



**FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
ENGENHARIA QUÍMICA**

RELATÓRIO DE TRABALHO DE LICENCIATURA

**Estudo do potencial energético da biomassa (casca e sabugo de milho) para
produção e uso de briquetes.**

Autor:

Yunus Nazir Esep Amuji

Supervisor:

Doutor Carlos Lucas, Eng^o

Co-supervisor:

Doutor Adolfo Condo, Eng^o

Co-supervisora:

MSc. Karina Motani, Eng^a

Maputo, Julho de 2024



**FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
ENGENHARIA QUÍMICA**

RELATÓRIO DE TRABALHO DE LICENCIATURA

Estudo do potencial da biomassa (casca e sabugo de milho) para produção e uso de briquetes.

Autor:

Yunus Nazir Esep Amuji

Supervisor:

Doutor Carlos Lucas, Eng^o

Co-supervisor:

Doutor Adolfo Condo, Eng^o

Co-supervisora:

MSc. Karina Motani, Eng^a

Maputo, Julho de 2024

TERMO DE ENTREGA DO RELATÓRIO DE TRABALHO DE LICENCIATURA

Declaro que o estudante Yunus Nazir Esep Amuji entregou no dia ____/____/20____ as ____ cópias do relatório do seu Trabalho de Licenciatura intitulado:

Estudo do potencial energético da biomassa (casca e sabugo de milho) para produção e uso de briquetes.

Maputo, ____ de _____ de 20____

O Chefe de Secretaria

DECLARAÇÃO SOB PALAVRA DE HONRA

Eu, Yunus Nazir Esep Amuji, declaro por minha honra que o presente trabalho 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_____

(Yunus Nazir Esep Amuji)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho em primeiro lugar aos meus pais Nazir Amuji (*in memoriam*) e Munira Ibrahimo, aos meus irmãos Shaheen, Muhammad e Ibrahim, à minha esposa, Adila e à minha família, que sempre me motivaram a empenhar-me nos meus estudos, acreditaram no meu potencial e nunca deixaram faltar nada para que eu pudesse atingir este nível.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a ALLAH (Deus), por me ter dado a vida e me permitir estar aqui, por ter me guiado durante os meus desafios e triunfos que enfrentei e também por permitir que este trabalho fosse realizado.

Em especial aos meus pais pelo amor, incentivo e apoio inabaláveis ao longo de todo o percurso dos meus estudos. Ao meu pai, Nazir Amuji (*in memoriam*), que desde pequeno ensinou-me a ler, escrever, que sempre acreditou no meu potencial e apoiou a minha educação, pelo seu contentamento com as minhas conquistas, pelos conselhos e ensinamentos de pai que ficarão comigo para sempre, pai, a si serei eternamente grato. À minha mãe, Munira Ibrahim, por ter estado presente em todos os momentos especiais da minha vida e pelo amor incondicional que me dá e faz sentir em todas as acções, por ter me acompanhado no meu primeiro dia de escola e desde aí sempre acompanhou o meu desempenho, por ser o meu suporte, por todo o carinho, tempo e dedicação que em mim despendeu, sem o seu suporte e amor incondicional não poderia ter chegado até aqui.

Quero ainda agradecer aos meus irmãos pelo contínuo incentivo, compreensão e crença em minhas aspirações. Ao meu irmão, Shaheen, pelos conselhos que me tem dado sempre que preciso, por proporcionar sempre alguma solução para as minhas preocupações e problemas, por também garantir que eu continuasse com os meus estudos e pelo sacrifício que tiveste de fazer para poder garantir que nós os mais novos pudéssemos estudar. Ao meu irmão, Muhammad, pela presença, sabedoria e suporte que tem dado quando preciso, pela motivação na realização do presente trabalho. Ao meu irmão Ibrahim, pelo apoio, carinho e pelas brincadeiras ocasionais.

Um especial agradecimento à minha esposa, Adila, que com o seu suporte incondicional, paciência e amor manteve-me firme nos momentos de dificuldades e também de triunfos nesta caminhada.

Além disso estendo os meus profundos agradecimentos à minha avó Bibi (*in memoriam*), assim como meus tios Shafee e Firoza, pela sua generosidade, hospitalidade e apoio em

proporcionar-me um ambiente acolhedor enquanto eu prosseguia os meus estudos. A sua bondade e incentivo foram inestimáveis, oferecendo-me um sentimento de pertença e estabilidade durante este capítulo significativo da minha vida. Fizeram-me sentir como filho e para mim serão sempre como meus pais.

Gostaria de agradecer a orientação e o apoio inestimáveis fornecidos pelos meus supervisores, Prof. Doutor Carlos Lucas, Prof. Doutor Adolfo Condo e MSc. Eng. Karina Motani. Sua experiência, *feedback* e incentivo foram fundamentais para definir a direcção e a qualidade de minha tese. Muito obrigado por terem aceite o meu pedido, e pela paciência, disponibilidade e exigência durante este processo.

Impossível não mencionar e agradecer a todos os meus colegas de turma e em especial os meus amigos, Alex, Chris, Francisco, José, Daniela, Ébe, Jéssica e Stela pelo companheirismo, incentivo e compreensão ao longo desta jornada. Foram os melhores e mais incríveis companheiros e amigos que com as experiências compartilhadas, discussões e o vosso apoio moral enriqueceram meus esforços académicos e tornaram o processo mais gratificante.

Agradeço também ao técnico do BECT, o Sr. Afonso, pela sua formidável ajuda e orientação durante os testes de combustão.

Aos meus amigos e irmãos, Zidane e Wassila, durante esta caminhada não faltaram momentos de alegria e irmandade, mesmo estando longe, ajudaram a manter-me firme e motivado, por tal, terão para sempre o meu agradecimento.

A todos aqueles que tiveram um papel, grande ou pequeno, na formação do meu percurso académico, apresento a minha mais sincera gratidão. Seu apoio foi fundamental para minhas realizações e estou profundamente grato a cada um de vocês.

Resumo

O potencial da casca e do sabugo de milho para a produção e uso de briquetes foi investigado no presente trabalho. O principal objectivo do estudo é utilizar os resíduos biomássicos como combustíveis na forma de briquetes carbonizados e verificar o seu desempenho em equipamentos de combustão de combustíveis sólidos. As amostras foram previamente carbonizadas na mufla a uma temperatura de 400°C por 2h e em seguida submetidas à moagem e classificação. Realizou-se a caracterização física, química e térmica dos resíduos, e determinou-se o poder calorífico superior da mistura de sabugo carbonizado e película de castanha de cajú (usado como ligante) obtendo um valor de 21,86 MJ/kg , enquanto que para a mistura de casca carbonizada e película de castanha de cajú foi de 20,66 MJ/kg . Foram pesados 30g de resíduo carbonizado e 30g de ligante com granulometria inferior a 1mm e humidade compreendida entre 7-11% para produzir briquetes a uma pressão de 10MPa e temperatura de 150°C. Os briquetes com 50% de película de castanha de cajú apresentaram menores valores de friabilidade (2,51-2,56%) tendo sido escolhidos para a continuação dos testes. O briquete de sabugo e película (BSP) apresentou densidade energética de 20.69 MJ/m^3 com ICOM de 1,34 enquanto o de casca e película (BCP) foi de 19.81 MJ/m^3 e ICOM de 1,26. Durante o teste de fervura de água, o BCP apresentou menor consumo específico na fase de início frio (78 g/L) em comparação com o BSP (93 g/L); consequentemente, o BCP apresentou valor de eficiência térmica média ligeiramente maior na fase de alta potência (37,7%) em comparação ao BSP (35,9%). Durante as 3 fases do teste de fervura, foram registadas emissões totais de $PM_{2,5}$ no intervalo de 2mg a 9152 mg, 4g a 40g de emissões de CO_2 e 2,45g a 11,46g de emissões totais para o CO .

Palavras-chave: Biomassa, briquetes, carbonização, sabugo, casca de milho.

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

BECT – *Biomass Energy Certification and Testing Center*

BCP – Briquete de casca e película

BSP – Briquete de sabugo e película

CP – Casca e película

CNSL – *Cashew Nut Shell Liquid* (líquido da casca de castanha de cajú)

CO₂ – Dióxido de carbono

FAO – *Food Agricultural Organization*

FAOSTAT - *Food Agricultural Organization Statistics*

GEE – Gases de efeito estufa

g – Grama

°C – Graus Celcius

ICOM – Índice de combustão de oxigénio modificado

IWA – *International Water Association*

LEMS – *Laboratory Emission Monitoring System*

MJ – Megajoule

MPa – Megapascal

m³ – Metro cúbico

mg - miligrama

ml – Mililitro

mm – Milímetro

mm³ – Milímetro cúbico

CO – Monóxido de carbono

% – Percentagem

PCI – Poder calorífico inferior

PCS – Poder calorífico superior

PCU – Poder calorífico útil

PEMS – *Portable Emission Monitoring System*

PM – *Particulate matter* (material particulado)

kcal – Quilocaloria

kg – Quilograma

kJ – Quilojoule

kW – Quilowatt

rpm – Rotações por minuto

SP – Sabugo e película

TCF – Teor de carbono fixo

TC – Teor de cinzas

TH – Teor de humidade

TV – Teor de voláteis

UEM – Universidade Eduardo Mondlane

WBT – *Water boiling test*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Processos de conversão de biomassa e seus produtos. (fonte: adaptado de VIEIRA, 2014).	8
Figura 2: Produção de energia primária em Moçambique. (fonte: ALER, 2017)	10
Figura 3: Consumo de energia em Moçambique por fonte (Fonte: ALER, 2017).....	10
Figura 4: Morfologia da planta do milho. (fonte: @agriconteudos – disponível em https://www.instagram.com/p/CnqAkfGu7yC/?igshid=MzRIODBiNWFIZA==).....	13
Figura 5: As principais partes da planta do milho e suas proporções mássicas (fonte: GELETHUKA et al. (2020)).	14
Figura 6: Cascas e sabugo de milho descartadas. (fonte: www.shutterstock.com disponível em https://www.shutterstock.com/image-photo/sweet-corn-cobs-large-waste-1741423175).....	15
Figura 7: Processos de carbonização completo incluindo seus produtos (fonte: adaptado de AMER e ELWARDANY, 2020).	17
Figura 8: Matéria-prima usada no presente trabalho. (A – Sabugo de milho, B – casca de milho, C – Película de castanha de cajú, D – Resíduos de processamento de algodão).	20
Figura 9: Analisador de humidade.....	21
Figura 10: A- Moinho de facas; B- Moinho ultracentrífugo	22
Figura 11: A – Série de peneiros; B – Peneiro vibratório – constituído pelo vibrador, na base, e a série de peneiros, que é colocada sobre vibrador	23
Figura 12: Equipamento usado para realização da carbonização; A – Mufla; B – Reactor de metal.....	23
Figura 13: Balança analítica	24
Figura 14: Erlenmeyers e balões volumétricos usados na determinação da densidade a granel.	24
<i>Figura 15: Determinação do teor de cinzas: (A) Cadinhos na mufla; (B) Mufla em funcionamento; (C) Cadinhos no dissecador.</i>	<i>25</i>
Figura 16: Determinação do teor de voláteis: (A) Cadinhos de níquel imediatamente após serem retirados da mufla; (B) Cadinhos de níquel no dissecador.	26
<i>Figura 17: Equipamento usado na briquetagem (MATOS, 2021)</i>	<i>28</i>
Figura 18: Rendimento de carbonização da casca e sabugo de milho em tempos de residência de 1, 2 e 3 horas.	34
Figura 19: Distribuição granulométrica das amostras.	36
Figura 20: Densidade a granel média das biomassas.....	37
Figura 21: Briquetes produzidos de (A)- Casca de milho carbonizada e película de castanha de cajú (50-50%); e (B)- Sabugo de milho carbonizado e película de castanha de cajú (50-50%).....	44
Figura 22: Estabilidade dimensional dos briquetes.	46
Figura 23: Densidades energéticas dos resíduos antes e após a briquetagem.	48

Figura 24: Comportamento da temperatura durante o teste de ICOM	49
Figura 25: Comportamento da massa durante o teste de combustão.....	49
Figura 26: Imagens de combustão: A) Briquetes embebidos de querosene no combustor; B) Ignição da querosene; C) Ignição dos briquetes; D) Emissão de fumo branco durante a fervura; E) Aderência de óleo acastanhado na panela; F) Formação de cinzas a volta dos briquetes.	52
Figura 27: Resultados do teste de fervura.	53
Figura 28: A - Emissões de PM, Perfil de temperatura da água e Humidade Relativa; B - Emissões de CO ₂ e CO; 1 – BSP (Briquete de sabugo e película); 2 – BCP (Briquete de casca e película); 3 – Lenha (pinheiro); 4 – Carvão vegetal	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Taxonomia da cultura do milho (fonte: TRIPATHI et al., 2011).	11
Tabela 2: Humidade in natura das amostras.....	33
Tabela 3: Análise imediata (Teores de: cinzas, voláteis e carbono fixo) das amostras. 38	
Tabela 4: Poder calorífico superior e inferior das biomassas.....	41
Tabela 5: Friabilidade média dos briquetes produzidos.	45
Tabela 6: Densidade aparente dos briquetes produzidos.	47
Tabela 7: Índice de Combustão (ICOM) dos briquetes produzidos.....	50
Tabela 8: Eficiência térmica de alta potência segundo métricas de desempenho do IWA	55
Tabela 9: Emissões totais dos gases CO, CO2 e PM2.5 durante o teste de fervura. ...	57

ÍNDICE

1. Introdução	1
1.1. Objectivos.....	2
1.1.1. Objectivo geral.....	2
1.1.2. Objectivos específicos.....	2
1.2. Justificativa.....	2
1.3. Metodologia.....	3
2. Revisão Bibliográfica	4
2.1. Energia.....	4
2.1.1. Classificação da energia.....	4
2.1.2. Biomassa.....	5
2.1.3. Matriz energética.....	8
2.2. Cultura do milho (<i>Zea mays L.</i>).....	11
2.2.1. Taxonomia e variedades da cultura do milho.....	11
2.2.2. Morfologia da planta do milho.....	12
2.2.3. Produção de milho no mundo.....	13
2.2.4. Produção do milho em Moçambique.....	13
2.2.5. Resíduos do milho.....	14
2.3. Pirólise.....	15
2.4. Processo de briquetagem.....	17
3. Parte Experimental	20
3.1. Materiais.....	20
3.2. Caracterização inicial da matéria-prima.....	21
3.2.1. Humidade <i>in natura</i>	21
3.2.2. Preparação das amostras.....	21
3.2.2.1. Secagem.....	21
3.2.2.2. Moagem.....	22
3.2.2.3. Peneiração.....	22
3.2.2.4. Carbonização.....	23
3.3. Caracterização física, química e térmica das amostras.....	24
3.3.1. Granulometria.....	24
3.3.2. Densidade a granel da biomassa.....	24
3.3.3. Teor de humidade.....	25
3.3.4. Teor de cinzas.....	25

3.3.5.	Teor de voláteis	26
3.3.6.	Teor de carbono fixo.....	26
3.3.7.	Poder calorífico.....	27
3.4.	Produção dos briquetes	28
3.5.	Caracterização física, mecânica e térmica dos briquetes	28
3.5.1.	Teor de humidade	28
3.5.2.	Densidade mássica/aparente	29
3.5.3.	Densidade energética.....	29
3.5.4.	Friabilidade	29
3.5.5.	Estabilidade dimensional dos briquetes.....	30
3.5.6.	Índice de combustão.....	30
3.6.	Ensaio em equipamentos de combustão de combustíveis sólidos.....	31
3.6.1.	Teste de fervura da água.....	31
4.	Resultados e Discussão	33
4.1.	Caracterização inicial da matéria-prima	33
4.1.1.	Humidade <i>in natura</i>	33
4.1.2.	Carbonização da matéria-prima	34
4.2.	Caracterização Físico Química e Térmica da Matéria-prima	35
4.2.1.	Distribuição Granulométrica	35
4.2.2.	Densidade a granel	36
4.2.3.	Análise imediata (Teor de cinzas, Teor de voláteis e Teor de carbono fixo)	38
4.2.3.1.	Teor de cinzas	38
4.2.3.2.	Teor de voláteis	39
4.2.3.3.	Teor de carbono fixo.....	40
4.2.4.	Poder Calorífico.....	41
4.2.4.1.	Poder calorífico superior.....	42
4.2.4.2.	Poder Calorífico Inferior.....	43
4.3.	Produção dos briquetes	43
4.4.	Caracterização Física, Mecânica e Térmica dos Briquetes.....	44
4.4.1.	Teor de Humidade	44
4.4.2.	Friabilidade	44
4.4.3.	Análise de estabilidade dimensional.....	46
4.4.4.	Densidade aparente e energética.....	47
4.4.5.	Índice de Combustão (ICOM)	48

4.5.	Ensaio em Equipamentos de Combustão de Combustíveis Sólidos	51
4.5.1.	Teste de Fervura de Água	51
4.5.1.1.	Emissões e perfil de temperatura do teste de fervura	55
5.	Conclusão	58
6.	Recomendações	59
7.	Referências Bibliográficas	60
8.	Anexos	A

1. Introdução

Com a crescente necessidade de recursos para a produção de energia sustentável, devido à transição dos combustíveis não renováveis para os renováveis, a utilização de biocombustíveis sólidos torna-se uma alternativa importante, uma vez que a biomassa é fonte de energia limpa e renovável. A biomassa é geralmente entendida como toda matéria orgânica não fóssil de origem vegetal, animal ou microbiana. Para fins energéticos, inclui plantas cultivadas ou nativas, resíduos agrícolas, florestas nativas ou plantadas, resíduos florestais ou de madeira, esterco de animais, esgotos urbanos, resíduos orgânicos do lixo doméstico, turfa, resíduos de matadouros e subprodutos das indústrias agrícolas (GOLDEMBERG, 1998; TRIPATHI, 1998).

A utilização de resíduos orgânicos para fins energéticos já é uma realidade. No entanto, para afirmar que determinado material é um bom gerador de energia, é necessário caracterizá-lo por meio de análises químicas e determinar o seu potencial energético (DE RAMOS e PAULA, 2011). A densificação dos resíduos é uma maneira eficiente de concentrar a energia disponível na biomassa. Os resíduos são comprimidos para adquirir uma forma definida, convertendo-se em briquetes, um material de maior valor comercial. Os briquetes surgiram como alternativa ao uso de lenha e podem ser utilizados para alimentar caldeiras em processos industriais, na combustão direta para geração de vapor e energia elétrica por cogeração, ou como matéria-prima na geração de energia renovável secundária, como a produção de biogás por conversão bioquímica e gás de síntese por conversão termoquímica. Também são usados em sistemas de aquecimento doméstico e na preparação de alimentos (FERNANDEZ *et al.*, 2017).

Alguns fatores que influenciam na produção e na qualidade dos briquetes são: temperatura e pressão de operação, densidades aparente e energética, humidade e tamanho dos resíduos. A densidade energética é um dos principais fatores que influenciam na qualidade do briquete, pois engloba as características químicas, teor de humidade e a quantidade de calor do briquete em uma única variável. É desejável obter briquetes com a maior densidade energética possível. Quanto à densidade aparente, quanto mais denso o briquete, maior a aglomeração das partículas e mais resistente é o

produto final, facilitando seu armazenamento e transporte. O teor de humidade influencia negativamente a queima da biomassa, pois quanto maior for, menor será a quantidade de energia global produzida durante a combustão.

1.1. Objectivos

1.1.1. Objectivo geral

- Estudar o potencial energético da casca e do sabugo de milho para a produção e uso de briquetes;

1.1.2. Objectivos específicos

- Carbonizar as amostras;
- Determinar as características físicas, químicas e térmicas das amostras *in natura* e carbonizadas;
- Produzir os briquetes;
- Efectuar a caracterização física, mecânica e térmica dos briquetes produzidos;
- Realizar ensaios em equipamentos de combustão de combustíveis sólidos (teste de fervura).

1.2. Justificativa

A busca por fontes de combustíveis renováveis como alternativa aos combustíveis fósseis poluentes e escassos, aliada à necessidade de diversificar a matriz energética atual do país, tem justificado a investigação do potencial energético proporcionado pelos diversos resíduos de origem orgânica, como os gerados no cultivo e processamento do milho, uma das culturas mais abundantes e cultivadas no país. A casca e o sabugo provenientes da planta do milho são biomassas que podem ser utilizadas como combustível na forma de briquetes, através da compactação. Os briquetes possuem a vantagem de serem facilmente armazenados e transportados, devido à sua forma uniforme e rígida, além de apresentarem alta densidade energética e serem combustíveis limpos.

Segundo CASA *et al.* (2003), a palha do milho pode levar mais de 3 anos para se decompor quando exposta ao ar livre. Portanto, uma alternativa para evitar o descarte inadequado desses resíduos, seja em lixeiras ou no solo, é o uso deles como combustível. Dessa forma, tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico, é de extrema importância investigar parâmetros ideais para agregar valor a esses resíduos. Isso permitirá produzir combustíveis com alto rendimento energético e requisitos satisfatórios para substituir lenha e carvão, atendendo às necessidades energéticas das populações e reduzindo os níveis de desflorestamento, que impactam significativamente a biodiversidade.

1.3. Metodologia

Para a realização do presente trabalho recorreu-se a:

- **Pesquisas bibliográficas:** em fontes credíveis como livros, artigos e relatórios científicos, monografias, dissertações;
- **Aquisição da matéria-prima:** principalmente na Agrimaçaroca, que é uma fazenda localizada no distrito de Vilankulo, província de Inhambane. Esta matéria-prima foi posteriormente armazenada no laboratório;
- **Experiências laboratoriais:** foram realizadas nos laboratórios do Departamento de Engenharia Química da Faculdade de Engenharia da Universidade Eduardo Mondlane e no laboratório do centro de teste e certificação de energia de biomassa (BECT: *Biomass Energy Certification and Testing Center*) localizada no campus da Universidade Eduardo Mondlane;
- **Tratamento e organização dos dados experimentais colectados;**
- **Elaboração do relatório final** que abrigou as informações consideradas relevantes para o trabalho, resultantes da pesquisa bibliográfica, os dados obtidos das experiências laboratoriais que, após o tratamento, foram analisados e organizados de modo a uniformizá-los para posterior discussão seguida da conclusão.

Contei especialmente com o apoio dos supervisores na contextualização, direcionamento das atividades laboratoriais e avaliação contínua do progresso na execução do trabalho.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Energia

Energia é a capacidade de realizar trabalho. A energia vem em várias formas, tais como movimento, calor, luz, energia eléctrica, química, nuclear e gravitacional. (DEMIREL, 2012).

2.1.1. Classificação da energia

De acordo com a sua origem, DEMIREL (2012) classifica a energia em:

- **Energia primária** – é a energia obtida ou extraída directamente do ambiente. Alguns exemplos deste tipo são a energia solar, hídrica, a biomassa, o petróleo, o gás natural, o carvão mineral.
- **Energia secundária** – é a energia obtida pela transformação ou conversão da energia primária. Alguns exemplos deste tipo são a electricidade, combustíveis como a gasolina, etanol, diesel e hidrogénio.

De acordo com a capacidade natural de reposição de recursos, as fontes de energia podem ser classificadas em **renováveis** e **não renováveis**.

- **Energias não renováveis** – são todas as fontes de energia presentes na natureza em quantidade limitada, ou seja, não podem ser renovadas num curto espaço de tempo se acabarem, pois, a sua recomposição na natureza ocorre de forma extremamente lenta. São alguns exemplos: energia nuclear e os combustíveis fósseis (petróleo, carvão mineral, gás natural).
- **Energias renováveis** – São energias provenientes de recursos naturais em quantidades ilimitadas e que podem ser renovadas ou reabastecidas naturalmente. Alguns exemplos são: energia solar, hídrica, eólica, geotérmica, das marés, das ondas e de biomassa. Essas energias são conhecidas pelo baixo impacto ambiental durante sua utilização.

2.1.2. Biomassa

O termo "biomassa" foi cunhado por volta de 1975 para descrever materiais que podem ser utilizados como combustível. Ele engloba toda matéria orgânica de origem vegetal ou animal, incluindo materiais resultantes de sua transformação natural ou artificial. De maneira mais abrangente, biomassa refere-se a toda a matéria existente em um dado momento na Terra. Do ponto de vista energético, biomassa compreende toda matéria orgânica (de origem animal ou vegetal) utilizável na produção de energia. Atualmente, o termo "biomassa" é aceito para designar produtos energéticos e matérias-primas renováveis originadas de matéria orgânica formada por processos biológicos. Excluem-se desse conceito os combustíveis fósseis e seus derivados orgânicos, embora também tenham origem biológica em épocas passadas (OMAR, 2003).

Segundo SPEIGHT (2019), biomassa difere dos combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás natural) por ser considerada qualquer matéria-prima orgânica renovável, mas é similar a eles por representar uma forma de energia solar armazenada, captada através da fotossíntese no crescimento das plantas. Exemplos de biomassa incluem resíduos florestais como madeira, incluindo casca, serragem e aparas; resíduos agrícolas como cascas, palhas, caules e folhas de diversas culturas como milho, arroz, trigo, coco, entre outras; resíduos do processamento agrícola como bagaço de cana-de-açúcar e polpa de papel; e resíduos sólidos orgânicos como restos vegetais e excrementos animais.

Conforme FORTES e RAIMUNDO (2020), a biomassa é renovável pois passa pelo ciclo do carbono, onde a decomposição ou a queima da matéria orgânica e seus derivados liberam dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera. As plantas, pela fotossíntese, transformam CO₂ e água em carboidratos que compõem sua massa viva, liberando oxigênio. Assim, o uso sustentável da biomassa não altera a composição média da atmosfera ao longo do tempo, sendo considerada uma fonte neutra de carbono.

A biomassa pode ser classificada em dois grupos: biomassa tradicional (lenha e resíduos naturais) e biomassa moderna (biocombustíveis líquidos e gasosos, briquetes e pellets). Com cerca de 34 milhões de hectares de superfície florestal, que representam 43% da

superfície nacional, o país possui um grande potencial para aproveitamento da bioenergia, especialmente da biomassa florestal (nativa ou residual) e das explorações agrícolas (FORTES e RAIMUNDO, 2020).

A biomassa pode ser convertida em combustíveis comerciais adequados para substituir os combustíveis fósseis. Estes podem ser utilizados para transporte, aquecimento, geração de eletricidade ou qualquer outra aplicação dos combustíveis fósseis. A conversão é realizada através de diversos processos que incluem tanto a conversão bioquímica quanto a térmica, para produzir combustíveis gasosos, líquidos e sólidos com alto teor energético, sendo facilmente transportáveis e, portanto, adequados para uso comercial (SPEIGHT, 2019).

- **Biomassa tradicional**

Corresponde à biomassa sólida, que inclui resíduos agrícolas, excrementos animais, produtos florestais e lenha combustível. Esta biomassa é frequentemente queimada de maneira ineficiente, em fogueiras abertas poluentes, fogões ou fornos, para fornecer energia térmica para cozinhar, conforto e para processos agrícolas e industriais em pequena escala, principalmente em áreas rurais de países em desenvolvimento (REN21, 2012).

A biomassa tradicional em Moçambique é composta principalmente por lenha e carvão vegetal. A lenha é um dos combustíveis mais antigos ainda em uso e continua sendo amplamente utilizado em muitos países. É composta principalmente de celulose, resinas, água e sais minerais. É utilizada principalmente como carvão vegetal e na geração de energia elétrica, com o restante sendo distribuído nos setores residencial, agropecuário e industrial (VIANA *et al.*, 2012).

A lenha é utilizada nas zonas rurais, enquanto o carvão vegetal é mais comum nas áreas periurbanas, fornecendo energia para 76% das famílias na capital de Moçambique, Maputo, e na cidade vizinha de Matola (AQUINO *et al.*, 2018). Moçambique é um dos dez maiores produtores de carvão vegetal do mundo. Estima-se que os resíduos da atividade florestal em nível nacional poderiam gerar 750 GWh de energia (ALER, 2017).

Além disso, estima-se que é possível produzir 3,1 milhões de barris equivalentes de petróleo por dia em biocombustíveis sem afetar a produção agrícola ou colocar em risco a biodiversidade (GUEIFÃO *et al.*, 2013; VAZ *et al.*, 2011).

- **Biomassa Moderna**

De acordo com FORTES e RAIMUNDO (2020), uma das grandes particularidades e vantagens da biomassa é a versatilidade na sua utilização como combustível, o que a torna única e adequada para diversas aplicações. Conforme o REN21 (2012), a biomassa moderna compreende a biomassa sólida, gasosa ou líquida, que possui aplicações modernas como aquecimento de espaços, geração de energia, produção combinada de calor e eletricidade, e transporte, em contraste com a biomassa tradicional.

A bioenergia moderna envolve a combustão direta da biomassa ou a conversão da biomassa em combustíveis mais convenientes, como a pirólise e gaseificação da biomassa sólida para produzir combustíveis líquidos e gasosos; a digestão anaeróbia de materiais biomássicos para produção de biogás; a transesterificação de óleos vegetais para a produção de biodiesel; e a fermentação de açúcar para etanol (REN21, 2012). Na **Figura 1**, é possível perceber as diferentes ramificações das possíveis conversões da biomassa em busca de modernização. O círculo vermelho representa o processo de densificação ou briquetagem, que será abordado mais adiante.

No atual cenário nacional, a inclusão da biomassa derivada de resíduos urbanos e industriais pode resolver simultaneamente os problemas energéticos e de gestão de resíduos. É sustentável a relação entre a produção de alimentos, geração de energia e preservação do meio ambiente. O uso de tecnologias eficientes na geração de biocombustíveis reduz os impactos ambientais e a dependência dos combustíveis fósseis, além de promover serviços de maior qualidade e contribuir para o aumento da eficiência de conversão e da sustentabilidade energética, especialmente em áreas rurais (FORTES e RAIMUNDO, 2020).

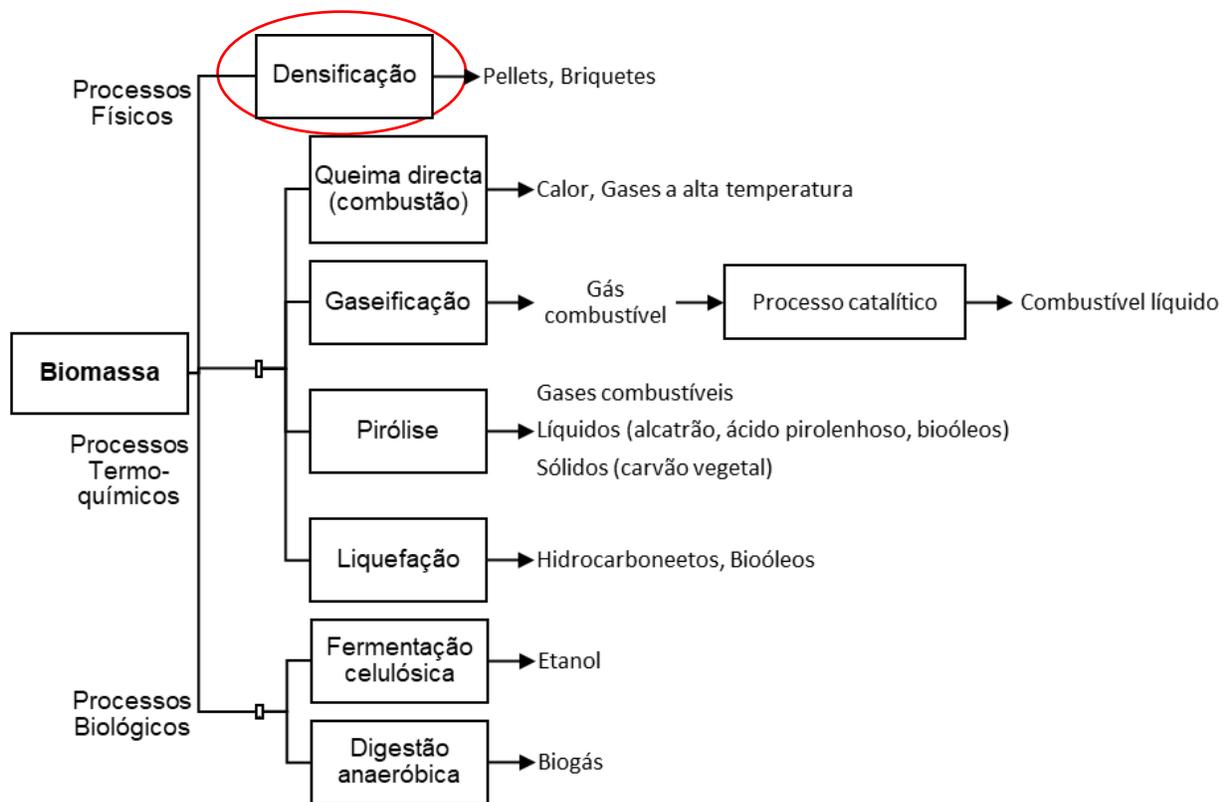


Figura 1: Processos de conversão de biomassa e seus produtos. (fonte: adaptado de VIEIRA, 2014).

2.1.3. Matriz energética

O conceito de matriz tem origem na matemática e refere-se essencialmente a uma tabela composta por um número definido de linhas e colunas. Devido à prática comum de listar as fontes de energia de um país ou região e as quantidades de energia disponíveis por fonte, seja anualmente, mensalmente, ou em outras unidades temporais, em tabelas, os técnicos do sector de energia, muitos dos quais com formação em engenharia e ampla experiência em cálculos matemáticos usando matrizes, passaram a denominar essas tabelas que representam a oferta de energia de um país como "matriz energética" daquele país. Em resumo, é uma representação quantitativa da oferta de energia, ou seja, da quantidade de recursos energéticos oferecidos por um país para ser transformada, distribuída e consumida em seus processos produtivos (BANDEIRA, 2012).

A base da matriz energética actual no mundo é predominantemente composta por combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás natural), os quais são recursos finitos (não renováveis) e altamente poluentes. Os combustíveis fósseis são a principal fonte de emissões de gases de efeito estufa (GEE) e de compostos sulfurados, responsáveis pela chuva ácida. Vários países têm se comprometido com protocolos ambientais voltados para a incorporação de fontes alternativas de energia e para a maximização de sua utilização. A valorização da biomassa para fins energéticos surge como uma alternativa para estimular as economias agrícolas e rurais, impulsionando o desenvolvimento regional. Além da redução das emissões de GEE, a diversificação da matriz energética, com base no uso racional das fontes disponíveis e na produção de matéria-prima dedicada, é uma questão de crucial importância para garantir o desenvolvimento regional (MARAFON *et al.*, 2016).

- **Matriz energética de Moçambique**

As energias renováveis são de longe a fonte de energia mais importante em Moçambique, tanto em termos de produção quanto de consumo. A principal fonte de energias renováveis é a biomassa tradicional (lenha e carvão vegetal), consumida principalmente pelo sector familiar (MINISTÉRIO DE ENERGIA, 2007).

Entre os anos de 1972 e 2014, o perfil energético de Moçambique foi caracterizado conforme a **Figura 2**. Pode-se observar que a biomassa permaneceu como a principal fonte de energia ao longo dos anos. Houve um aumento exponencial na produção de energia primária a partir de 1997, principalmente devido ao crescimento na produção de energia hídrica, ano em que a hidroelétrica de Cahora Bassa voltou a entrar em funcionamento.

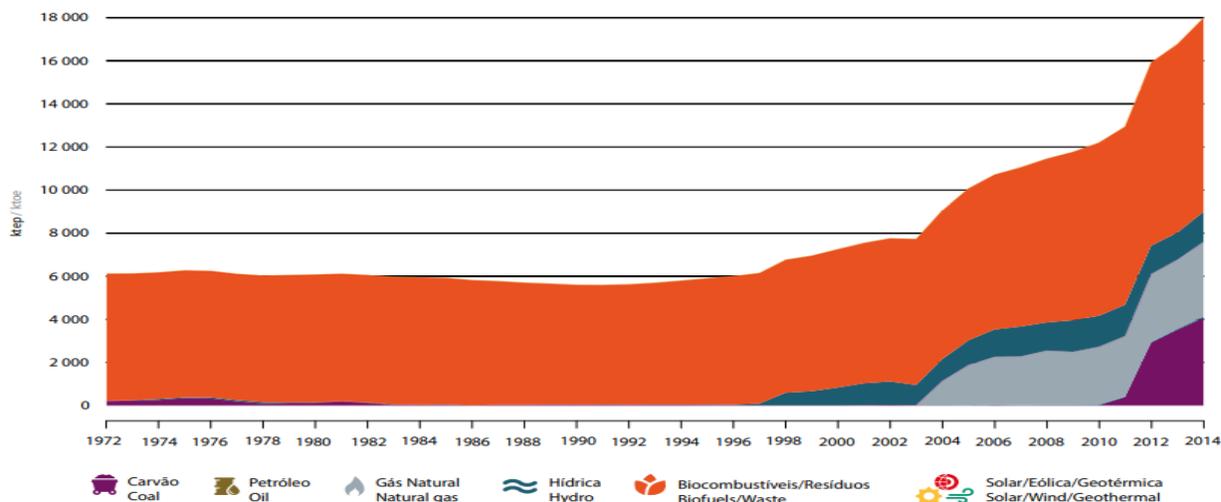


Figura 2: Produção de energia primária em Moçambique. (fonte: ALER, 2017)

Ainda de acordo com o ALER (2017), a quantidade total de energia produzida no ano de 2014 foi de 17.989 ktep, enquanto a oferta total de energia primária, que inclui importações, exportações, bunkers internacionais e variações de estoque, foi de 11.636 ktep. Destes, 75,8% correspondem a energia de biomassa.

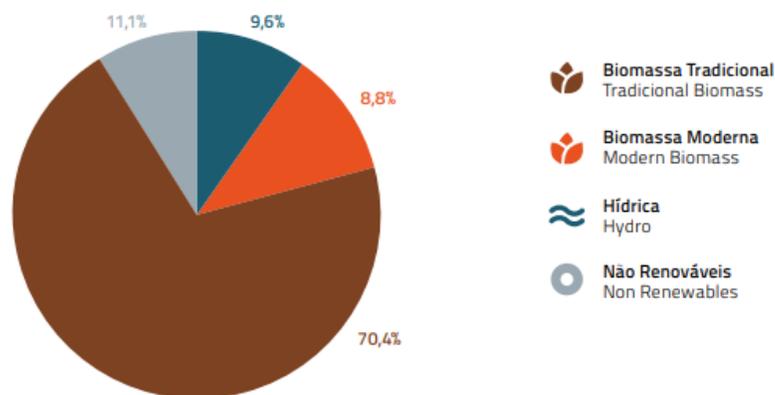


Figura 3: Consumo de energia em Moçambique por fonte (Fonte: ALER, 2017)

De acordo com o ALER (2017), a **Figura 3** acima refere-se ao consumo de energia em Moçambique. Analisando por fonte, atualmente, apenas a energia hidroelétrica, a biomassa moderna e a biomassa tradicional contribuem para o consumo de energias renováveis no país. A biomassa continua a representar indiscutivelmente a maior parcela, com os recursos de biomassa tradicional e biomassa moderna juntos correspondendo a 79,2% do consumo total de energia. O uso predominante da biomassa

em Moçambique continua sendo para consumo doméstico, aquecimento de água e preparação de alimentos.

2.2. Cultura do milho (*Zea mays L.*)

O milho (*Zea mays*) é uma planta da família das gramíneas (*Proaceae*), cultivada globalmente e uma das culturas cerealíferas mais importantes mundialmente. Além de ser fundamental na alimentação humana, o milho também é essencial na dieta animal e serve como matéria-prima para a fabricação de diversos produtos industriais, como amido de milho, maltodextrinas, óleo de milho, xarope de milho, além de produtos derivados de fermentação e destilação. Recentemente, o milho tem sido utilizado na produção de biocombustíveis (TRIPATHI *et al.*, 2011).

De acordo com BROWN *et al.* (1985), a teoria mais aceita sobre a origem do milho indica que ele teve sua origem no México, onde também foi domesticado. O milho mais antigo registrado arqueologicamente tem aproximadamente 7000 anos. Acredita-se que o teosinto (*Zea mexicana*) seja o progenitor silvestre do milho moderno.

2.2.1. Taxonomia e variedades da cultura do milho

De acordo com TRIPATHI *et al.* (2011), a taxonomia da planta do milho é descrita na Tabela 1.

Tabela 1: Taxonomia da cultura do milho (fonte: TRIPATHI *et al.*, 2011).

Taxonomia do milho	
Reino	<i>Plantae</i>
Divisão	<i>Magnoliophyta</i>
Classe	<i>Liliopsida</i>
Ordem	<i>Poales</i>
Família	<i>Proaceae</i>
Gênero	<i>Zea</i>
Espécie	<i>Mays</i>

Existem várias variedades de milho, mas de acordo com a BRITANNICA (2023), as cinco variedades mais produzidas para fins comerciais são diferenciadas pela textura do grão:

O **milho dentado** é cultivado principalmente como ração animal e para fabricação de alimentos. É caracterizado por uma depressão na coroa do grão, causada pela desidratação desigual do amido duro e macio que compõe o grão (BRITANNICA, 2023).

O **milho duro** possui endosperma duro em maior proporção em relação ao amiláceo. É utilizado na fabricação de condimentos, cervejas, massas e como alimento básico. Possui aspecto liso, firme e brilhante, com coloração laranja-avermelhada (DEON, 2021).

O **milho farináceo** é composto principalmente por amido macio, com grãos macios, farinhentos e facilmente moídos. É uma importante fonte de farinha de milho, com grãos de coloração branca e amarela (BRITANNICA, 2023; DEON, 2021).

O **milho doce** ou milho verde é comumente vendido fresco, congelado ou enlatado como vegetal. Possui sementes enrugadas e translúcidas, onde o açúcar vegetal não é convertido em amido como em outros tipos. Apresenta coloração amarela e é amplamente utilizado para consumo humano (BRITANNICA, 2023; DEON, 2021; BROWN *et al.*, 1985).

A **pipoca** é um tipo extremo de milho duro, caracterizado por espigas menores e grãos pequenos e duros com coloração amarelo-alaranjada. É desprovida de amido macio, e o aquecimento faz com que a umidade e o óleo nas células se expandam, causando a explosão dos grãos (BRITANNICA, 2023; DEON, 2021).

2.2.2. Morfologia da planta do milho

A planta do milho é uma gramínea anual alta, com caule robusto, ereto e sólido. Possui folhas grandes e estreitas com margens onduladas, dispostas alternadamente em lados opostos do caule. As flores estaminadas (masculinas) são carregadas no pendão, que termina o eixo principal do caule. As inflorescências pistiladas (femininas), que amadurecem para se tornarem espigas comestíveis, são pontas com eixo espessado, apresentando espiguetas pares dispostas em fileiras longitudinais; cada par de

espiguetas normalmente produz duas fileiras de grãos. Cada espiga é cercada por folhas modificadas chamadas palhas ou cascas (BRITANNICA, 2023).

Pode-se ver na **Figura 4** uma melhor representação da descrição acima efectuada.



Figura 4: Morfologia da planta do milho. (fonte: @agriconteudos – disponível em <https://www.instagram.com/p/CnaAkfGu7vC/?iashid=MzRIODBiNWFIZA==>)

2.2.3. Produção de milho no mundo

De acordo com a FAOSTAT (2023), em 2021 foram produzidos mais de 1,210 bilhões de toneladas de milho no mundo, com um rendimento médio de aproximadamente 5,87 toneladas por hectare, representando um crescimento de 7,5% na produção desde 2018 até 2021. Segundo a FAS/USDA (2023), até setembro de 2023, a produção mundial de milho atingiu cerca de 1,214 bilhões de toneladas. Os maiores produtores deste cereal foram os Estados Unidos, a China e o Brasil, responsáveis por 65% da produção total de milho. Com base nestes dados, percebe-se um crescimento contínuo na produção mundial de milho nos últimos anos, sem sinais de redução ou estagnação.

2.2.4. Produção do milho em Moçambique

Moçambique é um país localizado ao longo da costa leste da África Austral, com sua economia baseada principalmente na agricultura. A cultura do milho (*Zea mays* L.) é a mais importante, sendo cultivada principalmente em regime de sequeiro e com rendimentos dependentes das condições meteorológicas (MABILANA *et al.*, 2012). O milho é a cultura agrícola de maior importância em Moçambique, ocupando cerca de um

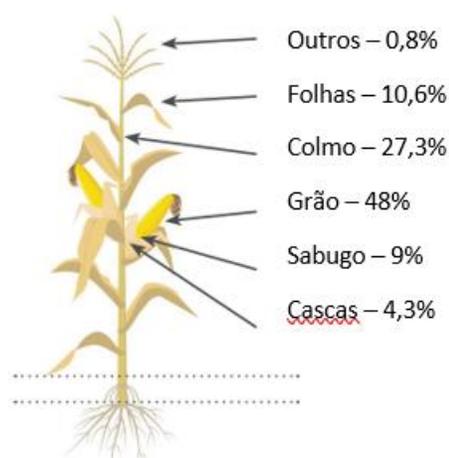
terço da área total cultivada no país. Esta cultura é tanto uma cultura alimentar básica quanto uma cultura de rendimento, sendo produzida na região sul (nas províncias de Maputo, Gaza e Inhambane), principalmente para subsistência (MUDEMA *et al.*, 2012).

Segundo AMARAL *et al.* (2019), em 2015 cerca de 50% da produção de milho ocorreu nas províncias de Tete, Zambézia e Manica, tornando-as as maiores produtoras de milho em Moçambique. De acordo com dados do INE (2022), a produção de milho, um dos alimentos mais cultivados em Moçambique, aumentou de 1,31 milhões de toneladas para 1,83 milhões de toneladas no período de 2017 a 2021, representando um crescimento de 40%. O rendimento médio foi de aproximadamente 0,8 toneladas por hectare.

2.2.5. Resíduos do milho

Conforme GELETHUKA *et al.* (2020), os resíduos da produção de milho em grão estão representados na **Figura 5**, onde apresentam a seguinte distribuição

- Os colmos representam cerca de 52,5% do peso total dos resíduos. Assim, os colmos compõem 27,3% da massa da planta inteira, incluindo os grãos. Os mesmos valores são apresentados abaixo para outras partes dos resíduos de milho.
- Folhas – 20,0% (10,6%);
- Sabugos – 17,5% (9,0%);
- Cascas – 8,5% (4,3%);
- Outras partes – 1,5% (0,8%).



*Figura 5: As principais partes da planta do milho e suas proporções mássicas (fonte: GELETHUKA *et al.* (2020)).*

De acordo com BURGESS *et al.* (2001), em um estudo realizado por um período de 2 anos no Canadá (país com temperaturas baixas durante o inverno), os resíduos do milho deixados na superfície do solo perderam cerca de 65% da sua massa inicial enquanto que os resíduos enterrados de 5 a 20 cm de profundidade perderam cerca de 87-89% da sua massa inicial. Feito ainda um estudo para cada resíduo, notou-se que ao fim de

dois anos, na superfície do solo, o sabugo perdeu apenas 30% da sua massa inicial enquanto que as cascas perderam quase 75% da sua massa inicial.

Com base nisso, pode-se afirmar que são necessários mais de 2 anos para que os resíduos de milho deitados na superfície do solo se decomponham na totalidade, podendo este tempo perfazer um período de 5 anos ou mais. De acordo com SILVA *et al.* (2022), a proporção em massa da espiga de milho é composta por cerca de 80% de grãos de milho, 14% de sabugo e aproximadamente 6% de cascas. O factor residual, ou seja, a proporção de massa entre os resíduos da planta do milho e os grãos de milho) depende de muitos factores, principalmente em uma cultura híbrida, mas em média é de 1,3 (GELETHUKA *et al.*, 2020).

Logo, pelos dados do INE (2022), que indicam uma produção de 1,83 milhões de toneladas de milho, é possível obter um valor estimado dos resíduos da planta do milho partindo do factor residual de 1,3 indicado por GELETHUKA *et al.* (2020). Assim em 2021, Moçambique gerou cerca de 2,37 milhões de toneladas de resíduos de milho. Portanto, para o presente estudo, escolheu-se as cascas e sabugo de milho (ilustradas na **Figura 6**) como fonte de biomassa para a produção de briquetes carbonizados.



Figura 6: Cascas e sabugo de milho descartadas. (fonte: [www.shutterstock.com](https://www.shutterstock.com/image-photo/sweet-corn-cobs-large-waste-1741423175) disponível em <https://www.shutterstock.com/image-photo/sweet-corn-cobs-large-waste-1741423175>)

2.3. Pirólise

O termo 'pirólise' é utilizado para caracterizar a decomposição térmica de materiais que contêm carbono na ausência de oxigênio. Dessa forma, a madeira, os resíduos agrícolas ou qualquer outro tipo de material orgânico se decompõem, originando três fases: a

primeira sólida (o carvão vegetal), a segunda gasosa e a terceira líquida, comumente designada como fração pirolenhosa (extrato ou bio-óleo). O processo de pirólise é amplamente utilizado na produção de carvão vegetal, que pode atingir um rendimento de 40% em massa em relação à matéria-prima (ZANATTA, 2012).

A pirólise pode ser classificada de acordo com a taxa de aquecimento aplicada durante o processo em **pirólise rápida** e **pirólise lenta**. Na **pirólise rápida**, a taxa de aquecimento é muito alta e o tempo de residência é menor; esses parâmetros aumentam a fração de rendimento do bio-óleo. Por outro lado, a **pirólise lenta** possui taxas de aquecimento mais baixas, resultando em maior rendimento de sólidos ou carvão vegetal (AMER e ELWARDANY, 2020).

A pirólise lenta também pode ser classificada de acordo com a temperatura de operação do processo e o tempo de residência, em **carbonização** e **torrefação**. O processo de carbonização utiliza temperaturas de operação mais altas e tempos de residência mais longos do que a torrefação. A **carbonização** visa produzir um produto rico em carbono fixo (e, conseqüentemente, oferece baixa densidade energética), enquanto a **torrefação** visa maximizar a densidade energética (e, portanto, não proporciona um elevado teor de carbono fixo). Assim, a diferença entre esses dois tipos de pirólise lenta reside na finalidade do produto final requerido (BASU, 2013; AMER e ELWARDANY, 2020).

A **carbonização** é a forma mais antiga de pirólise e tem sido utilizada por milhares de anos. A biomassa é aquecida lentamente na ausência de oxigênio a uma temperatura relativamente baixa (~400°C) por um período relativamente longo (mais de duas horas e podendo permanecer dias) (BASU, 2013; AMER e ELWARDANY, 2020). Na **Figura 7**, é possível verificar o processo completo de carbonização com todas as suas etapas até que os produtos desejados sejam alcançados. Também mostra como a biomassa deve se apresentar em cada etapa.

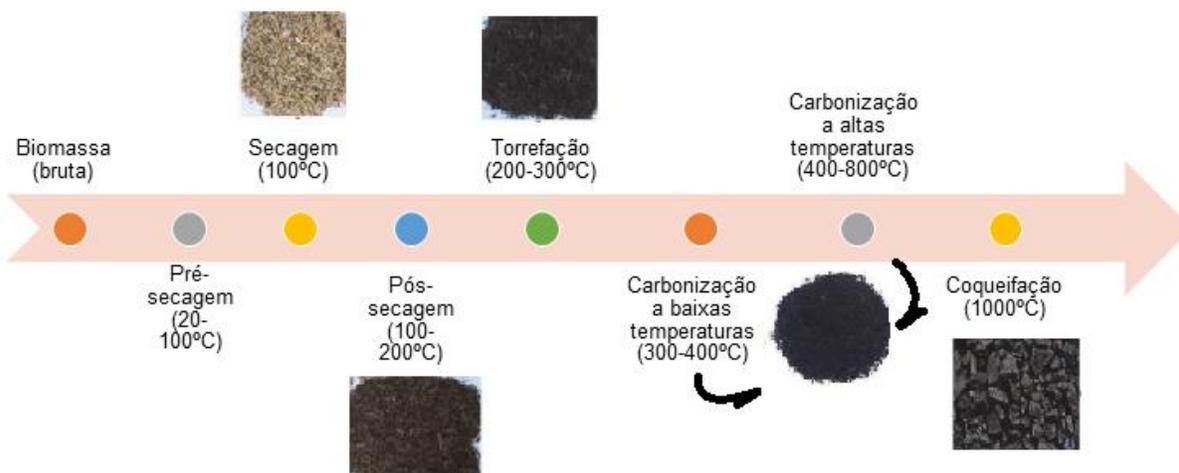


Figura 7: Processos de carbonização completo incluindo seus produtos (fonte: adaptado de AMER e ELWARDANY, 2020).

Ainda de acordo com AMER e ELWARDANY (2020), durante a fase de carbonização a baixas temperaturas, tanto a hemicelulose quanto a celulose se decompõem completamente, enquanto a lignina começa a degradar-se. A estrutura da biomassa continua a quebrar-se e decompor-se, resultando em um teor de carbono fixo ligeiramente mais rico em comparação com a torrefação. Se o aquecimento continuar acima de 400°C (carbonização a altas temperaturas), obtém-se um carvão vegetal muito rico em carbono. O grau de degradação da lignina depende da temperatura final.

De acordo com o estudo realizado por KATYAL *et al.* (2003), ao analisar o efeito da temperatura e o rendimento de carbonização em várias taxas de aquecimento, constatou-se que o rendimento de carbonização atingiu aproximadamente 25% a 400°C para todas as taxas, sendo que após essa temperatura o rendimento diminuiu para cerca de 20%. Em outras palavras, a 400°C, ocorreu a eliminação de 75% da massa inicial correspondente aos voláteis, enriquecendo assim a biomassa com alto teor de carbono fixo.

2.4. Processo de briquetagem

A briquetagem, como descrita no texto, refere-se ao processo patenteado por William Easby em 1848 nos Estados Unidos. Este processo permite a transformação de frações finas de carvão mineral, anteriormente consideradas rejeitos, em aglomerados sólidos de diferentes formas e tamanhos por meio da aplicação de pressão. Esses briquetes

resultantes têm alto valor como combustível para máquinas a vapor, forjas, culinária e outras aplicações industriais. Inicialmente, apesar da eficácia do processo, a briquetagem não recebeu grande atenção devido à abundância de lenha e ao surgimento do petróleo como fonte de energia mais acessível. Além disso, as preocupações ambientais na época eram mínimas. Por esses motivos, o uso dessa tecnologia diminuiu ao longo dos anos (CARVALHO e BRINCK, 2010).

No entanto, com o aumento da necessidade de diversificação da matriz energética e a crescente preocupação com o meio ambiente, especialmente devido ao encarecimento dos combustíveis fósseis e à busca por alternativas renováveis, o briquete voltou a ganhar relevância. Actualmente, ele está sendo reintroduzido em várias indústrias e na sociedade como uma alternativa viável e sustentável para o aproveitamento de recursos energéticos, reduzindo o desperdício de finos de carvão mineral e contribuindo para a eficiência energética global. Essa evolução demonstra como tecnologias antigas podem ser revalorizadas e adaptadas às necessidades contemporâneas, refletindo uma maior conscientização ambiental e uma busca por soluções energéticas mais sustentáveis (FERNANDES, 2012).

A briquetagem consiste na aglomeração de partículas finas por meio de pressão, podendo ou não adicionar algum ligante e realizar tratamento térmico posterior, o que permite obter um produto não apenas compactado, mas também com forma, tamanho e parâmetros mecânicos adequados. A forma mais econômica para a compactação de finos de carvão vegetal é com adição de ligante. A redução de volume do material facilita o transporte e o armazenamento econômico (QUIRINO e BRITO, 1991; CARVALHO e BRINCK, 2010).

MORO (1987), definiu sete etapas para o processo de briquetagem, sendo as mesmas:

Escolha do material: Esta etapa refere-se à seleção da matéria-prima desejada para a produção dos briquetes, considerando o tipo de briquete a ser fabricado e as características do material a ser utilizado (como tamanho das partículas, densidade e humidade).

Secagem: Consiste na remoção da umidade dos resíduos para garantir que o material possua a umidade adequada para o processo.

Moagem dos resíduos: Tem como objetivo triturar os resíduos, reduzindo o tamanho das partículas para facilitar o processo e a ação de aglutinantes, se necessários.

Granulometria e classificação: Promove a separação das partículas geradas na moagem em diferentes granulometrias por meio de peneiramento, selecionando as partículas a serem utilizadas e eliminando as indesejáveis no processo.

Mistura com aglutinante: O aglutinante é responsável pela aderência dos resíduos. Nesta etapa, escolhe-se o tipo e a qualidade do aglutinante, o que influencia diretamente o custo do processo. Nem sempre essa etapa é necessária, pois alguns resíduos podem aglutinar-se apenas com a plastificação da lignina em ambiente de alta pressão e temperatura.

Prensagem: A prensagem confere resistência aos briquetes. Envolve a aplicação de altas pressões e temperaturas à mistura de resíduos e ligantes por meio de prensas. Essa etapa define a forma final do briquete, conforme o molde utilizado.

Armazenamento e embalagem: Os briquetes devem ser armazenados em silos para manter um estoque intermediário entre a produção e a distribuição. Posteriormente, serão embalados para consumo.

Segundo CTCN (2020), existem dois tipos de briquetes: o **carbonizado** e **não carbonizado**;

- O briquete **carbonizado** – feito de biomassa que foi submetida à carbonização. A matéria-prima carbonizada é posteriormente misturada com um agente aglutinante e submetida à compactação para formar briquete. Os briquetes carbonizados têm a vantagem de possuir um elevado valor calórico, queimam com o mínimo de fumaça, contêm menor teor de cinzas e não podem ser destruídos por insectos como térmitas. Por estas razões, eles são preferidos para uso por residências para cozinhar, aquecer ambientes e outras aplicações.

- O briquete **não carbonizado** – é processado diretamente utilizando diferentes tipos de biomassa, passando por vários processos que incluem a prensagem, também conhecida como compactação, utilizando equipamentos de alta pressão. São mais econômicos (por unidade de massa) e queimam por mais tempo (até 6 horas) em comparação com o carvão vegetal. Por isso, indústrias e instituições como fábricas, escolas, hospitais e prisões os preferem.

Por outro lado, de acordo com DANTAS (2012) e FERNANDES (2012), o briquete é bastante vantajoso visto que:

- É um forte substituto da lenha e do carvão vegetal, evitando assim o desmatamento das florestas uma vez que pode ser produzido a partir de resíduos agrícolas;
- É de fácil manuseio e armazenamento;
- Possui alto poder calorífico, com maior temperatura de chama, pouca produção de fumaças e cinzas;
- Não é um produto sazonal, não precisa de monocultura e necessita de menor mão-de-obra no manuseio;
- Diminui a emissão dos GEE como o enxofre, o fósforo e o dióxido de carbono;

3. Parte Experimental

3.1. Materiais



Figura 8: Matéria-prima usada no presente trabalho. (A – Sabugo de milho, B – casca de milho, C – Película de castanha de caju, D – Resíduos de processamento de algodão).

A matéria-prima (casca e sabugo de milho (**Figura 8 – A e B**)) foi obtida principalmente da fazenda Agrimaçaroca, localizada no distrito de Vilankulo, na província de Inhambane. Quanto aos aglutinantes, a película da castanha de caju (**Figura 8 – C**) foi adquirida dos vendedores de castanha no distrito de Macia, situado na província de Xai-Xai, e os resíduos do processamento de algodão (**Figura 8 – D**) provêm da fábrica *Mozambique Cotton Manufacturers* (MCM), localizada no distrito de Marracuene, província de Maputo. Após a coleta de todos os resíduos, estes foram armazenados no laboratório de controle automático da Faculdade de Engenharia da Universidade Eduardo Mondlane.

3.2. Caracterização inicial da matéria-prima

3.2.1. Humidade *in natura*

A determinação da humidade das amostras, no seu estado natural, foi feita com recurso a um equipamento designado por analisador de humidade, de marca Sartorius, modelo MA 100 (**Figura 9**). Este equipamento possui uma unidade de pesagem, na qual se coloca 1g da amostra que se pretende determinar a sua humidade, uma unidade de aquecimento de halogénio, que ocasiona a secagem da amostra a 105°C, de modo a determinar a sua humidade pelo método de perdas por secagem (consiste em determinar a quantidade, em massa, da humidade presente na amostra, e relacionar com o peso total da amostra, determinando assim o percentual de humidade que a amostra possui).



Figura 9: Analisador de humidade.

3.2.2. Preparação das amostras

3.2.2.1. Secagem

A secagem das amostras é realizada para reduzir o teor de humidade natural e evitar comprometimento de sua integridade durante diversas atividades, devido à ação de

microrganismos ou condições climáticas adversas que poderiam alterar suas características químicas e físicas.

Segundo DIAS *et al.* (2012), a secagem geralmente não é necessária para materiais com humidade relativamente baixa, como casca de café, de amendoim e de arroz. Materiais com humidade considerável, como palha de coco, capim e bagaço de cana-de-açúcar, não requerem secagem. Neste caso, as amostras não precisaram ser secas, pois todas apresentavam baixa humidade natural.

3.2.2.2. Moagem

O tamanho das partículas é crucial para determinar a qualidade e durabilidade de um *pellet* ou briquete. Quanto menor o tamanho das partículas, menor será a porosidade do produto final e, conseqüentemente, maior será sua densidade (DIAS *et al.*, 2012).



Figura 10: A- Moinho de facas; B- Moinho ultracentrífugo

3.2.2.3. Peneiração

A peneiração é um método clássico frequentemente utilizado para realizar a análise granulométrica de uma amostra. Consiste em fazer a amostra passar por peneiras dispostas em série na vertical, uma sobre a outra, com aberturas que diminuem de tamanho de cima para baixo. Essas peneiras são colocadas em um vibrador, e o conjunto todo, composto pelas peneiras e pelo vibrador, é comumente conhecido como 'Peneira vibratória' (Figura 11).



Figura 11: A – Série de peneiros; B – Peneiro vibratório – constituído pelo vibrador, na base, e a série de peneiros, que é colocada sobre vibrador

3.2.2.4. Carbonização

A carbonização é um processo de queima da biomassa na ausência de oxigênio, com o objetivo de aumentar seu teor de carbono fixo, sendo comumente utilizado na produção de carvão vegetal. Para realizar essa operação, uma certa quantidade de biomassa foi submetida a altas temperaturas de até 400°C em intervalos de 1 a 3 horas dentro de um reator de metal (**Figura 12 – B**), utilizando uma mufla (**Figura 12 – A**) da marca Termolab – Fornos Elétricos, modelo MLM. Após a carbonização, o reator foi deixado esfriar até atingir 150°C para determinar o melhor tempo de residência. Em seguida, o reator com a biomassa foi retirado da mufla e deixado esfriar até a temperatura ambiente. O rendimento da carbonização foi determinado conforme a fórmula (1):

$$R_c = \frac{M_i - M_f}{M_i} \times 100\% \quad (1) \quad \text{Onde:}$$

R_c – Rendimento de carbonização (em %); M_f – Massa final (em g); M_i – Massa inicial (em g).



Figura 12: Equipamento usado para realização da carbonização; A – Mufla; B – Reactor de metal.

3.3. Caracterização física, química e térmica das amostras

3.3.1. Granulometria

A granulometria foi determinada através da operação de peneiração realizada durante a preparação da amostra. Este procedimento envolve a obtenção das frações de massa da amostra retida em cada um dos peneiros utilizados na etapa de peneiração. Para isso, utilizou-se uma balança analítica da marca Denver Instrument, modelo M-310 (**Figura 13**). Com esta balança, foi pesada a quantidade de amostra retida em cada peneiro, e esse peso foi dividido pelo peso total da amostra.



Figura 13: Balança analítica.

3.3.2. Densidade a granel da biomassa



Figura 14: Erlenmeyers e balões volumétricos usados na determinação da densidade a granel.

A determinação da densidade a granel envolve colocar uma quantidade específica de biomassa em um recipiente de volume conhecido, até que ele esteja completamente preenchido pela biomassa. Em seguida, determina-se a massa da biomassa no recipiente e calcula-se a razão entre essa massa e o volume do recipiente. Para esse propósito, foram utilizados três erlenmeyers de volume igual e três balões volumétricos de volume igual (**Figura 14**).

Segundo DIAS *et al.* (2012), a densidade é um parâmetro crucial na compactação, pois quanto maior a densidade, maior a relação energia/volume. Além disso, uma alta densidade facilita o transporte, manuseio e armazenamento do material.

3.3.3. Teor de humidade

O teor de humidade é definido como a massa de água presente na biomassa e pode ser expresso tanto na base húmida quanto na base seca. No presente estudo, o teor de humidade é determinado na base seca. O método utilizado para determinar a humidade é o mesmo aplicado na determinação da humidade natural.

3.3.4. Teor de cinzas

Segundo CHEN *et al.* (2009), o teor de cinzas refere-se aos elementos inorgânicos (como cálcio, potássio, ferro, entre outros minerais) presentes na biomassa que não são volatilizados durante a combustão, resultando em cinzas residuais após a queima. A determinação foi realizada conforme o protocolo E-1755-01 da norma ASTM, que envolve a pesagem de 1g da biomassa seca e sua inserção em uma mufla (modelo MLM da marca Termolab – Fornos Elétricos). Inicialmente, a mufla é aquecida a 250°C a uma taxa de aquecimento de 10°C/minuto e mantida nessa temperatura por 30 minutos. Posteriormente, a temperatura é elevada para 575°C e mantida até que todo o carbono seja queimado (cerca de 14 horas a essa temperatura). Após o resfriamento das amostras, estas são pesadas, e o teor de cinzas é calculado utilizando a fórmula:

$$\text{Teor de cinzas} = \frac{m_2 - m_1}{m_o} \times 100\% \quad (2)$$



Figura 15: Determinação do teor de cinzas: (A) Cadinhos na mufla; (B) Mufla em funcionamento; (C) Cadinhos no dessecador.

3.3.5. Teor de voláteis

O teor de materiais voláteis está relacionado à reatividade da biomassa à queima, ou seja, à facilidade de ignição da biomassa devido à volatilização de substâncias durante o aquecimento. Consiste nos vapores condensáveis e não condensáveis de um combustível liberados durante sua queima (MCKENDRY, 2002). A determinação foi realizada de acordo com a norma ASTM E-872, que envolve a queima da biomassa a uma temperatura padrão de 950°C em uma mufla (modelo MLM da marca Termolab – Fornos Elétricos). O procedimento requer que cada cadinho contendo 1 g da amostra de biomassa seja inserido na mufla e mantido a 950 °C por 7 minutos. O teor de voláteis é determinado utilizando a fórmula (3):

$$\text{Teor de voláteis} = \left(1 - \frac{m_2 - m_1}{m_0}\right) \times 100\%, \quad (3)$$

Onde:

m_2 – representa a massa do cadinho contendo a amostra volatilizada (g); m_1 – massa do cadinho vazio (g); m_0 – Massa da amostra no início (g).

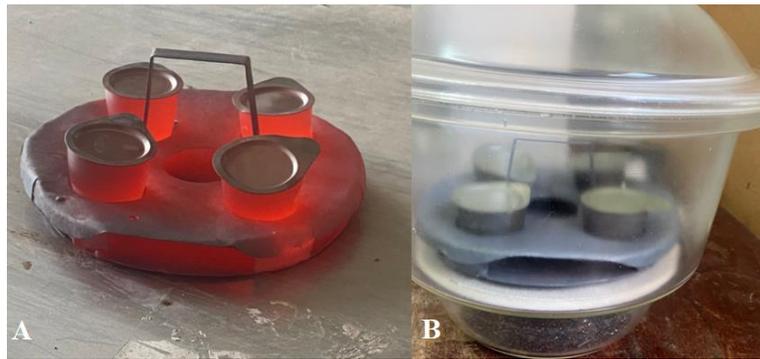


Figura 16: Determinação do teor de voláteis: (A) Cadinhos de níquel imediatamente após serem retirados da mufla; (B) Cadinhos de níquel no dissecador.

3.3.6. Teor de carbono fixo

O teor de carbono fixo (CF) representa a massa que permanece após a liberação dos compostos voláteis, cinzas e humidade (MCKENDRY, 2002). Quando a amostra está na

base seca, o teor de carbono fixo depende apenas dos compostos voláteis e das cinzas presentes nela.

3.3.7. Poder calorífico

O Poder Calorífico é a quantidade de energia liberada na forma de calor por unidade de massa de uma substância (como um combustível ou biomassa) ou por unidade de volume, se a substância estiver no estado gasoso, quando esta é completamente oxidada ou queimada. Quando se menciona o poder calorífico de uma substância, refere-se à quantidade de energia interna contida nela. Existem três tipos distintos: poder calorífico superior, inferior e útil.

O **poder calorífico superior (PCS)**, Segundo VAN WYLEN (1998), citado por KLAUTAU (2008), o poder calorífico superior é a quantidade de calor liberado durante a combustão na presença de água no estado condensado. Este é estimado pela correlação proposta por LOBATO *et al.* (2017), que foi identificada por PARIKH *et al.* (2005) como a melhor correlação para o cálculo do poder calorífico superior. Segundo PARIKH *et al.* (2005), esta correlação apresenta o menor erro absoluto médio em comparação com outras correlações consideradas, e possui a vantagem de poder ser aplicada ao cálculo do PCS de qualquer combustível a partir de sua análise imediata.

$$PCS = 0.3536 * (TCF) + 0.1559 * (TV) - 0.0078 * (TC) \quad \left(\frac{Mj}{kg} \right) \quad (4)$$

O **poder calorífico inferior (PCI)** Refere-se à quantidade de calor liberada durante a combustão na presença de água no estado de vapor. Esta será estimada pela correlação recomendada por BRITO (1993) e posteriormente por GONÇALVES *et al.* (2009):

$$PCI = PCS - 600 * \left(\frac{9 * H}{100} \right) * 4.18 * 10^{-3} \quad \left(\frac{Mj}{kg} \right) \quad (5)$$

O **poder calorífico útil (PCU)** É a quantidade líquida de calor liberado (PCS), descontando a quantidade de calor necessário para evaporar a água formada e a humidade do combustível (BRITO, 1993; GONÇALVES *et al.*, 2009). Este será estimado pela correlação recomendada por BRITO (1993) e posteriormente por GONÇALVES *et al.* (2009):

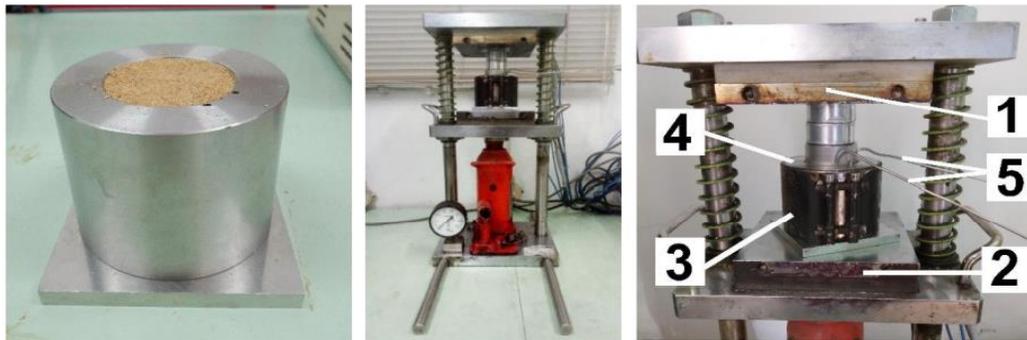
$$PCU = PCI * \left(\frac{100 - TH}{100} \right) - 600 * \frac{TH}{100} * 4.18 * 10^{-3} \quad \left(\frac{Mj}{kg} \right) \quad (6)$$

onde:

PCS – é o Poder Calorífico Superior; *PCI* – Poder Calorífico Inferior; *PCU* – representa o Poder Calorífico Útil, (todos na base seca e em MJ/kg);

TCF – Teor de Carbono Fixo, *TV* – Teor de Voláteis; *TC* – Teor de Cinzas; *TH* – Teor de Humidade; *H* – Teor de hidrogénio, (todos em percentagem).

3.4. Produção dos briquetes



a - Molde cilíndrico b - Prensa laboratorial c. Molde posicionado na prensa
Figura 17: Equipamento usado na briquetagem (MATOS, 2021)

No processo de produção dos briquetes, utiliza-se uma prensa laboratorial ilustrada na **Figura 17–b**, e um molde cilíndrico feito de aço inoxidável com diâmetro de 50 mm e altura aproximada de 70 mm, onde são inseridos 60 g de amostra conforme mostrado na **Figura 17–a**. As placas superior (**Figura 17–c1**) e inferior (**Figura 17–c2**) são usadas para aquecer a amostra nas partes superior e inferior, enquanto a camisa (**Figura 17–c3**) reveste o molde (**Figura 17–c4**) e aquece a amostra lateralmente, assegurando uma distribuição uniforme da temperatura ao redor de toda a amostra. Dois termopares (**Figura 17–c5**) são conectados próximo às amostras (nos dois orifícios existentes no molde) para monitorar a evolução da temperatura. A compactação foi realizada aplicando-se uma pressão constante de 10 MPa e temperatura de 150°C. Após a compactação, um ventilador foi usado para permitir um resfriamento rápido.

3.5. Caracterização física, mecânica e térmica dos briquetes

3.5.1. Teor de humidade

Admite-se que cada briquete possui a mesma humidade que a biomassa utilizada na sua produção. No entanto, durante o processo de briquetagem, o briquete pode ter perdido humidade devido ao aquecimento, ou pode ter absorvido humidade durante o seu endurecimento.

3.5.2. Densidade mássica/aparente

A densidade mássica ou aparente expressa a relação entre a massa contida por volume do briquete e foi determinada pela equação:

$$\rho = m \times V_B \quad (7)$$

Onde:

ρ – representa a densidade mássica dos briquetes, kg/m^3 ; m - massa do briquete, em g ; V_B - corresponde ao volume do briquete, em m^3 .

3.5.3. Densidade energética

A densidade energética expressa a quantidade de energia que pode ser obtida por volume de briquete. MATOS (2021), em seu estudo, recomenda o uso de uma metodologia de cálculo da densidade energética que se aproxime mais da realidade. Em sua opinião, isso envolve calcular a densidade energética multiplicando as densidades a granel e aparente pelo poder calorífico útil, para evitar superestimar esse valor ao utilizar o poder calorífico superior.

$$\rho_E = PCU \cdot \rho_M \quad (8)$$

Onde: ρ_E – representa a densidade energética, MJ/m^3 ;

3.5.4. Friabilidade

A friabilidade é a propriedade que um material possui de se partir facilmente, reduzindo-se em partículas menores (MATOS, 2021). O teste de friabilidade permite determinar a resistência do material à abrasão, e consiste em pesar o material, submetê-lo a ações mecânicas que simulem o seu manuseio e transporte (foi utilizado um moinho de bolas da marca Anard A.C. Induction Motor), e depois pesar novamente o material para calcular a percentagem de finos gerados.

Os briquetes previamente pesados foram colocados em um cilindro e submetidos a um movimento rotativo a uma velocidade de 40 rotações por minuto durante 5 minutos. Em seguida, os briquetes foram removidos e pesados novamente para estimar a quantidade de finos gerados devido ao efeito das forças de abrasão.

O cálculo da quantidade de finos produzidos (em porcentagem) é feito através da seguinte expressão:

$$Friabilidade = \frac{massa_0 - massa_1}{massa_0} \times 100\% \quad (9)$$

Onde:

$massa_0$ – representa a massa do briquete antes do teste de friabilidade (kg); $massa_1$ – massa do briquete após o teste de friabilidade (kg).

Este teste foi utilizado como base para determinar o melhor aglutinante para a produção dos briquetes, bem como para encontrar a proporção ideal de biomassa-aglutinante com o objetivo de produzir briquetes mais resistentes.

3.5.5. Estabilidade dimensional dos briquetes

A estabilidade dimensional dos briquetes é verificada através do controle da variação de suas dimensões utilizando um paquímetro da marca 'INGCO-HVC01150', iniciando-se no momento em que os briquetes são fabricados e encerrando-se quando não são mais observadas alterações significativas em suas dimensões. As dimensões dos briquetes são medidas em intervalos regulares de tempo, e a análise é considerada concluída para cada briquete quando suas dimensões se estabilizam.

Para determinar a expansão longitudinal do briquete em um determinado tempo (t), utiliza-se a seguinte expressão: $Expansão_{(t)} = \frac{h_{(t=t)} - h_{(t=0)}}{h_{(t=0)}} \times 100\% \quad (10)$

Onde: h – representa a altura do briquete (mm) e t – o tempo (h).

3.5.6. Índice de combustão

O índice de combustão de oxigênio modificado (ICOM) é um parâmetro que condensa em um único valor o tempo de combustão, a temperatura gerada durante a combustão

e a massa consumida para alcançá-la. Portanto, é um fator que determina a qualidade energética do briquete como combustível. Para realizar o teste e avaliar o comportamento dos briquetes na combustão, foi construído um sistema semelhante ao desenvolvido por QUIRINO e BRITO (1991). Os equipamentos necessários incluíram um combustor/fogão (marca: burn-jikoko), uma balança de precisão de 2 gramas (marca: Ohaus), um cronômetro, um termopar do tipo K com capacidade de medição de temperaturas de -50°C a 1300°C com precisão de $\pm 1^\circ\text{C}$, e um dispositivo de registro de dados (datalogger marca: testo 176T4) para registrar as temperaturas durante os testes. Para a ignição dos briquetes, foi utilizado querosene em quantidade correspondente a 5% da massa total dos briquetes usados no teste (aproximadamente 28g de querosene). Foram utilizados 9 briquetes para cada teste, quantidade suficiente para preencher o combustor.

$$ICOM = \frac{A \times B}{C \times 100} \quad (11)$$

Onde:

A = representa a percentagem do tempo de teste no qual a temperatura permanece acima de 150°C, tomada em relação ao tempo total de 120 min;

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

C = corresponde à percentagem da massa total a se consumir gerando temperaturas acima de 150°C.

Para cada tipo de briquete, foram realizados 3 ensaios/repetições, de modo a garantir a eficácia dos resultados.

3.6. Ensaios em equipamentos de combustão de combustíveis sólidos

3.6.1. Teste de fervura da água

O teste de fervura consiste na simulação do procedimento padrão de cozimento de alimentos e pode ser utilizado para uma rápida comparação do desempenho de combustíveis (MATOS, 2021). Este teste compreende 3 etapas: início frio de alta

potência, início quente de alta potência e fervura/ebulição contínua de baixa potência. Foi realizado no laboratório do BECT seguindo o protocolo da Global Alliance for Clean Cooking, versão 4.2.3 de 2017. Os parâmetros analisados incluem tempo de ignição, perfil de temperaturas, emissão de gases, tempo de fervura, taxa de queima, eficiência térmica e consumo específico de combustível, cujas fórmulas de cálculo estão descritas no Apêndice E dos anexos.

Para a realização deste ensaio, foram necessárias duas panelas de aço com tampa, um fogão/combustor (marca burn jikoko), uma balança de precisão de 2 gramas (marca Ohaus), um dispositivo de medição de temperatura (Testo 108), um cronômetro, um termopar do tipo K com capacidade de medição de temperaturas de -50°C a 1300°C com precisão de $\pm 1^\circ\text{C}$, um PC com o sistema LEMS (Laboratory Emission Monitoring System) para o tratamento dos dados, um dispositivo portátil de medição de emissão de gases de combustão acoplado a um exaustor (PEMS – Portable Emission Monitoring System), e um dispositivo de medição de gases no ambiente (marca Wöhler KM 410), além de querosene. O teste segue os seguintes procedimentos:

- Pesar uma quantidade inicial de briquetes suficiente para preencher o volume do combustor (aproximadamente 570g foram utilizados neste estudo).
- Pesar uma panela com tampa e preenchê-la com 2,5L de água, registrando o peso.
- Colocar a panela no combustor junto com os briquetes, ambos sobre uma balança. Fixar o termopar (conectado ao PC) no orifício da panela e registrar a temperatura inicial da água (que não deve ultrapassar 21°C).
- Acender os briquetes adicionando 5% de querosene em relação ao peso dos briquetes (aproximadamente 28g neste estudo).
- Ligar o medidor de emissões acoplado ao exaustor, deixando-o funcionar por 1 minuto antes de iniciar o teste.
- A etapa de início frio de alta potência termina quando a fervura é observada. Registrar o tempo, retirar a panela, pesá-la e registrar o peso do combustível. Em seguida, colocar a segunda panela com água, mantendo as mesmas características (peso), para iniciar a segunda etapa.

- Repetir o procedimento de pesagem e medição de tempo para a segunda panela até que a fervura comece.
- Deixar a água ferver por 45 minutos e, ao final, registrar o tempo e repetir os procedimentos de pesagem.

Estes procedimentos foram repetidos 3 vezes para cada tipo de briquete para assegurar a reprodutibilidade dos resultados.

4. Resultados e Discussão

4.1. Caracterização inicial da matéria-prima

4.1.1. Humidade *in natura*

Antes de proceder à moagem e subsequente classificação, é essencial determinar o teor de humidade *in natura* das biomassas, um parâmetro crucial na caracterização inicial das amostras. A **Tabela 2** apresenta os valores de humidade *in natura* das amostras: a casca de milho recebida foi seca ao sol, apresentando um teor de humidade de 7,91%. O sabugo de milho e a película de castanha de caju mostraram teores de humidade *in natura* em torno de 8%, com valores específicos de 8,54% e 8,17%, respectivamente. Os resíduos do processamento de algodão exibiram o menor teor de humidade *in natura* entre as biomassas analisadas, com 7,6%.

Tabela 2: Humidade in natura das amostras.

Biomassa	Humidade <i>in natura</i> (%)
Casca de milho (CM)	7.91 ± 0.18
Sabugo de milho (SM)	8.54 ± 0.72
Película de castanha de cajú (PCC)	8.17 ± 0.17
Resíduos de processamento de algodão (RPA)	7.6 ± 0.13

CM – Casca de milho; PCC – Película de castanha de cajú; SM – sabugo de milho; RPA – Resíduos de processamento de algodão.

Para o sabugo de milho, SILVA *et al.* (2022) registaram um teor de humidade de 8,8%, enquanto DIONIZIO (2017) encontrou um valor de 8,53%, ambos próximos aos valores encontrados neste estudo. Para a casca de milho, ALVES (2014) relatou um teor de humidade de 10,33%, e SILVA *et al.* (2022) encontraram um teor na faixa de 9%, valores ligeiramente altos, porém próximos aos determinados neste estudo. DEMIREL (2012)

propôs valores de humidade para resíduos de algodão entre 5% e 10%, estando o valor encontrado neste estudo dentro desse intervalo.

Quanto à casca de castanha de caju, TSAMBA (2008) registou um teor de humidade de 10,5%, enquanto UAMUSSE *et al.* (2014) observaram um valor de 3,83%. O valor registado neste estudo está dentro da faixa observada por esses autores. Segundo NAKASHIMA *et al.* (2014), o intervalo recomendado para a produção de briquetes é de 8% a 12% de humidade. Portanto, a mistura preparada para a produção dos briquetes foi ajustada para alcançar esse intervalo recomendado, não sendo necessária secagem adicional das biomassas, uma vez que apresentavam valores de humidade ótimos para o processo de briquetagem e análises subsequentes.

4.1.2. Carbonização da matéria-prima

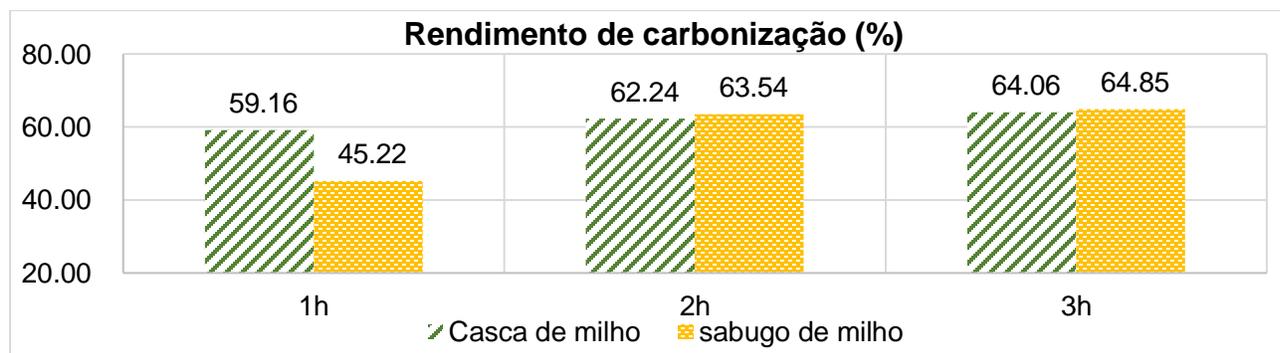


Figura 18: Rendimento de carbonização da casca e sabugo de milho em tempos de residência de 1, 2 e 3 horas.

A carbonização da casca e do sabugo de milho a 400°C foi realizada variando-se o tempo de residência (1h, 2h e 3h) para determinar o tempo ideal e que proporcione melhor rendimento em termos de eliminação de materiais voláteis e maior quantidade de carbono fixo. Os resultados deste teste são apresentados na **Figura 18**. Observa-se na **Figura 18** que a carbonização a 400°C por 1 hora resultou no menor rendimento, com 45% para o sabugo e 59% para a casca. Não houve uma diferença significativa nos rendimentos entre os tempos de residência de 2h e 3h. Para a casca de milho, os rendimentos foram de 62% e 64% para 2h e 3h, respectivamente. Para o sabugo, os rendimentos foram de 63% e 65% para 2h e 3h, respectivamente. Assim, o tempo de 3

horas apresentou melhores rendimentos em comparação ao tempo de 2 horas, como esperado.

No entanto, ao perceber a pequena diferença entre os tempos de residência de 2h e 3h, optou-se, para efeitos de carbonização da amostra destinada à briquetagem, pelo tempo de 2 horas, também considerando a economia de eletricidade. DIONIZIO (2017) realizou um estudo de carbonização de diversas biomassas com um tempo de residência de 2,5 horas a uma temperatura de 450°C, obtendo rendimentos de carbonização entre 59% e 61,5%, com um rendimento de eliminação de voláteis de 60,8% para o sabugo de milho. Portanto, os valores encontrados neste estudo são próximos aos obtidos pela autora mencionada.

4.2. Caracterização Físico Química e Térmica da Matéria-prima

4.2.1. Distribuição Granulométrica

A distribuição granulométrica é de elevada importância, pois permite avaliar se a amostra a ser utilizada é de tamanho apropriado para a briquetagem e para a realização dos testes subsequentes. A análise da distribuição granulométrica é apresentada na **Figura 19**. As amostras de casca de milho foram moídas em um moinho de facas antes da carbonização, e a maioria da amostra, cerca de 80%, tinha tamanho inferior a 1 mm de granulometria. Para os testes realizados neste estudo, foram utilizadas apenas as amostras com tamanho de partícula abaixo de 1 mm.

O sabugo de milho foi triturado com um pilão e apresentou granulometria predominantemente acima de 1,18 mm, sendo que, para as análises realizadas, utilizou-se apenas a fração com tamanho de partícula abaixo de 1 mm. Após a carbonização, tanto a casca quanto o sabugo de milho passaram por um moinho centrífugo para obter uma granulometria abaixo de 1 mm. Após o processo, constatou-se que 80% da casca carbonizada apresentava granulometria inferior a 0,5 mm, enquanto 95% do sabugo carbonizado apresentava granulometria abaixo de 0,5 mm.

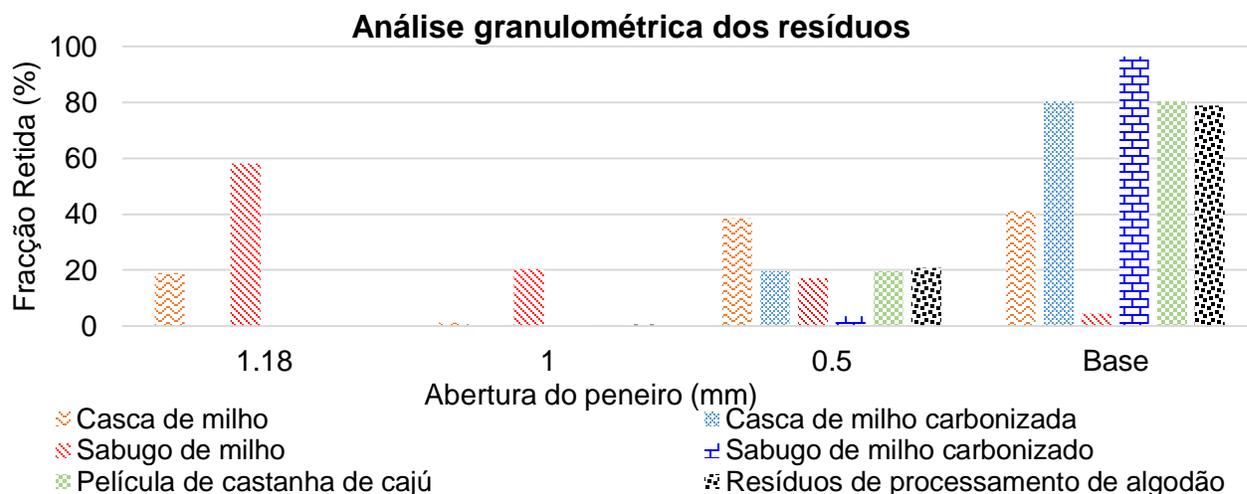


Figura 19: Distribuição granulométrica das amostras.

A película de castanha de caju foi moída em um moinho centrífugo, resultando em toda a amostra com tamanho inferior a 1 mm, sendo que 80% da película tinha tamanho inferior a 0,5 mm de diâmetro. O resíduo de processamento de algodão não necessitou de moagem, pois foi recebido em granulometria fina, com 100% da amostra tendo tamanho inferior a 1 mm de diâmetro, sendo que 80% da amostra estava abaixo de 0,5 mm. GONÇALVES *et al.* (2013) produziu briquetes de serragem de eucalipto utilizando diferentes granulometrias e observou que os briquetes com granulometria abaixo de 1 mm, especialmente de 0,84 mm a 0,15 mm, apresentaram melhores valores de resistência à compressão.

No estudo de caracterização de resíduos como casca de arroz, resíduo de soja e sabugo de milho, VIEIRA (2012) utilizou amostras com tamanho acima de 1,18 mm para realizar testes de análise elementar e análise imediata. Todas as amostras utilizadas nas análises térmicas e na produção de briquetes neste estudo tinham tamanho inferior a 1 mm, estando dentro do intervalo mencionado pelos autores acima.

4.2.2. Densidade a granel

Os resultados obtidos para a densidade a granel da biomassa estão dispostos no gráfico da **Figura 20**.

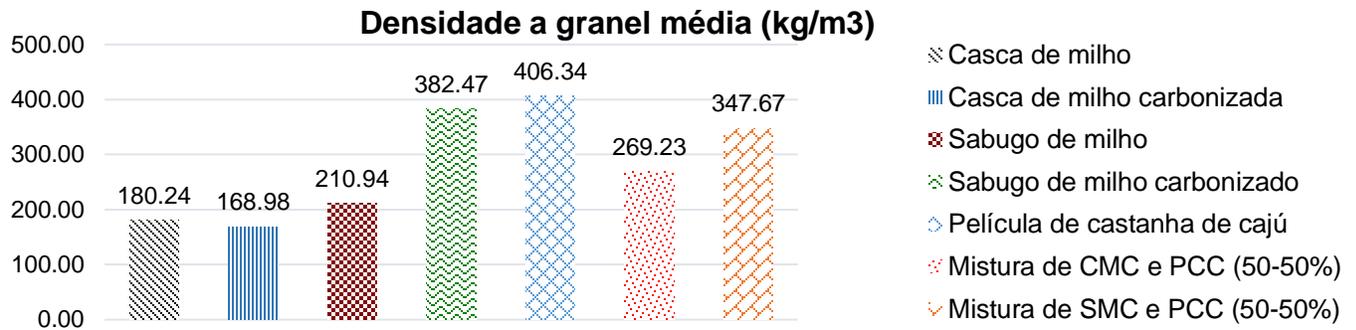


Figura 20: Densidade a granel média das biomassas.

Observou-se que a amostra de película de castanha de caju apresentou o maior valor de densidade a granel em relação às demais biomassas, atingindo 406,34 kg/m³, um valor próximo ao proposto por GADELHA *et al.* (2019) para a casca de castanha de caju, que encontrou uma densidade de 448,07 kg/m³. Houve um aumento significativo na densidade entre o sabugo não carbonizado e o sabugo carbonizado. O sabugo de milho apresentou uma densidade a granel de 210,94 kg/m³, enquanto o sabugo carbonizado alcançou 382,47 kg/m³, representando um aumento de aproximadamente 81% de densidade. Esse aumento pode ser explicado pelo fato de que o material carbonizado possui granulometria menor em comparação ao material não carbonizado, além da eliminação de matéria volátil mais leve, resultando em maior concentração de carbono e cinzas. SILVA *et al.* (2022) registou valores de densidade a granel para o sabugo ligeiramente acima do encontrado neste estudo, com um valor de 250,7 kg/m³, enquanto DIONIZIO (2017) registou valores abaixo, sendo 146,91 kg/m³ para o sabugo de milho não carbonizado e ainda mais baixo, 114,33 kg/m³ para o sabugo carbonizado.

No entanto, semelhante ao estudo de DIONIZIO (2017), observou-se uma diferença na tendência da densidade a granel das biomassas após a carbonização, onde para algumas biomassas houve aumento e para outras houve diminuição. A casca de milho, neste estudo, apresentou uma diminuição na densidade após a carbonização, com valores de 180,24 kg/m³ in natura e 168,98 kg/m³ após carbonização. SILVA *et al.* (2022) apresentou densidade a granel da casca de milho com valores mais elevados, obtendo 248,8 kg/m³. A mistura de casca de milho carbonizada e película de castanha de caju resultou em uma densidade de 269,23 kg/m³, dentro do intervalo observado para as amostras não misturadas. No entanto, a mistura de sabugo carbonizado e película de

castanha de caju apresentou uma densidade de 347,67 kg/m³, ligeiramente abaixo do sabugo carbonizado individualmente, não estando dentro do intervalo das amostras não misturadas, embora ainda seja um valor elevado.

4.2.3. Análise imediata (Teor de cinzas, Teor de voláteis e Teor de carbono fixo)

Para ainda melhor entender o tempo de residência ideal para a carbonização, fez-se a análise imediata dos produtos carbonizados a diferentes tempos de residência, que será discutido a seguir. Os resultados da análise imediata realizados para as amostras estão dispostos na **Tabela 3**.

Tabela 3: Análise imediata (Teores de: cinzas, voláteis e carbono fixo) das amostras.

Biomassa	TC (%)	TV (%)	TCF (%)
Película de castanha de caju	6.50 ± 0.001	70.88 ± 1.12	22.62 ± 1.12
Mistura de sabugo e película	6.43 ± 0.01	56.54 ± 0.07	37.02 ± 0.08
Mistura de casca e película	9.54 ± 0.24	56.92 ± 0.50	33.54 ± 0.74
Casca de milho <i>in natura</i>	2.84 ± 0.09	67.53 ± 1.03	29.63 ± 1.12
Casca de milho carbonizada (1h)	11.97 ± 0.05	50.17 ± 0.16	37.87 ± 0.2
Casca de milho carbonizada (2h)	17.24 ± 0.08	41.11 ± 0.98	41.65 ± 1.07
Casca de milho carbonizada (3h)	18.29 ± 0.20	39.21 ± 0.02	42.50 ± 0.22
Sabugo de milho <i>in natura</i>	1.81 ± 0.03	68.78 ± 0.39	29.41 ± 0.42
Sabugo carbonizado (1h)	3.10 ± 0.04	45.81 ± 0.12	51.09 ± 0.16
Sabugo carbonizado (2h)	4.56 ± 0.02	41.94 ± 0.98	53.50 ± 1.01
Sabugo carbonizado (3h)	5.07 ± 0.23	40.02 ± 0.40	54.90 ± 0.63

4.2.3.1. Teor de cinzas

As cinzas são a matéria inorgânica que não sofre combustão, e portanto, quanto menor a proporção na biomassa, melhor. A película de castanha de caju apresentou um teor de cinzas de 6,5%, um valor elevado em relação ao encontrado por TSAMBA (2008) para a casca de castanha de caju, que foi de 1,7%, mas abaixo do teor encontrado por UAMUSSE *et al.* (2014), que foi de 7,53%, estando assim dentro do intervalo observado

por esses autores. A casca de milho apresentou um teor de cinzas de 2,84%, valor próximo ao encontrado por VALE *et al.* (2013), que foi de 1,91%, e por SILVA *et al.* (2022), que foi de 3,5%. No entanto, após a carbonização da casca, observou-se um aumento no teor de cinzas à medida que o tempo de residência aumentava. Houve um aumento significativo de 1h para 2h (de 11,97% para 17,24%), mas um aumento pouco significativo de 2h para 3h (de 17,24% para 18,29%), justificando a escolha do tempo de residência de 2h para economizar eletricidade.

O teor de cinzas mais baixo foi encontrado no sabugo de milho, que apresentou um valor de 1,81%, corroborado por VALE *et al.* (2013), que obteve 1,65% para o sabugo. ALVES (2014) e DIONIZIO (2017) registraram teores de cinzas de 2,51% e 3,81%, respectivamente, estando o valor encontrado neste estudo dentro do intervalo observado por esses autores. Após a carbonização, o teor de cinzas no sabugo de milho apresentou a mesma tendência observada na casca de milho, aumentando com o aumento do tempo de carbonização. Houve um aumento de 1h para 2h (de 3,10% para 4,56%) e de 2h para 3h (de 4,56% para 5,07%), semelhante ao aumento observado na casca. Os teores de cinzas encontrados nas misturas tanto da casca de milho carbonizada (2h) com película de castanha de caju (9,54%) quanto do sabugo de milho carbonizado com película de castanha de caju (6,43%) estão dentro do intervalo observado para as respectivas amostras não misturadas.

4.2.3.2. Teor de voláteis

De acordo com MCKENDRY (2002), os voláteis estão relacionados à reatividade da biomassa à queima, ou seja, à facilidade de ignição da biomassa devido à volatilização de substâncias do material durante o aquecimento. A película de castanha de caju apresentou o maior teor de voláteis em relação às demais amostras, com um valor de 70,88%. UAMUSSE *et al.* (2014) registraram um teor de voláteis de 73,41% para a casca de castanha de caju, corroborado por TSAMBA (2008) que obteve 73,2%. TAVARES (2016) encontrou um teor de voláteis ainda mais elevado para a casca de castanha de caju, de 84,08%. A casca e o sabugo de milho in natura apresentaram teores de voláteis relativamente próximos, 67,53% e 68,78%, respectivamente. Estes valores são mais baixos em comparação com os encontrados por DIONIZIO (2017) e BARROS (2012)

para o sabugo, que foram de 78,82% e 72,02%, respectivamente. SILVA *et al.* (2022) e HORST (2013) propuseram valores mais altos para voláteis na casca de milho, ambos de 81,7%. Observou-se também que durante a carbonização houve uma tendência de redução na quantidade de voláteis e consequente aumento do teor de carbono fixo, tanto para a casca quanto para o sabugo. Para a casca, a redução de 1h (50,17%) para 2h (41,11%) foi mais significativa do que a redução de 2h (41,11%) para 3h (39,21%). Para o sabugo, embora a mesma tendência tenha sido observada, a diferença foi menos acentuada, com teores de voláteis para os tempos de 1h (45,81%), 2h (41,94%) e 3h (40,02%). Embora o tempo de 3h tenha sido ligeiramente mais eficaz na redução dos voláteis, a diferença em relação ao tempo de 2h não foi significativa, contribuindo assim para a economia das atividades. Para as misturas de casca e película, assim como de sabugo e película, os teores de voláteis foram de 56,92% e 56,54%, respectivamente, valores semelhantes e dentro dos intervalos observados para as biomassas não misturadas.

4.2.3.3. Teor de carbono fixo

De acordo com STURION *et al.* (1998), o carbono fixo é um parâmetro ideal para a combustão, pois indica a quantidade de calor que será produzida; quanto maior o teor de carbono fixo, maior será a quantidade de calor gerada. Observa-se que a película de castanha de caju apresentou o menor teor de carbono fixo em comparação com as outras amostras, sendo de 22,62%, ainda assim superior aos valores propostos por TSAMBA (2008) e UAMUSSE *et al.* (2014), que encontraram 14,6% e 15,04% para a casca de castanha de caju, respectivamente. Tanto a casca quanto o sabugo de milho in natura apresentaram valores semelhantes e elevados para o teor de carbono fixo, sendo 29,63% e 29,41%, respectivamente. DIONIZIO (2017) e OKOT *et al.* (2022) encontraram teores de carbono fixo para o sabugo de 17,37% e 16,3%, respectivamente, valores significativamente mais baixos do que os encontrados neste estudo. Já VALE *et al.* (2013) e SILVA *et al.* (2022) propuseram teores de carbono fixo para a casca de milho de 12,19% e 14,8%, respectivamente, também inferiores aos encontrados neste estudo. Como mencionado anteriormente, a carbonização tem como objetivo aumentar o teor de carbono fixo, o qual é responsável pela geração de calor durante a combustão. Pode-se

observar que todos os resíduos carbonizados obtiveram valores significativamente elevados de carbono fixo. Para a casca carbonizada, os valores foram de 37,87% (1h), 41,65% (2h) e 42,5% (3h), enquanto para o sabugo carbonizado foram de 51,09% (1h), 53,5% (2h) e 54,9% (3h). DIONIZIO (2017) registrou um teor de carbono fixo para o sabugo carbonizado a 450°C por 2,5h de 66,97%, diferença que pode ser atribuída às diferentes condições experimentais entre este estudo e o estudo mencionado. Por outro lado, VIEIRA (2012) encontrou um teor de carbono fixo para o sabugo de 62,29% após carbonização a 450°C e 3,5h de residência, valores próximos aos obtidos neste estudo. As misturas utilizadas para a briquetagem apresentaram teores de carbono fixo de 33,54% para a casca e película e 37,02% para o sabugo e película, estando dentro do intervalo observado para as biomassas antes da mistura.

4.2.4. Poder Calorífico

Os resultados obtidos nos cálculos do poder calorífico superior e inferior estão listados na **Tabela 4** acima.

Tabela 4: Poder calorífico superior e inferior das biomassas.

Biomassa	PCS (MJ/kg)	PCI (MJ/kg)
Película de castanha de caju	19.00 ± 0.57	17.64 ± 0.57
Mistura de casca e película	20.66 ± 0.34	19.31 ± 0.34
Mistura de sabugo e película	21.86 ± 0.04	20.50 ± 0.04
Casca de milho <i>in natura</i>	20.98 ± 0.56	19.63 ± 0.56
Casca de milho carbonizada (1h)	21.12 ± 0.10	19.76 ± 0.10
Casca de milho carbonizada (2h)	21.00 ± 0.53	19.65 ± 0.53
Casca de milho carbonizada (3h)	21.00 ± 0.08	19.64 ± 0.08
Sabugo de milho <i>in natura</i>	21.11 ± 0.21	19.75 ± 0.21
Sabugo de milho carbonizado (1h)	25.18 ± 0.07	23.83 ± 0.07
Sabugo de milho carbonizado (2h)	25.42 ± 0.51	24.07 ± 0.51
Sabugo de milho carbonizado (3h)	25.61 ± 0.29	24.26 ± 0.29

4.2.4.1. Poder calorífico superior

A película de castanha de caju apresentou o menor poder calorífico superior (PCS), com $19 \pm 0,57$ MJ/kg, em comparação com as outras biomassas. De acordo com TSAMBA (2008) e TAVARES (2016), a casca de castanha de caju carbonizada apresenta PCS de 21,53 MJ/kg e 21,73 MJ/kg, respectivamente. Essa diferença se deve à carbonização da casca de castanha de caju nos estudos mencionados. VALE *et al.* (2013) e ALVES (2014) registaram valores de PCS para casca de milho de 18,24 MJ/kg e 18,58 MJ/kg, respectivamente, ambos abaixo do valor calculado neste estudo, que foi de 20,98 MJ/kg. Para o sabugo de milho, ambos os autores registaram valores de 18,71 MJ/kg e 19,17 MJ/kg, respectivamente, também abaixo do valor determinado neste estudo, que foi de 21,11 MJ/kg.

Não houve muita diferença no valor de PCS para a casca de milho carbonizada, tanto para 1h (21,12 MJ/kg) quanto para 2h e 3h, que apresentaram uma média de PCS de 21,00 MJ/kg. Também não se observou diferença significativa no PCS antes e após a carbonização da casca de milho, o que pode ser justificado pelo alto teor de cinzas presente na casca carbonizada em comparação com a casca não carbonizada. Para o sabugo de milho, notou-se um aumento acentuado no PCS com a carbonização, com valores registados mais altos entre todas as amostras estudadas: 25,18 MJ/kg para 1h, 25,42 MJ/kg para 2h de residência e o PCS mais elevado de 25,61 MJ/kg registado para o sabugo carbonizado por 3h a 400°C.

DIONIZIO (2017) registou um PCS de 27,34 MJ/kg para o sabugo de milho após carbonização, um aumento de 50% em relação ao sabugo não carbonizado, que obteve 18,05 MJ/kg. No presente estudo, o aumento observado foi de 20% no PCS do sabugo *in natura*. OKOT *et al.* (2022) também registaram um PCS de 28,2 MJ/kg para o sabugo de milho após carbonização, um aumento de 49% em relação ao sabugo não carbonizado. Portanto, tanto DIONIZIO (2017) quanto OKOT *et al.* (2022) observaram que o teor de carbono fixo afeta positivamente o poder calorífico, pois quanto maior o teor de carbono fixo, maior é o PCS. As misturas de casca de milho e película de castanha, assim como de sabugo e película de castanha, obtiveram valores de PCS de

20,66 MJ/kg e 21,86 MJ/kg, respectivamente, estando dentro do intervalo das suas amostras não misturadas.

4.2.4.2. Poder Calorífico Inferior

DIONIZIO (2017) obteve, na análise elementar de vários resíduos agrícolas, incluindo o sabugo de milho, uma média de 6% de hidrogênio. Similarmente, SILVA *et al.* (2022) registou teores de hidrogênio de 5,8% para a casca e sabugo de milho. Portanto, para o cálculo do Poder Calorífico Inferior (PCI) neste estudo, foi adotado um teor de hidrogênio de 6%. O PCI calculado variou de 17,64 MJ/kg a 24,26 MJ/kg, sendo o mais baixo para a película de castanha de caju e o mais alto para o sabugo carbonizado por 3h. TSAMBA (2008) realizou ensaios com casca de castanha de caju e registou valores de PCI de 19,92 MJ/kg, um valor mais elevado do que o registado para as películas da castanha neste estudo.

SILVA *et al.* (2022) registou valores de PCI de 16,2 MJ/kg e 17,45 MJ/kg para a casca e sabugo de milho, respectivamente. Embora próximos, esses valores estão um pouco abaixo dos registados neste estudo para a casca (19,63 MJ/kg) e para o sabugo (19,75 MJ/kg). DIONIZIO (2017) registou valores de Poder Calorífico Útil (que neste estudo é igual ao PCI) para o sabugo de milho não carbonizado e carbonizado de 15,05 MJ/kg e 25,4 MJ/kg, respectivamente. Esses valores são baixos para o sabugo não carbonizado e altos para o sabugo carbonizado, em comparação com os obtidos no presente estudo. No entanto, os valores obtidos neste estudo estão dentro dos intervalos apresentados pelos autores.

4.3. Produção dos briquetes

Foram produzidos briquetes com 2 tipos de aglutinantes (película de castanha de caju e resíduos de processamento de algodão), em diferentes proporções de mistura, variando de 80:20%, 70:30%, 60:40% e 50:50%, tanto para a casca de milho quanto para o sabugo de milho carbonizados. Através do teste de friabilidade (que será discutido adiante), foi possível determinar a melhor combinação de biomassa-aglutinante, assim como a proporção ideal de biomassa-aglutinante.

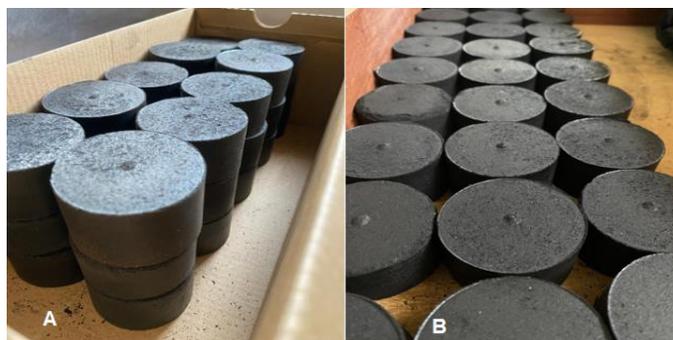


Figura 21: Briquetes produzidos de (A)- Casca de milho carbonizada e película de castanha de caju (50-50%); e (B)- Sabugo de milho carbonizado e película de castanha de caju (50-50%)

Assim como observado na **Figura 21**, foram produzidos 30 briquetes com uma mistura de casca de milho carbonizada e película de castanha de caju (50-50%), e 30 briquetes com uma mistura de sabugo de milho carbonizado e película de castanha de caju (50-50%). A escolha dessas proporções foi baseada nas observações obtidas no teste de friabilidade. Cada briquete possui 60g, com 30g de biomassa e 30g de aglutinante (película de castanha de caju).

4.4. Caracterização Física, Mecânica e Térmica dos Briquetes

4.4.1. Teor de Humidade

Inicialmente, a humidade foi mantida entre 8-12%, conforme mencionado por NAKASHIMA *et al.* (2014). No entanto, observou-se que os briquetes feitos com casca e película de castanha de caju apresentavam algumas rachaduras quando a humidade estava acima de 11%. Por isso, optou-se por limitar a humidade para este tipo de briquete a um intervalo de 9-11%, o que eliminou a ocorrência de rachaduras. Para os briquetes feitos com sabugo e película, notou-se que acima de 9% de humidade também apareciam pequenas rachaduras. Por conseguinte, escolheu-se um intervalo de 7-9% de humidade, onde não foram observadas rachaduras. Com esses intervalos seleccionados, não foram notadas rachaduras nos briquetes.

4.4.2. Friabilidade

Para obter a melhor composição entre o aglutinante e a biomassa, foram realizados testes com 2 tipos de aglutinantes para cada biomassa, com 4 composições diferentes

para cada aglutinante. De acordo com OLIVEIRA *et al.* (1978), a friabilidade foi classificada como muito friável para perdas acima de 30%, bastante friável para perdas entre 25-29%, friabilidade média para perdas entre 15-24%, pouco friável para perdas entre 10-15%, e muito pouco friável para perdas abaixo de 10%. Essa mesma classificação foi adotada neste estudo. Os resultados desses testes estão apresentados na **Tabela 5**.

Tabela 5: Friabilidade média dos briquetes produzidos.

Briquete	Composição	Friabilidade média (%)	Classificação
Misturas de casca de milho carbonizada e película de castanha de caju	50-50%	2.56 ± 0.22	Muito pouco friável
	60-40%	5.46 ± 1.15	Muito pouco friável
	70-30%	16.31 ± 2.16	Friabilidade média
	80-20%	17.87 ± 1.44	Friabilidade média
Misturas da casca de milho carbonizada e resíduos de algodão	50-50%	3.56 ± 0.46	Muito pouco friável
	60-40%	5.50 ± 0.34	Muito pouco friável
	70-30%	11.10 ± 5.27	Pouco friável
	80-20%	16.13 ± 4.47	Friabilidade média
Misturas de sabugo de milho carbonizado e película de castanha de caju	50-50%	2.51 ± 0.42	Muito pouco friável
	60-40%	4.99 ± 0.17	Muito pouco friável
	70-30%	14.40 ± 1.84	Pouco friável
	80-20%	19.46 ± 2.86	Friabilidade média
Misturas de sabugo de milho carbonizado e resíduos de algodão	50-50%	4.39 ± 0.27	Muito pouco friável
	60-40%	7.73 ± 0.62	Muito pouco friável
	70-30%	11.48 ± 0.54	Pouco friável
	80-20%	21.08 ± 5.18	Friabilidade média

De acordo com a **Tabela 5**, os briquetes com película de castanha de caju como aglutinante a 50% apresentaram os melhores resultados, com uma friabilidade entre 2,5% e 2,6%. Para ambos os aglutinantes, quanto menor era a proporção utilizada nos briquetes, estes mostraram-se mais instáveis e apresentaram valores mais altos de friabilidade, chegando até a se dividir em pedaços durante o teste. Com base nestes

resultados, decidiu-se produzir apenas briquetes utilizando película de castanha de caju como aglutinante, na proporção de 50%.

Em um estudo anterior, SILVA *et al.* (2015) classificaram briquetes feitos de diferentes biomassas como bagaço de cana e vários tipos de madeira, encontrando variações de friabilidade entre 10% e 40%, valores superiores aos encontrados neste estudo. Segundo esses autores, quanto menor a friabilidade do briquete, maior é sua resistência mecânica, sendo assim sempre desejável que os briquetes apresentem os menores valores possíveis neste ensaio.

4.4.3. Análise de estabilidade dimensional

Após a produção de cada briquete, tanto da mistura entre sabugo e película quanto da casca e película, foram realizadas medições progressivas de suas dimensões para avaliar as variações dimensionais ao longo do tempo. Estas medições foram feitas em intervalos determinados para caracterizar adequadamente a expansão ou compressão dos briquetes ao longo do tempo.

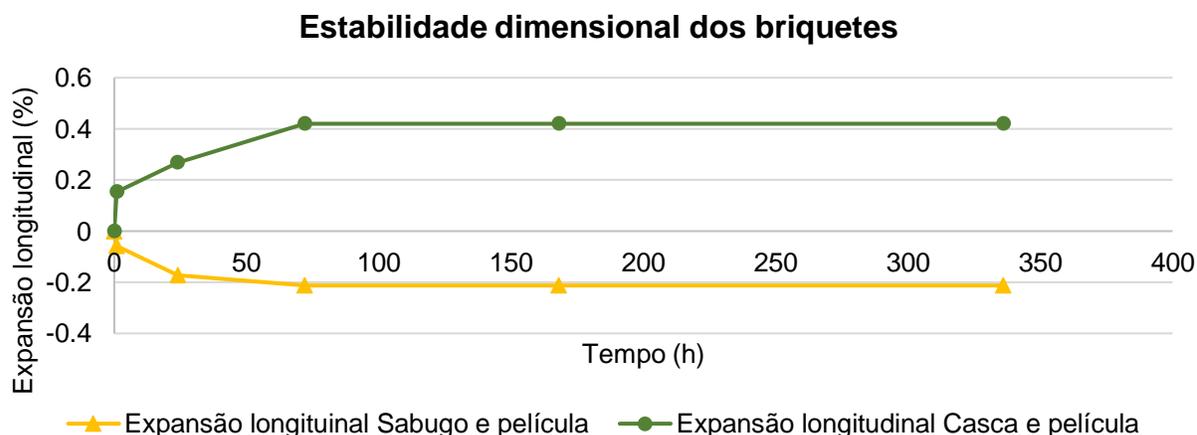


Figura 22: Estabilidade dimensional dos briquetes.

De acordo com os gráficos da **Figura 22**, os resultados do teste de estabilidade dimensional mostram que a principal diferença foi a expansão do briquete feito com casca e película, enquanto o briquete de sabugo e película apresentou compressão ao longo do tempo. Ambos os tipos demonstraram excelente estabilidade, sendo o briquete de sabugo e película o mais estável. Observou-se que a estabilidade dos briquetes foi

alcançada após 72 horas de cura. A média de expansão do briquete de casca e película foi de $0,42 \pm 0,16\%$, enquanto a média de compressão dos briquetes de sabugo e película foi de $0,21 \pm 0,03\%$. Estes valores são inferiores aos registados por MATOS (2021) em seu estudo sobre briquetes de endocarpo e mesocarpo de coco, onde o autor encontrou valores de expansão longitudinal entre 2,9% e 3,10% após 72 horas.

4.4.4. Densidade aparente e energética

Após a estabilidade dimensional dos briquetes ter sido alcançada, procedeu-se à medição da massa e do volume de cada briquete, e determinou-se a densidade aparente conforme registada na **Tabela 6**.

Tabela 6: Densidade aparente dos briquetes produzidos.

Biomassa	Densidade aparente (kg/m^3)
Briquete de casca e película	1025.85 ± 2.84
Briquete de sabugo e película	1009.72 ± 2.06

O briquete de casca de milho carbonizada e película de castanha de caju apresentou uma maior densidade aparente de $1025,85 \pm 2,84 kg/m^3$ em comparação ao briquete de sabugo carbonizado e película de castanha de caju, que registou $1009,72 \pm 2,06 kg/m^3$. Esses valores estão dentro do intervalo mencionado por DIAS *et al.* (2012), que varia de 500 a $1200 kg/m^3$ para densidade de briquetes. No estudo conduzido por SILVA *et al.* (2015), foram analisadas densidades de briquetes de diversas biomassas, como serradura de pinho, eucalipto, resíduos e bagaço da cana de açúcar, encontrando valores entre 880 a $1110 kg/m^3$. BARROS (2012) relatou densidades de briquetes de diferentes resíduos agrícolas variando de 1177 a $1404 kg/m^3$, com briquetes de sabugo de milho apresentando uma média de $1270 kg/m^3$ de densidade. Em outro estudo por DESHANNAVAR *et al.* (2018), que utilizou casca de arroz carbonizada e amido como aglutinante, foram obtidos valores de densidade entre 98 a $560 kg/m^3$. Portanto, os resultados obtidos neste estudo estão dentro do intervalo esperado para densidades de briquetes. Após a determinação da densidade aparente dos briquetes, procedeu-se ao cálculo da densidade energética multiplicando os valores da densidade aparente pelo

poder calorífico inferior (por ter sido calculado na base seca é o mais próximo do útil), conforme sugerido por MATOS (2021).

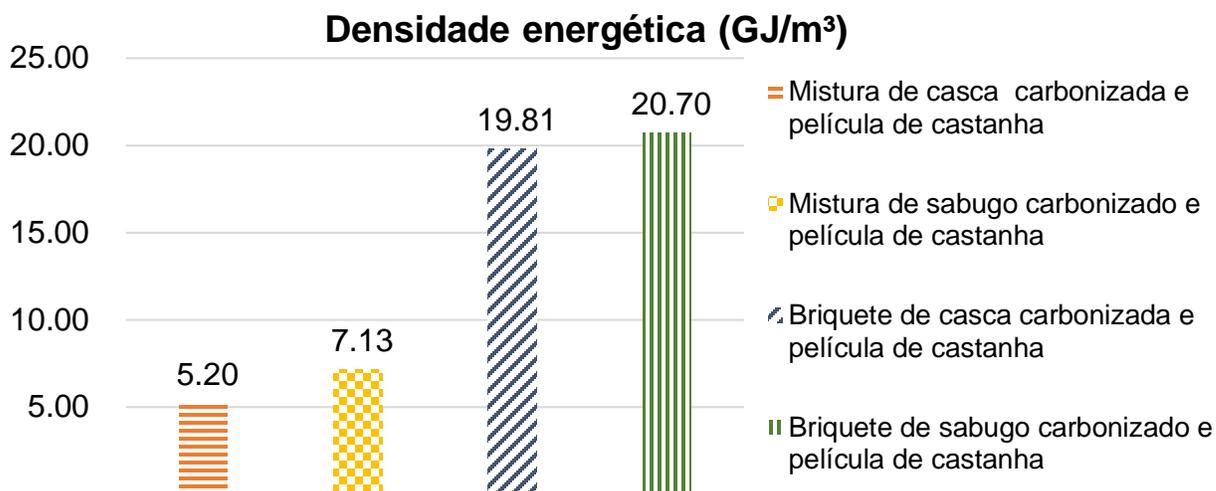


Figura 23: Densidades energéticas dos resíduos antes e após a briquetagem.

Os resultados estão registados no gráfico da **Figura 23**, onde é possível verificar o impacto significativo que a briquetagem proporcionou à biomassa. Observou-se um aumento energético de 2,9 vezes para a mistura de sabugo carbonizado e película, e um aumento ainda maior de 3,8 vezes para a mistura de casca carbonizada e película.

No estudo realizado por BARROS (2012), foi analisada a densidade energética de resíduos lignocelulósicos agrícolas, encontrando valores no intervalo de 14131,4 MJ/m³ a 18859 MJ/m³, com o briquete de sabugo de milho apresentando uma média de 15791 MJ/m³. DIONIZIO (2017) produziu briquetes de diferentes biomassas carbonizadas com dois tipos de aglutinantes, registando valores de densidade energética entre 13328,6 a 14513 MJ/m³. Os briquetes produzidos neste estudo apresentaram densidades energéticas significativamente superiores aos valores encontrados na literatura, o que é favorável para aplicações de produção de energia. Conforme mencionado por MATOS (2021), uma maior densidade aparente é desejável, pois há uma relação direta e proporcional entre o aumento da densidade aparente e a densidade energética do briquete.

4.4.5. Índice de Combustão (ICOM)

Ao analisar o comportamento da temperatura e o consumo de massa durante a combustão, verifica-se, conforme mostrado na **Figura 24** e **Figura 25**, que os gráficos exibem as curvas típicas de temperatura versus tempo e consumo de massa versus tempo.

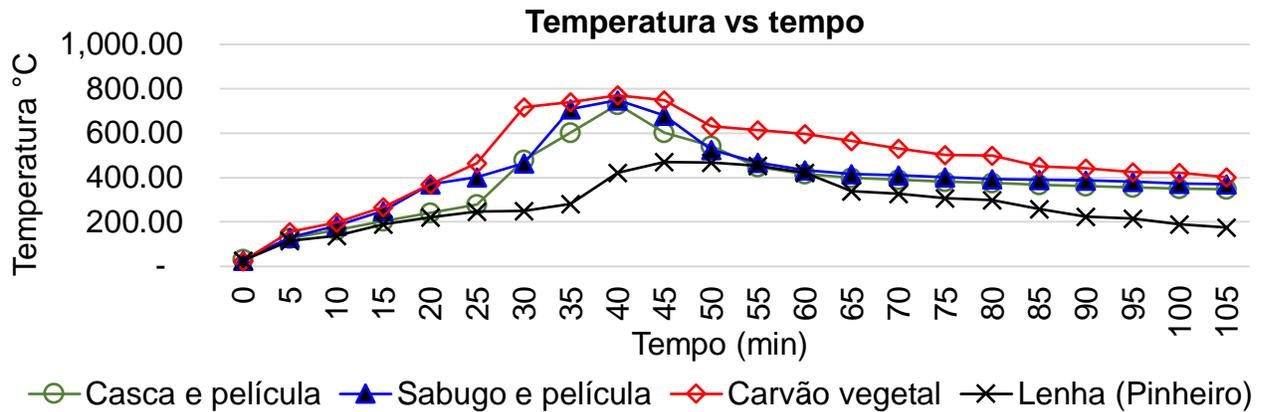


Figura 24: Comportamento da temperatura durante o teste de ICOM

As temperaturas máximas alcançadas por cada tipo de combustível são ligeiramente diferentes: o briquete de casca de milho e película (BCP) apresentou uma temperatura média de 730°C, enquanto o briquete de sabugo de milho e película (BSP) atingiu em média 750°C. O carvão vegetal registou uma temperatura máxima de 770°C, enquanto a combustão da lenha alcançou a temperatura máxima mais baixa, que foi de 470°C.

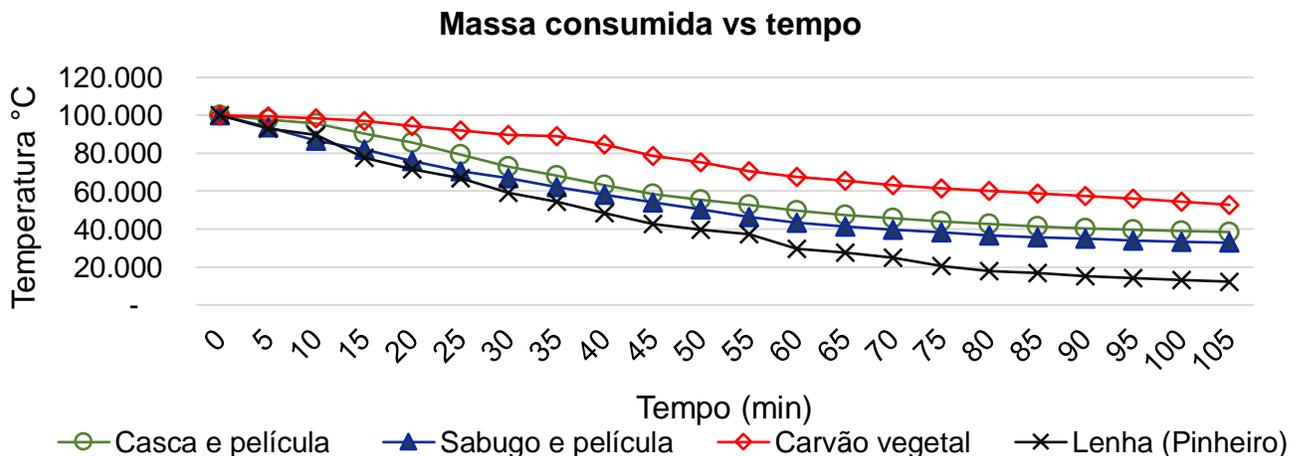


Figura 25: Comportamento da massa durante o teste de combustão.

Os briquetes levavam de 5 a 10 minutos para se inflamar, e observou-se que um dos fatores que poderia contribuir para essa variação era a disposição dos briquetes no

combustor. Em algumas situações, a ignição ocorria mais rapidamente quando os briquetes estavam arranjados de modo a permitir melhor circulação de ar entre eles. Isso possibilitava espaço para a saída dos voláteis e evitava que estes dificultassem a entrada de ar, o que também poderia afetar o tempo total de queima. Durante a combustão dos briquetes, bem como do carvão e da lenha, observa-se um período inicial de queima até atingir o pico de temperatura, seguido por uma rápida diminuição até alcançar uma estabilidade em torno de 300 a 400°C (exceto para a lenha, que estabilizou entre 200-300°C). É importante notar que o tempo total de análise compreendeu 105 minutos de queima. De acordo com QUIRINO e BRITO (1991), para processos de cozimento e aquecimento, é vantajoso manter uma temperatura média estável, evitando variações bruscas de temperatura que necessitariam de frequentes realimentações de combustível.

Em relação ao consumo de massa ao longo do teste, observa-se que o gráfico é quase linearmente decrescente. Após atingir as temperaturas máximas, o consumo de massa tende a seguir uma função logarítmica decrescente. Ambos os briquetes consumiram cerca de 65 a 70% de sua massa durante o teste, enquanto o carvão vegetal consumiu menos massa, aproximadamente 50%, e a lenha foi a que mais consumiu, cerca de 90%. No que diz respeito ao consumo de massa, a fórmula (11) sugerida por QUIRINO e BRITO (1991) para o cálculo do Índice de Consumo de Massa (ICOM) favorece os briquetes que têm menor taxa de consumo de massa ao longo do tempo, gerando altas temperaturas. Segundo esses autores, os briquetes que produzem mais calor com menos consumo de massa são os mais desejáveis. Após a realização dos testes de combustão, procedeu-se ao cálculo do ICOM para ambos os briquetes, cujos resultados estão apresentados na **Tabela 7**.

Tabela 7: Índice de Combustão (ICOM) dos briquetes produzidos

Briquetes	ICOM
Briquetes de casca carbonizada e película	1.26 ± 0.04
Briquetes de sabugo carbonizado e película	1.34 ± 0.03
Carvão vegetal	1.64 ± 0.04
Lenha (pinheiro)	0.75 ± 0.05

De acordo com a **Tabela 7**, os briquetes de sabugo carbonizado e película de castanha apresentaram um ICOM de $(1,34 \pm 0,03)$, maior do que os de casca carbonizada e película de castanha $(1,26 \pm 0,04)$. Isso era esperado, uma vez que os briquetes de sabugo e película foram os que mostraram maior poder calorífico e densidade energética. Como esperado, o carvão vegetal apresentou o maior valor de ICOM $(1,64 \pm 0,04)$, enquanto a lenha apresentou o menor $(0,75 \pm 0,05)$. Assim, pode-se perceber que os briquetes apresentam características mais próximas do carvão vegetal, tendo grande potencial para substituí-lo e reduzir seu consumo.

De acordo com RAMOS e PAULA *et al.* (2011), que produziram briquetes de diferentes resíduos agrícolas em seu estudo, obtiveram variações de ICOM de 0,43 a 0,65. Para briquetes de palha e de sabugo de milho, os valores de ICOM foram 0,597 e 0,631, respectivamente. Nessa biomassa, os valores máximos de temperatura alcançados foram de 300-420°C, significativamente menores em comparação aos registados aqui, e quase toda a massa foi consumida durante os testes (com uma massa de 150g e uma queima durando aproximadamente 1 hora). Esses valores de ICOM correspondem a biomassas não carbonizadas, que têm um menor conteúdo energético em comparação com os briquetes de biomassa carbonizada produzidos neste estudo.

No estudo realizado por QUIRINO e BRITO (1991), analisando briquetes de carvão vegetal de diferentes origens, foram obtidos valores de ICOM entre 0,31 e 1,23, sendo o valor mais alto para o briquete de carvão vegetal produzido nos EUA. Portanto, pode-se afirmar que a carbonização dos briquetes contribui significativamente para a geração de altas temperaturas (calor) e para o consumo reduzido de massa, sendo que o alto teor de carbono fixo pode ter contribuído para esse aspecto, uma vez que o carbono é a fonte de calor.

4.5. Ensaio em Equipamentos de Combustão de Combustíveis Sólidos

4.5.1. Teste de Fervura de Água

O teste de fervura ocorreu simultaneamente ao teste de ICOM, pois não havia briquetes suficientes para realizar ambos separadamente.



Figura 26: Imagens de combustão: A) Briquetes embebidos de querosene no combustor; B) Ignição da querosene; C) Ignição dos briquetes; D) Emissão de fumo branco durante a fervura; E) Aderência de óleo acastanhado na panela; F) Formação de cinzas a volta dos briquetes.

Para realizar o teste de fervura, os briquetes foram colocados no combustor. Para acelerar a ignição, adicionou-se querosene (**Figura 26 – A e B**) e uma pequena quantidade de cavacos de pinho. O querosene é altamente inflamável e produziu chama imediatamente após a ignição (**Figura 26– C**). O tempo de ignição dos briquetes variou entre 5 a 10 minutos. Observou-se a emissão de fumo branco com maior intensidade durante e após a ignição, o que era esperado devido às elevadas quantidades de voláteis, além de uma chama forte de cor alaranjada (**Figura 26 – D**). Também foi notável a presença de óleo castanho escuro ao redor da panela, possivelmente o líquido da casca de castanha de caju (CNSL) proveniente da película de castanha de caju (**Figura 26– E**). Portanto, não é aconselhável aquecer alimentos em contato direto com as emissões dos briquetes. Durante a fase inicial quente e a fervura, formou-se uma camada de cinzas ao redor dos briquetes, que atuou como isolante, resultando numa redução na taxa de queima dos mesmos (**Figura 26 – F**). Também foi observada a fragmentação dos briquetes durante a queima, embora tenham permanecido estáveis durante o teste (**Figura 26 – F**).

BERNARD (2022), em seu estudo sobre briquetes carbonizados com resina como ligante, observou chama alaranjada, fumo branco e registou um tempo de ignição variando entre 6 a 7 minutos ao usar bioetanol em gel como agente de ignição. Ele também observou a formação de camada de cinzas ao redor dos briquetes e sua tendência à fragmentação. Embora não tenha notado óleo ao redor da panela, registou vestígios de fuligem preta. Portanto, esse comportamento é característico dos briquetes carbonizados.

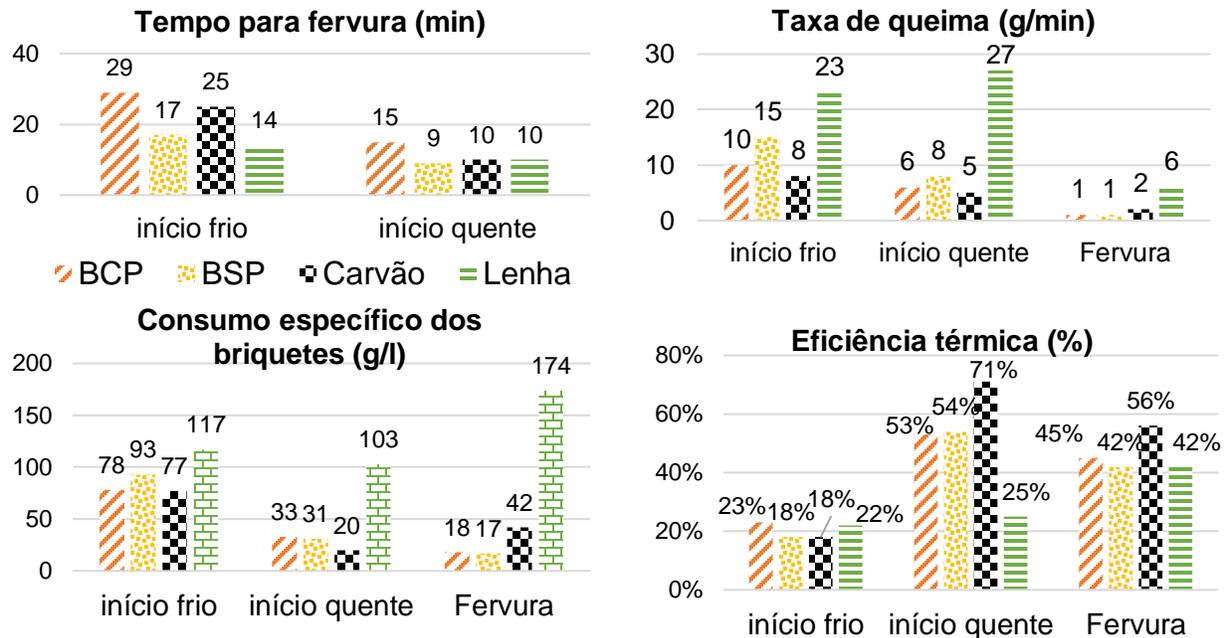


Figura 27: Resultados do teste de fervura.

Na **Figura 27**, podem ser observados alguns resultados do teste de fervura, comparando os dois tipos de briquetes, carvão e lenha, bem como as três etapas do teste (início quente, início frio e fervura). O briquete de casca e película (BCP) levou mais tempo para ferver a água (29 minutos) em comparação com o briquete de sabugo e película (BSP) (17 minutos) no início frio, e também foi mais lento no início quente, com o BCP levando 15 minutos e o BSP 9 minutos para ferver 2,5 litros de água, apresentando valores próximos aos do carvão e da lenha, embora a lenha tenha sido mais rápida na fervura no início frio. BERNARD (2022) registou tempos de fervura variando entre 20 a 42 minutos para 2,5 litros de água e tempos mais curtos entre 14 a 25 minutos no início quente ao usar briquetes carbonizados com diferentes proporções de ligante, portanto os briquetes produzidos neste estudo apresentaram melhores resultados de tempo de fervura em comparação com os estudados pelo autor.

Os briquetes mostraram melhores resultados em relação à lenha (23 g/min no início frio, 27 g/min no início quente e 6 g/min na fervura), mas o carvão ainda obteve melhores resultados do que os briquetes nas fases de início frio (8 g/min) e quente (5 g/min). O BSP teve uma taxa de queima maior no início frio e quente (15 g/min e 8 g/min, respectivamente) em comparação com o BCP (10 g/min e 6 g/min, respectivamente), ambos apresentando a mesma taxa de queima na fase de fervura (1 g/min). NWABUE

et al. (2017) registaram taxas de queima entre 1300 a 3800 g/min para briquetes carbonizados que incorporam resíduos plásticos. Portanto, é possível perceber que os briquetes produzidos neste estudo queimam mais lentamente, não necessitando de adições frequentes ao combustor durante a cocção. Os briquetes ainda mostraram potencial semelhante ao do carvão, apresentando uma taxa de queima menor do que este na fervura.

Foi necessário um maior quantidade de BSP (93 g) para ferver 1 litro de água durante o início frio em comparação com o BCP (78 g), mas nas fases seguintes, o consumo foi semelhante. Em comparação com o carvão e a lenha, o BCP apresentou um consumo específico semelhante ao do carvão no início frio, e o carvão apresentou o melhor valor no início quente (20 g/L), enquanto a lenha teve uma média de 110 g/L, um valor muito superior ao dos briquetes. Na fase de fervura, os briquetes apresentaram um consumo específico muito inferior (18 g/L) em comparação com a lenha (174 g/L) e um pouco acima do dobro do valor do carvão (42 g/L). BERNARD (2022) obteve um consumo específico variando entre 21,7 a 70,1 g/L, com os valores mais altos na fase de início frio. GRIMSBY *et al.* (2016), estudando diferentes combustores e diferentes combustíveis, incluindo resíduos de milho, obtiveram um consumo específico entre 83 a 102 g/L. Portanto, o consumo específico obtido neste estudo está dentro desses intervalos, sendo que na fase de fervura foram obtidos os melhores resultados, indicando que os briquetes têm a capacidade de gerar grandes quantidades de calor consumindo menos combustível.

O combustor apresentou resultados de eficiência térmica ligeiramente melhores para o BCP em comparação com o BSP, devido ao seu bom resultado de consumo específico. O carvão registou os maiores valores de eficiência térmica (18-71%) em comparação com os briquetes (18-54%), embora estes tenham alcançado valores elevados, superiores aos da lenha (22-42%). MATOS (2021) registou valores médios de eficiência térmica para briquetes de resíduos de coco entre 20-26%, enquanto o carvão vegetal obteve aproximadamente 27%. No estudo de briquetes carbonizados, BERNARD (2022) obteve valores de eficiência térmica variando entre 21-31% no início frio, 44-55% no início quente e 39-50% na fervura. Portanto, os valores obtidos neste estudo (18-54%)

estão dentro dos intervalos propostos pelos autores acima. É importante lembrar que a eficiência térmica mede a fração de calor produzido que chega à panela, enquanto o restante é perdido para o ambiente (CLEAN COOKING ALLIANCE, 2014). A **Tabela 8** apresenta os valores médios de rendimento térmico durante as fases de início quente e início frio, de acordo com as métricas da IWA (International Water Association).

Tabela 8: Eficiência térmica de alta potência segundo métricas de desempenho do IWA

Eficiência térmica média de alta potência (início quente e frio) de acordo com as métricas de desempenho do IWA			
BCP	BSP	Carvão vegetal	Lenha (pinheiro)
37.7%	35.9%	44.7%	23.5%

Conforme mostrado na **Tabela 8**, os briquetes apresentaram rendimentos elevados (35,9-37,7%), comparados com a lenha (23,5%) e um pouco abaixo do carvão vegetal (44,7%). Embora o carvão tenha apresentado um rendimento maior no teste de fervura, os briquetes demonstraram resultados positivos e são capazes de suprir a demanda energética equivalente à da lenha, além de oferecer uma alternativa para reduzir o uso do carvão vegetal.

4.5.1.1. Emissões e perfil de temperatura do teste de fervura

A **Figura 28** mostra os gráficos de emissões de CO₂ e CO, além dos gráficos de emissões de material particulado, perfil de temperatura da água e umidade relativa durante o teste de fervura para o BSP e BCP, bem como para o carvão e a lenha para efeitos comparativos (Ilustrações mais detalhadas estão no apêndice C dos anexos).

Os perfis de temperatura mostraram duas fases com aumento linear de temperatura e uma fase de temperatura constante, típicas do teste de fervura de água proposto pelo CLEAN COOKING ALLIANCE (2014). As quedas abruptas de temperatura ocorreram devido à troca da panela após o início frio e também quando a panela foi removida do combustor para pesagem antes da fase de fervura. Observou-se que a temperatura local de ebulição da água foi de 99,4°C.

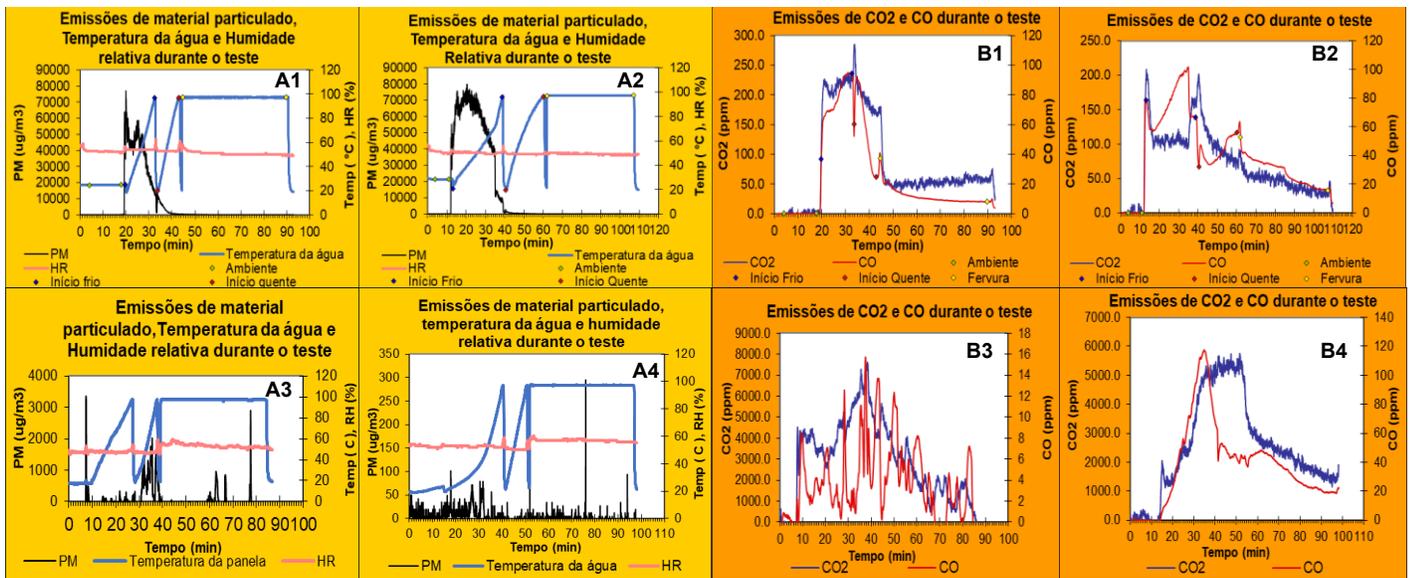


Figura 28: A - Emissões de PM, Perfil de temperatura da água e Humidade Relativa; B - Emissões de CO₂ e CO; 1 – BSP (Briquete de sabugo e película); 2 – BCP (Briquete de casca e película); 3 – Lenha (pinheiro); 4 – Carvão vegetal

A emissão de material particulado foi mais intensa no início do teste para os briquetes, chegando a atingir valores de 80.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, uma vez que este é principalmente composto por material volátil. O fluxo reduziu significativamente durante as fases de início quente e fervura, um fenômeno também observado por BERNARD (2022). Em comparação com o carvão e a lenha, estes apresentaram fluxos muito mais baixos, com a lenha atingindo 3.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e o fluxo mais baixo sendo registrado para o carvão com picos de 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Este fato pode ser justificado pela quantidade de voláteis presentes nos briquetes e pela menor quantidade nos briquetes de carvão, além do líquido de casca de castanha de caju (CNSL) presente nos briquetes.

O CO₂ e o CO apresentaram comportamentos semelhantes, atingindo altas concentrações no início e durante a fase de alta potência, reduzindo sua concentração na fase de fervura e mantendo-se praticamente constantes (exceto para o caso da lenha, onde o fluxo de CO se manteve inconsistente ao longo do teste). Os picos de concentração observados nos gráficos resultaram da retirada da panela do combustor para pesagem, distribuindo repentinamente as emissões diretamente pela chaminé. O carvão vegetal e a lenha apresentaram maiores fluxos de emissão de CO₂, atingindo picos de 6000 ppm e 8000 ppm, respectivamente. Os briquetes tiveram emissões de CO₂

mais baixas, atingindo picos de 200-250 ppm. Para as emissões de CO, os menores fluxos foram registrados pela lenha com picos de 16 ppm, enquanto os briquetes atingiram picos de 100 ppm, sendo os valores mais elevados registrados pelo carvão, com 120 ppm. A **Tabela 9** apresenta as quantidades totais de emissões do teste de fervura em gramas, permitindo análise das três fases (início frio, início quente e fervura) para cada tipo de briquete produzido.

Tabela 9: Emissões totais dos gases CO, CO₂ e PM_{2.5} durante o teste de fervura.

Fases	BCP			CO (g)	BSP			Carvão Vegetal			Lenha		
	CO (g)	CO ₂ (g)	PM _{2.5} (mg)		CO ₂ (g)	PM _{2.5} (mg)	CO (g)	CO ₂ (g)	PM _{2.5} (mg)	CO (g)	CO ₂ (g)	PM _{2.5} (mg)	
Início Frio	11.09	25	7530	11.46	40	9152	16.49	1234	2	0.61	990	2	
Início Quente	4.50	21	80	4.72	25	198	4.22	742	0	0.47	822	43	
Fervura	2.45	4	2	4.56	26	18	14.47	1579	1	1.46	1680	5	

Tal como observado nos gráficos de fluxo das emissões, a fase de início frio emitiu maiores quantidades de gases em comparação com as outras fases, sendo o PM_{2.5} a emissão de maior destaque, atingindo valores de 7530 mg (BCP) e 9152 mg (BSP). Mais uma vez, isso pode ter sido causado pela emissão do óleo castanho (possivelmente CNSL) observado ao redor da panela (**Figura 26 – E**). No início quente, esses valores diminuíram drasticamente para 80mg e 198mg, respectivamente, e caíram para 2 mg e 18 mg na fase de fervura. Para ambos os briquetes, o CO variou de 2,45g a 11,46g e o CO₂ variou de 4g a 40g, valores muito inferiores em comparação com o carvão.

BERNARD (2022) registou valores totais de emissão de PM_{2.5} variando de 0,3 a 25,5 mg, valores muito abaixo dos registrados aqui, o que pode ser justificado pelo fato de que este autor não registou a presença de substância oleosa, mas apenas fuligem preta ao redor da panela durante a combustão. No entanto, ele obteve maiores emissões de CO e CO₂, com quantidades variando de 9,3 a 58g para CO e de 92,4 a 173,3g para CO₂.

5. Conclusão

Neste trabalho foi possível estudar o potencial energético da casca e sabugo do milho para a produção e uso dos briquetes, pelo que se constatou o seguinte:

- A carbonização da amostra a 400°C durante 2 horas eliminou cerca de 60% do teor de voláteis, favorecendo o aumento do carbono fixo, que é o principal responsável pela geração de calor.
- Notou-se diferenças nos poderes caloríficos antes e depois da carbonização, com um aumento significativo para o sabugo, de 21,11 MJ/kg para 25,4 MJ/kg, o que não se verificou para a casca (20,98 MJ/kg para 21 MJ/kg).
- Os briquetes produzidos a partir da biomassa carbonizada, com teores de humidade entre 8-12%, apresentaram algumas rachaduras. No entanto, intervalos de humidade específicos mostraram-se mais propícios para a obtenção de briquetes de melhor qualidade: entre 9-11% para a mistura da casca carbonizada com a película e entre 7-9% para a mistura do sabugo carbonizado com a película.
- A mistura da película de castanha de caju em proporção de 50% apresentou valores menores no teste de friabilidade, abaixo de 2.6% para ambos os resíduos.
- A compactação contribuiu significativamente para o aumento da densidade energética da biomassa em relação ao seu estado *in natura*, elevando o valor energético em 290% para a mistura de sabugo e 380% para a casca.
- O briquete de sabugo carbonizado e película apresentou um Índice de Combustão de Oxigênio Modificado (ICOM) de 1.34, apesar de ter consumido uma massa ligeiramente maior do que o briquete de casca carbonizada, que obteve um ICOM de 1.26. Ambos valores são superiores ao ICOM da lenha, que foi de 0.75. Valores mais altos de ICOM foram observados no carvão vegetal, que foi de 1.64.
- Nos testes de fervura, verificou-se que, apesar de levar mais tempo para ferver, os briquetes de casca e película apresentaram uma eficiência térmica ligeiramente maior (37.7%) em relação aos briquetes de sabugo e película (35.9%). Ambos tipos de briquetes foram mais eficientes que a lenha (23.5%), mas ainda estiveram abaixo do carvão vegetal (44.7%). Verificou-se também que os briquetes geraram grandes quantidades de material particulado (picos de 80 mg/m³), enquanto que para a lenha e o carvão vegetal as quantidades foram reduzidas. Em

contrapartida, a lenha e o carvão vegetal produziram maiores quantidades de CO₂ (picos de 8000 ppm e 7000 ppm, respectivamente), comparativamente aos briquetes que apresentaram picos de 200-250 ppm.

6. Recomendações

Com estes resultados e com as restrições encontradas no trabalho, recomenda-se para estudos futuros:

- Realizar os testes que não puderam ser realizados devido à certas limitações (análise elementar, teste de resistência a compressão) de modo a obter resultados de uma análise mais completa;
- Estudar diferentes temperaturas para a carbonização de modo a obter maior rendimento;
- Realizar testes de índice de combustão e de fervura de água em separado de modo a obter resultados mais coerentes;
- Estudar melhores aglutinantes para a produção de briquetes carbonizados com possibilidades de obter mais valor energético e menores emissões.
- Melhoria das condições ou estados de certos equipamentos, de modo a reduzir ou, se possível, eliminar os erros instrumentais. Por exemplo, a obtenção de um colector para o moinho de martelos para moagem a grosso, de modo a evitar perdas significativas da biomassa; assim como a obtenção de novas prensas para a briquetagem de modo a facilitar e acelerar a produção de briquetes.

7. Referências Bibliográficas

1. ALER, 2017 – **Energias Renováveis em Moçambique: Relatório nacional do ponto de situação**. 2 ed., Associação Lusófona de Energias Renováveis, Maputo.
2. ALVES, D. A. H.; 2014 – **Avaliação Do Potencial Energético de Resíduos de Produção Agrícola Provenientes do Beneficiamento da Mandioca e do Milho**, Dissertação (mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal de Alagoas, Maceió.
3. AMARAL, C., MOUZINHO, B., VILISA, D., MATCHAYA, G., NHLENGETHWA, S., WILSON, D., NHEMACHENA, C.; 2019 - **Analysis of maize production and yield in Mozambique (2000-2018): trends, challenges and opportunities for improvement**. Ministério da Agricultura e Desenvolvimento Rural, Moçambique.
4. AMER, M., ELWARDANY, A., 2020 – **Biomass carbonization. Renewable Energy – Resources, challenges and applications**, Intechopen. Disponível em <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.90480> acesso aos 25/10/23
5. AQUINO, A., LIM, C., KAECHHELE, K., TAQUIDIR, M.; 2018 – **Notas sobre a floresta em Moçambique**. Grupo banco mundial e Sweden sverige, Maputo.
6. BANDEIRA, F.P.M; 2012 – **Desenvolvimento sustentável, matriz energética e tarifas de energia eléctrica**. cadernos aslegis, n.45, p. 197-212.
7. BARROS, L.O; 2012 – **Densidade energética de briquetes produzidos a partir de resíduos agrícolas**, Monografia (Engenharia florestal), Universidade de Brasília, Brasília DF.
8. BASU, P., 2013 - **Biomass Gasification, Pyrolysis, and Torrefaction: Practical Design and Theory**. Elsevier, 2nd ed., London.
9. BERNARD, K; 2022 - **Canarium schweinfurthii resin as an organic binder for carbonized briquettes**. Dissertação (Doutoramento em Ciência e Engenharia de Energia Sustentável), Instituto Africano de Ciência e Tecnologia Nelson Mandela, Arusha.
10. BRITANNICA, 2023 – **Corn**. *Encyclopedia Britannica*, The Editors of Encyclopaedia. <https://www.britannica.com/plant/corn-plant> - acesso aos 09/10/23

11. BRITO, J. O., 1993 - **Expressão da produção florestal em unidades energéticas.**
In: CONGRESSO FLORESTAL PANAMERICANO, n. 1, CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, *Sociedade Brasileira de Silvicultura*, Anais, Curitiba.
12. BROWN, W. L., ZUBER, M. S., DARRAH, L. L., GLOVER, D. V.; 1985 – **Origin, Adaptation and Types of Corn**, *National Corn Handbook*, Iowa State University, Iowa.
13. BURGESS, M. S., MEHUYS, G. R., MADRAMOOTOO, C. A.; 2001 - **Decomposition of grain-corn residues (*Zea mays* L.): A litterbag study under three tillage systems.** *Canadian Journal Soil Science*. Vol. 82, n. 2, pg. 127–138
14. CASA, R.T., REIS, E.M., ZAMBOLIM, L; 2003 – **Decomposition of corn residue and the sacrophytic survival of *Stenocarpella macrospora* and *S. maydis*.** *Fitopatologia Brasileira*, vol 28, nº 4.
15. CARVALHO, E. A., BRINCK, P., 2010 - **Briquetagem.** CETEM, *Tratamento de Minérios*, 5ª ed., pg. 683-703.
16. CLEAN COOKING ALLIANCE; 2014 – **The Water Boiling Test version 4.2.3**, - <https://cleancooking.org/research-evidence-learning/standards-testing/protocols/> - acesso aos 13/02/24
17. CHEN, L., XING, L., HANA, L.; 2009 - **Renewable energy from agro-residues in China: solid biofuels and biomass briquetting technology**, *Renewable and Sustainable Energy Review*, Oxford, U.K, v.13, n. 9, p. 2689-2695.
18. CTCN, 2020 – **Urban Briquette Making Pilot.** Centre for Technology and Climate Change, Nairobi.
19. DANTAS, A. P., SANTOS, R. R., SOUZA, S. C.; 2012 – **O briquete como combustível alternativo para a produção de energia.** III Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, *Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais*, Goiânia.
20. DE RAMOS e PAULA, L.E., TRUGILHO, P.F., REZENDE, R.N., DE ASSIS, C.O., BALIZA, A.E.R., 2011 - **Produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulósicos.** *Pesquisa Florestal Brasileira*, Lavras, Minas Gerais, Brasil.
21. DEMIREL, Y., 2012 - **Energy: Production, Conversion, Storage, Conservation, and Coupling.** vol. 69, Springer London, Nebraska - <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2372-9> - acesso aos 19/10/23

22. DEON, T., 2021 – **Tipos de grãos de milho: tudo que você precisa saber para fazer a escolha certa**. *aegro-lavoura*; - <https://blog.aegro.com.br/tipos-de-graos-de-milho/> acesso aos 19/10/23
23. DESHANNAVAR, U. B., HEGDE, P. G., DHALAYAT, Z., PATIL, V., GAVAS, S., 2018 - **Production and characterization of agro-based briquettes and estimation of calorific value by regression analysis: An energy application**, *Materials Science for Energy Technologies*, v. 1, p. 175-181.
24. DIAS, J. M. C. S., SOUZA, D. T., BRAGA, M., ONOYAMA, M. M., MIRANDA, C. H. B., BARBOSA, P. F. D., ROCHA, J. D.; 2012 - **Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agro-industriais e florestais**. Embrapa Agroenergia, Brasília.
25. DIONIZIO, A. F.; 2017 - **Aproveitamento Energético De Resíduos Agroindustriais No Distrito Federal**, Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) PPGEFL.DM, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília.
26. FAOSTAT, 2023 – **Crops and livestock products**. Food and agriculture organization of the United Nations - <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL> acesso aos 19/10/23
27. FAS/USDA, 2023 – **Grain: World Markets and Trade**. United States Department of Agriculture, USA. - <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/grain.pdf> acesso aos 23/10/23
28. FERNANDES, C. R. P., AUGUSTO, A. P., SANTOS, I. J. S., SOUZA, S. C., 2012 – **Produção de Briquete Industrial: Energia Limpa e Sustentável**. III Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, *Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais*, Goiânia.
29. FERNANDEZ, B. O., GONÇALVES, B. F., PEREIRA, A.C.C., HANSTED, A.L.S., PÁDUA, F.A., DA RÓZ, A.L., YAMAJI, F.M.; 2017 – **Características Mecânicas e Energéticas de Briquetes Produzidos a partir de Diferentes Tipos de Biomassa**, *Revista Virtual de Química*, vol 9, nº1, p. 31.
30. FORTES, A.G., RAIMUNDO, B.; 2020 – **Bioenergia em Moçambique: tecnologias de produção, uso e aspetos sustentáveis**. *Revista Desenvolvimento Socioeconómico em Debate*, Vol. 6, nº 1, p. 60-77.

31. GADELHA, A. M. T., ALMEIDA, F. D. L., SILVA, R. A., MALVEIRA, J. Q., LOPES, A. A. S., RIOS, M. A. S.; 2019 – **Cashew nut husk and babassu coconut husk residues: evaluation of their energetic properties**, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, Taylor and Francis Group.
32. GELETHUKHA, G., DRAHNIEV, S., ZHELIEZNA, T., BASHTOVYI, A.; 2020 - **Analysis of pellets and briquettes production from corn residues**. *UABIO*, n. 23, Ukraine.
33. GRIMSBY, L. K.; RAJABU, H. M.; TREIBER, M. U.; 2016 – **Multiple biomass fuels and improved cook stoves from Tanzania assessed with the water boiling test**. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, nr 14, p. 63–73.
34. GUEIFÃO, C., ANDRÉ, J., NOBREGA, N., CARANOVA, R., SANTOS, J., ANDRE, S., SOUSA, J., CUMANO, G., ABREU, M., CHAVES, R., MORAIS, M., MARTINS, C., ROSA, F., MENDONÇA, B., SANSANA, J., DOS SANTOS, P.P., FALCÃO, D., 2013 - **Atlas das energias renováveis de Moçambique: Recursos e projectos para produção de electricidade**. 1. ed. Maputo - Moçambique: Gesto-Energia, S.A.
35. GOLDEMBERG, J., 1998 - **Energia, meio ambiente e desenvolvimento**., Ed. Edusp. pg 234, São Paulo.
36. GONÇALVES, F. B.; YAMAJI, F. M.; FERNANDEZ, B. O.; RÓZ, A. L.; FLORIANO, F. S.; 2013 – **Caracterização e comparação entre diferentes granulometrias de serragem de Eucalyptus grandis para confecção de briquetes**. *Revista Instituto Florestal*, vol. 25, pg. 205
37. GONÇALVES, J. E.; SARTORI, M. M. P; LEÃO, A. L. 2009 - **Energia de briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de Eucalyptus grandis**. In: *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 13.
38. HORST, D. J., 2013 - **Avaliação da Produção Energética a Partir de Ligninas Contidas em Biomassas**, Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa.
39. INE, 2022 – **Anuário Estatístico 2021**, Instituto Nacional de Estatística, Moçambique.

40. KATYAL, S., THAMBIMUTHU, K., VALIX, M., 2003 - **Carbonisation of bagasse in a fixed bed reactor: influence of process variables on char yield and characteristics.** *Renewable Energy*, vol. 28, pg. 713-725.
41. KLAUTAU, J. V. P. 2008 - **Análise Experimental de uma Forno a lenha de Fluxo Cocorrente Para Secagem de Grãos.** Dissertação (mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) PPGERHA, UFPR. Curitiba.
42. LOBATO, C. C. S., REIS, M. P., SILVA, L. F. F., PENISCH, D. C. S., NAGAISHI, T. Y. R.; 2017 - **Aproveitamento de Biomassa do Coco (Cocos nucifera L.) Para Uso Energético,** II Congresso Internacional das Ciências Agrárias: COINTER – PDVAgro, Amazônia.
43. LUCAS, C.; CONDO, A.; 2021 - **Biomassa: Conceitos. Potencialidades. Aplicação.** Universidade Eduardo Mondlane, Maputo.
44. MABILANA, H. A., FONTANA, D. C., FONSECA, E. L.; 2012 - **Desenvolvimento de modelo agrometeorológico espectral para estimativa de rendimento do milho na Província de Manica-Moçambique.** *Revista Ceres*, V. 59, n. 3, p. 337-349, Viçosa;
45. MARAFON, A. C., SANTIAGO, A.D., AMARAL, A. F. C., BIERHALS, A. N., PAIVA, H. L., GUIMARÃES, V. S.; 2016 - **Uso da biomassa para geração de energia,** Embrapa tabuleiros costeiros, 1 ed., Aracaju.
46. MATOS, J.P.M, 2021 - **Estudo e caracterização das cascas de coco verde e coco seco para a produção de briquetes e utilização em equipamentos de combustão de combustíveis sólidos.** tese (Licenciatura em Engenharia Química) – Universidade Eduardo Mondlane, Maputo.
47. MCKENDRY, P., 2002 - **Energy production from biomass (part 1): overview of biomass, Bioresource Technology.**
48. MINISTÉRIO DE ENERGIA; 2007 – **Estatística de Energia,** Direcção de estudos e planificação, Moçambique.
49. MORO, J. P., 1987 – **Briquetagem de finos de carvão vegetal.** Anais da 2ª jornada de Engenharia dos países de língua portuguesa, Rio de Janeiro.

50. MUDEMA, J. A.; SITOLE, R. F.; MLAY, G.; 2012 - **Rentabilidade da cultura do milho na zona sul de Moçambique: Estudo de caso do distrito de Boane**. Instituto de Investigação Agrária de Moçambique, Maputo.
51. NAKASHIMA, G. T.; MARTINS, M. P.; DA SILVA, D. A.; CHRISOSTOMO, W.; YAMAJI, F. M.; 2014 - **Aproveitamento de Resíduos Vegetais Para a Produção de Briquetes**, Revista Brasileira de Ciências Ambientais, v. 34, n. 3, p. 22-29.
52. NWABUE, F. I.; UNAH, U.; ITUMOH, E. J.; 2017 – **Production and characterisation of smokeless bio-coal briquettes incorporating plastic waste materials**. *Environmental Technology and Innovation*, n 8, p. 233–245.
53. OKOT, D. K., BILSBORROW, P. E., PHAN, A. N., 2022 - **Thermo-chemical behaviour of maize cob and bean straw briquettes**, *Energy Conversion and Management: X*, Elsevier.
54. OLIVEIRA, J. B.; GOMES, P. A.; ALMEIDA, M. D; 1978 - **Estudos Preliminares de Normalização de Testes de Controle de Qualidade do Carvão Vegetal**. Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais, Belo Horizonte.
55. OMAR, S., 2003 - **Análise de Ciclo de Vida Aplicada ao Processo Produtivo de Cerâmica Estrutural Tendo Como Insumo Energético Capim Elefante (Pennisetum Purpureum Schaum)**. Campinas, São Paulo.
56. PARIKH, J., CHANNIWALA, S.A., GHOSAL, G.K.; 2005 – **A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels**. *Fuel*, Elsevier, Vol. 84, pp. 487-494.
57. QUIRINO, W. F.; BRITO, J. O., 1991 - **Características e índice de combustão de briquetes de carvão vegetal**. LPF – Série Técnica Nº 1, Brasília-DF.
58. REN21, 2012 – **Renewables 2012 Global Status Report**. Renewable Energy policy network for the 21st century, Paris.
59. SILVA, D.A; YAMAJI, F.M; DE BARROS, J.L; DA RÓZ, A.L; NAKASHIMA, G.T., 2015 – **Caracterização de biomassas para a briquetagem**, FLORESTA, Curitiba, PR, v. 45, n. 4, p. 713-722.
60. SILVA, R. L., OLIVI, J. B., SILVA, A. M. P., 2022 - **Resíduos da colheita do milho para avaliação de cogeração: disponibilidade no Estado de Mato Grosso do Sul**

- e características energéticas.** *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, vol. 15, n. 1 pg. 255-266;
61. SPEIGHT, J.G., 2019 – **Handbook of petrochemical processes.** *Chemical industries*, CRC Press, Wyoming.
62. STURION, J. A., PEREIRA, J. C. D, CHEMIM, M.S., 1998 – **Qualidade da Madeira de Eucalyptus viminalis Para Fins Energéticos Em Função Do Espaçamento e Idade de Corte.** *Boletim de Pesquisa Florestal*, Colombo, n. 16, p.55-59, dez.
63. TAVARES, P. T., 2016 – **Caracterizações Física e Química de Resíduos Sólidos da Cajucultura e Avaliação do Potencial Energético em Processos de Conversão Térmica,** Dissertação (Mestrado em Energias Renováveis), CEAR, Universidade Federal de Paraíba, João Pessoa.
64. TRIPATHI, A. K., IYER, P. V. R., KANDPAL, T. C., 1998 – **A techno-economic evaluation of biomass briquetting in India.** *Biomass and Bioenergy*. Vol 14. n 5/6. p 479-488. Great Britain.
65. TRIPATHI, K. K., GOVILA, O. P., WARRIER, R., AHUJA, V.; 2011 – **Biology of Zea mays (Maize).** Series of crop specific Biology documents, Government of India, New Delhi.
66. TSAMBA, A. J., 2008 - **Fundamental Study of Two Selected Tropical Biomass for Energy: Coconut and Cashew Nut Shells,** Tese (Doutoramento em Tecnologia de energia e fornos), KTH Industrial Engineering and Management, Stockholm, Sweden.
67. UAMUSSE, M. M., PERSSON, K. M., TSAMBA, A. J.; 2014 - **Gasification of Cashew Nut Shell Using Gasifier Stove in Mozambique,** *Journal of Power and Energy Engineering*, Vol. 2, p. 11-18.
68. VALE, A. T., DANTAS, V. F. S., ZAMBRYZYCKI, G. C., 2013 - **Potencial Energético Dos Resíduos Da Cultura Do Milho (Zea Mays),** *Evidência*, Joaçaba v. 13, n. 2, p. 153-164.
69. VAN WYLEN. G. J., SONNTAG. R. E., BORGNAKKE. C., 1998 - **Fundamentos da termodinâmica.** 5a edição. São Paulo: Edgar Blucher Ltda, 538p. p385-400.
70. VAZ, K., STOREY, P., CIPRIANO, A., CUAMBA, B., D'ADDÁRIO, P., FALCAO, P., LEHMAN, N.; 2011; **Green Investments in Mozambique.** Maputo: BoM - AFD.

71. VIANA, A. N. C., BORTONI, E.C., NOGUEIRA, L. A. H., HADDAD, J., VENTURINI, O. J., YAMACHITA, R. A.; 2012, **Eficiência energética: Fundamentos e aplicações**. 1. ed, PEE-ANEEL, ELEKTRO, Campinas, São Paulo.
72. VICTORINO, A. 1995. - **Estudo sobre o fogão a carvão vegetal e o ensino de Física em Moçambique**. Monografia (Ensino de Física), Universidade Pedagógica, Beira.
73. VIEIRA, A. C.; 2012 - **Caracterização Da Biomassa Proveniente De Resíduos Agrícolas**, Dissertação (mestrado em energia na agricultura), UNIOESTE PR, Cascavel.
74. ZANATTA, E. R., 2012 – **Estudo cinético da pirólise das biomassas: bagaço de mandioca, casca de soja e bagaço de cana**. Dissertação (Engenharia Química), Universidade Estadual do Oeste do Paraná.
75. <https://brasilecola.uol.com.br/geografia/fontes-energia.htm> acesso aos 02/10/2023.
76. <https://www.instagram.com/p/CnqAkfGu7yC/?igshid=MzRIODBiNWFIZA==> acesso aos 22/10/23.
77. <https://www.shutterstock.com/image-photo/sweet-corn-cobs-large-waste-1741423175> acesso aos 23/10/23

8. Anexos

8.1. Apêndice A: Caracterização física e química dos resíduos

Tabela A-1: Humidade *in natura* dos resíduos.

Humidade <i>in natura</i>					
Biomassa	No	massa (g)	Humidade (%)	Humidade média (%)	Desvio padrão
Casca de milho	1	1.003	8.18	7.91	0.18
	2	1.004	7.67		
	3	1.002	7.88		
Sabugo de milho	1	1.007	8.85	8.54	0.72
	2	0.997	9.3		
	3	1.002	7.46		
Película de castanha de caju	1	1.001	8.3	8.17	0.17
	2	1	7.91		
	3	1	8.3		
Resíduos de processamento de algodão	1	1.005	7.4	7.6	0.13
	2	1.003	7.62		
	2	1.001	7.78		

Tabela A-2: Classificação granulométrica dos resíduos.

Casca de milho moída					
Mesh	Abertura do peneiro (mm)	Massa retida (g)	Fracção retida (%)	Fracção cumulativa (%)	Fracção cumulativa passante (%)
16	1.18	18.9856	18.9856	18.9856	81.0144
18	1	1.3013	1.3013	20.2869	79.7131
35	0.5	38.616	38.616	58.9029	41.0971
base	0	41.0971	41.0971	100	0
Total		100	100	100	0

Casca de milho carbonizada e moída					
Mesh	Abertura do peneiro (mm)	Massa retida (g)	Fracção retida (%)	Fracção cumulativa (%)	Fracção cumulativa passante (%)
16	1.18	0	0	0	100
18	1	0	0	0	100
35	0.5	19.6362	19.6362	19.6362	80.3638
base	0	80.3638	80.3638	100	0
Total		100	100	100	

Sabugo de milho					
Mesh	Abertura do peneiro (mm)	Massa retida (g)	Fracção retida (%)	Fracção cumulativa (%)	Fracção cumulativa passante (%)
16	1.18	58.145	58.145	58.145	41.855
18	1	20.247	20.247	78.392	21.608
35	0.5	17.247	17.247	95.639	4.361
base	0	4.361	4.361	100	0
Total		100	100	100	

Sabugo de milho carbonizado e moído

Mesh	Abertura do peneiro (mm)	Massa retida (g)	Fracção retida (%)	Fracção cumulativa (%)	Fracção cumulativa passante (%)
16	1.18	0	0	0	100
18	1	0	0	0	100
35	0.5	3.56	3.56	3.56	96.34
base	0	96.34	96.34	100	0
Total		100	100	100	

Película de castanha de cajú

Mesh	Abertura do peneiro (mm)	Massa retida (g)	Fracção retida (%)	Fracção cumulativa (%)	Fracção cumulativa passante (%)
16	1.18	0	0	0	100
18	1	0.01	0.01	0.01	99.99
35	0.5	19.57	19.57	19.58	80.42
base	0	80.43	80.42	100	0
Total		100	100	100	

Resíduos de processamento de algodão

Mesh	Abertura do peneiro (mm)	Massa retida (g)	Fracção retida (%)	Fracção cumulativa (%)	Fracção cumulativa passante (%)
16	1.18	0	0	0	100
18	1	0.52	0.52	0.52	99.48
35	0.5	20.681	20.681	21.201	78.799
base	0	78.799	78.799	100	0
Total		100	100	100	

Tabela A-3: Rendimento de carbonização da biomassa.

Rendimento de Carbonização

biomassa	Tempo de residência	Massa inicial	massa final	Rendimento de carbonização	Rendimento de carbonização médio	Desvio padrão
Casca de milho	1h	35.365	14.3614	59.39092	59.15894	0.231979
		32.245	13.244	58.92697		
	2h	260.3866	98.994	61.98191	62.24096	0.259043
		320	120	62.5		
	3h	36	12.8946	64.18167	64.06012	0.121544
		45.26	16.3214	63.93858		
sabugo de milho	1h	26.6214	14.5725	45.2602	45.22065	0.039555
		30.785	16.876	45.18109		
	2h	445	161	63.82022	63.54277	0.277459
		147	54	63.26531		
	3h	17.2578	6.03	65.05928	64.85181	0.207472
	48.36	17.098	64.64433			

Tabela A-4: Densidade a granel da biomassa.

Biomassa	Nº	Balão vazio (g)	Balão+Amostra (g)	Amostra (kg)	Volume (m ³)	Densidade a granel (kg/m ³)	Densidade a granel média (kg/m ³)	Desvio padrão
Casca de milho	1	55.822	72.649	0.0168	0.0001	168.28	180.24	7.97
	2	44.665	63.339	0.0187	0.0001	186.74		
	3	46.629	65.199	0.0186	0.0001	185.7		
Casca de milho carbonizada	1	46.627	63.333	0.0167	0.0001	167.06	168.98	1.80
	2	50.133	66.955	0.0168	0.0001	168.22		
	3	43.344	60.512	0.0172	0.0001	171.68		
Sabugo de milho	1	28.309	33.643	0.0053	3E-05	213.35	210.94	1.61
	2	28.462	33.723	0.0053	3E-05	210.47		
	3	29.389	34.614	0.0052	3E-05	208.99		
Sabugo de milho carbonizado	1	28.311	37.618	0.0093	3E-05	372.31	382.47	8.74
	2	28.463	37.951	0.0095	3E-05	379.51		
	3	29.391	39.281	0.0099	3E-05	395.58		
Película de castanha de cajú	1	55.816	96.172	0.0404	0.0001	403.56	406.34	1.85
	2	48.106	88.853	0.0407	0.0001	407.48		
	3	44.663	85.461	0.0408	0.0001	407.98		
Mistura de casca de milho carbonizada e película de castanha de cajú (50-50%)	1	43.346	70.26	0.0269	0.0001	269.14	269.23	2.71
	2	50.133	77.463	0.0273	0.0001	273.3		
	3	46.632	73.158	0.0265	0.0001	265.26		
Mistura de sabugo de milho carbonizado e película de castanha de cajú (50-50%)	1	28.307	36.806	0.0085	3E-05	339.96	347.67	7.95
	2	29.387	38.377	0.009	3E-05	359.59		
	3	28.46	37.046	0.0086	3E-05	343.46		

Tabela A-5: Determinação do teor de cinzas da biomassa.

Biomassa	N°	Código do cadinho (porcelana)	cadinho vazio (g)	Amostra fresca (g)	Cadinho + cinzas (g)	Teor de cinzas (%)	Teor de cinzas médio (%)	Desvio padrão
Película da castanha de caju	1	1 (PC)	40.793	1.0009	40.858	6.5041	6.50	0.001
	2	2 (PC)	27.273	1.0013	27.338	6.5015		
sabugo de milho carbonizado	1	3 (SC)	39.653	1.0011	39.698	4.585	4.56	0.024
	2	4 (SC)	32.736	1.0006	32.781	4.5373		
casca de milho carbonizada	1	5 (CC)	36.379	1.0017	36.553	17.321	17.24	0.084
	2	6 (CC)	15.976	0.7008	16.096	17.152		
Mistura de sabugo carbonizado e película da castanha de caju (50-50%)	1	7 (SP)	44.813	1	44.877	6.42	6.43	0.013
	3	9 (SP)	29.142	1.0005	29.207	6.4468		
Mistura da casca de milho carbonizada e película da castanha de caju (50-50%)	1	10 (CP)	38.752	1.0018	38.85	9.7724	9.54	0.237
	3	12 (CP)	25.411	1.0002	25.504	9.2981		
casca de milho	1	9	25.41	1.0012	25.439	2.9265	2.84	0.088
	2	10	38.75	1	38.777	2.75		
sabugo de milho	1	11	39.651	1	39.67	1.84	1.81	0.031
	2	12	12.337	1.0009	12.355	1.7784		
casca de milho carbonizada 1h	1	1	44.811	1.0005	44.931	11.924	11.97	0.046
	2	23	40.793	1.0004	40.913	12.015		
casca de milho carbonizada 3h	1	30	36.377	1.0005	36.558	18.091	18.29	0.196
	2	4	27.927	1.0004	28.112	18.483		
sabugo de milho carbonizado 1h	1	15	51.375	1	51.405	3.06	3.10	0.040
	2	6	32.735	1	32.767	3.14		
sabugo de milho carbonizado 3h	1	7	42.341	1.0002	42.394	5.2989	5.07	0.226
	2	8	27.41	1.0007	27.458	4.8466		

Tabela A-6: Determinação do teor de voláteis das biomassas.

Biomassa	N°	Código do cadinho (porcelana)	cadinho vazio (g)	Amostra fresca (g)	Cadinho + carvão (g)	Teor de voláteis (%)	Teor de voláteis médio (%)	Desvio padrão
Película da castanha de cajú	1	5	48.644	1.0012	48.947	69.7563	70.88	1.120
	2	21	48.307	0.9999	48.587	71.9972		
sabugo de milho carbonizado	1	30	48.371	1.0010	48.962	40.9590	41.94	0.984
	2	25	49.01	1.0003	49.581	42.9271		
casca de milho carbonizada	1	21	48.282	1.0010	48.868	41.5085	41.11	0.394
	2	25	48.979	1.0005	49.572	40.7196		
Mistura de sabugo carbonizado e película da castanha de cajú (50-50%)	1	5	48.6920	1.0012	49.128	56.4722	56.54	0.070
	2	30	48.294	1.0019	48.728	56.6124		
Mistura da casca de milho carbonizada e película da castanha de cajú (50-50%)	1	13	48.5500	1.0019	48.977	57.4209	56.92	0.50
	2	13	48.511	1.0006	48.947	56.4261		
casca de milho	1	13	48.482	1.0011	48.7970	68.5646	67.53	1.034
	2	25	48.989	1.0008	49.324	66.4968		
sabugo de milho	1	5	48.633	1.0018	48.949	68.3969	68.78	0.387
	2	30	48.313	1.0000	48.621	69.1700		
casca de milho carbonizada 1h	1	13	48.463	0.9998	48.959	50.3201	50.17	0.155
	2	30	48.301	0.9998	48.8	50.0100		
casca de milho carbonizada 3h	1	5	48.679	1.0012	49.288	39.2329	39.21	0.022
	2	25	48.976	1.0003	49.584	39.1882		
sabugo de milho carbonizado 1h	1	21	48.272	1.0007	48.815	45.6980	45.81	0.116
	2	30	48.287	0.9998	48.8280	45.9292		
sabugo de milho carbonizado 3h	1	5	48.665	1.0013	49.2618	40.4274	40.02	0.404
	2	21	48.2360	1.0000	48.84	39.6200		

8.2. Apêndice B: Caracterização física, mecânica e térmica dos briquetes.

Tabela B-1: Estabilidade dimensional dos briquetes produzidos.

Briquetes de casca de milho carbonizada e película de castanha (50-50%)								
Tempo (horas)	Altura (mm)			Expansão longitudinal (%)			Expansão longitudinal média (%)	Desvio padrão
	B1 (mm)	B2 (mm)	B3 (mm)	B1 (mm)	B2 (mm)	B3 (mm)		
0	36.65	30.825	31.85	0	0	0	0	-
1	36.75	30.835	31.9	0.273	0.032	0.157	0.15	0.12
24	36.8	30.85	31.95	0.409	0.081	0.314	0.27	0.17
72	36.85	30.9	32	0.546	0.243	0.471	0.42	0.16
168	36.85	30.9	32	0.546	0.243	0.471	0.42	0.16
336	36.85	30.9	32	0.546	0.243	0.471	0.42	0.16

Briquetes de sabugo de milho carbonizado e película de castanha (50-50%)								
Tempo (horas)	Altura (mm)			Expansão longitudinal (%)			Expansão longitudinal média (%)	Desvio padrão
	B1 (mm)	B2 (mm)	B3 (mm)	B1 (mm)	B2 (mm)	B3 (mm)		
0	32.05	31.15	31.025	0	0	0	0	-
1	32.0325	31.125	31.0125	-0.055	-0.080	-0.040	-0.06	0.02
24	32	31.1	30.9625	-0.156	-0.161	-0.201	-0.17	0.03
72	31.9875	31.0875	30.95	-0.195	-0.201	-0.242	-0.21	0.03
168	31.9875	31.0875	30.95	-0.195	-0.201	-0.242	-0.21	0.03
336	31.9875	31.0875	30.95	-0.195	-0.201	-0.242	-0.21	0.03

Tabela B-2: Determinação da densidade aparente dos briquetes.

Biomassa	Nº	M (g)	H (mm)	D (mm)	V (m ³)	Densidade (kg/m ³)	Densidade aparente (kg/m ³)	Desvio padrão
Briquete de casca e película	1	60.949	30.025	50.1	6E-05	1029.741		
	2	61.483	30.575	49.95	6E-05	1026.212	1025.85	2.84
	3	60.104	30.025	49.95	6E-05	1021.585		
Briquete de sabugo e película	1	61.937	31.338	50	6E-05	1006.632		
	2	60.966	30.7	50	6E-05	1011.418	1009.72	2.06
	3	61.715	30.963	50.1	6E-05	1011.112		

M = massa, H = altura, D = diâmetro, V = volume

Tabela B-3: Determinação da densidade energética dos briquetes e dos resíduos.

Briquetes					
Briquete	Densidade aparente (kg/m^3)	PCU (MJ/kg)	Densidade energética (MJ/m^3)	Densidade energética média (MJ/m^3)	Desvio padrão
Casca e película	1,029.74	19.31	19,884.31		
	1,026.21	19.31	19,816.15	19,809.09	54.86
	1,021.58	19.31	19,726.80		
Sabugo e película	1,006.63	20.50	20,635.96		
	1,011.42	20.50	20,734.08	20,699.28	42.21
	1,011.11	20.50	20,727.80		
Biomassas					
Biomassa	Densidade a granel (kg/m^3)	PCU (MJ/kg)	Densidade energética (MJ/m^3)	Densidade energética média (MJ/m^3)	Desvio padrão
Casca de milho	168.28	19.63	3,303.30		
	186.74	19.63	3,665.54	3,538.03	156.49
	185.70	19.63	3,645.25		
Casca de milho carbonizada	167.06	19.65	3,282.67		
	168.22	19.65	3,305.17	3,320.44	35.36
	171.68	19.65	3,373.47		
Sabugo de milho	213.35	19.75	4,213.62		
	210.47	19.75	4,157.53	4,166.22	31.60
	208.99	19.75	4,127.51		
Sabugo de milho carbonizado	372.31	24.07	8,961.45		
	379.51	24.07	9,133.01	9,205.33	210.79
	395.58	24.07	9,521.51		
Película de castanha de cajú	403.56	17.64	7,118.75		
	407.48	17.64	7,189.22	7,168.25	33.00
	407.98	17.64	7,196.78		
Mistura de casca de milho carbonizada e película de castanha de cajú (50-50%)	269.14	19.31	5,197.07		
	273.30	19.31	5,276.25	5,198.50	51.83
	265.26	19.31	5,122.19		
Mistura de sabugo de milho carbonizado e película de castanha de cajú (50-50%)	339.96	20.50	6,969.10		
	359.59	20.50	7,371.55	7,127.19	162.91
	343.46	20.50	7,040.93		
Briquete de Casca e película	1,029.74	19.31	19,884.31		
	1,026.21	19.31	19,816.15	19,809.09	54.86
	1,021.58	19.31	19,726.80		
Briquete de Sabugo e película	1,006.63	20.50	20,635.96		
	1,011.42	20.50	20,734.08	20,699.28	42.21
	1,011.11	20.50	20,727.80		

Tabela B-4: Determinação da friabilidade dos briquetes produzidos

Briquete de casca de milho carbonizada e película de castanha de cajú (50%-50%)					
Massa inicial (g)	Massa final (g)	Massa perdida (g)	Friabilidade (%)	Friabilidade Média (%)	Desvio padrão
61.1015	59.7386	1.3629	2.231		
60.5043	58.8297	1.6746	2.768	2.56	0.22
59.9555	58.3412	1.6143	2.692		
Briquete de casca de milho carbonizada e película de castanha de cajú (60%-40%)					
Massa inicial (g)	Massa final (g)	Massa perdida (g)	Friabilidade (%)	Friabilidade Média (%)	Desvio padrão
61.4712	57.176	4.2952	6.987		
60.8341	58.5633	2.2708	3.733	5.46	1.15
58.7344	55.4033	3.3311	5.671		
Briquete de casca de milho carbonizada e película de castanha de cajú (70%-30%)					
Massa inicial (g)	Massa final (g)	Massa perdida (g)	Friabilidade (%)	Friabilidade Média (%)	Desvio padrão
60.1036	49.9145	10.1891	16.953		
61.4715	49.8496	11.6219	18.906	16.31	2.16
60.845	52.8959	7.9491	13.065		
Briquete de casca de milho carbonizada e película de castanha de cajú (80%-20%)					
Massa inicial (g)	Massa final (g)	Massa perdida (g)	Friabilidade (%)	Friabilidade Média (%)	Desvio padrão
60.9337	48.73165	12.20205	20.025		
60.2446	49.5506	10.694	17.751	17.87	1.44
60.5798	50.9845	9.5953	15.839		
Briquete de sabugo de milho carbonizado e película de castanha de cajú (50%-50%)					
Massa inicial (g)	Massa final (g)	Massa perdida (g)	Friabilidade (%)	Friabilidade Média (%)	Desvio padrão
61.9373	60.5051	1.4322	2.312		
61.3847	59.4594	1.9253	3.136	2.51	0.42
61.7146	60.4359	1.2787	2.072		
Briquete de sabugo de milho carbonizado e película de castanha de cajú (60%-40%)					
Massa inicial (g)	Massa final (g)	Massa perdida (g)	Friabilidade (%)	Friabilidade Média (%)	Desvio padrão
60.8774	57.6871	3.1903	5.241		
61.2357	58.3214	2.9143	4.759	4.99	0.17
60.4257	57.4215	3.0042	4.972		
Briquete de sabugo de milho carbonizado e película de castanha de cajú (70%-30%)					
Massa inicial (g)	Massa final (g)	Massa perdida (g)	Friabilidade (%)	Friabilidade Média (%)	Desvio padrão
60.2224	51.3587	8.8637	14.718		
60.3887	50.2149	10.1738	16.847	14.40	1.84
60.8774	53.7896	7.0878	11.643		
Briquete de sabugo de milho carbonizado e película de castanha de cajú (80%-20%)					
Massa inicial (g)	Massa final (g)	Massa perdida (g)	Friabilidade (%)	Friabilidade Média (%)	Desvio padrão
60.4478	49.2165	11.2313	18.580		
61.0111	51.2159	9.7952	16.055	19.46	2.86

60.6677	46.2548	14.4129	23.757		
Briquete de casca de milho carbonizada e resíduos de processamento de algodão (50%-50%)					
Massa inicial (g)	Massa final (g)	Massa perdida (g)	Friabilidade (%)	Friabilidade Média (%)	Desvio padrão
61.0485	59.2971	1.7514	2.869		
60.8251	58.439	2.3861	3.923	3.56	0.46
60.4587	58.1127	2.346	3.880		
Briquete de casca de milho carbonizada e resíduos de processamento de algodão (60%-40%)					
Massa inicial (g)	Massa final (g)	Massa perdida (g)	Friabilidade (%)	Friabilidade Média (%)	Desvio padrão
60.9544	57.4416	3.5128	5.763		
60.4571	57.439	3.0181	4.992	5.50	0.34
60.6587	57.1789	3.4798	5.737		
Briquete de casca de milho carbonizada e resíduos de processamento de algodão (70%-30%)					
Massa inicial (g)	Massa final (g)	Massa perdida (g)	Friabilidade (%)	Friabilidade Média (%)	Desvio padrão
60.7498	49.2083	11.5415	18.998		
61.1333	58.6781	2.4552	4.016	11.10	5.27
60.7812	54.5328	6.2484	10.280		
Briquete de casca de milho carbonizada e resíduos de processamento de algodão (80%-20%)					
Massa inicial (g)	Massa final (g)	Massa perdida (g)	Friabilidade (%)	Friabilidade Média (%)	Desvio padrão
61.1027	48.971	12.1317	19.855		
60.7519	49.1478	11.6041	19.101	16.13	4.47
59.1332	53.5587	5.5745	9.427		
Briquete de sabugo de milho carbonizado e resíduos de processamento de algodão (50%-50%)					
Massa inicial (g)	Massa final (g)	Massa perdida (g)	Friabilidade (%)	Friabilidade Média (%)	Desvio padrão
60.1143	57.2269	2.8874	4.803		
60.4431	57.9657	2.4774	4.099	4.39	0.27
60.1147	57.547	2.5677	4.271		
Briquete de sabugo de milho carbonizado e resíduos de processamento de algodão (60%-40%)					
Massa inicial (g)	Massa final (g)	Massa perdida (g)	Friabilidade (%)	Friabilidade Média (%)	Desvio padrão
60.7456	56.2144	4.5312	7.459		
61.2247	56.8965	4.3282	7.069	7.73	0.62
60.3357	55.1158	5.2199	8.651		
Briquete de sabugo de milho carbonizado e resíduos de processamento de algodão (70%-30%)					
Massa inicial (g)	Massa final (g)	Massa perdida (g)	Friabilidade (%)	Friabilidade Média (%)	Desvio padrão
60.6657	53.2114	7.4543	12.288		
60.3324	53.6547	6.6777	11.068	11.48	0.54
60.1421	53.4785	6.6636	11.080		
Briquete de sabugo de milho carbonizado e resíduos de processamento de algodão (80%-20%)					
Massa inicial (g)	Massa final (g)	Massa perdida (g)	Friabilidade (%)	Friabilidade Média (%)	Desvio padrão
61.2478	48.2145	13.0333	21.280		
60.2577	52.2369	8.0208	13.311	21.08	5.18
60.8871	43.4432	17.4439	28.650		

Tabela B-5: Dados de temperatura e consumo de massa médios durante o teste de índice de combustão dos briquetes.

Tempo (min)	CASCA E PELÍCULA			SABUGO E PELÍCULA			CARVÃO VEGETAL			LENHA (PINHEIRO)		
	Massa consumida (kg)	Temperatura (°C)	Massa consumida (%)	Massa consumida (kg)	Temperatura (°C)	Massa consumida (%)	Massa consumida (kg)	Temperatura (°C)	Massa consumida (%)	Massa consumida (kg)	Temperatura (°C)	Massa consumida (%)
0	0.568	31.77	100.000	0.586	27.27	100.000	0.460	24.2	100.000	0.726	26.7	100.000
5	0.556	127.20	97.887	0.549	128.53	93.682	0.458	154.66	99.565	0.675	116.3	92.975
10	0.544	162.67	95.716	0.508	183.47	86.739	0.453	197.8	98.478	0.651	139.2	89.669
15	0.513	205.60	90.317	0.480	250.27	82.015	0.447	266.8	97.174	0.563	189.7	77.548
20	0.486	242.07	85.622	0.444	371.60	75.754	0.434	371.2	94.348	0.519	221.7	71.488
25	0.450	278.87	79.167	0.414	402.83	70.632	0.424	465.5	92.174	0.486	246.5	66.942
30	0.414	480.70	72.887	0.392	466.43	66.875	0.413	718.3	89.783	0.430	251.3	59.229
35	0.387	602.33	68.134	0.364	708.40	62.094	0.409	740.3	88.913	0.396	281.8	54.545
40	0.359	729.67	63.146	0.340	749.17	57.997	0.389	770.4	84.565	0.352	423.3	48.485
45	0.333	603.87	58.609	0.317	679.77	54.126	0.361	748.4	78.478	0.311	470	42.837
50	0.315	541.07	55.458	0.295	526.20	50.313	0.346	630.4	75.217	0.289	467.9	39.807
55	0.299	446.83	52.700	0.271	469.10	46.272	0.325	614.1	70.652	0.271	453.8	37.328
60	0.282	416.10	49.707	0.253	434.90	43.256	0.310	597.8	67.391	0.216	421	29.752
65	0.270	399.03	47.535	0.242	417.57	41.264	0.301	566.6	65.435	0.201	339	27.686
70	0.260	390.33	45.775	0.233	411.60	39.784	0.291	531.4	63.261	0.181	328.8	24.931
75	0.249	380.73	43.897	0.224	402.83	38.304	0.283	501.2	61.522	0.148	307.5	20.386
80	0.242	375.30	42.606	0.215	392.90	36.767	0.276	500.8	60.000	0.129	297.4	17.769
85	0.235	366.67	41.373	0.209	390.93	35.743	0.270	450.8	58.696	0.121	259	16.667
90	0.230	362.93	40.434	0.204	388.27	34.832	0.265	443.1	57.609	0.111	222.9	15.289
95	0.226	355.53	39.730	0.199	382.17	34.035	0.258	425.2	56.087	0.103	215.3	14.187
100	0.222	349.53	39.085	0.196	372.93	33.409	0.251	421.3	54.565	0.095	190.3	13.085
105	0.218	346.97	38.439	0.192	369.03	32.783	0.243	400.68	52.826	0.089	175.4	12.259

8.3. Apêndice C: Teste de Fervura de água

Figura C-1: Amostra da folha de importação de dados (do WBT 4.2.3 *Data calculation sheet*)

Data Import Sheet

Aprovecho Advanced Studies in Appropriate Technology
Sensor Box -- For PEMS and LEMS
Software Version 4.2.1 for all Sensor Boxes
Updated 3/21/2013

Sensor Box Number
2035

Data file name (without .csv or .txt):
23C03_007_0512_01

Process Data

Enter PEMS # and data file name
Then Click "Process Data" Button and proceed to "WBT" sheet entry.

Fuel carbon fraction 50% Wood is about 50%, other fuels differ.

Charcoal carbon fraction 50% 50 - 90%

Flow Data	Magnahelic	Screen			
	Inch Water	Reading			m
Zero Flow	0	9213.6		Fan on @:	1.2 minutes
Full Flow	0.39	11747		Fan should be turned on between 1 and 4 minutes elapsed for p	b

Background (before lighting fire)

Start time 8:34:15 Verify these times

End time 8:48:00 But do not change unless in error

Start row 120

End row 533

	Phase 1 (Cold Start)	Phase 2 (Hot Start)	Phase 3 (Simmer)
Start time	08:50:00	09:04:00	09:15:00
End time	09:02:50	09:13:10	10:00:00
Test length (min)	12.8	9.2	45.0
Start row	593	1013	1343
End row	978	1288	2693

Total consumption/emission

	Phase 1 (Cold Start)	Phase 2 (Hot Start)	Phase 3 (Simmer)
Wood from Carbon	32.63	20.26	25.56
CO (g)	10.16	5.41	5.10
CO2 (g)	44	29	39
BC(abs) (mg)	0.00	0.00	0.00
PM2.5 (mg)	4520	265.22	24
CO/CO2 (molar)	0.364	0.297	0.206
EF-CO (g/kg)	311.51	267.01	199.61
EF-PM2.5 (g/kg)	138.53	13.09	0.95
EF-CO2 (g/kg)	1343.8	1413.7	1519.7

Average PM2.5 scattering coefficient (1/Mm)	Phase 1	Phase 2	Phase 3
	117309	9764	183

PM2.5 Mass Scattering Cross-section (m2/g)	Phase 1	Phase 2	Phase 3
	3.00	3.00	3.00

Additional Gas Measurement Entries:

Gas Name	Mol. Weight	Cold Start Avg. ppm	Hot Start Avg. ppm	Simmer Avg. ppm	GWP
Methane	16				
CO	28				
CO2	44				
THC	16				

(Make sure this is average minus the background ppm)

If only one sample was taken for all three phases, enter the average in each cell.
Results for Additional Gases are found at the very bottom of the "Results" Sheet.

Figura C-2: Amostra da folha de introdução de dados de fervura.

HELL FOUNDATION HEH PROJECT WATER BOILING TEST

DATA AND CALCULATION FORM (the form can be used with stoves that cook between one and four pots)*

Shaded cells require user input; unshaded cells automatically display outputs

Qualitative data

Name(s) of Tester(s)	YUNUS AMUJI
Test Number	1
Date	05/12/23
Stove type/model	BURN JIKOKOA
Location	BECT
Fuel species	BRIQUETES DE SABUGO CARBONIZADO E PELICULA DE CASTANHA DE CAJU
Wind conditions	NO

data entry places in the simmering test for pots other than the primary pot are left blank intentionally because the simmering test can not account for pots other than the primary pot.

Magnahelic

Full Flow: 0.39 inches H2O

Initial Test Conditions

Data	value	units	label	Data	value	units	label
Air temp	26.2	°C		Dry weight of Pot # 1 (grams)	884	g	P1
Average dimensions of fuel	2x2x2	cm x cm x cm		Dry weight of Pot # 2 (grams)		g	P2
Gross calorific value (dry fuel)	21,860	kJ/kg	HHV	Dry weight of Pot # 3 (grams)		g	P3
Net calorific value (dry fuel)	20,540	kJ/kg	LHV	Dry weight of Pot # 4 (grams)		g	P4
Wood moisture content (% - wet basis)	5.0%	%	MC	Weight of container for char (grams)	-	g	k
fuel)	19,385	kJ/kg	EHV	Local boiling point	99.4	°C	T _b
Net calorific value charcoal (dry fuel)	20,540		LHV				
Fuel type (enter "W", "K", "G", or "C")	B	W = wood, K = kerosene, G = LPG, C = coal and charcoal					

HIGH POWER TEST (COLD START)

Measurements	Units	Start		Finish: when Pot #1 boils	
		data	label	data	label
Time	hh:mm:ss	08:50	t _{ci}	09:02:50	t _{cf}
Weight of fuel	g	573	f _{ci}	331	f _{cf}
Water temperature, Pot # 1	°C	19.8	T1 _{ci}	99.4	T1 _{cf}
Water temperature, Pot # 2	°C		T2 _{ci}		T2 _{cf}
Water temperature, Pot # 3	°C		T3 _{ci}		T3 _{cf}
Water temperature, Pot # 4	°C		T4 _{ci}		T4 _{cf}
Weight of Pot # 1 with water	g	3384	P1 _{ci}	3354	P1 _{cf}
Weight of Pot # 2 with water	g		P2 _{ci}		P2 _{cf}
Weight of Pot # 3 with water	g		P3 _{ci}		P3 _{cf}
Weight of Pot # 4 with water	g		P4 _{ci}		P4 _{cf}
Fire-starting materials (if any)	--				
Weight of charcoal+container	g				c _c

COLD START HOT START

Calculations/Results	Units	COLD START		HOT START	
		data	label	data	label
Fuel consumed (moist)	g	242	f _{cm}	88	f _{hm}
Net change in char during test	g	-	Δr _c	-	Δr _h
Equivalent dry wood consumed	g	228	f _{cd}	83	f _{hd}

Figura C-3: Amostra da folha de resultados de fervura e emissões de gases do WBT 4.2.3

Stove type/model: **JIKOKOA**
 Location: **BECT**
 Fuel species: **BIUGO CARBONIZADO E PELICULA DE CASTANHA DE CAJU**
 Date: **5/12/23**

Summarized Data is found at the bottom of this sheet

WA Performance Metrics	units	Value
High Power Thermal Efficiency	%	36.1%
Low Power Specific Consumption Rate	MJ/min/L	0.008
High Power CO	g/MJ _d	8.63
Low Power CO	g/min/L	0.05
High Power PM	mg/MJ _d	2655.4
Low Power PM	mg/min/L	0.24
Indoor Emissions CO	g/min	0.69
Indoor Emissions PM	mg/min	190.6
Safety	Index	

Tier	Value
High Power Thermal Efficiency	3.1
Low Power Specific Consumption Rate	4.5
High Power CO	3.3
Low Power CO	4.4
High Power PM	0.3
Low Power PM	4.7
Indoor Emissions CO	1.7
Indoor Emissions PM	0.2
Safety	0.0

Standard Performance Measures	units	Value
Fuel to Cook 5L (850/1500)	g	388.2
CO to Cook 5L (20)	g	27.0
PM to Cook 5L (1500)	mg	4897.1
Energy to Cook 5L (15,000/25,000)	kJ	7.973
Time to Boil	min	10.4
CO2 to Cook 5L	g	158.6
CO to Cook 5L	mg	0.00

Basic Operation	units	Value
COLD START		
Time to boil Pot # 1	min	13
Burning rate	g/min	17.80
Thermal efficiency	—	19%
Specific fuel consumption	g/liter	92.47
Temp-corrected specific consumption	g/liter	87.1
Firepower	watts	6,092
Equivalent Dry Fuel Consumed	g	228.4
HOT START		
Time to boil Pot # 1	min	9
Burning rate	g/min	9.06
Thermal efficiency	—	53%
Specific fuel consumption	g/liter	33.65
Temp-corrected specific consumption	g/liter	31.7
Firepower	watts	3,102
Equivalent Dry Fuel Consumed	g	83.1

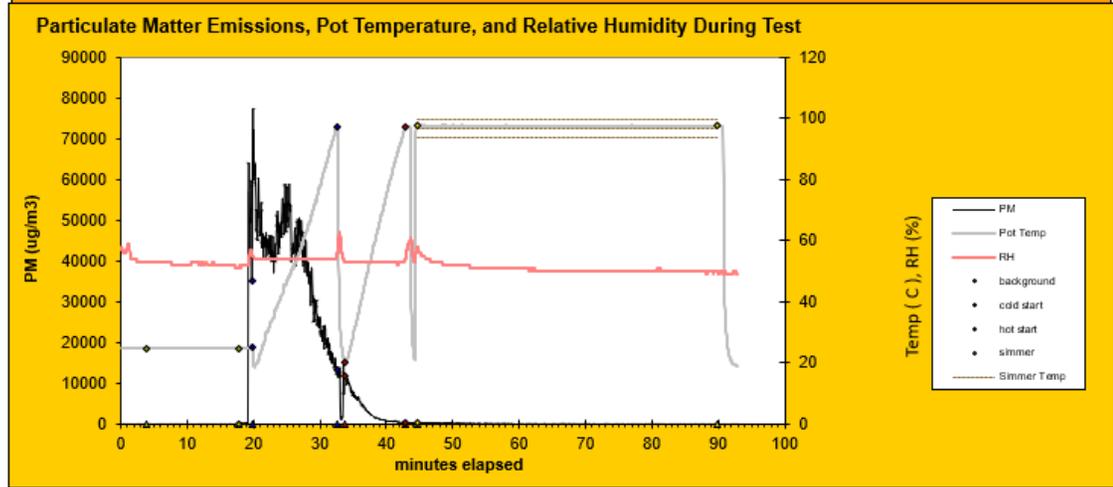
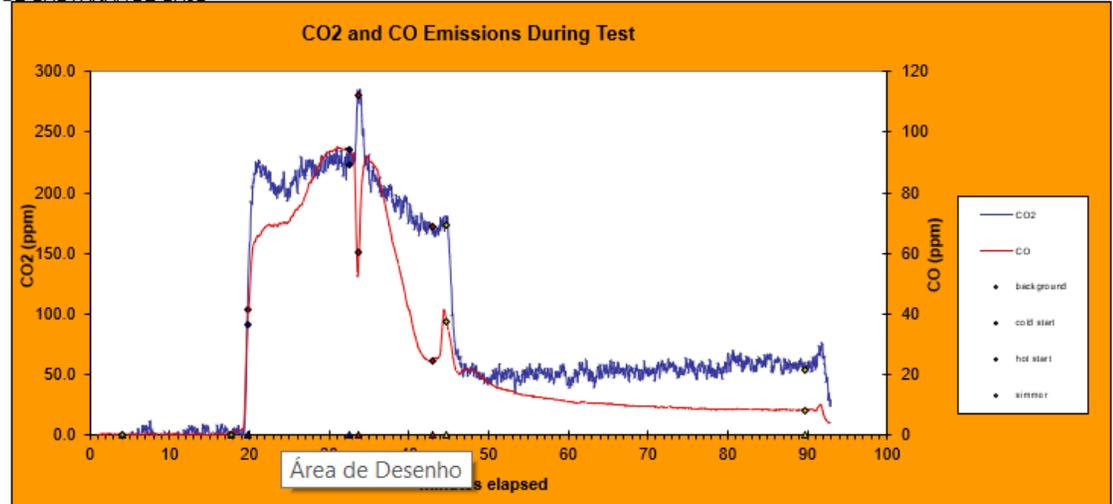


Figura C-4: Resultados de eficiência dos testes de fervura de água dos briquetes de sabugo carbonizado e película de castanha de cajú.

WATER BOILING TEST - VERSION 4.2.3		TEST #		23C03/007	
All cells are linked to data worksheets, no entries are required					
Stove type/model	BURN JIKOKOA				
Location	BECT-CPE				
Fuel description	Charcoal				
Wind conditions	No wind; No wind; No wind; No wind; No wind;				
Ambient temperature	26.2°C; 29.2°C; 26.4°C; 27.1°C; °C; °C; °C; °C; °C; °C				

1. HIGH POWER TEST (COLD START)	units	Test 1	Test 2	Test 3	Average	St Dev	COV
Time to boil Pot # 1	min	13	13	27	17	7.0	42.4%
Temp-corrected time to boil Pot # 1	min	12	12	26	16	7.1	45.2%
Burning rate	g/min	18	17	10	14	3.9	28.5%
Thermal efficiency	%	19%	20%	14%	0	0.0	19.72%
Specific fuel consumption	g/liter	92	89	113	87	24.1	27.7%
Temp-corrected specific consumption	g/liter	87	82	110	82	24.2	29.4%
Temp-corrected specific energy cons.	kJ/liter	1,786	1,673	2,253	1,789	341.2	19.1%
Firepower	watts	6,002	5,755	3,559	5,051	1,103.5	21.8%

2. HIGH POWER TEST (HOT START)	units	Test 1	Test 2	Test 3	Average	St Dev	COV
Time to boil Pot # 1	min	10	10	10	12	3.5	29.8%
Temp-corrected time to boil Pot # 1	min	9	9	10	11	3.2	29.0%
Burning rate	g/min	8	9	7	7	1.9	26.4%
Thermal efficiency	%	53%	51%	58%	1	0.1	13.5%
Specific fuel consumption	g/liter	34	35	29	32	2.6	8.0%
Temp-corrected specific consumption	g/liter	32	32	28	30	2.3	7.6%
Temp-corrected specific energy cons.	kJ/liter	650	660	570	669	94.1	14.1%
Firepower	watts	2,838	2,934	2,483	2,586	383.0	14.8%

3. LOW POWER (SIMMER)	units	Test 1	Test 2	Test 3	Average	St Dev	COV
Burning rate	g/min	1	1	1	1	0.2	16.2%
Thermal efficiency	%	51%	39%	36%	0	0.1	22.46%
Specific fuel consumption	g/liter	18	17	17	19	3.3	17.5%
Temp-corrected specific energy cons.	kJ/liter	374	356	345	438	160.3	36.6%
Firepower	watts	315	308	301	374	132.4	35.4%
Turn down ratio	--	19.04	18.68	11.83	15	5.2	35.7%

BENCHMARK VALUES (for 5L)		Test 1	Test 2	Test 3	Average	St Dev	COV
Fuel Use Benchmark Value	g	388	371	428	377	45.4	12.1%
Energy Use Benchmark Value	kJ	7,959	7,613	8,781	8,335	600.3	7.2%

IWA PERFORMANCE METRICS	units	Test 1	Test 2	Test 3	Average	St Dev	COV
High Power Thermal Efficiency	%	36.2%	35.5%	35.9%	35.9%	0.38%	1.05%
Low Power Specific Fuel Consumption	MJ/(min-L)	0.011	0.011	0.011	0.01	0.00	0.04
High Power CO	g/MJ	8.6	8.4	10.7	9.24	1.25	0.13
Low Power CO	g/(min-L)	0.050	0.036	0.048	0.04	0.01	0.17
High Power PM	mg/MJ	2,655	2,893	10,909	5,485.70	4,698.41	0.86
Low Power PM	mg/(min-L)	0.2	0.3	0.0	0.27	0.18	0.64
Indoor CO Emissions	g/min	0.691	0.627	0.421	0.58	0.14	0.24
Indoor PM Emissions	mg/min	190.6	197.1	320.6	236.09	73.23	0.31

IWA PERFORMANCE TIERS	Tier
High Power Thermal Efficiency	4
Low Power Specific Fuel Consumption	4
High Power CO	2
Low Power CO	4
High Power PM	0
Low Power PM	NA
Indoor CO Emissions	2
Indoor PM Emissions	0

NA = Not Applicable; IWA Performance Tiers are not reported if there are fewer than 3 tests conducted.

Figura C-5: Resultados de eficiência dos testes de fervura de água dos briquetes de casca carbonizada e película de castanha de cajú.

WATER BOILING TEST - VERSION 4.2.3		TEST # 23C03/007	
All cells are linked to data worksheets, no entries are required			
Stove type/model	Burn Jikokoa		
Location	BECT-CPE		
Fuel description	Charcoal		
Wind conditions	No wind; No wind; No wind; No wind; No wind;		
Ambient temperature	32.9°C; 32.8°C; 29.6°C; °C; °C; °C; °C; °C; °C; °C		

1. HIGH POWER TEST (COLD START)	units	Test 1	Test 2	Test 3	Average	St Dev	COV
Time to boil Pot # 1	min	55	26	11	31	22.4	72.9%
Temp-corrected time to boil Pot # 1	min	52	25	11	29	21.3	72.8%
Burning rate	g/min	4	7	19	10	8.2	81.9%
Thermal efficiency	%	20%	26%	22%	0	0.0	12.08%
Specific fuel consumption	g/liter	87	70	86	81	9.6	11.7%
Temp-corrected specific consumption	g/liter	83	67	84	78	9.8	12.6%
Temp-corrected specific energy cons.	kJ/liter	1,610	1,284	1,617	1,504	190.1	12.6%
Firepower	watts	1,270	2,160	6,210	3,214	2,633.3	81.9%

2. HIGH POWER TEST (HOT START)	units	Test 1	Test 2	Test 3	Average	St Dev	COV
Time to boil Pot # 1	min	15	21	10	15	5.5	35.9%
Temp-corrected time to boil Pot # 1	min	14	20	10	15	5.1	34.9%
Burning rate	g/min	6	4	8	6	1.9	30.9%
Thermal efficiency	%	50%	51%	57%	1	0.0	7.1%
Specific fuel consumption	g/liter	36	36	32	35	2.2	6.2%
Temp-corrected specific consumption	g/liter	34	34	31	33	1.8	5.5%
Temp-corrected specific energy cons.	kJ/liter	666	657	601	641	35.2	5.5%
Firepower	watts	1,923	1,374	2,581	1,959	604.4	30.9%

3. LOW POWER (SIMMER)	units	Test 1	Test 2	Test 3	Average	St Dev	COV
Burning rate	g/min	1	1	1	1	0.3	30.1%
Thermal efficiency	%	42%	45%	48%	0	0.0	7.28%
Specific fuel consumption	g/liter	14	25	16	18	5.9	32.3%
Temp-corrected specific energy cons.	kJ/liter	270	483	306	353	114.0	32.3%
Firepower	watts	236	405	263	301	90.6	30.1%
Turn down ratio	--	5.38	5.34	23.60	11	10.5	92.1%

BENCHMARK VALUES (for 5L)		Test 1	Test 2	Test 3	Average	St Dev	COV
Fuel Use Benchmark Value	g	364	376	366	369	6.3	1.7%
Energy Use Benchmark Value	kJ	7,038	7,266	7,074	7,126	122.6	1.7%

IWA PERFORMANCE METRICS	units	Test 1	Test 2	Test 3	Average	St Dev	COV
High Power Thermal Efficiency	%	35.3%	38.3%	39.5%	37.7%	0.021	5.68%
Low Power Specific Fuel Consumption	MJ/(min-L)	0.009	0.016	0.010	0.01	0.004	0.32
High Power CO	g/MJ	3.8	15.8	7.1	8.88	6.202	0.70
Low Power CO	g/(min-L)	-0.050	0.122	0.002	0.06	0.089	1.43
High Power PM	mg/MJ	4,721	6,926	1,478	4,375.04	2,740.4	0.63
Low Power PM	mg/(min-L)	-0.1	0.0	0.1	0.08	0.123	1.48
Indoor CO Emissions	g/min	0.099	0.589	0.578	0.42	0.280	0.66
Indoor PM Emissions	mg/min	73.9	235.3	114.3	141.16	83.975	0.59

IWA PERFORMANCE TIERS	Tier
High Power Thermal Efficiency	4
Low Power Specific Fuel Consumption	4
High Power CO	3
Low Power CO	NA
High Power PM	0
Low Power PM	NA
Indoor CO Emissions	3
Indoor PM Emissions	0

NA = Not Applicable; IWA Performance Tiers are not reported if there are fewer than 3 tests conducted.

Figura C-6: Emissões de PM, CO e CO₂, Perfil de temperatura da água e Humidade Relativa durante o teste de fervura de água dos BSP.

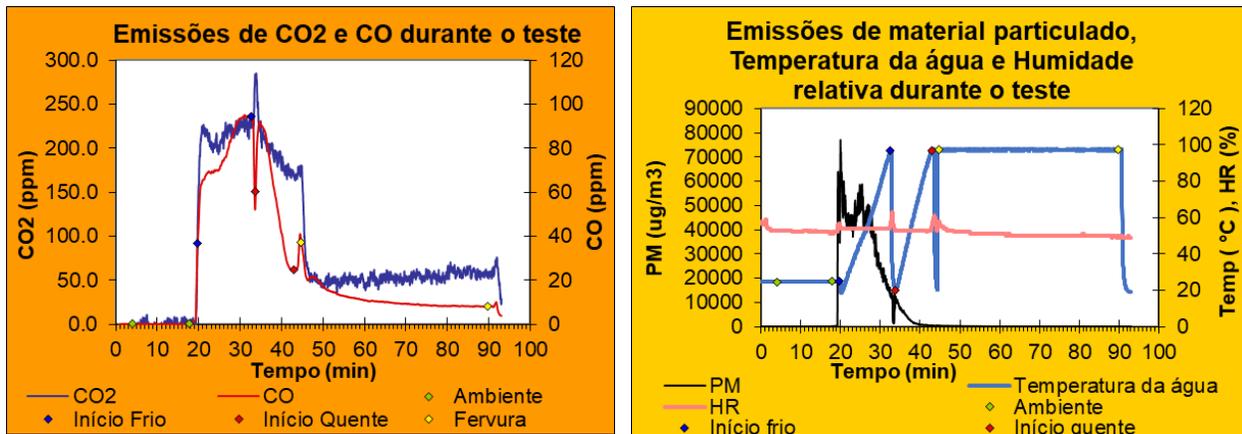


Figura C-7: Emissões de PM, CO e CO₂, Perfil de temperatura da água e Humidade Relativa durante o teste de fervura de água dos BCP.

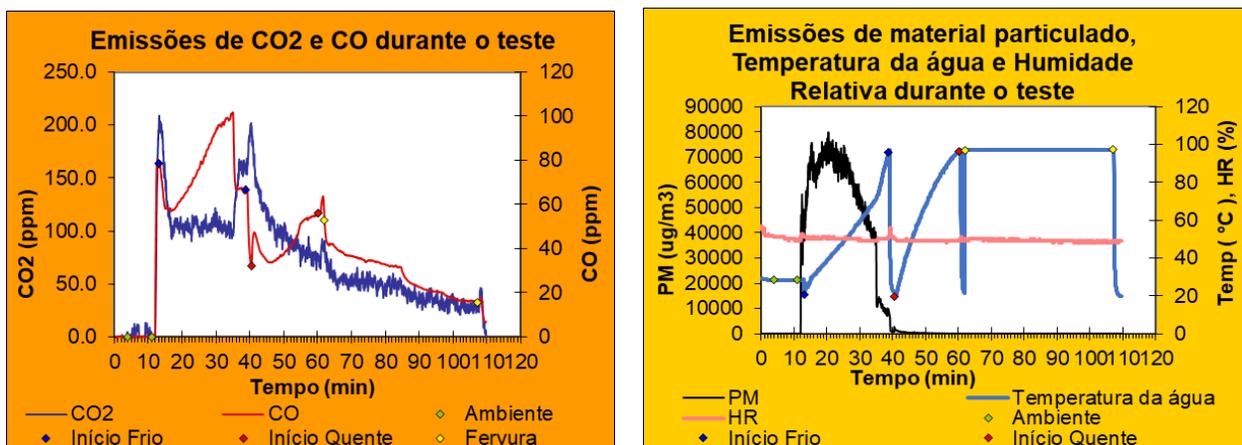


Figura C-8: Emissões de PM, CO e CO₂, Perfil de temperatura da água e Humidade Relativa durante o teste de fervura de água da lenha.

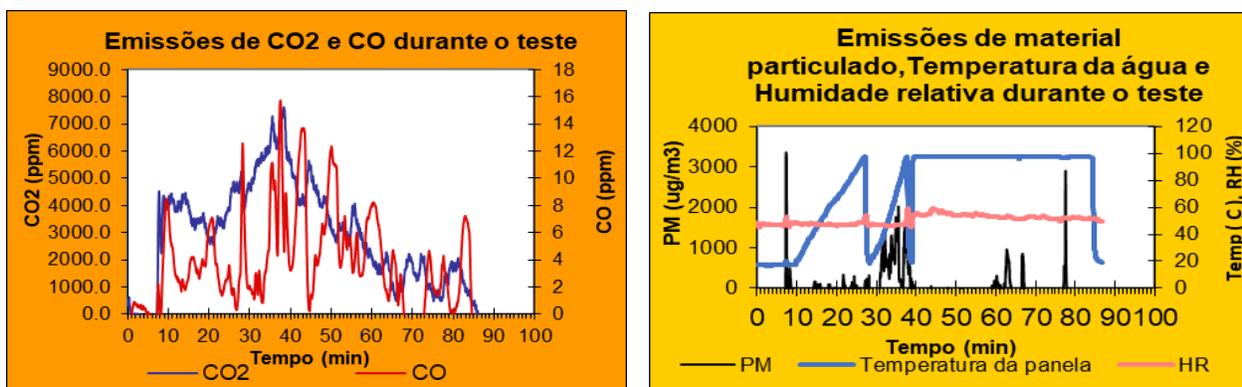
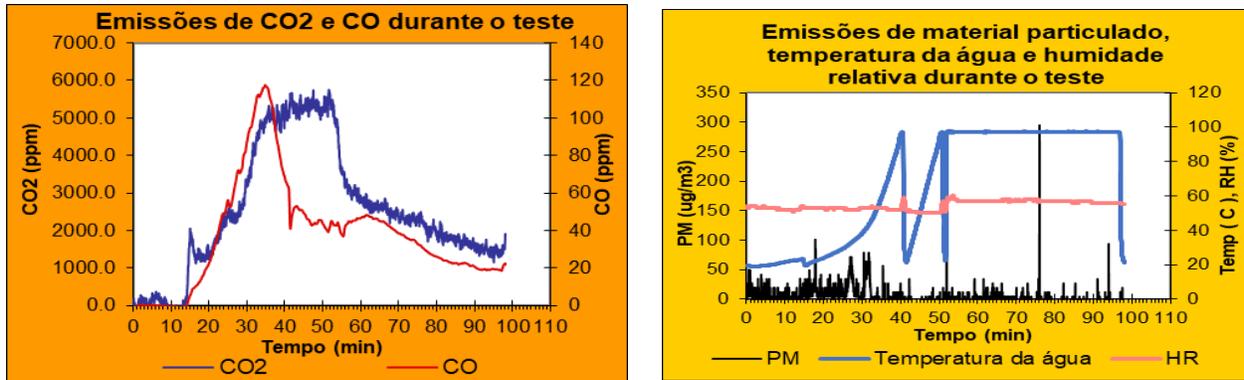


Figura C-9: Emissões de PM, CO e CO₂, Perfil de temperatura da água e Humidade Relativa durante o teste de fervura de água do carvão vegetal.



8.4. Apêndice D: Equipamentos do teste de fervura de água

Figura D-1: A – Panela com água por cima do combustor, acoplada a termopares e uma balança; B – Ducto do exaustor acoplado ao PEMS (medidor de emissão de gases) que por sua vez está conectado a um PC.

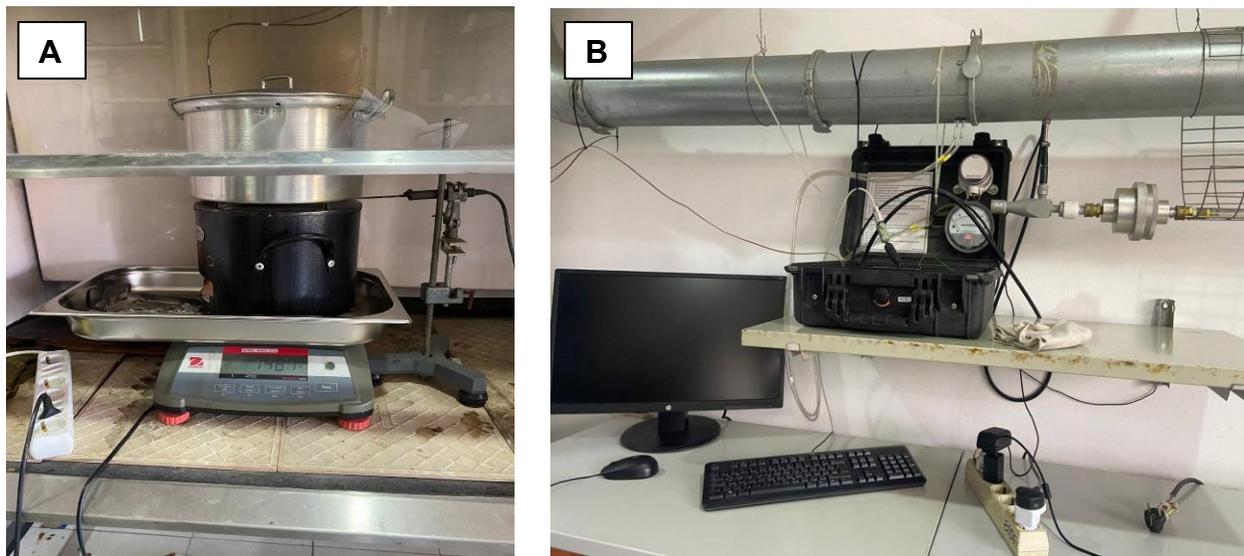


Figura D-2: Aplicação de colecta dos dados de fervura e de emissão de gases correndo no PC.

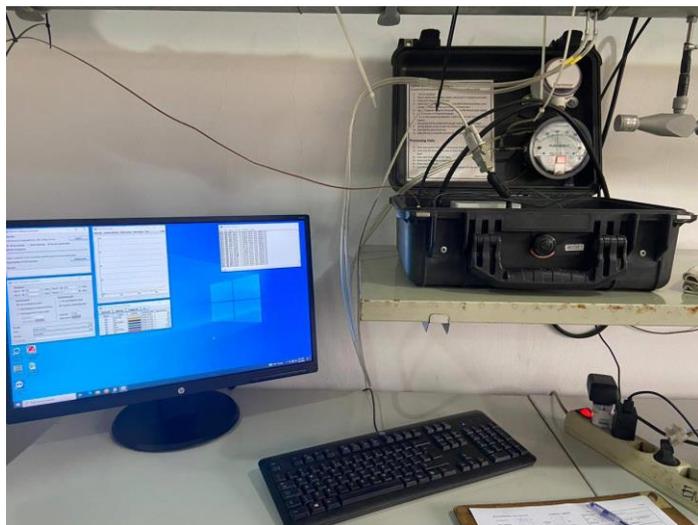


Figura D-3: A- dispositivo de medição de gases no ambiente (CO, CO₂, PM); B – *Datalogger* – Dispositivo de registo de dados de temperatura dos briquetes conectado ao PC; C – Termopar digital para medição da temperatura da água no ambiente.

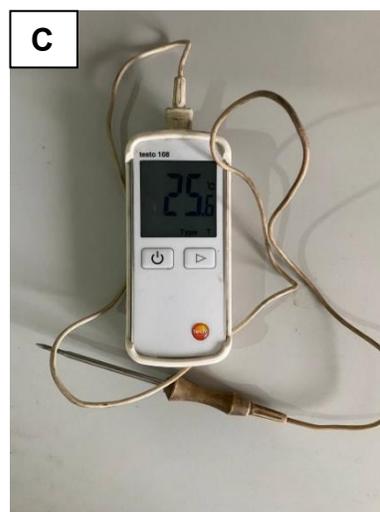


Figura D-4: A – Balança digital da marca Ohaus; B – querosene para ignição.



8.5. Apêndice E: Algumas fórmulas dos cálculos no teste de fervura.

De acordo com o CLEAN COOKING ALLIANCE (2014), os parâmetros do teste são calculados pelas seguintes fórmulas.

Tempo de fervura ($t_{fervura}$) – tempo necessário para que a água atingisse a temperatura de fervura.

$$t_{fervura} = t_f - t_i \quad (1)$$

onde: t_f – tempo final de fervura; t_i – tempo inicial do teste;

Tempo de fervura corrigido (t_f^c) – é o mesmo que acima, mas ajusta o resultado para uma mudança de temperatura padrão de 75 °C (de 25 °C a 100 °C). Esse ajuste padroniza os resultados e facilita a comparação entre testes que podem ter utilizado água com temperaturas iniciais mais altas ou mais baixas.

$$t_f^c = t_f \times \frac{75^\circ\text{C}}{T_f - T_i} \quad (2)$$

Onde; T_f – Temperatura final de fervura; T_i – temperatura inicial de fervura;

Consumo de combustível (húmido) ($m_{\text{combustível Húmido}}$) – é a massa de briquetes usada para ferver a água, calculado pela diferença entre a massa inicial e a massa final (após a fervura).

$$m_{\text{combustível Húmido}} = m_{ci} - m_{cf} \quad (3)$$

Onde: m_{ci} – Massa do combustível inicial; m_{cf} – massa do combustível após fervura;

Combustível consumido equivalente ($m_{c\text{seco},eq}$) – ajusta a quantidade de combustível seco que foi queimado levando em conta dois factores: (1) a energia necessária para remover a humidade do combustível e (2) a quantidade de carvão não queimado que permanece. A massa de combustível seco consumido é o briquete húmido consumido menos a massa de água no briquete:

$$m_{\text{combustível seco}} = m_{ch} \times (1 - TH) \quad (4)$$

Onde: TH – Teor de humidade do briquete. m_{ch} - Massa do combustível húmido;

A energia necessária para remover a humidade do combustível ($\Delta E_{H_2O,c}$) é a massa de água no combustível multiplicado pela variação da entalpia específica da água.

$$\Delta E_{H_2O,c} = m_{H_2O,c} (C_p (T_{eb,H_2O} - T_{amb}) + \Delta h_{H_2O,fg}) \quad (5)$$

$$m_{H_2O,c} = m_{\text{combustível Húmido}} \times TH \quad (6)$$

Onde: $m_{H_2O,c}$ – massa de água no briquete; C_p – Calor específico da água; $\Delta h_{H_2O,fg}$ – calor latente de vaporização da água; T_{eb,H_2O} – temperatura de ebulição da água; T_{amb} – temperatura do briquete inicial = temperatura do ambiente;

$$\left(C_p \approx 4,186 \frac{kJ}{kgK} \right) \quad (7);$$

$$\left(\Delta h_{H_2O,fg} \approx 2257 \frac{kJ}{kg} \right) \quad (8)$$

Portanto:

$$\Delta E_{H_2O,c} = m_{\text{Combustível húmido}} \times TH \times (4,186(T_{eb,H_2O} - T_{amb}) + 2257) \quad (9)$$

Esta quantidade de energia é dividida pelo conteúdo energético do combustível para determinar a massa equivalente do combustível necessário para remover a humidade do combustível:

$$m_{\text{combustível para evaporar a água}} = \frac{\Delta E_{H_2O,c}}{PCI} \quad (10)$$

Onde: PCI – Poder calorífico Inferior

A energia do combustível armazenada no carvão restante ($\Delta E_{\text{carvão},c}$) é a massa do carvão multiplicada pelo conteúdo de energia do carvão:

$$\Delta E_{\text{carvão},c} = m_{\text{carvão},c} \times PCI_{\text{carvão}} \quad (11)$$

Onde: $m_{\text{carvão},c}$ – massa dos briquetes após o teste;

Esta quantidade de energia é dividida pelo conteúdo energético do combustível para determinar a quantidade equivalente de combustível não queimado restante na forma de carvão:

$$m_{\text{combustível no carvão}} = \frac{\Delta E_{\text{carvão},c}}{PCI} \quad (12)$$

Agrupando tudo temos:

$$m_{\text{cseco},c} = m_{\text{Combustível seco}} - m_{\text{combustível para evaporar a água}} - m_{\text{combustível no carvão}} \quad (13)$$

$$m_{\text{cseco},c} = m_{ch} \times (1 - TH) - \frac{m_{ch} \times TH(4,186(T_{eb} - T_a) + 2257)}{PCI} - \frac{m_{\text{carvão},c} \times PCI_{\text{carvão}}}{PCI} \quad (14)$$

$$m_{\text{cseco},eq} = \frac{m_{ch}(PCI(1-TH) - TH(4,186(T_b - T_a) + 2257)) - m_{\text{carvão},c} \times PCI_{\text{carvão}}}{PCI} \quad (15)$$

Eficiência térmica (h_c) - é a razão entre o trabalho realizado pelo aquecimento e evaporação da água e a energia consumida/libertada pela queima de combustível. É

uma estimativa da energia total produzida pelo fogo que é utilizada para aquecer a água na panela. É calculado da seguinte maneira:

$$h_c = \frac{\Delta E_{H_2O, \text{aquecimento}} + \Delta E_{H_2O, \text{evaporação}}}{E_{\text{libertada}}} \quad (16)$$

$$\Delta E_{H_2O, \text{aquecimento}} = m_{H_2O, \text{aquecida}} \times C_{p, H_2O} \times \Delta T \quad (17)$$

$$\Delta E_{H_2O, \text{aquecimento}} = m_{H_2O, \text{aquecida}} \times 4,186 \times (T_f - T_i) \quad (18)$$

$$\Delta E_{H_2O, \text{evaporação}} = m_{H_2O, \text{evaporada}} \times \Delta h_{H_2O, fg} \quad (19)$$

$$\Delta E_{H_2O, \text{evaporação}} = m_{H_2O, \text{evaporada}} \times 2257 \quad (20)$$

Onde: $m_{H_2O, \text{aquecida}}$ – massa da água aquecida; $m_{H_2O, \text{evaporada}}$ – massa de água evaporada;

$$E_{\text{libertada}} = m_{c \text{ seco, eq}} \times PCI \quad (21)$$

Colocando tudo junto, temos:

$$h_c = \frac{m_{H_2O, \text{aquecida}} \times 4,186 \times (T_f - T_i) + m_{H_2O, \text{evaporada}} \times 2257}{m_{H_2O, \text{evaporada}} \times 2257} \quad (22)$$

Taxa de queima (T_q) – Esta é uma medida da taxa de consumo de combustível ao ferver a água. É calculado dividindo o combustível seco equivalente consumido pelo tempo do ensaio.

$$T_q = \frac{m_{c \text{ seco, eq}}}{t_{\text{fervura}}} \quad (23)$$

Consumo específico de combustível ($C_{\text{esp.c}}$) – pode ser definido para qualquer número de ensaio de cozimento e deve ser considerado “o combustível necessário para produzir uma produção unitária”, quer a produção seja água fervida, feijão cozido ou pães. No caso do WBT de alta potência com início frio, é uma medida da quantidade de briquetes

necessária para produzir um litro (ou quilo) de água fervente a partir do fogão frio. Isso é calculado como:

$$C_{esp.c} = \frac{m_{cseco,eq}}{m_{H_2O,aquecida}} \quad (24)$$

Consumo específico de combustível corrigido pela temperatura ($C_{esp.c}^T$) – corrige o consumo específico de modo a levar em conta as diferenças nas temperaturas iniciais da água. Isto facilita a comparação de fogões testados em dias diferentes ou em condições ambientais diferentes. A correção é um factor simples que “normaliza” a mudança de temperatura observada nas condições de teste para uma mudança de temperatura “padrão” de 75 °C (de 25 a 100). É calculado da seguinte forma:

$$C_{esp.c}^T = C_{esp.c} \times \frac{75}{T_f - T_i} \quad (25)$$

Consumo específico de energia corrigido pela temperatura ($CE_{esp.c}^T$): Semelhante ao consumo específico de combustível corrigido pela temperatura, esta é uma medida da quantidade de energia de combustível necessária para produzir um litro (ou quilo) de água fervente começando com fogão frio. É o consumo específico de combustível corrigido pela temperatura multiplicado pelo conteúdo energético do combustível.

$$CE_{esp.c}^T = C_{esp.c}^T \times \frac{PCI}{1000} \quad (26)$$

Potência de queima (P_q) – Esta é a energia do combustível consumida para ferver a água, dividida pelo tempo de fervura. Indica a potência média do combustor (em Watts ou J/s) durante o teste de alta potência:

$$P_q = \frac{m_{cseco,eq} \times PCI}{t_{fervura} \times 60} \quad (27)$$

Tabela E-1: Resultados dos parâmetros analisados no teste de fervura.

Etapas	Tempo para fervura (min)				Taxa de queima (g/min)				Consumo específico dos briquetes (g/l)				Eficiência térmica (%)			
	BCP	BSP	CV	L	BCP	BSP	CV	L	BCP	BSP	CV	L	BCP	BSP	CV	L
Início frio	29	17	25	14	10	15	8	23	78	93	77	117	23%	18%	18%	22%
Início quente	15	9	10	10	6	8	5	27	33	31	20	103	53%	54%	71%	25%
Fervura	-	-			1	1	2	6	18	17	42	174	45%	42%	56%	42%

BSP – Briquete de sabugo e película, BCP – Briquete de casca e película; CV – Carvão vegetal; L – Lenha (pinheiro);

Tabela E-2: Métricas de desempenho do IWA para o teste de fervura.

Medidas de desempenho do IWA	unidades	BSP			BCP		
		Média	Desvio Padrão	COV	Média	Desvio Padrão	COV
Eficiência Térmica de Alta Potência	%	35.9%	0.38%	1.05%	37.7%	0.021	5.68%
Consumo Específico de combustível a Baixa Potência	MJ/(min·L)	0.01	0.00	0.04	0.01	0.004	0.32
CO a Alta Potência	g/MJ	9.24	1.25	0.13	8.88	6.202	0.70
CO a Baixa potência	g/(min·L)	0.04	0.01	0.17	0.06	0.089	1.43
PM a Alta Potência	mg/MJ	5,485.70	4,698.41	0.86	4,375.04	2,740.4	0.63
PM a Baixa Potência	mg/(min·L)	0.27	0.18	0.64	0.08	0.123	1.48
Emissões internas de CO	g/min	0.58	0.14	0.24	0.42	0.280	0.66
Emissões internas de PM	mg/min	236.09	73.23	0.31	141.16	83.975	0.59