASCONCELOS, G.S. (2015). *Cocos nucifera* Linn (Arecaceae): a phytochemical and pharmacological review, *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*, vol.48, p.953-964.
- LIRA, F. S. (2018). Qualidade do ar interior em habitações do Nordeste de Portugal: a influência dos sistemas de aquecimento doméstico. *Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental)*, Instituto Politécnico de Bragança (Portugal).

- MACUÁCUA, J. C. (2014). Desafios de integração de políticas e medidas na estratégia nacional e local de REDD+ em Moçambique, *Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Rural)*, Universidade Eduardo Mondlane, Maputo.
- MAKONYA, T. Z. (2022). Produção e Caracterização de Briquetes Provenientes de Serradura de Tronco de Coqueiro e Resíduos de Mandioca (Casca de Mandioca). *Monografia (Licenciatura em Engenharia Química)*, Universidade Eduardo Mondlane, Maputo.
- MANTOVANI, L. P.; LEITE, A. R.; e MANTOVANI, J. P. M.; SIMÕES, B., N., S.; GONÇALVES, E. S. S.; NEVES, F. P.; e RIBEIRO, V. G. (2022), Biomassa e Energia. *Agronomia Brasileira*, vol.6, n.10.
- MARAFON, A. C.; AMARAL, A. F. C.; e LEMOS, E. E. P. (2019). Characterization of bamboo species and other biomasses with potential for thermal energy generation. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, vol.49.
- MARAFON, A. C.; SANTIAGO, A. D.; AMARAL, A. F. C.; BIERHALS, A. N.; PAIVA, H. L.; e GUIMARÃES, V. S. (2016). Uso a biomassa para a geração de energia, *Embrapa Tabuleiros Costeiros*, Aracaju.
- MARTINS, C. R. e JESUS JÚNIOR, L. A. (2014). Produção e Comercialização de Coco no Brasil frente ao comércio internacional: Panorama 2014. *Embrapa Tabuleiros Costeiros*, Aracaju, 53p.
- MATARUCA, M. J. (2014). Avaliação do efeito da aplicação de produtos naturais no controlo da mosca-branca no coqueiro. *Dissertação*, Faculdade de Agronomia e Engenharia Florestal, Universidade Eduardo Mondlane, Maputo.
- MATOS, J. P. M.; LUCAS, C.; e CONDO, A. (2021). Estudo e caracterização das cascas de coco verde e coco seco para produção de briquetes e utilização em equipamentos de combustão de combustíveis sólidos, *Monografia (Licenciatura em Engenharia Química)*, Maputo.
- MCKENDRY, P. (2002). Energy production from biomass (part 3): gasification technologies. *Bioresource technology*, vol.83, p.55-63

- MINISTÉRIO DA ENERGIA (2011). Estratégia de Desenvolvimento de Energias Novas e Renováveis (EDENR) para o período de 2011 - 2025, Maputo.
- MINUCEL, F. D. (2018). Aproveitamento energético de resíduos sólidos orgânicos: o estudo do coco verde. *Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso)*, São Paulo.
- MOREIRA, R. (2015). Estudo da pirólise lenta da casca da castanha de cajú. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Materiais), Instituto de pesquisas energéticas e nucleares, São Paulo.
- MOREY, R.V. e KALIYAN, N. (2009). Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and Bioenergy*, p.337-359.
- MORO, J. P. (1987). Briquetagem de finos de carvão vegetal. *Anais da 2ª jornada de engenharia dos Países de Língua portuguesa*, p.1-14.
- MOURA, A. P.; CAMPOS, J. E.; e MAGALHÃES, S. R. (2011). Melhoria da qualidade de serviço na produção de carvão no setor de carbonização: um estudo de caso. *Revista da Universidade Vale do Rio Verde*, vol. 8.
- MUEIA, M. (2017). Moçambique: Doença do coqueiro na Zambézia afecta população. *DW: Made for Minds*, Quelimane.
- NAKASHIMA, G. T.; MARTINS, M. P.; SILVA, D. A.; CHRISOSTOMO, W.; e YAMAJI, F. M. (2014). Aproveitamento de resíduos vegetais para a produção de briquetes. *Revista brasileira de Ciências Ambientais*, p. 22-29.
- NONHEBEL, S. (2007). Energy from agricultural residues and consequences for land requirements for food production. *Agricultural Systems*, vol.94, n.2, p.586-592.
- OBERNBERGER, I. e THEK, G. (2004). Physical characteristics and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behavior. *Biomass and Bioenergy*, vol.27, p.653-669.
- OLIVEIRA, C. M. (2016). Biomassa-Bioenergia, Briquetes e Woodpellets. 1ª ed, p.542.
- OLIVEIRA, R. R. L.(2013). Moldagem de briquetes com finos de carvão vegetal aglutinado com parafina: caracterização de algumas propriedades. *Dissertação (Mestrado em*

- Ciências dos Materiais*), Universidade Estadual de São Carlos, Sorocaba (São Paulo).
- PADILLA, E. R. D.; PIRES, I. C. S.; YAMAJY, F. M.; e FANDIÑO, J. M. M. (2016). Produção e caracterização físico-mecânica de briquetes de fibra de coco e palha de cana-de-açúcar. *Revista Virtual Química*, vol.8, p.1334-1346.
- PARIKH, J.; CHANNIWALA, S. A.; e GHOSAL, G. K. (2005). A correlation for Calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. 5ª ed., vol. 84, Londres.
- PEREIRA, B. L. (2012). Qualidade da madeira de Eucalyptus para a produção de carvão vegetal. *Dissertação (Pós-Graduação em Ciência Florestal)*, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais (Brasil).
- PEREIRA, B. L. (2014). Propriedades de pellets: biomassas, aditivos e tratamento térmico. *Tese (Pós-Graduação em Ciência Florestal)*, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais (Brasil).
- PETRICOSKI, S. M. (2017). Briquetes produzidos com mistura de podas urbanas, glicerina e resíduos de processamento de mandioca. *Dissertação (Pós-graduação em Engenharia de Energia na Agricultura)*, Paraná (Brasil).
- PINHEIRO, G. F.; RENDEIRO, G.; E PINHO, J. T. (2005). Densidade energética de resíduos vegetais, vol.2, n.2, p.113-123.
- POMPÊU, G. C. (2019). Estudo do conteúdo calorífico de ligninas extraídas de diferentes fontes de biomassa vegetal. *Dissertação (Pós-Graduação em Ciências e Tecnologia do Biocombustível)*, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- PROTÁSIO, T. P.; ALVES, I. C. N.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, V. O.; e BALIZA, A. E. R. (2011). Compactação de biomassa vegetal visando à produção de biocombustíveis sólidos. *Pesquisa Florestal Brasileira*, vol.31, p.273-283, Universidade Federal de Lavras, Lavras (Brasil).
- QUIRINO, W. F. e BRITO, F. O. (1991). Características e Índice de combustão de briquetes de carvão vegetal, p. 1-19, Laboratório de Produtos Florestais, Brasília

- QUIRINO, W. F. (2002). Utilização energética de resíduos vegetais. Laboratório de Produtos Florestais, Brasília.
- QUIRINO, W. F.; PINHA, I. V. O.; MOREIRA, A. C. O.; e SOUZA, F. (2012). Densitometria de raios x na análise da qualidade de briquetes de resíduos de madeira. *Scientia Forestalis*, vol.40, p. 525-536.
- REED, T. B.; TREZEK, G.; e DIAZ, L. (1980). Biomass densification energy requirements. *Thermal conversion of solid waste and biomass.*, p.177-189.
- RENDEIRO, G.; NOGUEIRA, M. F. M.; BRASIL, A. C. M.; CRUZ, D. O. A.; GUERRA, D. R. S.; MACÊDO, E. N.; e ICHIHARA, J. A. (2008). Combustão e gasificação de biomassa sólida: soluções energéticas para a amazônia. 1ª ed. Brasília.
- RIBEIRO, C. A. (2015). Características de cinzas e sua aplicação no tratamento de gases durante a gasificação. *Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente)*, Universidade de Aveiro, Aveiro.
- RODRIGUES, T. (2019). Modelo de desenvolvimento de soluções conceituais de forno de carbonização. *Tese (Doutorado em Engenharia de Produção)*, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa.
- ROSA, R. A. (2010). Qualidade do carvão vegetal, para uso doméstico, comercializado em três municípios do estado do Espírito Santo. *Monografia (Graduação em Engenharia Florestal)*, Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo.
- ROSILLE-CALLE, F. (2006). Overview of Biomass Energy. *The biomass assessment handbook*, p. 23-48, Routledge.
- SANTANA, E. R. (2019). Caracterização e briquetagem de resíduos florestais. *Dissertação*, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados.
- SANTOS, M. M.; FRANCO, T. T.; BERNI, M. D. (2015). Caracterização físico-química da palha de cana de açúcar: Uma revisão de literatura. *XI Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica*, p.178-183.
- SEIFFERT, M. E. (2007). Gestão ambiental: instrumentos, esferas de acção e educação ambiental. (ATLAS, Ed.)

- SEYE, O. (2003). Análise de ciclo de vida aplicada ao processo produtivo de cerâmica estrutural tendo como insumo energético capim elefante (*Pennisetum Purpureum* Schaum). Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- SILVA, D. A.; DA RÓZ, A. L.; PIRES, A. A. F.; CARVALHO, A. M.; NAKASHIMA, G.T.; PÁDUA, F. A.; e YAMAJI, F. M. (2017). A Influência da Humidade em Propriedades Mecânicas de Briquetes Produzidos com Resíduos de Madeira (*Eucalyptus* sp.e *Pinus* sp.). *Revista virtual de Química*.
- SILVA, L. C. (2004). Forno em cascata. *Revista Grãos Brasil: Da Semente ao Consumo*, Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo (Brasil).
- SILVA, M. J. M. e RUGGERO, P. A. (2014). Gaseificação.
- SILVA, M. V. (2018). Estudo da queima de briquetes de biomassa numa Salamandra. *Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)*, Universidade de Porto, Porto.
- SILVA, R. V. D.; SPINELLI, D.; FILHO, W. W. B.; NETO, S. C.; CHIERICE, G. O.; e TARPANI, J. R. (2006). Fracture toughness of natural fibers/castor oil polyurethane composites. *Composites science and technology*, vol.66, n.10, p.1328-1335.
- SILVA, T. T.; MULDER, A. P.; e SANTANA, I. (2021). Coqueiro (*Cocos nucifera* L.) e produtos alimentícios derivados: Uma revisão sobre aspectos de produção, tecnológicos e nutricionais. *Revista Tecnologia de Alimentos: Tópicos Físicos, Químicos e Biológicos*, vol.2, p.80-101.
- SILVEIRA, A. J. (2018). Viabilidade técnica da pirólise da biomassa do coco: Produção de bioóleo, biocarvão e biogás. *Dissertação (Mestrado em energia da biomassa)*, Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo.
- SILVEIRA, M. (2008). Aproveitamento das Cascas de Coco Verde Para Produção de Briquete em Salvador-BA. *Dissertação (Mestrado em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo – Ênfase em Produção Limpa)*, Universidade Federal da Bahia, Salvador.
- TACCINI, M. M. (2010). Estudo das metodologias da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas, referentes à avaliação de emissões de gases de

- efeito estufa na produção de carvão vegetal. *Dissertação (Mestrado em Ciências - Área de concentração: Recursos Florestais)*, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- TEIXEIRA, R. S. (2010). Utilização de resíduos sucroalcooleiro na fabricação de fibrocimento pelo processo de extrusão. *Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais)*, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- VALE, A. T. D.; GENTIL, L. V.; GONÇALEZ, J. C.; e COSTA, A. F. D. (2007). Caracterização energética e rendimento da carbonização de resíduos de grãos de café (*Coffea arábica*, L) e de madeira (*Cedrelinga catenaeformis*), *Revista Cerne*, v. 13, n. 4, p. 416-420, Lavras.
- VALE, A. T. e GENTIL, L. V. B. (2008). Produção e uso energético de biomassa e resíduos agroflorestais. *Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro III.*, p.195-241, Rio Branco: Suprema
- VICTORINO, A. (1995). Estudo sobre o fogão a carvão vegetal e o ensino de Física em Moçambique. *Monografia (Ensino de Física)*, Universidade Pedagógica, Beira.
- WATER BOILING TEST (W.B.T) - 4.2.3 (2009). Emissões e eficiência de fogões em um ambiente de laboratório controlado
- YAMAJI, F. M.; VENDRASCO, L.; CHRISOSTOMO, W.; e FLORES, W. P. (2013). Análise do comportamento higroscópico de briquetes. *Energia na Agricultura*, vol.28, p.11 - 15.
- ZANELLA, K. (2018). Produção de briquetes de carvão vegetal por meio do beneficiamento do bagaço da laranja (*Citrus sinensis*). *Tese (Doutorado em Engenharia Química)*, Universidade Estadual de Campinas, Campinas (Brasil).

APÊNDICES

Apêndice 1 – Caracterização física e química dos resíduos

Tabela A1-1: Determinação do Rendimento gravimétrico ou de carbonização dos resíduos do coco seco.

Amostra	Tempo de residência (h)	N	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Rendimento gravimétrico (%)	Rendimento gravimétrico médio (%)
Mesocarpo	1	1	130	87.03	66.95	67.45 ± 0.55
		2	120	80.93	67.44	
		3	120	81.56	67.97	
	2	1	506.38	287.8	56.83	56.37 ± 0.57
		2	628.76	350.44	55.74	
		3	745	421.33	56.55	
	3	1	140	65.06	46.47	45.62 ± 0.98
		2	190	87.06	45.82	
		3	175	77.97	44.55	
Endocarpo	1	1	90	55	61.11	62.31 ± 1.08
		2	95	60.04	63.20	
		3	125	78.29	62.63	
	2	1	145	80.44	55.48	54.89 ± 0.67
		2	100	55.04	55.04	
		3	120	65	54.17	
	3	1	55	25.06	45.56	44.98 ± 0.55
		2	90	40.02	44.47	
		3	60	26.94	44.90	

Tabela A1-2: Caracterização granulométrica do endocarpo do coco seco.

Endocarpo							
Crivos (mm)	Massa retida (g)			Massa retida média (g)	Fracção retida (%)	Fracção cumulativa (%)	Fracção cumulativa passante(%)
1	0.27	0.44	0.36	0.36	0.36	0.36	99.64
0.6	10.94	10.34	11.46	10.91	10.99	11.35	88.65
0.5	16.16	16.98	17.02	16.72	16.84	28.19	71.81
0.35	29.48	28.32	29.99	29.26	29.48	57.67	42.33
0	42.60	43.03	40.32	41.99	42.31	100	0
Total	99.44	99.12	99.15	99.24	100	-	-

Tabela A1-3: Caracterização granulométrica do mesocarpo do coco seco.

Mesocarpo							
Crivos (mm)	Massa retida (g)			Massa retida média (g)	Fracção retida (%)	Fracção cumulativa (%)	Fracção cumulativa passante(%)
1	0.09	0.12	0.10	0.10	0.1	0.1	99.9
0.6	1.51	2.23	1.19	1.64	1.65	1.75	98.25
0.5	3.04	2.57	3.19	2.93	2.95	4.7	95.3
0.35	14.85	15.68	12.89	14.47	14.56	19.26	80.74
0	80.21	78.57	81.89	80.22	80.73	100	0
Total	99.70	99.17	99.25	99.37	100	-	-

Tabela A1-4: Caracterização granulométrica das películas de castanha de cajú.

Películas de castanha de cajú							
Crivos (mm)	Massa retida (g)			Massa retida média (g)	Fracção retida (%)	Fracção cumulativa (%)	Fracção cumulativa passante(%)
1	0.08	0.08	0.15	0.10	0.1	0.1	99.9
0.6	1.13	1.98	2.22	1.78	1.79	1.89	98.11
0.5	1.41	2.24	3.86	2.50	2.51	4.4	95.6
0.35	12.87	14.57	13.45	13.63	13.68	18.08	81.92
0	83.64	81.00	79.97	81.54	81.82	100	0
Total	99.43	99.86	99.66	99.65	100	-	-

Tabela A1-5: Determinação da densidade a granel das amostras.

Amostra	N	Balão vazio (g)	Balão + amostra (g)	Balão - amostra (g)	V (ml)	Densidade (kg/m ³)	Densidade média (Kg/m ³)
E	1	46.21	117.22	71.01	100	710.13	710.61 ± 0.74
	2	43.34	114.49	71.15	100	711.48	
	3	44.67	115.69	71.02	100	710.24	
E.P	1	16.18	78.00	61.82	100	618.21	619.11 ± 0.82
	2	16.18	78.11	61.93	100	619.29	
	3	16.92	78.90	61.98	100	619.82	
P	1	15.98	70.39	54.41	100	544.12	544.56 ± 0.69
	2	16.02	70.55	54.54	100	545.36	
	3	16.75	71.17	54.42	100	544.20	
M	1	15.98	35.87	19.89	100	198.91	199.04 ± 0.34
	2	16.02	35.90	19.88	100	198.80	
	3	16.75	36.69	19.94	100	199.43	
M.P	1	15.98	41.43	25.45	100	254.54	255.07 ± 0.61
	2	16.02	41.51	25.49	100	254.92	
	3	16.75	42.32	25.57	100	255.74	

Onde: E – Endocarpo; E.P – Endocarpo e películas de castanha de cajú; P – Películas de castanha de cajú; M – Mesocarpo e M.P – Mesocarpo e películas de castanha de cajú.

Tabela A1-6: Determinação do Teor de cinzas dos resíduos de coco seco carbonizados.

Amostra	Tempo de residência (h)	N	Cadinho vazio (g)	Amostra (g)	Cadinho + cinzas (g)	Teor de cinzas (%)	Teor de cinzas médio (%)
Endocarpo	1	1	13.28	2.00	13.31	1.42	1.70 ± 0.26
		2	12.37	2.01	12.41	1.94	
		3	13.24	2.00	13.27	1.73	
	2	1	42.35	2.00	42.39	2.15	2.17 ± 0.04
		2	25.23	2.00	25.27	2.15	
		3	25.40	2.00	25.45	2.22	
	3	1	16.76	2.01	16.81	2.74	2.76 ± 0.17
		2	13.51	2.01	13.57	2.61	
		3	28.25	2.01	28.31	2.95	
Mesocarpo	1	1	27.82	2.00	27.91	4.81	5.05 ± 0.35
		2	27.42	2.00	27.53	5.45	
		3	25.41	2.00	25.51	4.90	
	2	1	39.66	2.00	39.79	6.61	6.17 ± 0.41
		2	51.40	2.00	51.52	5.80	
		3	48.68	2.00	48.80	6.11	
	3	1	27.43	2.00	27.57	8.06	7.39 ± 0.34
		2	27.95	2.00	28.10	7.73	
		3	16.77	2.00	16.91	7.38	

Tabela A1-7: Determinação do Teor de cinzas das amostras.

Amostra	N	Cadinho vazio (g)	Amostra (g)	Cadinho + cinzas (g)	Teor de cinzas (%)	Teor de cinzas médio (%)
Endocarpo	1	16.76	2.01	16.81	2.74	2.76 ± 0.17
	2	13.51	2.01	13.57	2.61	
	3	28.25	2.01	28.31	2.95	
Endocarpo + Películas de castanha de cajú	1	25.10	2.00	25.17	3.38	3.07 ± 0.32
	2	11.84	2.00	11.90	2.74	
	3	12.39	2.00	12.46	3.10	
Películas de castanha de cajú	1	25.44	2.01	25.51	3.40	3.35 ± 0.05
	2	28.15	2.00	28.22	3.34	
	3	25.23	2.01	25.30	3.31	
Mesocarpo	1	27.43	2.00	27.57	8.06	7.39 ± 0.34
	2	27.95	2.00	28.10	7.73	
	3	16.77	2.00	16.91	7.38	
Mesocarpo + Películas de castanha de cajú	1	12.87	2.00	13.04	8.28	8.03 ± 0.29
	2	16.64	2.00	16.81	8.09	
	3	13.66	2.00	13.82	7.71	
Carvão vegetal	1	28.21	2.00	28.46	12.43	12.48 ± 0.13
	2	29.07	2.00	29.32	12.39	
	3	29.34	2.00	29.60	12.64	

Tabela A1-8: Determinação do Teor de voláteis dos resíduos de coco seco carbonizados.

Amostra	Tempo de residência (h)	N	Cadinho vazio (g)	Amostra (g)	Cadinho + carvão(g)	Teor de voláteis (%)	Teor de voláteis médio (%)
Endocarpo	1	1	48.49	1.01	48.99	51.08	52.13 ± 0.94
		2	48.29	1.01	48.76	52.38	
		3	48.31	1.01	48.78	52.91	
	2	1	48.49	1.00	49.04	45.69	45.46 ± 0.24
		2	48.07	1.00	48.61	45.48	
		3	49.57	1.00	50.12	45.21	
	3	1	49.01	1.01	49.60	41.55	41.47 ± 0.44
		2	48.31	1.01	48.90	41.00	
		3	48.49	1.00	49.07	41.86	
Mesocarpo	1	1	49.01	1.00	49.51	49.86	49.52 ± 0.36
		2	48.32	1.00	48.82	49.57	
		3	48.68	1.00	49.19	49.14	
	2	1	48.31	1.00	48.89	42.53	42.38 ± 0.62
		2	48.66	1.00	49.24	41.69	
		3	48.31	1.01	48.88	42.91	
	3	1	48.66	1.01	49.28	39.04	39.53 ± 0.65
		2	49.01	1.01	49.62	40.27	
		3	48.55	1.01	49.17	39.28	

Tabela A1-9: Determinação do Teor de voláteis das amostras.

Amostra	N	Cadinho vazio (g)	Amostra (g)	Cadinho+ carvão (g)	Teor de voláteis (%)	Teor de voláteis médio (%)
Endocarpo	1	49.01	1.01	49.60	41.55	41.47 ± 0.44
	2	48.31	1.01	48.90	41.00	
	3	48.49	1.00	49.07	41.86	
Endocarpo + Películas de castanha de cajú	1	48.66	1.01	49.12	53.49	53.31 ± 0.17
	2	48.49	1.00	48.96	53.28	
	3	49.01	1.00	49.48	53.15	
Películas de castanha de cajú	1	48.52	1.00	48.84	68.05	68.11 ± 0.16
	2	48.87	1.00	49.19	68.28	
	3	48.49	1.00	48.81	67.98	
Mesocarpo	1	48.66	1.01	49.28	39.04	39.53 ± 0.65
	2	49.01	1.01	49.62	40.27	
	3	48.55	1.01	49.17	39.28	
Mesocarpo + Películas de castanha de cajú	1	48.31	1.01	48.79	51.90	51.92 ± 0.03
	2	48.49	1.00	48.97	51.91	
	3	48.32	1.01	48.80	51.95	
Carvão vegetal	1	49.09	1.00	49.88	21.03	20.82 ± 0.34
	2	48.72	1.00	49.52	20.43	
	3	49.57	1.00	50.36	20.99	

Tabela A1-10: Determinação do poder calorífico dos resíduos de coco seco carbonizados.

Amostra	Tempo de residência (h)	Poder calorífico superior (MJ/kg)	Poder calorífico inferior (MJ/kg)	Poder calorífico útil (MJ/kg)
Endocarpo do coco seco	1	24.44	23.04	21.89
	2	25.59	24.19	22.83
	3	26.16	24.76	23.44
Mesocarpo do coco seco	1	23.74	22.35	21.14
	2	24.75	23.35	21.84
	3	24.87	23.47	22.00

Apêndice 2 – Caracterização dos briquetes

Tabela A2-1: Determinação da densidade aparente dos briquetes.

Amostra	N	Massa (g)	Altura (cm)	Diâmetro (cm)	V (cm ³)	Densidade aparente (g/cm ³)	Densidade aparente média (g/cm ³)
Endocarpo + Películas de castanha de cajú	1	59.03	2.52	5.00	49.62	1.19	1.18 ± 0.03
	2	59.17	2.62	5.01	51.67	1.15	
	3	60.02	2.52	5.00	49.66	1.21	
Mesocarpo + Películas de castanha de cajú	1	50.99	3.04	5.01	60.05	0.85	0.97 ± 0.11
	2	59.18	2.90	5.01	57.27	1.03	
	3	60.04	2.93	5.02	57.88	1.04	

Tabela A2.2 - Determinação da expansão longitudinal dos briquetes.

Tipo de Briquete	Tempo (horas)	Altura (mm)			Expansão longitudinal(%)			Expansão longitudinal média (%)
		1	2	3	1	2	3	
Endocarpo + Películas de castanha de cajú	0	24.97	25.98	25.28	0.00	0.00	0.00	0.00
	1	24.91	25.93	25.19	-0.24	-0.19	-0.36	-0.26 ± 0.09
	2	24.91	25.91	25.20	-0.24	-0.27	-0.32	-0.28 ± 0.04
	24	24.96	26.00	25.19	-0.04	0.08	-0.36	-0.11 ± 0.23
	48	25.46	26.37	25.34	1.96	1.50	0.24	1.23 ± 0.89
	72	25.23	26.23	25.27	1.04	0.96	-0.04	0.65 ± 0.60
	168	25.25	26.22	25.26	1.12	0.92	-0.08	0.66 ± 0.89
	360	25.26	26.23	25.27	1.16	0.96	-0.04	0.69 ± 0.60
Mesocarpo + Películas de castanha de cajú	0	30.26	30.75	28.97	0.00	0.00	0.00	0.00
	1	30.33	30.78	29.08	0.23	0.10	0.38	0.24 ± 0.14
	2	30.25	30.71	29.00	-0.03	-0.13	0.10	-0.02 ± 0.12
	24	30.38	30.77	28.96	0.40	0.07	-0.03	0.14 ± 0.07
	48	30.40	30.80	28.98	0.46	0.16	0.03	0.22 ± 0.22
	72	30.40	30.87	29.14	0.46	0.39	0.59	0.48 ± 0.10
	168	30.45	30.88	29.11	0.63	0.42	0.48	0.51 ± 0.22
	360	30.39	30.87	29.14	0.43	0.39	0.59	0.47 ± 0.10

Tabela A2.3 - Determinação da friabilidade dos briquetes de endocarpo e películas de castanha de caju.

Amostra	Proporções	N	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Massa perdida (%)	Massa perdida média (%)
Endocarpo + Películas de castanha de caju	80% + 20 %	1	59.61	-	-	-
		2	60.13	-	-	
		3	59.89	-	-	
	70% + 30%	1	59.53	52.67	11.53	10.73 ± 0.81
		2	59.80	53.89	9.89	
		3	60.02	53.55	10.78	
	65% + 35%	1	59.85	54.99	8.12	8.78 ± 0.57
		2	60.54	55.00	9.15	
		3	59.34	53.97	9.06	
	60% + 40%	1	59.02	54.64	7.42	7.22 ± 0.58
		2	59.05	55.17	6.57	
		3	58.95	54.42	7.68	
	50% + 50%	1	59.99	59.10	1.48	1.36 ± 0.34
		2	60.16	59.18	1.63	
		3	59.55	58.97	0.98	

Tabela A2.4 - Determinação da friabilidade dos briquetes de mesocarpo e películas de castanha de caju.

Amostra	Proporções	N	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Massa perdida (%)	Massa perdida média (%)
Mesocarpo + Películas de castanha de caju	80% + 20 %	1	60.05	-	-	-
		2	59.89	-	-	
		3	60.45	-	-	
	70% + 30%	1	60.36	50.76	15.91	15.61 ± 0.88
		2	60.74	51.86	14.63	
		3	59.72	49.99	16.30	
	65% + 35%	1	60.36	53.19	11.87	12.09 ± 0.70
		2	60.06	52.32	12.87	
		3	60.66	53.67	11.53	
	60% + 40%	1	60.06	57.37	4.48	5.32 ± 0.94
		2	59.89	56.09	6.33	
		3	60.08	56.98	5.16	
	50% + 50%	1	60.55	59.72	1.36	1.51 ± 0.54
		2	60.39	59.78	1.01	
		3	60.74	59.44	2.14	

Tabela A2.5 - Determinação da friabilidade dos briquetes de endocarpo e resíduos do processamento de algodão.

Amostra	Proporções	N	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Massa perdida (%)	Massa perdida média (%)
Endocarpo + Resíduos do processamento de algodão	80% + 20 %	1	59.13	-	-	-
		2	60.21	-	-	
		3	59.88	-	-	
	70% + 30%	1	59.34	-	-	-
		2	59.67	-	-	
		3	60.15	-	-	
	65% + 35%	1	59.65	-	-	-
		2	59.89	-	-	
		3	60.15	-	-	
	60% + 40%	1	59.76	54.37	9.02	10.18 ± 1.02
		2	59.90	53.55	10.60	
		3	60.56	53.94	10.93	
	55% + 45%	1	59.44	56.11	5.59	5.75 ± 1.16
		2	59.06	56.30	4.67	
		3	60.03	55.84	6.98	
	50% + 50%	1	59.02	56.63	4.05	3.82 ± 0.28
		2	59.77	57.45	3.89	
		3	61.03	58.89	3.51	
	45% + 55%	1	59.18	57.15	3.42	3.44 ± 0.76
		2	60.87	59.24	2.69	
		3	59.98	57.45	4.21	
	40% + 60%	1	59.09	57.87	2.08	2.15 ± 0.18
		2	60.58	59.16	2.35	
		3	60.10	58.89	2.01	

Tabela A2.6 - Determinação da friabilidade dos briquetes de mesocarpo e resíduos do processamento de algodão.

Amostra	Proporções	N	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Massa perdida (%)	Massa perdida média (%)
Mesocarpo + Resíduos do processamento de algodão	80% + 20 %	1	60.65	-	-	-
		2	59.40	-	-	
		3	60.74	-	-	
	70% + 30%	1	60.16	-	-	-
		2	59.97	-	-	
		3	59.44	-	-	
	65% + 35%	1	60.13	51.44	14.47	13.46 ± 0.88
		2	60.06	52.20	13.09	
		3	59.42	51.79	12.83	
	60% + 40%	1	59.94	53.89	10.10	9.89 ± 1.02
		2	59.43	53.02	10.78	
		3	60.06	54.79	8.78	
	55% + 45%	1	59.39	55.68	6.25	7.13 ± 0.77
		2	60.48	55.98	7.43	
		3	59.27	54.71	7.70	
	50% + 50%	1	59.78	57.09	4.49	4.42 ± 0.4
		2	59.57	57.20	3.99	
		3	59.87	57.01	4.78	
45% + 55%	1	59.85	56.90	4.93	4.13 ± 0.70	
	2	60.60	58.41	3.62		
	3	60.01	57.71	3.83		
40% + 60%	1	59.83	58.11	2.88	2.93 ± 0.05	
	2	59.63	57.88	2.93		
	3	59.04	57.28	2.98		

Tabela A2-7: Determinação do índice de combustão dos briquetes.

Amostra	N	A (%)	B(%)	C(%)	ICOM	ICOM médio
Endocarpo e películas de Castanha de cajú	1	45.83	78.04	54.811	0.65	0.66 ± 0.01
	2	45.83	78.88	54.08	0.67	
	3	45.83	79.07	54.87	0.66	
Mesocarpo e películas de Castanha de cajú	1	50	77.81	61.27	0.63	0.61 ± 0.03
	2	50	78.09	62.86	0.62	
	3	45.83	76.87	61.98	0.57	
Carvão vegetal	1	50	80.7	51.74	0.78	0.79 ± 0.01
	2	54.16	79.88	53.88	0.80	
	3	50	80.06	51.43	0.78	
Lenha (pinheiro)	1	37.5	74.82	87.19	0.32	0.31 ± 0.02
	2	37.5	74.66	85.22	0.33	
	3	33.33	75.03	86.44	0.29	

Tabela A2-8: Resultados do teste de fervura de água para os briquetes para a primeira experiência.

1ª Experiência	Endocarpo			Mesocarpo		
	A.P(frio)	A.P(quente)	B.P	A.P(frio)	A.P(quente)	B.P
mcc (kg)	0.20	0.09	0.05	0.24	0.09	0.04
ma (kg)	0.07	0.06	0.14	0.06	0.03	0.20
T (°C)	80.40	80.10	0.00	79.80	78.90	0.00
t (min)	24.00	11.00	45.00	17.00	10.00	45.00
Qlib (kJ)	4,417.94	1,963.53	1,071.0 2	4,908.82	1,872.01	832.00
Qab (kJ)	1,144.06			1,134.85		
Qvap (kJ)	616.98			641.84		
P (kW)	3.07	2.98	0.40	4.81	3.12	0.31
Cc	2.71	1.42	0.35	3.93	3.21	0.20
η (%)	23.63			23.34		

Tabela A2-9: Resultados do teste de fervura de água para o carvão vegetal e a lenha para a primeira experiência.

1ª Experiência	Carvão vegetal			Lenha		
	A.P(frio)	A.P(quente)	B.P	A.P(frio)	A.P(quente)	B.P
mcc (kg)	0.18	0.06	0.05	0.20	0.15	0.22
ma (kg)	0.07	0.04	0.17	0.04	0.04	0.15
T (°C)	79.40	79.10	0.00	79.60	79.20	0.00
t (min)	25.00	10.00	45.00	17.00	10.00	45.00
Qlib (kJ)	4,559.40	1,519.80	1,266.50	2,803.43	2,126.74	2,982.96
Qab (kJ)	1,144.06			1,144.06		
Qvap (kJ)	628.28			517.99		
P (kW)	3.04	2.53	0.47	2.75	3.54	1.10
Cc	2.65	1.67	0.29	4.61	4.03	1.47
η (%)	24.13			21.00		

Tabela A2-10: Resultados do teste de fervura de água para os briquetes para a segunda experiência.

2ª Experiência	Endocarpo			Mesocarpo		
	A.P(frio)	A.P(quente)	B.P	A.P(frio)	A.P(quente)	B.P
mcc (kg)	0.22	0.05	0.03	0.19	0.16	0.11
ma (kg)	0.04	0.02	0.13	0.07	0.03	0.35
T (°C)	81.10	81.20	0.00	80.00	79.90	0.00
t (min)	16.00	11.00	45.00	14.00	11.00	45.00
Qlib (kJ)	4,908.83	1,213.82	624.76	3,952.02	3,328.02	2,225.61
Qab (kJ)	1,154.02			1,137.70		
Qvap (kJ)	418.10			1,014.74		
P (kW)	5.11	1.85	0.23	4.70	5.04	0.82
Cc	5.64	2.86	0.22	2.92	5.00	0.30
η (%)	23.30			22.64		

Tabela A2-11: Resultados do teste de fervura de água para o carvão vegetal e a lenha para a segunda experiência.

2ª Experiência	Carvão vegetal			Lenha		
	A.P(frio)	A.P(quente)	B.P	A.P(frio)	A.P(quente)	B.P
mcc (kg)	0.23	0.06	0.04	0.19	0.15	0.28
ma (kg)	0.06	0.03	0.24	0.05	0.04	0.23
T (°C)	79.00	78.80	0.00	80.40	80.40	0.00
t (min)	15.00	10.00	45.00	12.00	10.00	45.00
Qlib (kJ)	5,724.58	1,418.48	911.88	2,762.00	2,071.50	3,894.42
Qab (kJ)	1,144.06			1,144.06		
Qvap (kJ)	745.80			736.76		
P (kW)	6.36	2.36	0.34	3.84	3.45	1.44
Cc	3.77	2.15	0.15	4.17	3.41	1.21
η (%)	23.46			21.55		

Tabela A2-12: Resultados do teste de fervura de água para os briquetes para a terceira experiência.

3ª Experiência	Endocarpo			Mesocarpo		
	A.P(frio)	A.P(quente)	B.P	A.P(frio)	A.P(quente)	B.P
mcc (kg)	0.25	0.09	0.03	0.29	0.08	0.11
ma (kg)	0.04	0.02	0.26	0.06	0.02	0.41
T (°C)	81.20	81.70	0.00	80.40	80.30	0.00
t (min)	17.00	10.00	45.00	18.00	13.00	45.00
Qlib (kJ)	5,578.21	2,030.47	624.76	6,032.03	1,684.81	2,308.81
Qab (kJ)	1,144.06			1,143.38		
Qvap (kJ)	736.76			1,108.30		
P (kW)	5.47	3.38	0.23	5.59	2.16	0.86
Cc	5.68	4.33	0.11	4.97	4.50	0.27
η (%)	22.84			22.46		

Tabela A2-13: Resultados do teste de fervura de água para o carvão vegetal e a lenha para a terceira experiência.

3ª Experiência	Carvão vegetal			Lenha		
	A.P(frio)	A.P(quente)	B.P	A.P(frio)	A.P(quente)	B.P
mcc (kg)	0.20	0.06	0.09	0.26	0.15	0.39
ma (kg)	0.04	0.04	0.30	0.04	0.05	0.36
T (°C)	78.90	78.70	0.00	80.40	81.50	0.00
t (min)	16.00	10.00	45.00	13.00	10.00	45.00
Qlib (kJ)	4,964.68	1,393.15	2,229.04	3,590.60	2,126.74	5,358.28
Qab (kJ)	1,144.06			1,144.06		
Qvap (kJ)	840.72			1,007.96		
P (kW)	5.17	2.32	0.83	4.60	3.54	1.98
Cc	5.16	1.53	0.30	6.50	3.08	1.09
η (%)	23.11			19.43		