



**UNIVERSIDADE  
E D U A R D O  
M O N D L A N E**

**FACULDADE DE AGRONOMIA E ENGENHARIA FLORESTAL**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

**PROJECTO FINAL**

**Avaliação da qualidade de briquetes de cafulo de coco pré-carbonizado como  
alternativa energética sustentável.**

**Autor:**

Karen Stephanny James Gwambe

**Supervisora:**

Professora Doutora Rosta Mate

**Co- supervisor:**

Mestre Osório Nhiuane

Maputo, Agosto de 2024



FACULDADE DE AGRONOMIA E ENGENHARIA FLORESTAL

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

PROJECTO FINAL

**Avaliação da qualidade de briquetes de cafulo de coco pré-carbonizado como alternativa energética sustentável.**

**Por:**

Karen Stephanny James Gwambe

Projecto Final apresentado ao Departamento de Engenharia Florestal da Faculdade de Agronomia e Engenharia Florestal da Universidade Eduardo Mondlane, como parte das exigências para obtenção do grau de licenciatura em Engenharia Florestal.

**Supervisora:**

Professora Doutora Rosta Mate

**Co- supervisor:**

Mestre Osório Nhiuane

## DECLARAÇÃO DE HONRA

Eu, **Karen Stephanny James Gwambe**, declaro por minha honra que este trabalho é fruto da minha própria investigação e nunca foi apresentado para a obtenção de qualquer grau académico, seja nesta ou em qualquer outra universidade. Este constitui o fruto de trabalho de campo por mim realizado e de pesquisas bibliográficas, estando as fontes utilizadas mencionadas no texto e nas referências bibliográficas.

Maputo, Agosto de 2024

-----

## RESUMO

Com o intuito de contribuir para a redução do problema do desmatamento no país associado ao consumo de biomassa para fins energéticos na comunidade de Cumbane agrícola da província de Inhambane, o presente trabalho foi realizado com o objectivo de determinar os parâmetros de qualidade dos briquetes produzidos a partir de resíduos da biomassa do coco que outrora eram subaproveitados. As propriedades analisadas foram: análise imediata, poder calorífico superior e inferior, densidades aparente, energética e a granel, resistência à abrasão, teste de fervura de água e índice de combustão. As misturas de briquetes testadas eram compostas por: mistura A: carvão de coco+ argila+ água; mistura B: carvão de coco+ esterco bovino+ água e mistura C: carvão de coco+ argila+ esterco bovino+ água. Os dados foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas através do teste de Tukey a 5% de significância. Os resultados do estudo sugerem que a mistura B teve melhores resultados, contudo nenhuma das variedades teve bom desempenho no teste de resistência à abrasão. O teste de índice de combustão e o teste de fervura de água demonstraram que o briquete teve bom desempenho em relação a literatura consultada. Recomenda-se a pesquisa por outras formas de compactação manual de modo a aumentar a densidade aparente do briquete que por sua vez irá melhorar as características físicas e energéticas.

**Palavras-chave:** Energias renováveis, Briquete, Coco, Endocarpo, Cafulo.

## DEDICATÓRIA

Aos meus pais

Estevão James Gwambe e Maria Chissaque

Aos meus irmãos

Eric e Jannet.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar e acima de tudo agradeço a Deus por ter me permitido chegar a este momento.

Agradeço aos meus pais que incansavelmente investiram na minha educação, formação e bem-estar, com amor, atenção, apoio moral, emocional e monetário até aqui chegar.

Aos meus irmãos, pelo apoio moral e por de igual forma serem companheiros desta jornada estudantil.

Agradeço a todos os docentes da FAEF, que acompanharam e contribuíram bastante na minha formação. Em especial agradeço a Prof. Dr<sup>a</sup>. Rosta Munjovo e o Mestre Osório Nhiuane pela paciência e pelo supervisionamento. Do mesmo modo agradeço ao Prof. Condo pela supervisão no trabalho laboratorial e ao Dr. Matsinhe e aos demais colegas da Faculdade de Engenharia.

Ao Eng. Nelson Banze, que toma um lugar especial, pelo carinho, conselhos e companheirismo, do fundo do coração agradeço.

Agradeço a todos meus colegas e amigos da turma de Engenharia Florestal 2018: ao Eng. Kelven Sozinho, Eng. Milton Da Joana, Eng<sup>a</sup>. Djulian Licó, Alberto Chambela, Amade Chaputo, Dania Osório, Inaia Mateus e da FAEF no geral que directa ou indirectamente contribuíram para o meu desenvolvimento académico, em especial as minhas meninas Eng<sup>a</sup>. Lídia Merine, Eng<sup>a</sup>. Fernância, Eng<sup>a</sup>. Cléusia Cardina, Eng<sup>a</sup>. Géssica Talube, Paula de Almeida, Odete Manguete e Jéssica Vilanculo.

Agradeço a todos que não foram aqui mencionados que directa ou indirectamente contribuíram bastante para a minha formação.

## ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Contextualização.....	1
1.2. Problema e Justificativa.....	3
1.3. OBJECTIVOS.....	4
1.3.1. Geral.....	4
1.3.2. Específicos.....	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1. Composição da biomassa e composição do coco.....	5
2.1.1. Categorias de biomassa.....	5
2.1.2. Biocombustíveis e conversão da biomassa para biocombustíveis.....	6
2.2. Briquetes: generalidades.....	7
2.2.1. Processo de briquetagem.....	8
2.2.2. Vantagens e desvantagens dos briquetes.....	9
2.3. Parâmetros que influenciam a qualidade da densificação.....	11
2.3.1. Granulometria.....	11
2.3.2. Pré-tratamentos.....	11
2.3.3. Conteúdo de humidade da biomassa.....	12
2.3.4. Temperatura.....	12
2.3.5. Proporção de biomassa usada.....	12
2.3.6. Aglutinantes.....	13
2.3.7. Tecnologias de compactação.....	13
I. Compactação a média e alta pressões (processo contínuo ou semicontínuo).....	14
II. Compactação a baixa pressão (processo descontínuo).....	15
2.4. Parâmetros de qualidade de briquetes.....	16

2.4.1. Propiedades físicas.....	16
2.4.2. Propriedades químicas e energéticas.....	18
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	21
3.1. Proveniência do material.....	21
3.2. Métodos.....	21
3.3. Análises laboratoriais.....	23
I. Análises físicas.....	23
Densidade aparente.....	23
Densidade energética.....	24
Densidade à granel.....	24
Friabilidade.....	25
II. Análises químicas e energéticas.....	25
Humidade.....	25
Materiais Voláteis.....	26
Teor de Cinzas.....	27
Poder calorífico.....	28
Teste de fervura de água.....	28
Índice de combustão (ICOM).....	31
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	33
4.1. Análises físicas.....	33
4.2. Análises químicas e energéticas.....	36
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	45
5.1. Conclusões.....	45
5.2. Recomendações.....	45
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	1
7. APÊNDICES.....	7

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. A:Forno em ignição; B: introdução dos cafulos no forno: C: cafulos no processo de carbonização.....	21
Figura 2. A: Briquetadeira usada para moldar os briquetes; B: Processo de enchimento da briquetadeira.....	22
Figura 3. Pontos de medição de alturas e diâmetros.....	23
Figura 4. Recipiente de volume padronizado 100 cm <sup>3</sup> .....	24
Figura 5. Máquina para o teste de friabilidade.....	25
Figura 6. Analisador de humidade.....	26
Figura 7. A: Retirada dos cadinhos da mufla após a devolatilização. B e C: Arrefecimento dos cadinhos na mesa de Inox e no dissecador.....	27
Figura 8. Resultado da queima das diferentes misturas de briquetes A: mistura A; B: mistura B e C: mistura C.....	27
Figura 9. Fase de alta potência do teste de fervura de água.....	29
Figura 10. A: Sistema montado para realização do teste índice de combustão. B: briquetes durante a queima.....	31

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Caracterização físico-química das partes do coco.....	5
Tabela 3. Resultados das análises físico-mecânicas.....	33
Tabela 4. Resultados das análise imediata.....	36
Tabela 5. Resultados do índice de Combustão.....	40
Tabela 6. Resultados do Teste de Fervura.....	43

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Análise da friabilidade.....	35
Gráfico 2. Análise do poder calorífico.....	39
Gráfico 3. Evolução da temperatura em função do tempo de combustão do briquete.....	41
Gráfico 4. Perda percentual de massa em função do tempo de combustão do briquete.....	42

## LISTA DE SIGLAS E ACRÓNIMOS

A.P – Alta potência

ANOVA -Análise de variância

*ASTM* – *American Society for Testing and Materials*

B.P – Baixa potência

D- diâmetro

h- altura

ICOM – Índice de combustão

kcal – Quilocaloria

kg – Quilograma

kJ – Quilojoule

kW – Quilowatt

m<sup>3</sup> – Metro cúbico

MJ – Megajoule

MV – Teor de voláteis

PCI – Poder calorífico inferior

PCS – Poder calorífico superior

rpm – Rotações por minuto

TC – Teor de cinzas

TCF – Teor de carbono fixo

TH – Teor de humidade

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Contextualização

A consciência da necessidade da diversificação da matriz energética por alternativas renováveis, limpas e sustentáveis tem aumentado tanto em países desenvolvidos e subdesenvolvidos como reconhecimento dos problemas socioeconômicos e ambientais resultantes do consumo de combustíveis fósseis como por exemplo: a emissão de gases de efeito estufa (Souza, 2012).

Dentre as energias renováveis e limpas, destaca-se o uso da biomassa que historicamente sempre esteve presente como fonte energética seja na forma de lenha ou carvão vegetal. No contexto energético, o termo biomassa refere-se ao material biológico, não fóssil de origem vegetal, animal ou microbiana que pode ser convertido em energia (Protásio *et al.*, 2011). De acordo com a sua origem, pode ser: florestal, agrícola, pecuária e a fração biodegradável de resíduos urbanos e industriais (Vieira, 2012).

As actividades de processamento agrícola de pequena e grande escala caracterizam-se pela produção de significantes volumes de resíduos. A briquetagem é uma técnica que reaproveita vários tipos de resíduos incluindo agrícolas e agropecuários de forma a compactá-los manualmente ou em determinadas pressões na presença ou não de aglutinantes e temperaturas elevadas, transformando-os em aglomerados sólidos denominados briquetes, que possuem potencial energético maior que a biomassa *in natura* em decorrência do aumento da densidade (Mateos, 2019).

A densificação manual de resíduos ou seja o uso de baixas pressões é uma das grandes vantagens da briquetagem pois permite que comunidades possam usufruir desta forma de energia sem depender de equipamentos de compactação de altas pressões que exigem capacidade financeira para incorrer em custos de energia eléctrica para a produção dos briquetes (Magalhães *et al.*, 2018). Ademais, esta tecnologia apresenta-se como uma alternativa viável para a diminuição da demanda da lenha e do carvão vegetal que é fonte principal de energia para a população Moçambicana (Fortes e Raimundo, 2020).

Visando obter briquetes de melhor qualidade tratamentos térmicos podem ser aplicados a matéria prima tanto como ao briquete como por exemplo a carbonização.

Esta técnica para além de melhorar as características físicas e químicas do briquete, apresenta outros usos para a biomassa como por exemplo: o uso de biomassa carbonizada para a adubação de campos agrícolas (Zanella 2018; Oshiro, 2016).

Após a produção dos briquetes, deve-se submeter os mesmos a testes de qualidade visando compreender as suas propriedades físicas, químicas e energéticas. Os testes de propriedades físicas mais comuns a serem realizados incluem: densidade, resistência à abrasão, resistência à compressão, resistência à penetração de água que visam indicar a integridade física do briquete. Quanto as propriedades químicas as análises frequentemente realizadas são: análise imediata e elementar que visam indicar o conteúdo químico dos materiais que podem ou não influenciar a qualidade do briquete e o teste de propriedade energética usualmente realizado é de poder calorífico que indica a quantidade de calor que o material emite.

## 1.2. Problema e Justificativa

Segundo o anuário estatístico de 2022, Moçambique apresentou no quadriénio de 2018 a 2021 uma produção de 24269-23000 toneladas de copra facta que sugere e evidencia uma oportunidade para o aproveitamento dos resíduos gerados desta cultura pelo sector energético e ao mesmo tempo constituindo uma alternativa para a redução do desmatamento de florestas primárias e secundárias das quais os produtos são comumente usados para fins energéticos.

De acordo com Egas *et al.* (2016), população Moçambicana é excessivamente dependente de combustíveis lenhosos para o uso doméstico, predominantemente a lenha nas zonas rurais e o carvão nas zonas urbanas. O carvão vegetal é consumido por mais de 70% das famílias dos centros urbanos facto que está associado a degradação das florestas e desmatamento.

O aproveitamento energético dos resíduos do coco por meio da produção de briquetes oferece uma solução sustentável para estes que outrora seriam subaproveitados, e quiçá usados como uma alternativa para reduzir a pressão sobre os recursos naturais, como a lenha e carvão vegetal, que são directamente explorados como fonte de combustível (Manjate, 2023).

A briquetagem proporciona uma padronização e melhoria na qualidade dos resíduos de biomassa, superando limitações como baixa densidade energética, alto teor de humidade e granulometria irregular, tornando-os mais viáveis como combustível (Petricoski, 2017).

Porém, é essencial estudar as propriedades físicas, químicas e energéticas de modo a indicar determinado material (combustível) como bom gerador de energia. Esta pesquisa cingir-se-á em testar estas propriedades e assim poder fornecer informações relevantes para a melhoria do produto.

### **1.3. OBJECTIVOS**

#### **1.3.1. Geral**

Avaliar a qualidade de briquetes de cafulo de coco pré-carbonizado como alternativa energética.

#### **1.3.2. Específicos**

- Determinar as características físico-químicas e energéticas dos briquetes produzidos;
- Determinar o índice de combustão e testar o tempo de fervura de água dos briquetes produzidos.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Composição da biomassa e composição do coco

A biomassa, conhecido como um material lignocelulósico possui na sua estrutura energia armazenada de forma química. Isto acontece porque as plantas absorvem energia solar através do processo de fotossíntese e armazenam no seu interior até completar o seu ciclo de vida natural ou entrar numa cadeia de utilização (Salgueiro, 2014).

Segundo Jenkins *et al.* (1998), a biomassa têm na sua estrutura as seguintes componentes: celulose, hemicelulose, lignina (as 3 principais macromoléculas), lípidos, proteínas, açúcares simples, amido, água, cinzas e uma fração mineral resultante do processo de fotossíntese. A concentração de cada componente varia de acordo com a espécie, o estágio e as condições de crescimento do organismo vivo. Zhang *et al.* (2010), aponta de forma geral um intervalo de valores em que as 3 principais macromoléculas podem se inserir nomeadamente: a celulose (40-60%), hemicelulose (20-40%), e a lignina (10-25%).

Para a cultura do coco estão apresentadas na tabela 1 as macromoléculas, o conteúdo de cinzas, o poder energético e das componentes da biomassa do coco e as respetivas quantidades.

Tabela 1. Caracterização físico-química das partes do coco. Fonte: Marafon *et al.* (2019).

Componentes	Casca (fibra+ po)	Endocarpo
Celulose (%)	35,52	42,91
Hemicelulose (%)	33,41	16,76
Lignina (%)	22,28	30,95
Cinzas (%)	7,70	1,31
PCS (Kcal/kg)	4.358	4.784
PCI (Kcal/kg)	4.059	4.484
Densidade básica (g/cm <sup>3</sup> )	0,186	0,922
Densidade energética (Mcal/m <sup>3</sup> )	811	4.411

### 2.1.1. Categorias de biomassa

A biomassa pode ser classificada em dois grandes grupos: biomassa tradicional que é composta pela lenha e resíduos naturais. O outro grupo é de biomassa moderna: produzida a partir de processos tecnológicos eficientes (exemplo os briquetes) e processos avançados tais como biocombustíveis líquidos (Marafon, 2016). Segundo Lora *et al.* (2013), por meio da biomassa é possível se obter diversas formas de energia e os seus principais usos como insumo energético são: produção de biocombustíveis sólidos para geração de energia térmica (carvão vegetal), biocombustíveis líquidos (biodiesel utilizado em motores a combustão) e geração de energia elétrica (combustão direta, gaseificação)

A Norma ISO 17225-1 de combustíveis sólidos de 2014 estabelece um conjunto de especificações e classes que permitem classificar as biomassas como biocombustíveis sólidos. Abaixo seguem descritas as classes de biomassa.

- a) Biomassa de madeira: biomassa proveniente de árvores (folhas, galhos e troncos), arbustos;
- b) Biomassa herbácea: biomassa de plantas que não possuem um caule de madeira e cuja vida termina com o final do ciclo de crescimento (anual ou mais curto) por exemplo: caule de mandioca. Inclui ainda grãos e todos os seus subprodutos como os cereais.
- c) Biomassa de fruto: biomassa que consiste em, ou possui, sementes ou frutos por exemplo: casca e caroço de manga;
- d) Biomassa aquática: também conhecida por biomassa hidrófila, ou seja, adaptada ao meio aquático, seja ele de água doce ou salgada por exemplo algas marinhas.
- e) Misturas de biomassa: refere-se a material de origem diversa e que de forma propositada ou não, misturado com o intuito de servir como combustível. Esta categoria resulta da mistura de biomassas com origens diferentes (entre as classes a, b, c, e d).

Segundo Awogbemi *et al.* (2021), também existe a categoria de resíduos sólidos. Esta categoria pode ser composta por: papel processado, estrume animal e de aves seco, resíduos municipais degradáveis, resíduos de comida e também resíduos de esgoto.

## 2.1.2. Biocombustíveis e conversão da biomassa para biocombustíveis

Fortes e Raimundo (2020), definem biocombustíveis como todos os elementos orgânicos ou toda matéria-prima não mineral capazes de gerar combustão. Nesta perspectiva abrange os combustíveis sólidos, líquidos, gasosos e gelatinosos.

A conversão da biomassa é feita de várias formas e para diferentes fins energéticos por exemplo: conversão física que envolve a produção de lenha; a conversão bioquímica que envolve por exemplo a fermentação alcoólica e a conversão termoquímica que incluem processos como a (combustão, torrefação, pirólise incluindo a carbonização) sendo que, a combustão directa representa aproximadamente 97% da produção bioenergética a nível mundial e em muitos países em desenvolvimento a principal forma de conversão em energia utilizável (Zhang *et al.*, 2010).

Segundo estudos realizados por Yang *et al.* (2004), em ensaios termogravimétricos a pirólise das 3 componentes da biomassa (celulose, hemicelulose, e lignina) geram sólidos na ordem de 8%, 25% e 46% em peso demonstrando que quanto mais lignina o material tiver, maior será o rendimento na carbonização. A biomassa do o coco pode ser transformado em carvão vegetal.

O endocarpo (cafulo) do coco apresenta maiores valores de celulose e lignina (Tabela 1) com a excepção da hemicelulose o que torna o endocarpo uma atraente opção para o uso energético. Por exemplo: a percentagem de lignina do endocarpo em relação a casca é de 30,95% em relação 22,28%, indicativo que a conversão desta parte do coco terá maior rendimento em carvão (Marafon *et al.*, 2019).

A combustão directa ocorre essencialmente em fogões para a cocção de alimentos, fornos metalúrgicos e caldeiras para a geração de vapor. Embora o processo de combustão directa seja muito prático e conveniente é geralmente ineficiente. A ineficiência provém da alta humidade e baixa densidade energética do combustível por exemplo a lenha, palha, resíduos de diferente tipos de biomassa. Estas características dificultam o armazenamento e transporte dos combustíveis (Atkins, 2006).

Um das formas de contornar a ineficiência da combustão directa da biomassa *in natura* é por meio da briquetagem (Obi *et al.*, 2022). O carvão do endocarpo do coco pode ser transformado em briquetes de alto poder calorífico para a geração de energia como fonte alternativa de combustível em substituição de outras fontes

vegetais tradicionais altamente exploradas as quais precisam ser preservadas como o carvão vegetal e a lenha nativa (Nunes, 2018).

## **2.2. Briquetes: generalidades**

O briquete é um biocombustível sólido feito a partir da compactação de resíduos lignocelulósicos muito utilizado para a geração de energia na forma de calor ou eletricidade. Eles são substitutos diretos da lenha em muitas aplicações incluindo o uso residencial, industrial e estabelecimentos comerciais como: olarias, cerâmicas, padarias, pizzarias, laticínios, fábricas de alimentos, indústrias químicas, têxteis e de cimento dentre outros (Tavares, 2015).

A compactação geralmente aumenta a densidade aparente, melhora o manuseio e a logística, reduz os custos de mão de obra, melhora as propriedades térmicas da biomassa, bem como a combustão direta e a co-combustão da biomassa (Nascimento *et al.*, 2021).

Existem dois tipos de briquetes: simples e os compostos. Os briquetes compostos passam pelo mesmo processo de produção dos briquetes simples, no entanto, são compostos por mais de um tipo de resíduo (Melo, 2010). Por conta disto, no processo de produção existe a fase da mistura das matérias-primas. Ao se produzir briquetes compostos evita-se a dependência de um único tipo de resíduo. Nos períodos de escassez dos resíduos de maior poder calorífico, tem-se a opção de substituí-los por outros resíduos em maior quantidade, mantendo a eficiência energética dos briquetes (Dantas, 2012 e Santos e Souza, 2012).

### **2.2.1. Processo de briquetagem**

Segundo Borne (2022) e De Oliveira (2013), as etapas do processo de briquetagem são:

- Escolha do material: refere-se a selecção do material que se deseja compactar pode ser somente um ou um conjunto de materiais tomando em consideração suas características como tamanho da partícula, densidade e humidade bem como o tipo de briquete que se deseja obter (Vieira, 2014).
- Secagem: o material destinado a briquetagem deve ser seco de modo a adequar o conteúdo de humidade presente na biomassa. A secagem pode ser realizada com passagem de ar quente usando secadores (secador rotativo directo ou indirecto),

ou pode ser realizada ao ar livre.

- Trituração: o material deve ser triturado para adequar o tamanho das partículas de modo a evitar partículas muito grandes no processo de compactação, dificultando a acção do prensador e dos aglutinantes se estes estiverem presentes.
- Peneiração: refere-se a separação dos resíduos por tamanho das partículas, de modo a usar a matéria prima com granulometria desejada e eliminar as partículas indesejadas.
- Prensagem: a prensagem propriamente dita proporciona a resistência aos briquetes. É realizada por meio de prensas que aplicam altas pressões e temperaturas sobre a massa do resíduo e ao ligante mas também pode ser realizada manualmente ou por meio de moldes resultando em formas geométricas definidas.
- Arrefecimento: quando aplicada a acção do calor na formação do briquete após a compactação os briquetes devem ser arrefecidos ou caso não tenham sofrido a acção da temperatura devem ser postos no secadores ou ao ar livre para que ocorra o processo de cura.
- Armazenamento e embalagem: depois de secos os briquetes devem ser armazenados em ambientes secos, limpos e arrejados.

### 2.2.2. Vantagens e desvantagens dos briquetes

Segundo Njagi *et al.* (2013) e Biomachine (2007), as vantagens dos briquetes incluem:

- Possuem maior conteúdo energético por unidade de volume se comparados aos resíduos *in natura*;
- Apresentam menor humidade (10 a 12%) comparada a que a lenha muitas vezes possui teores de humidade elevados;
- Apresentam maior temperatura de chama e queima regular;
- Ajudam a reduzir a poluição e possibilita a criação de uma nova estratégia de gestão de resíduos para comunidades e conselhos municipais;
- Reduzem a quantidade de árvores abatidas, pois contribuem para a diminuição do uso da biomassa tradicional (lenha e carvão vegetal);

- Geram menos cinza e fumo, causando menor impacto ambiental que outros tipos de combustíveis;
- São produtos 100% reciclados e ecológicos;
- Os briquetes ajudam a gerar renda pois podem ser comercializados;
- O formato geométrico facilita o transporte, manipulação e armazenamento;
- Requerem menor espaço para armazenamento por exemplo:1 tonelada de briquete ocupa 25 m<sup>2</sup>;
- Permite o aproveitamento de resíduos das indústrias de base florestal, agrícolas, agro-alimentares, dentre outras de origem vegetal;
- Uma tonelada de briquetes pode substituir aproximadamente 1,96 toneladas de lenha.

As desvantagens da produção de briquetes apontadas por Dias *et al.* (2012); Silveira (2008); Silva (2020) como desafios a serem superados são divididas em três principais áreas:

- Logística: a densidade da biomassa, o custo de coleta e de transporte, torna difícil a utilização dos resíduos longe dos locais de produção dessa forma, as plantas de briquetagem devem estar localizadas perto das regiões onde haja disponibilidade da matéria-prima;
- Técnica: cada matéria-prima apresenta características distintas, deste modo, é necessário ter conhecimentos técnicos e inovações tecnológicas para coleta, secagem, moagem e classificação dos materiais, de modo a conseguir-se homogeneidade, qualidade e eficiência.
- Econômica: a produção dos briquetes a nível industrial necessita de investimento inicial em equipamentos (moinhos, secadores e briquetadeiras);
- A biomassa tem a característica de ser hidrofóbica e por via disto apresentam tendência de se desfazerem quando expostos à água ou submetidos à alta humidade (Weatherstone *et al.*, 2015).

### **2.3. Parâmetros que influenciam a qualidade da densificação**

A qualidade dos briquetes para o uso energético é influenciada pelo processo de produção por factores como: a granulometria, humidade da matéria prima, pressão de compactação entre outros factores. Em seguida são descritos de forma breve os principais parâmetros considerados importantes para obtenção de briquetes de qualidade desejada.

#### **2.3.1. Granulometria**

A qualidade do briquete está relacionada com o tamanho das partículas que o compõe, pois a granulometria do material influencia directamente no consumo de aglutinantes, e na resistência final do briquete (Gil *et al.*, 2013). A matéria-prima ideal deve ser composta por uma mistura de partículas de vários tamanhos, sendo que a medida máxima depende do tipo de material e do diâmetro da matriz da prensa. Geralmente é aceitável uma dimensão de partículas que se encontram na faixa de 5 e 10 mm para que ocorra uma compactação eficiente (Silva *et al.*, 2018;). A redução no tamanho das partículas é geralmente recomendado, a fim de reduzir os espaços interpartículas e criar laços mais fortes durante a compressão (Vieira, 2012).

#### **2.3.2. Pré-tratamentos**

A biomassa a ser utilizada como combustível, por exemplo: na combustão direta, normalmente não é eficiente utiliza-la na forma em que se encontra disponível, necessitando de algum tratamento termo-mecânico para seu uso eficaz. Dentre os tratamentos termo-mecânicos disponíveis são: a secagem, torrefação, carbonização, trituração, entre outros (Rendeiro, 2018). O objetivo destes tratamentos é melhorar as características físicas e ou mesmo químicas da biomassa (Gilvari *et al.*, 2019).

A carbonização é um processo em que, material orgânico é submetido a temperaturas entre 350 a 600°C em ambiente fechado, com pequena quantidade ou exclusão total de oxigénio e durante o qual são liberados gases, vapores de água e líquidos orgânicos, permanecendo como resíduos principalmente o alcatrão e o carvão vegetal (Dermibas, 2009).

Quando esta biomassa carbonizada é compactada, produz um combustível com maior poder calorífico, menor teor de materiais voláteis, maior teor de carbono fixo e baixa

humidade (Chen *et al.*, 2011).

### **2.3.3. Conteúdo de humidade da biomassa**

Na geração de energia a partir da biomassa, um parâmetro que deve ser controlado é o teor de humidade da matéria-prima tanto como no produto final. Alves Júnior (2003), indica que a faixa ideal de humidade para a matéria-prima utilizada no processo de briquetagem está entre 8 e 15%. Quanto maior a humidade menor será a produção de calor por unidade de massa, pois parte da energia liberada na combustão é gasta na vaporização da água. Adicionalmente, o excesso de humidade pode provocar explosões pela formação de vapor de água e ocasionar o aparecimento de fissuras no produto final (Gonçalves, 2010).

Por outro lado, se o resíduo for muito seco (menor que 5%) ou acima da humidade indicada (maior 15%) produz um briquete com baixa estabilidade dimensional, desfazendo-se quando armazenado ou transportado (Quirino e Brito, 1991).

### **2.3.4. Temperatura**

A temperatura de compactação exerce uma função relevante nas propriedades finais do produto e no consumo energético durante a compactação. Com o aquecimento, é possível obter produtos mais estáveis com menor dimensão se comparados com materiais de mesma composição porém compactados sem aquecimento (Junior *et al.*, 2017).

Estudos mostram que a temperatura máxima não deve ultrapassar os 300°C, para que se evite a decomposição das componentes da biomassa. Porém, a temperatura a ser usada depende da matéria-prima, pré-tratamento, tempo de compactação e teor de humidade (Marreiro *et al.*, 2021).

### **2.3.5. Proporção de biomassa usada**

A briquetagem permite a combinação de vários materiais, e assim, promove o aproveitamento energético dos resíduos excedentes de algumas culturas ou processos produtivos trazendo benefícios ambientais e socioeconómicos (Gebrezgabher, 2016). No entanto, dadas as diferenças que podem existir entre as matérias-primas, como por exemplo: a granulometria e a humidade é necessário

aplicar técnicas de processamento adequadas, uma vez que influenciam o manuseamento, a qualidade final do produto e os custos com consumo de energia (Tumuluru, 2020).

### 2.3.6. Aglutinantes

Os aglutinantes funcionam como adesivo e contribuem para a interligação e coesão das partículas. A utilização de aglutinantes no processo de briquetagem se justifica quando o material a ser aglomerado não possui características intrínsecas de aglutinação ou, após a compactação, apresente características físicas comprometidas, como a resistência à compressão e ao impacto (De Oliveira, 2013).

Para biomassas como por exemplo, as partículas de carvão vegetal por terem passado pelo processo de carbonização, apresentam baixa concentração de ligantes naturais e necessitam de uma quantidade adicional de aglutinantes para produzir bons briquetes de carvão vegetal (Teixeira *et al.*, 2011).

As principais características que aglutinantes devem possuir são: alta taxa de aglutinação, inexistência de material inerte em sua composição, alta resistência mecânica, possuir simplicidade de uso, resistência à humidade e boas condições de operacionalidade (De Melo, 2010).

Os aglutinantes também não devem prejudicar as características energéticas do briquete, por exemplo: diminuindo o rendimento calorífico, aumentando o teor de voláteis e cinzas, ou mesmo, ser usado em proporções que o custo inviabilize economicamente a produção dos briquetes (Dias *et al.*, 2012).

Os aglutinantes podem ser divididos em dois grupos principais: ligantes orgânicos e inorgânicos. No grupo dos orgânicos se encontram: o melado, alcatrão de hulha, betume, amido, resina. Por outro lado, os ligantes inorgânicos incluem: a argila, cimento, calcário, resíduos de papel (Tumuluru *et al.*, 2010).

Os aglutinantes também podem ser subdivididos em aglutinantes combustíveis e não combustíveis. Por exemplo: resinas naturais ou sintéticas, alcatrão, estrume animal, lama de esgoto, algas, e o amido. Quanto aos não combustíveis são exemplos: a argila, lama, cimento, e o lodo (Baab, 2017).

### 2.3.7. Tecnologias de compactação

Existem dois tipos principais de processo de compactação. O primeiro é um processo de extrusão contínuo ou semicontínuo que depende de forças de atrito do lado da matriz que actuam para produzir compressão. O outro é um processo descontínuo, no qual um único briquete por vez é produzido em um molde fechado (Stanley, 2003).

O processo contínuo é geralmente associado à produção industrial em larga escala e normalmente envolve compressão de média a altas pressões. Por outro lado, o processo descontínuo de briquetagem é comumente visto em configurações de menor escala-zonas rurais- e envolve compressão de baixa pressão (Yang *et al.*, 2004).

#### I. Compactação a média e alta pressões (processo contínuo ou semicontínuo)

A compactação de média e alta pressão normalmente não requer nenhum aglutinante adicional. A força de compactação é causada pelas forças de Van Der Waals, forças de valência e entrelaçamento de partículas. Os componentes naturais do material podem ser activados pelas forças de alta pressão predominantes para se tornarem aglutinantes (Grover e Mishra, 1996). Na compactação de alta pressão, os resíduos de biomassa são comprimidos sob alta temperatura e pressão. Esses resíduos contêm lignina, que é um polímero aromático não cristalizado sem ponto de fusão fixo, mas a 200–300°C, a lignina começa a ficar macia, derretida e liquefeita

Segundo Chen *et al.* (2011) os equipamentos comumente usados podem ser classificados em três grandes grupos nomeadamente:

- i. **Prensa de pistão mecânico:** neste tipo de prensa o material é alimentada por um funil e compactada em uma matriz por meio de um pistão que movimenta-se alternadamente. A matriz é geralmente constituída por um conduto afunilado de secção circular, que serve para compactar e extrudar na forma de briquetes.
- ii. **Prensa com parafuso cónico:** neste tipo de prensa, o parafuso cónico alimenta a matéria-prima e a pré-compacta em uma antecâmara e posteriormente, um cabeçote de compressão compacta e extrusa a biomassa em uma matriz.
- iii. **Prensa com parafuso cilíndrico e matriz aquecida:** neste tipo de prensa o material é forçado a passar directo por uma parte estreita, cónica e aquecida, com um molde de saída que pode ser no formato circular ou quadrado. O orifício central presente serve para aumentar a densificação do material causada pela

rotação da extrusora e eliminar o fumo provocado pela pirólise parcial na superfície.

A principal vantagem da compactação de média e alta pressões é a obtenção de produtos com maior densidade e mais estáveis, isto é, não se quebram com facilidade e se obtém produtos com menores dimensões (Paula, 2010).

## **II. Compactação a baixa pressão (processo descontínuo)**

Diferente da compactação a alta e média pressões, a briquetagem a baixas pressões necessita de um agente ligante para auxiliar na formação de ligações entre as partículas de biomassa (Magalhães *et al.*, 2018).

Existem diferentes tipos de prensas manuais usadas para briquetagem de biomassa. Elas são projetados especificamente para esse fim ou adaptados de implementos existentes usados para outros fins, por exemplo: as prensas manuais para fabricação de tijolos de barro (Baaba, 2017).

As principais vantagens da briquetagem de baixa pressão são: baixos custos de capital, baixos custos operacionais e baixos níveis de habilidade necessária para operar a tecnologia.(Chaney, 2010). De forma geral, técnicas de baixa pressão são particularmente adequadas para briquetagem de resíduos húmidos por exemplo folha de banana. O material húmido é moldado sob baixa pressão em prensas de bloco simples ou prensas de extrusão (Njagi, 2013). O briquete resultante tem uma densidade maior do que o material original, mas ainda requer secagem antes de ser usado. O briquete seco tem pouca resistência mecânica e esfarela-se com facilidade, sendo imprescindível o uso de um aglutinante (Cavalcante, 2017).

## 2.4. Parâmetros de qualidade de briquetes

A qualidade dos briquetes para o uso energético é geralmente medida por meio de propriedades físico-mecânicas; químicas e energéticas. Os parâmetros de qualidade usualmente avaliados em briquetes de biomassa do ponto de vista físico-mecânico e energético incluem: a resistência à compressão, resistência à abrasão, resistência ao impacto e resistência à penetração de água, (todos influenciados pela densidade dos briquetes); poder calorífico, análise imediata entre outros (Brand, 2010; Obi *et al.*, 2022). Em seguida são descritos de forma breve os principais parâmetros usados na caracterização da qualidade dos briquetes.

### 2.4.1. Propiedades físicas

#### i. Densidade aparente

De acordo com Furtado *et al.* (2010), a densidade aparente expressa a quantidade de material por unidade de volume. Esta propriedade está relacionada com o poder calorífico superior. Portanto, quanto maior a densidade aparente mais concentrada está a energia, resultando em um briquete com maior potencial energético em um mesmo volume (Silva *et al.*, 2018). A densidade é uma das principais características do briquete, pois define a logística a ser tratada, bem como o transporte e o armazenamento (Demirbas, 2009).

#### ii. Densidade a granel

A densidade a granel de uma determinada biomassa é definida como a massa total de biomassa armazenada em um determinado volume, dividida pelo valor desse volume, expressado em  $\text{kg/m}^3$  (Kunrath, 2016). A densidade a granel quantifica o volume de materiais de formas irregulares, considerando os espaços vazios entre as partículas (Barros, 2012). Quanto menor o tamanho da partícula, maior a densidade a granel que conseqüentemente, apresentará maior massa a ser transportada ou armazenada, minimizando os custos dessas etapas (Garcia *et al.*, 2013).

#### iii. Densidade energética

Protásio *et al.* (2011), define a densidade energética como a propriedade que avalia o desempenho da biomassa como combustível.

De acordo com Souza & Vale (2016), a densidade energética é uma das principais propriedades que definem a qualidade do briquete pois resume as características químicas, físicas, as condições de humidade e a quantidade de calor do produto final em uma única variável.

#### **iv. Resistência à compressão**

A resistência à compressão é um parâmetro de controle de qualidade, porque indica a resistência dos danos ao produto e, conseqüentemente, perda de massa e do poder calorífico. Este teste simula a força máxima de compressão que um briquete pode suportar durante o transporte, manuseio e armazenamento (Gentil, 2008). Para materiais orgânicos densificados, a resistência à compressão é definida como a força axial máxima que pode suportar até a fractura ou ruptura. Se a força for aplicada perpendicularmente, a medição resultante é chamada de resistência à tração (Kambo e Dutta 2014).

#### **v. Resistência à abrasão**

A resistência à abrasão é a medida da capacidade dos briquetes permanecerem intactos sob a influência de forças abrasivas durante o manuseio, armazenamento e transporte. Conhecimento sobre a durabilidade do briquete de biomassa é importante para mitigar a perda do material, geração de poeira e as possíveis explosões por conta dos finos gerados (Gilvari *et al.*, 2019).

O método usualmente utilizado para a medição da resistência a abrasão é o método de tamboreamento, que consiste em avaliar a diferença entre a massa inicial e final do briquete que é introduzido num tambor rotativo por um tempo determinado (Rajaseenivasan, 2016).

#### **vi. Resistência ao impacto**

A resistência ao impacto mede a resistência do briquete à quebra quando caem de uma altura e superfície de material conhecido (Wu *et al.*, 2011). A percentagem de perda de peso é descrita como uma medida da resistência do briquete ao impacto. Esta é influenciada principalmente pela força de ligação do material briquete (Khorasgani *et al.*, 2020). A resistência ao impacto é importante para entender o comportamento dos

briquetes durante o descarregamento em superfícies (Rajaseenivasan, 2016).

#### **vii. Resistência à penetração de água**

A capacidade de resistência à água de briquetes de biomassa é medida por um teste de imersão em água feito em laboratório (Zhang *et al.*, 2017). Este parâmetro de qualidade é particularmente importante para o armazenamento e transporte de briquetes em ambientes de alta humidade ou quando expostos à chuva (Obi *et al.*, 2013).

Segundo Gilvari *et al.* (2019), um dos fatores que influencia a resistência à água dos briquetes é a quantidade de aglutinantes usados na fabricação do briquete. Quanto menor a quantidade de aglutinante, ocorre o aumento do entrelaçamento das partículas de briquete, resultando em menos espaços vazios. Por outro lado, briquetes com tamanho de partículas maiores, exibem baixa resistência à água devido à sua natureza porosa permitindo assim a fácil penetração da água. Outros fatores que influenciam a resistência à água dos briquetes incluem a temperatura e o tempo de briquetagem (Orisaley *et al.*, 2019).

### **2.4.2. Propriedades químicas e energéticas**

#### **i. Poder calorífico**

Define-se poder calorífico como a quantidade de energia na forma de calor liberada pela combustão de uma unidade de massa do material em análise (Dias *et al.*, 2012).

O poder calorífico divide-se em superior e inferior. O poder calorífico superior (PCS) é aquele em que indica o potencial de produção de energia por unidade de massa. O poder calorífico inferior (PCI) é a energia efetivamente disponível por unidade de massa de combustível após deduzir as perdas com a evaporação da água (Briane *et al.*, 1985).

#### **ii. Análise imediata**

A análise imediata engloba a quantificação dos teores de humidade, materiais

voláteis e carbono fixo presentes na biomassa que auxiliam na caracterização energética de qualquer material (Vieira, 2012).

### **iii. Teor de cinzas**

O teor de cinzas é a fracção que permanece como resíduo após a combustão do carvão vegetal (Dias *et al.*, 2012). Os elementos que dão origem às cinzas podem ser inerentes à biomassa, ligados às estruturas contendo carbono, ou podem ser introduzidos no combustível como fragmentos minerais do ambiente externo, durante a colheita com recurso ao uso de maquinarias (Petricoski, 2017).

A testagem do parâmetro do teor de cinzas é importante nas análises de biomassa porque dá indicação sobre o conteúdo de matéria inorgânica que dará origem à formação de cinzas nos sistemas de combustão e fornece também indicação sobre a possível existência de contaminação da biomassa (Vassilev *et al.*, 2010). Adicionalmente, é importante o conhecimento do teor de cinzas na medida em que permite acautelar ciclos de limpeza e manutenção, bem como a existência de mecanismos de retirada de poeira e redução de emissão de partículas nos sistemas de combustão (Salgueiro, 2014).

A maioria dos resíduos de biomassa tem baixo teor de cinzas, exceto a casca de arroz que pode conter até cerca de 25% de cinzas, devido ao alto conteúdo de sílica na matéria prima. Desta maneira, quanto menor a quantidade de cinzas, melhor a qualidade do briquete. Segundo Steffler (2019), as cinzas da biomassa em alta concentração podem diminuir o poder calorífico e causar perda de energia.

### **iv. Teor de voláteis**

As materias voláteis fazem parte da mistura de substâncias no estado gasoso que são expelidas por meio do aquecimento do material. O teor de voláteis, está relacionado ao comportamento do combustível em meio à sua decomposição (Garcia, 2013).

O teor de volátil da biomassa contribui tipicamente com cerca de 70% de calor para o processo de combustão e afecta a estabilidade da chama, a formação de poluentes e a eficiência global da combustão (Williams *et al.*, 2012). Como resultado da elevada quantidade de matéria volátil, a biomassa apresenta uma elevada reactividade que influencia o processo de combustão, na medida em que uma parte do combustível de

biomassa é vaporizado antes de ocorrerem as reações de combustão em fase gasosa (Petricoski, 2017).

#### **v. Teor de carbono fixo**

Borsato *et al.* (2009), definem o teor de carbono fixo como todo carbono no material que pode sofrer combustão.

Segundo Cavalcante (2017), combustíveis com alto índice de carbono fixo apresentam queima mais lenta, implicando maior tempo de residência nos aparelhos de queima, em comparação com outros combustíveis que tenham menor teor de carbono fixo.

#### **vi. Testes de combustão**

O índice de combustão (ICOM) é um parâmetro visa avaliar o desempenho do briquete durante a combustão que integra num só valor o tempo de combustão, a temperatura gerada durante a combustão e a massa consumida para gerá-la (Quirino e Brito, 1991).

#### **vii. Teste de fervura de água**

É uma simulação simplificada do processo de cozedura dos alimentos, e pode ser usado na comparação rápida do desempenho de diferentes combustíveis. Expressa a quantidade de energia no combustível que realmente pode ser utilizada, isto é, a energia transferida pelo combustível para o recipiente (panela) que é utilizado durante o cozimento, aquando da sua combustão num fogão (Faxälv & Nyström, 2007).

O teste possui duas fases: a fase de alta potência (A.P) e a de baixa potência (B.P). Na fase de alta potência mede-se o tempo e o combustível necessário para levar uma certa quantidade de água desde a temperatura ambiente até ao ponto de ebulição local. Na fase de baixa potência mede-se a quantidade de combustível necessária para manter a água fervendo por 60 minutos Manjate (2023).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. Proveniência do material

O material do presente estudo provém da comunidade de Cumbana agrícola, província de Inhambane onde está estabelecida uma plantação de coqueiros nas seguintes coordenadas (-23.54107; 35.4118) para a produção de copra no âmbito do projecto de Exploração Sustentável de óleo de Coco da província de Inhambane. A comunidade local era responsável pela produção do carvão de coco e dos briquetes do presente estudo.

#### 3.2. Métodos

##### Processo de produção de carvão endocarpo (cafulos)

O endocarpo (cafulos) do coco foi submetido ao tratamento da carbonização com o intuito de melhorar as características físicas e químicas do briquete. Os cafulos de coco (secos ao ar livre) foram separados em pequenas quantidades e pesados em uma balança de precisão até ao peso de 10 kg. De seguida, o forno foi posto em ignição e introduzido o primeiro lote de cafulo até a sua carbonização (Figura 1). Gradualmente, lotes de 10 kg cada foram adicionados (até a capacidade de 90 kg do forno) e esperados 15 minutos para que cada lote carboniza-se. Após a carbonização do último lote o forno foi fechado com uma tampa de metal, e posta uma camada de argila para



prevenir a entrada oxigénio dentro do forno.

Figura 1. A:Forno em ignição; B: introdução dos cafulos no forno: C: cafulos no processo de carbonização.

## Produção dos briquetes

As variedades de briquetes produzidos usados para os testes de qualidade, foram resultantes das misturas de carvão moído de cafulo (principal ingrediente), esterco bovino e argila como aglutinantes e água até formarem uma pasta homogênea. Após a mistura da pasta esta foi introduzida nos orifícios da briquetadeira (Figura 2) e compactada usando um almofariz. Antes da mistura o carvão e esterco foram moídos ou pilados com a finalidade de adequar as partículas para melhor compactação. O modelo empregado para produção dos briquetes era de lotes. As quantidades das componentes de briquetes usadas em cada uma das variedades encontram-se na Tabela 2.



Figura 2. A: Briquetadeira usada para moldar os briquetes; B: Processo de enchimento da briquetadeira.

Tabela 2. Quantidades dos ingredientes dos briquestes

Misturas	Carvão de coco	Esterco bovino	Argila	Água
Mistura A (Carvão de coco+Argila+ Água)	2 kg	---	1 kg	653 ml
Mistura B (Carvão de coco+Esterco bovino+ Água)	2 kg	1 kg	---	2800 ml
Mistura C (Carvão de coco+Argila+Esterco bovino+ Água)	2 kg	0.5 kg	0.5 kg	1400

### 3.3. Análises laboratoriais

O presente trabalho teve como objetivos realizar testes laboratoriais de modo a determinar a qualidade dos briquetes produzidos. Os testes foram realizados no laboratório de química da Faculdade de Engenharia da UEM. Para realizar os testes foram produzidos 10 briquetes de cada variedade.

#### I. Análises físicas

##### Densidade aparente

A densidade aparente foi determinada pelo método estereométrico, que consistiu em obter o volume dos briquetes a partir de medições de diâmetro e altura dos briquetes feitas em 3 pontos utilizando um paquímetro e posteriormente realizada a média das medições e a massa do briquete foi obtida utilizando uma balança com precisão de 0,001g (Protásio 2011).

$$\rho = \frac{m}{V} \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (1) \quad \text{Onde:}$$

$\rho$  – Densidade (g/cm<sup>3</sup>)

m – Massa (g)

V - Volume (cm<sup>3</sup>)

O volume foi determinado a partir da fórmula (2);

$$V = \pi r^2 h \text{ (cm}^3\text{)} \quad (2) \quad \text{Onde:}$$

Onde:

v – Volume (cm<sup>3</sup>)

r – Raio (cm)

h – altura (cm)



Figura 3. Pontos de medição de alturas e diâmetros. Fonte: Autora (2024).

### Densidade energética

A densidade energética (DE) é a propriedade que avalia o desempenho da biomassa como combustível, pois resume as características físico-químicas (constituição química, poder calorífico e cinzas) e é definida como o produto entre o poder calorífico e a densidade aparente (Souza *et al.* 2015).

A fórmula abaixo ilustra como esta foi determinada:

$$DE = \rho \times PCS \text{ (MJ m}^{-3}\text{)} \quad (3) \quad \text{Onde:}$$

$\rho$  – Densidade (g/cm<sup>3</sup>)

*PCS*- poder calorífico superior

### Densidade à granel

Para a determinação da densidade a granel da biomassa usou-se a norma ASTM E-873-06. Este processo consistiu em introduzir a biomassa num recipiente com dimensões padronizadas. O recipiente é preenchido e compactado. O peso final da biomassa no recipiente corresponde a densidade à granel.



Figura 4. Recipiente de 100 cm<sup>3</sup>. Fonte: Autora (2024)

volume padronizado

## Friabilidade

O teste de friabilidade foi realizado inserindo-se cada variedade de briquete, previamente pesado numa balança analítica, num tambor rotativo de marca: *Anand A.C Induction Motor* (Figura 5), ajustado para 40 rotações por minuto durante 15 minutos. Os briquetes foram retirados do tambor e pesados novamente para obter a massa residual.

O cálculo da quantidade de finos produzidos (%) foi feito através da seguinte expressão:

$$\text{Friabilidade} = \frac{\text{massa}_0 - \text{massa}_1}{\text{massa}_0} \times 100\% \quad (4) \quad \text{Onde:}$$

*massa<sub>0</sub>*- massa do briquete antes do teste (g)

*massa<sub>1</sub>*- massa do briquete após o teste (g)



Figura 5. Máquina para  
Fonte: Autora (2024)

o teste de friabilidade.

## II. Análises químicas e energéticas

A composição imediata consiste na determinação da humidade, teor de cinzas, materiais voláteis e carbono fixo.

### Humidade

Para se determinar o teor de humidade a base húmida e seca, foram pesados 20g de

cada variedade de briquete previamente trituradas até ao estado de pó. Foi usado o analisador de humidade *Sartorius* MA 100 (Figura 6) que permite que aproximadamente 1g de amostra seja introduzido para análise da humidade. Para determinar a humidade a base seca as amostras foram primeiro deixadas a secar na estufa por 48 horas na estufa a 110 °C depois determinada a humidade.



Figura 6. Analisador de humidade. Fonte: Autora (2024).

### **Materiais Voláteis**

Para a determinação do teor de materiais voláteis recorreu-se a norma ASTM-E 872 que determina que 1g da amostra seca, é colocada num cadinho com tampa para evitar contacto com o ar durante a devolatilização. O cadinho coberto foi colocado na mufla a uma temperatura de 950°C e mantido durante 7 minutos. Em seguida, as amostras foram removidas e arrefecidas num dissecador e posteriormente pesadas para determinar a perda de massa ocorrida devido a devolatilização.

A fórmula abaixo ilustra como esta foi determinada:

$$MV(\%) = \frac{Ma-Mb}{Ma} \times 100 \quad (5) \quad \text{Onde:}$$

MV – Matéria Volátil (%)

Ma – Massa da amostra fresca (g)

Mb – (mcaquinho vazio+ tampa) –(Cadinho+ mfinal) (g)

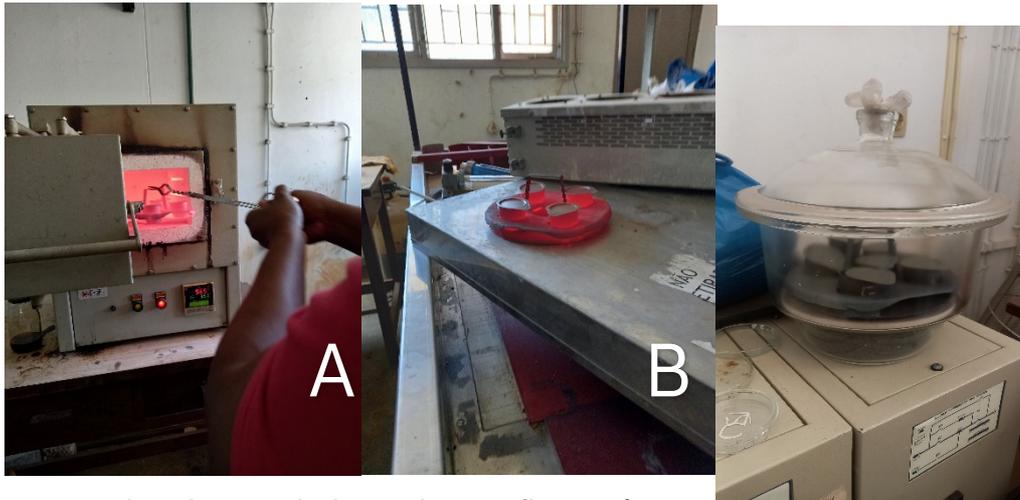


Figura 7.

A: Retirada dos cadinhos da mufla após a devolatilização. B e C: Arrefecimento dos cadinhos na mesa de Inox e no dessecador.  
 Fonte: Autora (2024)

### Teor de Cinzas

O teor de cinzas foi determinado com recurso da norma ASTM E-1755-01 destinada para diferentes tipos de biomassa. A norma E-1755-01 propõe a pesagem de 1g da biomassa seca, inicialmente aquecida até 250°C a uma taxa de aquecimento de 10°C.min<sup>-1</sup> e mantida a esta temperatura por 30 minutos. A temperatura é novamente elevada até a 575°C e mantida até que todo carbono seja queimado. Em seguida as amostras foram arrefecidas, pesadas e o teor de cinzas foi determinado segundo a fórmula (6) abaixo.

$$TC(\%) = \frac{Ma - Mb}{C} \times 100 \quad (6) \quad \text{Onde:}$$

Ma = massa (cadinho + amostra, g)

Mb = massa  
aquecimento, g)

C = massa da



(cadinho + amostra após o  
amostra, g)

Figura 8. Resultado da queima das diferentes misturas de briquetes A: mistura A; B: mistura B e C: mistura C. Fonte: Autora (2024)

### **Carbono Fixo**

O teor de carbono fixo (CF) é uma medida indireta e foi determinada pela diferença entre os constituintes dos materiais, por meio da equação (7) , seguindo a norma *ASTME870-82*.

$$CF(\%) = 100 - \%Cinzas - \% \text{ Materiais Voláteis} \quad (7)$$

### **Poder calorífico**

O Poder Calorífico Superior (PCS) e Poder Calorífico Inferior (PCI) são variáveis que podem ser obtidas de forma indirecta por meio de equações como as que se apresentam abaixo. Este método foi descrito e utilizado por Dias *et al.* (2012), cuja referência foi a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura, onde o Poder Calorífico Superior (PCS) e Poder Calorífico Inferior (PCI) em (MJ/kg) foram calculados com base do teor de cinzas (A) e o teor de humidade (M) do combustível.

$$PCS = 20,0 \times (1 - A - M) \text{ (MJ/kg)} \quad (8)$$

$$PCI = 18,7 \times (1 - A) - 21,2 \times M \text{ (MJ/kg)} \quad (9)$$

Onde:

A-teor de cinzas;

M- teor de humidade do combustível

### **Teste de fervura de água**

O ensaio de fervura da água foi realizado seguindo a metodologia descrita por Victorino (1995). A quantidade de água utilizada durante a execução do teste foi de 2/3 da capacidade total da panela de 5L. O teste de fervura envolve duas fases: a fase de alta potência (A.P) e a de baixa potência (B.P). A fase de alta potência envolveu o

aquecimento da água desde a temperatura ambiente até a ebulição (Figura 7), mantendo-a em ebulição durante 15 minutos. Por sua vez, a fase de baixa potência consistiu na redução da quantidade de combustível para a manutenção da temperatura da água alguns graus abaixo da temperatura de ebulição normal da água durante 60 minutos.

O sistema usado para a aquisição de dados experimentais seguiu a seguinte sequência:

- i. Pesou-se a quantidade inicial de briquetes (300 g);
- ii. Pesou-se a panela com a respectiva tampa;
- iii. Preencheu-se a panela com 2/3 de água da sua capacidade e pesou-se;
- iv. Colocou-se a panela no fogão, fixou-se o termopar no seu interior (através do orifício na tampa) e registou-se a temperatura inicial da água;
- v. Acendeu-se os briquetes e registou-se o tempo de início;
- vi. Registou-se o tempo em que a água começou a ferver;
- vii. Exatamente 15 minutos após o início da fervura, rapidamente: anotou-se o tempo, pesou-se a panela com a água incluindo a tampa, removeram-se os briquetes do fogão, pesaram-se e devolveram-se os briquetes ao fogão;
- viii. Nos seguintes 60 minutos manteve-se o fogo baixo de modo a evitar a ebulição vigorosa da água;
- viii. Depois dos 60 minutos, repetiu-se os passos descritos no ponto (vii).



Figura 9. Fase de alta potência do teste de fervura de água. Fonte: Autora (2024)

Para a realização dos cálculos necessários de modo a avaliar o desempenho dos combustíveis, é necessário o conhecimento do seguinte balanço energético:

**1. Calor libertado durante a combustão ( $Q_{lib}$ , kJ):** corresponde a quantidade de calor libertado durante a combustão total de uma unidade de massa de combustível.

$$Q_{lib} = PCI \times m_c \quad (10) \text{ Onde:}$$

PCI – poder calorífico inferior do combustível [kJ/kg];

$m_c$  – massa de combustível consumido (kg)

**2. Calor absorvido pela água ( $Q_{ab}$ , kJ):** é o calor necessário para elevar a temperatura de uma certa massa de água até a ebulição.

$$Q_{ab} = m_{ic} \times c_a \times (T_{fa} - T_{ia}) \quad (11) \text{ Onde:}$$

$m_{ic}$  – massa da água no início do teste [kg];

$c_a$  – calor específico da água;  $c_a = 4,2 \text{ kJ.kg}^{-1} \text{ .K}^{-1}$

$T_{fa}$  – temperatura final da água ( $^{\circ}\text{C}$ );

$T_{ia}$  – temperatura inicial da água ( $^{\circ}\text{C}$ ).

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

$$Q_{vap} = \Delta m_a \times L \quad (12) \text{ Onde:}$$

$\Delta m_a$  – Massa de água evaporada (kg);

$L$  – calor latente de vaporização da água;  $L = 2,26 \times 10^6 \text{ J.kg}^{-1}$

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

$$\eta = \frac{Q_{ab} + Q_{vap}}{Q_{lib}} \times 100\% \quad (13) \text{ Onde:}$$

$Q_{ab}$  - Calor absorvido pela água (kJ);

$Q_{vap}$  - Calor latente de vaporização (kJ);

$Q_{lib}$  – calor libertado durante a combustão (kJ).

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

$$P = \frac{Q_{lib}}{t} \quad (14) \text{ Onde:}$$

$Q_{lib}$  – calor libertado durante a combustão (kJ);

$t$  – tempo (s)

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

$$C_c = \frac{m_{cc}}{\Delta m_a} \quad (15)$$

### Índice de combustão (ICOM)

O teste de combustão realizado foi adaptado, segundo o sistema proposto por Quirino e Brito (1991) representado pela figura 8. O sistema foi montado composto pelo combustor, um anteparo de chapa metálica, para regular as massas de ar durante a combustão, uma balança com precisão 5 g de marca *ADAM*, modelo SA 1422 e uma placa de madeira (para proteger a balança do calor da combustão). Adicionalmente, foi usado um termopar de marca *Coleparmer* modelo: 91000-00, para registar a temperatura e com a auxílio do telefone celular foi possível cronometrar cada fase do processo de combustão.

As amostras foram acesas com auxílio de fósforos e petróleo com aplicação direta da chama posicionados no dispositivo de queima. A perda de massa e a temperatura dos corpos de prova foram medidos a cada 2 minutos durante 1 hora. Através destes dados, foi então calculado o índice de combustão (ICOM) que é um número adimensional, usando fórmula 10 (Cruz et al. 2016).

$$ICOM = ((A \times B)) / ((100 \times C)) \quad (16)$$

Sendo:

A = a percentagem do tempo em que a temperatura permaneceu acima de 150°C;

B = a percentagem da temperatura máxima atingida em relação a temperatura de 150°C;

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



Figura 10. A: Sistema montado para realização do teste índice de combustão. B: briquetes durante a queima. Fonte: Autora (2024).

### Análise estatística

As análises foram realizadas com três misturas de briquetes em três repetições, tendo sido realizadas: a análise imediata (humidade, teor de voláteis, cinzas e carbono fixo), poder calorífico, densidade aparente, energética e a granel e friabilidade. As análises de índice de combustão e fervura de água foram realizadas com um única mistura de briquete (mistura C) em três repetições.

Os resultados obtidos na caracterização das amostras de briquetes foram submetidos ao processamento no software Excel e a análise estatística pelo PAST. Foi realizada a análise de variância (ANOVA), a fim de verificar se existia diferença estatística entre as médias das misturas de briquetes produzidos. Para os dados em que a média diferiu estatisticamente, ou seja, os dados em que o valor de F foi significativo ( $\alpha=0,05$ ) aplicou-se o teste de média de Tukey a 5% de significância.

### Limitações

Para a realização das análises de índice de combustão e fervura de água encontrou-se a limitação de não poder realizar estes teste com as outras misturas de briquetes pois mais lotes destas misturas não foram mais produzidos.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Análises físicas.

#### Densidade aparente

Os resultados da densidade aparente são apresentados na tabela 3. Estes variam de 482,44 a 293,82 kg/m<sup>3</sup>. Pimenta *et al.* (2015), ao produzirem briquetes a partir de carvão de cascas de coco alcançaram valores de densidade aparente de 660 kg/m<sup>3</sup> e 710 kg/m<sup>3</sup> para briquetes que continham como aglutinantes amido e argila.

Tabela 3. Resultados das análises físicas.

Misturas	d(kg/m <sup>3</sup> )	DE(MJ/m <sup>3</sup> )	D(g/m <sup>3</sup> )
Mistura A (Carvão de coco+Argila+ Água)	482,44 <sup>a</sup>	7339,63 <sup>a</sup>	100,77 <sup>a</sup>
Mistura B (Carvão de coco+Esterco bovino+ Água)	294,18 <sup>b</sup>	5514,34 <sup>b</sup>	79,78 <sup>b</sup>
Mistura C (Carvão de coco+Argila+Esterco bovino+ Água)	293,82 <sup>c</sup>	4970,31 <sup>b</sup>	89,94 <sup>c</sup>

d-densidade aparente; DE- densidade energética; D-densidade à granel; (±) desvio padrão; Segundo o teste de Tukey a 5% de nível de significância, as médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si

Segundo Dias *et al.* (2012), em geral a densidade aparente dos briquetes varia entre 500 a 1200 kg/m<sup>3</sup>. Os valores observados neste estudo apresentam-se abaixo dos valores encontrados por Pimenta *et al.* (2015) e estas diferenças podem ser explicadas pelos diferentes métodos de compactação utilizados. Pimenta *et al.* (2015), compactou seus briquetes com auxílio de uma briquetadeira mecânica de pistão usando uma pressão de 1500 psi ao passo que no presente estudo a pressão foi aplicada manualmente com recurso a um almofariz.

Tecnicamente uma densidade aparente maior é desejável, uma vez que existe uma relação diretamente proporcional entre a densidade aparente e a densidade energética do briquete. Produtos de alta densidade são vantajosos do ponto de vista de transporte, armazenamento e manuseio devido a otimização e a logística do processo (Protásio *et al.*, 2012).

É importante considerar que a densidade é influenciada por diversos factores como humidade e granulometria da biomassa, carga aplicada no processo de compactação,

temperatura, uso de aglutinantes, bem como o tipo de prensa utilizada na compactação (Quirino 1991).

A ANOVA para a densidade aparente demonstrou haver diferença estatisticamente significativa entre os briquetes  $p=0,0005$ . O teste de *Tukey* realizado a 5% de nível de significância (Anexo 7) demonstrou a existência de diferenças significativas na mistura B e mistura C.

### Densidade energética

Os resultados da densidade energética variam de 7339,63 a 4970,31 MJ/m<sup>3</sup> (Tabela 3). A ANOVA para a densidade energética demonstra que pelo menos uma das misturas avaliadas apresentou diferença estatisticamente significativa em relação a média  $p=0,006$ . O teste de *Tukey* feito a 5% de nível de significância demonstrou a existência de diferenças estatisticamente significativas nas misturas B e mistura C.

Como referido, existe uma relação de proporcionalidade entre a densidade aparente e a densidade energética dos briquetes. Observa-se que a mistura A obteve maior densidade energética (7339,63 MJ/m<sup>3</sup>) quando comparado com as outras misturas nomeadamente a mistura B (5514,34 MJ/m<sup>3</sup>) e a mistura C (4970,31 MJ/m<sup>3</sup>).

Petricoski (2017), observou no seu estudo valores de densidade energética para o tratamento 1 (resíduos de podas urbanas) 20.778,76 MJ/m<sup>3</sup> e para o tratamento 2 (resíduos de podas e bagaço de mandioca) e 3 (resíduos de podas e bagaço de mandioca e glicerina) obteve 18.122,70 MJ/m<sup>3</sup> 17.472,43 MJ/m<sup>3</sup> respectivamente. O tratamento 1 possui maior densidade energética em virtude da alta densidade aparente que este possui. De acordo com o estudo conduzido por Souza e Vale (2015), observou-se o mesmo comportamento observado no presente estudo, em que maiores valores de densidade aparente determinaram maiores valores da densidade energética, mesmo que combustível não apresenta-se o maior poder calorífico.

Visando à utilização energética dos combustíveis de biomassa, é desejável alta densidade energética, ou seja, maior quantidade de energia por unidade de volume.

### Densidade à granel

Os valores de densidade à granel variam de 79,78 g/m<sup>3</sup> a 100,77 g/m<sup>3</sup> (Tabela 3). Os resultados deste trabalho não estão em cordância com o estudo conduzido por

Rendeiro *et al* (2008), onde foram observadas densidades com valores de 282 a 300 ( $\text{kg/m}^3$ ) para briquetes produzidos do o mesocarpo e endocarpo do coco seco respectivamente.

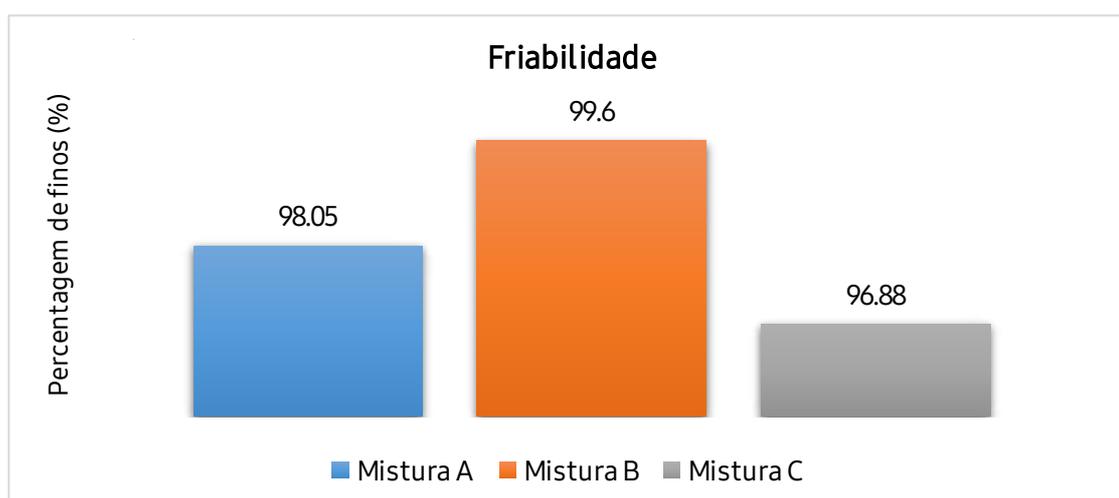
A densidade a granel dos briquetes dificilmente excede 500 ( $\text{kg/m}^3$ ), mas ainda é significativamente maior que a densidade a granel da biomassa bruta não compactada (Embrapa, 2012).

Densidade à granel baixa tem efeito negativo sobre a densidade energética da pilha ou aglomerado e conseqüentemente sobre os custos de transporte e da capacidade de armazenamento, tanto para o produtor do briquete como para o consumidor final (Matos, 2021).

A ANOVA para a densidade energética demonstra haver diferença estatisticamente significativa entre os briquetes  $p=5,05^{-06}$ . O teste de *Tukey* realizado com 5% de nível de significância demonstrou a existência de diferenças estatisticamente significativas nas misturas B e mistura C.

### Friabilidade

Os valores de índice de friabilidade encontrados neste estudo encontram-se no intervalo de 96,88-99,60-% apresentados no Gráfico 1. A ANOVA para o teste de friabilidade demonstra que menos uma das misturas apresentou diferença estatisticamente significativa em relação a média  $p=8,56^{-06}$ . O teste de *Tukey* realizado a 5% de nível de significância demonstra a existência de diferenças



estatisticamente significativas nas misturas B e C entre os briquetes

## Gráfico 1. Análise da friabilidade

Pereira (2009) e Zanella (2018), observaram nos seus estudos que a friabilidade tem correlação com a densidade aparente. Os briquetes mais densos apresentaram-se os menos friáveis. Em ambos os estudos este comportamento deveu-se ao aumento do teor de aglutinante na composição dos briquetes, que elevou a densidade e consequentemente, reduziu a geração de finos.

Segundo a classificação proposta por Pereira (2009), os briquetes do presente estudo são classificados como muito friáveis (MF) por possuir mais de 30% de finos gerados. Husain *et al.* (2002) argumenta que a friabilidade dos briquetes é directamente influenciada pelo teor de humidade e densidade. O excesso tanto como o défice de humidade influencia negativamente na estrutura e integridade do briquete, demonstra que secando de forma apropriada e aplicando a quantidade certa de aglutinante proporciona maior densidade e por sua vez maior resistência de abrasão do briquete. Para os briquetes do presente estudo, a alta taxa de finos gerados pode ser devido ao baixo teor de humidade e a baixa densidade.

De acordo Dias *et al.* (2012), um dos fatores que contribui para briquetes muito friáveis são: dimensões da matriz e distância entre a prensa e a matriz. Matrizes com dimensões maiores podem deixar espaços vazios quando não devidamente preenchidos. Esta também pode ser uma das razões para a friabilidade dos briquetes do presente estudo.

## 4.2. Análises químicas e energéticas

### Humidade

Os resultados da avaliação do conteúdo de humidade são apresentados na tabela 4, e os valores estão no intervalo de 0,55% a 0,69%. Geralmente a faixa de humidade ideal para os briquetes está entre 8-12%, conforme Quirino (2003). Contudo, Alves Júnior (2003) sugere que a faixa de humidade ideal para queima dos briquetes é de até 15%. Briquetes com baixo teor de humidade (<5%) podem resultar na perda do material pela geração de finos durante o transporte e armazenamento, bem como a sua quebra (Gonçalves *et al*, 2009).

Tabela 4. Resultados das análise imediata.

TH%- teor de humidade; TC%- teor de cinzas; MV%- materiais voláteis; CF%- carbono fixo; ( $\pm$ ) desvio padrão; Segundo o teste de Tukey a 5% de nível de significância, as médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si.

Quando o briquete apresenta conteúdo de humidade acima de 15%, pode causar perdas energéticas, bem como provocar explosões devida à formação de vapores (Filippetto, 2008). Segundo Gonçalves *et al.* (2009), acima deste intervalo a excessiva humidade pode levar à quebra do briquete e à degradação biológica durante o transporte e armazenamento.

A ANOVA para o teor de humidade demonstrou que nenhuma das misturas apresentou diferença estatisticamente significativa em relação a média.

### Teor de Cinzas

Os valores de teor de cinzas encontrados neste estudo encontram-se no intervalo de 12,30-28,47% (Tabela 4). Estes valores encontram-se próximos aos de Baab (2017), que observou no seu estudo de briquetes de coco pré-carbonizado produzidos em condições laboratoriais teores de cinza entre 15,69-23,34%. De igual forma, Yuliah (2017), observou nos seus briquetes de uma mistura de coco e casca de arroz pré-carbonizado produzidos laboratorialmente teores de cinza no intervalo 19,92-30,44%.

Um baixo teor de cinzas garante maior resistência ao briquete além de um poder calorífico elevado, dando origem a briquetes de melhor qualidade (Rendeiro, 2008). A literatura recomenda que o material usado para a produção do briquete tenha até 4% de teor de cinzas e mesmo este pode ser considerado extremamente alto, por forma a produzir briquetes com baixo teor de cinzas.

Misturas	TH%	TC%	MV%	CF%
Mistura A (Carvão de coco+Argila+ Água)	0,69	28,47 <sup>a</sup>	18,20 <sup>a</sup>	53,32
Mistura B (Carvão de coco+Esterco bovino+ Água)	0,59	12,30 <sup>b</sup>	20,67 <sup>b</sup>	67,01
Mistura C (Carvão de coco+Argila+Esterco bovino+ Água)	0,55	21,20 <sup>c</sup>	13,44 <sup>c</sup>	65,35

A mistura A, destaca-se por conter o maior teor de cinzas (28,47%). Pimenta *et al.* (2015), observou em seu estudo que briquetes que continham maior proporção de argila apresentavam maior teor de cinzas. De acordo com Rendeiro *et al.*(2008), o

elevado teor de cinzas encontrado para este material no presente estudo, pode estar relacionado com fragmentos do solo/poeira misturados à biomassa na colecta e/ou manuseio do material, visto que a areia influencia no teor de cinzas

Demirbas (2002), afirma que a biomassa com alto teor de cinzas não é uma fonte ideal para a produção de combustíveis, já que estas afectam directamente o poder calorífico da biomassa, a transferência de calor na superfície do material combustível e a difusão de oxigénio durante a combustão. Além disso, um elevado teor de cinzas pode provocar a formação de incrustações nos equipamentos, exigindo manutenções mais frequentes e aumentando os custos da produção.

A ANOVA para o teor de cinzas demonstrou haver diferença estatisticamente significativa entre os briquetes  $p=1,50^{08}$ . O teste de *Tukey* realizado a 5% de nível de significância para detectar a origem das diferenças do teor de cinza nos briquetes, mostra haver diferenças estatisticamente significativas nos briquetes de mistura B e mistura C.

### Materiais Voláteis

No presente estudo observam-se valores de voláteis variando de 13,44-20,67% (Tabela 4). Estes valores são próximos aos valores encontrados por Yuliah (2017) que variam entre 21,70-25,61% e de Pimenta *et al.* (2015) que estão compreendidos entre 20,47-28,81%, sendo que ambos produziram briquetes de coco carbonizado em condições laboratoriais.

De acordo com Helwani *et al.* (2020) e Nwabue *et al.* (2017), obtiveram nos seus estudos 19,73% e 17,23% respectivamente de teor de materiais voláteis em briquetes que a biomassa sofreu o pré-tratamento da carbonização. Os resultados deste estudo e da literatura citada podem ser explicados pelas condições de pré-carbonização que a matéria-prima foi submetida antes do processo de compactação. Segundo Marreiro *et al.* (2021) o processo de carbonização da biomassa antes da compactação volatiliza os gases que se encontram presentes na biomassa reduzindo desta forma o teor de materiais voláteis.

Segundo Martinez *et al.* (2019), em geral a biomassa possui em peso 65 a 85% de materiais voláteis. Por conta disto, briquetes produzidos com biomassa sem pré-tratamento térmico podem conter teores de voláteis dentro desse intervalo. Quanto mais volátil um combustível mais reactivo e facilmente inflamável este é resultando

numa queima rápida. Contudo, quando o combustível é usado para fins domésticos uma queima mais lenta é preferida. Teores de voláteis elevados são responsáveis por causar grandes quantidades de fumo no início da combustão do combustível resultando em gases não queimados (Marreiro *et al.*, 2021).

A ANOVA para o teor de voláteis demonstrou que pelo menos uma das misturas apresentou diferença estatisticamente significativa em relação a média com um valor de  $p=0,0017$  e realizado o teste de *Tukey* a 5% de nível de significância demonstrou haver diferenças significativas para as misturas B e C.

### Carbono Fixo

Os teores de carbono fixo (Tabela 4) variam de 53,32% a 65,35%. Yuliah (2017), observou no seu estudo valores de carbono fixo variando de 38,83-49,63% e Baab (2017) valores variando de 39,03-54,4%. Em ambos estudos os briquetes produzidos foram de carvão de cafulos e usados como aglutinante amido de mandioca .

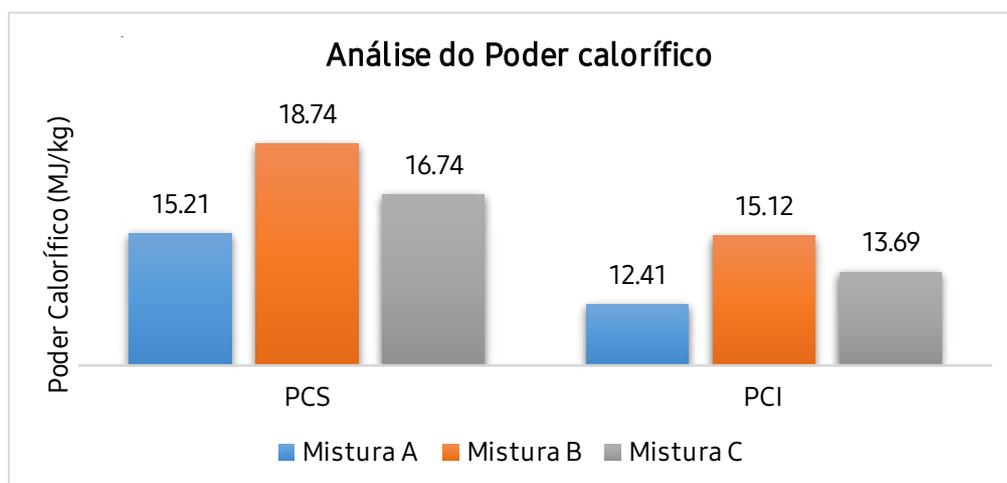
De acordo com Fernandes *et al.* (2013), o conteúdo de carbono fixo para a biomassa pode variar entre 7 a 20%. Contudo, em estudos conduzidos por Helwani *et al.* (2020) e Nwabue *et al.* (2017) foram registados valores de carbono fixo de 71,40% e 42,41% respectivamente, onde Helwani *et al.* (2020), produziu briquetes de tronco de palma e Nwabue *et al.* (2017), de folha de bananeira. Os resultados obtidos por: Helwani *et al.* (2020) , Nwabue *et al.* (2017, Yuliah (2017) e Baab (2017), podem explicados pelo efeito da aplicação do pré-tratamento térmico (carbonização) que as biomassas foram submetidas. Do mesmo modo, os resultados deste estudo podem ser explicados pelo o efeito do pré-tratamento térmico.

Segundo Marreiro *et al.* (2021), pré-tratamentos térmicos aplicados à biomassa como o exemplo da carbonização podem promover o aumento do carbono fixo presente no combustível. O conteúdo de carbono fixo é inversamente proporcional ao conteúdo de materiais voláteis depois que todos os gases são volatilizados e a humidade libertada. Deste modo, permite-se uma combustão mais lenta e estável do combustível, sendo gasto menos calor durante a decomposição do material volátil e assim é gerada mais energia através do maior volume de carbono fixo.

Do ponto de vista qualitativo todas as misturas de briquetes, destacando a mistura B, apresentaram altos teores de carbono fixo em relação a literatura consultada mostrando assim potencial para ser uma boa fonte para geração de energia.

## Poder calorífico

Os resultados do poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico inferior (PCI) obtidos neste estudo estão apresentados no Gráfico 2. Os briquetes analisados apresentaram PCS compreendidos entre 15.21 a 18.74 MJ/kg, e PCI no intervalo de



12.41 a 15.12 MJ/kg.

Gráfico 2. Análise do poder calorífico

Observou-se que a mistura B apresentou maior valor de poder calorífico superior como inferior, facto que está relacionado ao teor de carbono fixo relativamente alto em relação as outras misturas. Padilla *et al.* (2016), também observaram no seu estudo que, quanto maior o teor de carbono fixo apresentado pela biomassa, maior era o seu poder calorífico.

Gwezi *et al.* (2020), observaram nos seus briquetes produzidos numa compactadeira manual 33.8 MJ/kg de PCS. Este valor pode ser explicado pela composição dos briquetes que eram compostos de uma mistura de pó de carvão, serradura e plástico reciclado. Helwani *et al.* (2020), obteve 30.67 MJ/kg de PCS usando uma prensa hidráulica com briquetes de caule de palmeira carbonizado e Bazargan *et al.* (2017), obteve 31.29 MJ/kg de PCS por meio da prensa de parafuso cónico briquetes produzidos a base do carvão do caroço de palmeira.

Segundo Marreiro *et al.* (2021), os resultados obtidos pelos autores mencionados podem ser explicados pela a escolha da matéria-prima de alto poder calorífico, o uso de diferentes materiais, e mesmo o tratamento térmico dado a biomassa para produção de briquetes que podem influenciar na qualidade.

Do ponto de vista qualitativo todas as misturas de briquetes, com destaque para a mistura B apresenta maior valor de poder calorífico inferior (PCI) em relação as outras misturas, mostrando assim potencial para ser uma boa fonte para geração de energia.

### Índice de Combustão

O resultado do ensaio de índice de combustão obtido é 0,80 (Tabela 5). Este valor é comparável aos encontrados por Quirino (1991), que obteve índices de combustão dentro da faixa de 0,31 a 1,23 para briquetes produzidos a partir de diversos resíduos e provenientes de vários países.

Tabela 5. Resultados do índice de Combustão.

Briquetes	ICOM
Briquetes (mistura c)	<b>0.80±0,54</b>
Briquetes de endocarpo de coco seco (Matos, 2021)	0.49±0,02

ICOM- Índice de Combustão; (±) desvio padrão

Vários autores argumentam a existência de factores que influenciam a qualidade de combustão de um combustível sendo por exemplo: o tipo e quantidade de aglutinante usados no briquete, conteúdo de humidade presente na mistura, tamanho da partícula, pressão de compactação.

Segundo estudos conduzidos por Altun *et al.* (2003), sobre os efeitos do tipo e quantidade de aglutinante, e adição de água nas características de combustão de briquetes de carvão usando melão como ligante demonstraram que os briquetes apresentaram maior índice de combustão devido as partículas grandes que constituíam o briquete e a grande quantidade de melão. Os briquetes do presente estudo, apresentaram um valor elevado em relação aos de Matos (2021), este valor pode ser justificado pelo facto dos briquetes do presente estudo conterem na sua composição esterco bovino pois segundo Olugbade *et al.* (2019), tem a capacidade de aumentar a eficiência térmica do combustível. De acordo com Manjate (2023), são preferíveis briquetes com elevado índice de combustão porque estes geram mais calor consumindo menor quantidade de massa.

No Gráfico 3, observa-se os briquetes apresentaram picos de temperatura no intervalo de 560- 666 °C. O tempo que os combustíveis levam para atingir 150°C e as temperaturas máximas, está directamente relacionado com a quantidade de matéria

volátil, isto é, combustíveis com maiores concentrações de voláteis rapidamente atingem altas temperaturas.

A curva de temperatura versus tempo demonstra que os briquetes permaneceram acima de 150°C por aproximadamente 75 minutos. Esse comportamento pode estar relacionado com a concentração de carbono fixo e conseqüentemente pode ter implicado uma queima mais lenta, mantendo a produção de calor por mais tempo.

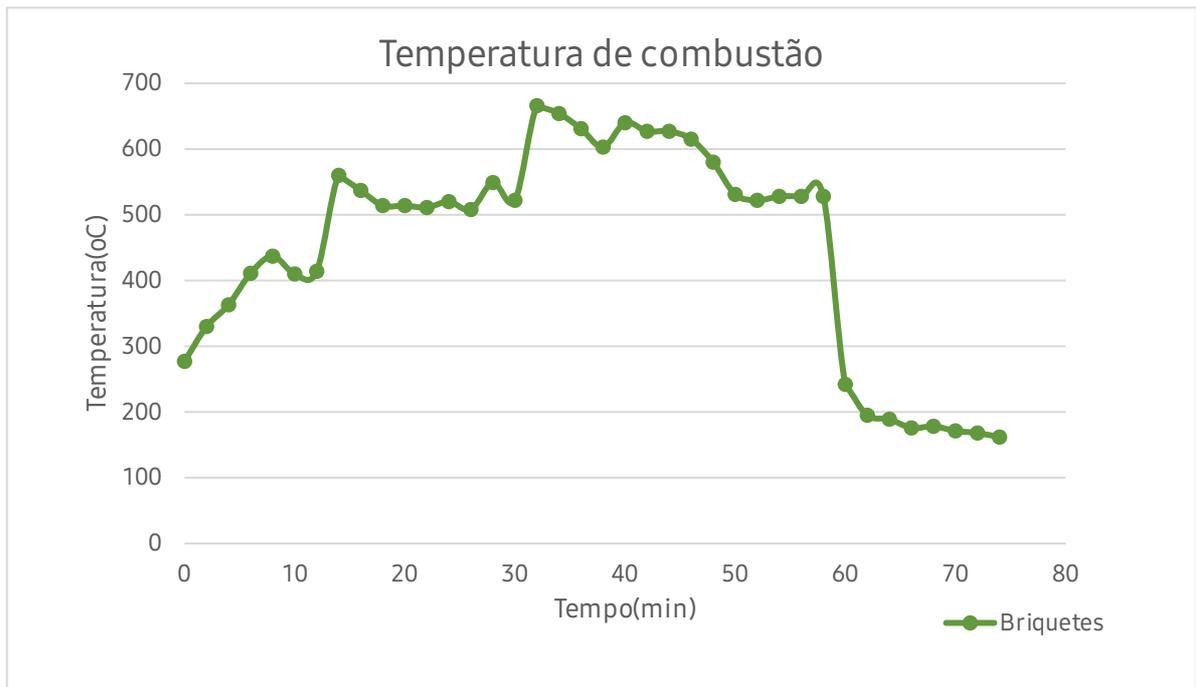


Gráfico 3. Evolução da temperatura em função do tempo de combustão do briquete

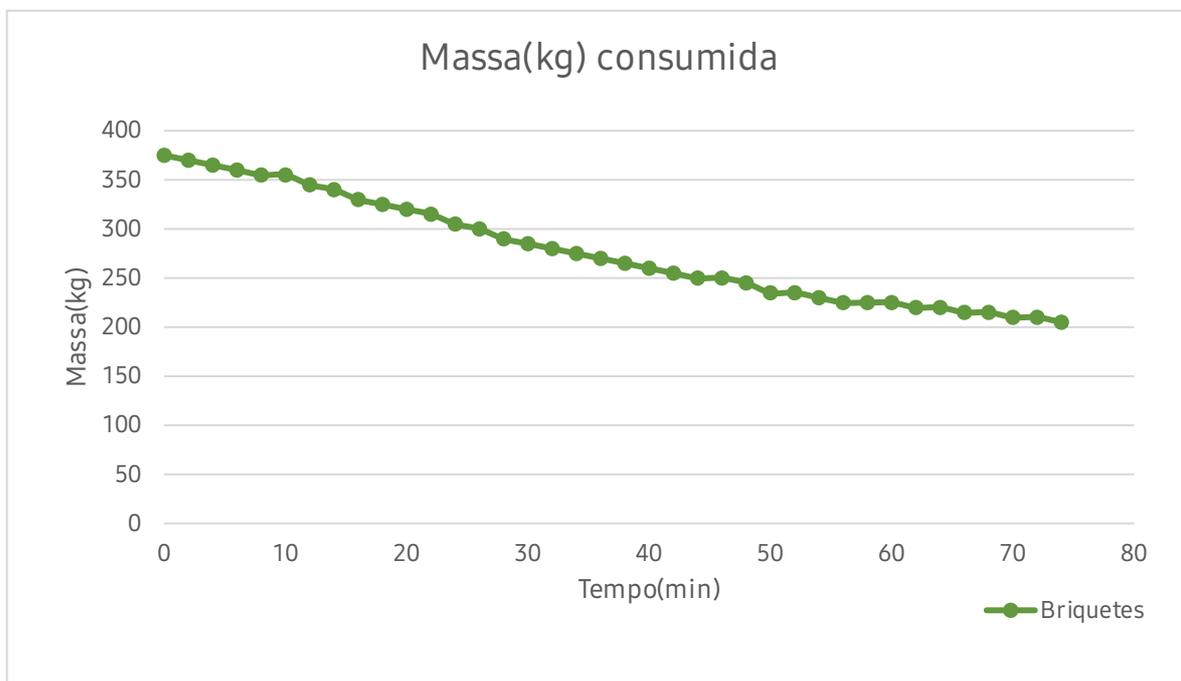


Gráfico 4. Perda percentual de massa em função do tempo de combustão do briquete.

Analisando a percentagem de perda de massa com o tempo (Gráfico 4), percebe-se que o briquete teve um consumo ou perda de massa gradual durante o tempo de combustão.

Segundo Spadim (2020), a alta compactação diminui a taxa de queima de combustíveis sólidos prensados por diminuir o fluxo de oxigênio e escoamento dos produtos da combustão.

Estes resultados indicam que para algumas aplicações, nas quais é importante que as temperaturas de operação sejam consideravelmente altas (na faixa de 500 a 600 ) e os tempos de residência dentro dos equipamentos de combustão sejam moderadamente curtos, os briquetes podem ser uma ótima opção

## Teste de fervura

A análise dos resultados será feita em termos de potência, consumo específico do combustível e eficiência, tanto na fase da alta potência assim como na fase de baixa potência.

A potência exprime a quantidade de calor a ser libertado pelo combustível por unidade de tempo. No conjunto das duas fases (A.P e B.P) os briquetes do presente estudo (Tabela 6) apresentaram resultados inferiores em relação aos briquetes estudados por Matos (2021). Na fase de alta potência os briquetes do presente estudo apresentaram menor resultado (1,57 kW) comparado ao observado por Matos (2021) que registou 3,34 kW, o que é indicativo que nos primeiros instantes da combustão mais calor foi gerado pelos briquetes. Este comportamento poder ser explicado pela quantidade de volatéis (77,27%) que os briquetes estudados por Matos (2021) possuem contra 13.44% do presente estudo.

Tabela 6. Resultados do Teste de Fervura.

Briquetes	t (min)		P (kW)		Cc		$\eta$ (%)
	A.P	B.P	A.P	B.P	A.P	B.P	
Briquetes (mistura c)	15	45	1,57	1,42	0,67	1,14	28,24
Briquetes de endocarpo de coco seco (Matos,2021)	48	60	3,34	0,15	2,43	0,11	20,15

A.P e B.P- alta e baixa potência; t (min)- tempo em minutos; P (kW)- potência; Cc- consumo específico;  $\eta$  (%)-eficiência

Na fase de baixa potência, os briquetes do presente estudo apresentaram melhores resultados (1,42 kW) comparados aos de Matos (2021), 0,15kW o que significa que, durante a fase de baixa potência mais calor foi libertado para o recipiente usado no teste. Do ponto de vista qualitativo, os briquetes do presente estudo, embora geraram menos calor na fase inicial, conseguiram manter a potência acima de 1 kW, o que demonstra vantagem para actividades de cocção de alimentos e mesmo aquecimento sem o gasto de mais combustível.

No que concerne ao consumo específico, a fase de alta potência indica a massa de

combustível consumida para produzir um quilograma de vapor água, e na fase da baixa potência indica a massa de combustível consumida para manter um quilograma de água no intervalo de um ou dois graus abaixo da temperatura de ebulição.

Matos (2021), obteve, maior consumo específico na fase de alta potência, facto que representou uma desvantagem, pois o valor encontrado representa a necessidade de 2,43kg contra 0,67 kg de combustível para evaporar 1kg de água. Contudo, na fase de baixa potência, os briquetes deste estudo, consumiram 1,14 kg para manter a água abaixo da temperatura de ebulição. Do ponto e vista de qualidade, quanto menor for o consumo específico de combustível, mais econômica é a fonte de combustível (Onuegbu *et al.*, 2011).

No que concerne a eficiência, observa-se que no presente estudo a eficiência (28,24%) foi maior em relação a observada por Matos (2021), de 20,15% com briquetes de casca de coco ao passo que Baab(2017), obteve 92,42% de eficiência com briquetes de coco carbonizado por si produzidos. O valor obtido neste estudo, pode ser justificado pelo facto da matéria prima ter sido carbonizada, oque diminui o teor de voláteis fazendo com que o percentual de carbono fixo e poder calorifico aumentassem. Este facto sugere que a aplicação deste processo otimiza as características do endocarpo do coco.

## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 5.1. Conclusões

De acordo com os resultados obtidos, conclui-se que:

A caracterização química e energética das misturas de briquetes estudados demonstrou de forma satisfatória que estes são indicados para fins energéticos, apresentando valores de cinzas, voláteis, carbono fixo e poder calorífico dentro dos intervalos recomendados. Contudo, a mistura de briquete que demonstrou melhores resultados em relação as outras foi a a mistura B, composta por esterco bovino.

Por outro lado a caracterização física demonstrou que nenhuma mistura de briquetes possui características físicas satisfatórias por terem apresentado valores altos de índice de friabilidade.

Ambos testes de índice de combustão e fervura, demonstraram que o briquete (mistura C) apresentou melhor desempenho. No teste de índice de combustão o briquete teve melhor desempenho do ponto de vista de tempo de residência no fogão. Por outro lado, o teste de fervura demonstrou que o briquete teve melhor desempenho em termos de rendimento, potência e consumo específico.

### 5.2. Recomendações

Com os resultados obtidos e limitações observadas durante a realização do trabalho, recomenda-se para estudos futuros:

- Aplicar novas formas de compactação manual por forma a aumentar a densidade aparente do briquete que por sua vez melhorará as características físicas e energéticas;
- Estudar sobre o uso do melhor aglutinante em briquetes de endocarpo de coco carbonizado para melhorar a sua resistência física e a combustão;
- Realizar os testes de índice de combustão e fervura de água das com as misturas não testadas (A e B) de modo a avaliar o desempenho destas e determinar a melhor mistura entre as três misturas.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Atkins, P. W.; De Paula, J. 2006. Physical Chemistry Oxford: Oxford University Press. 972 pp.
2. Altun, N.E; Hicyilmaz, C; Bagci, A. S. 2003. Combustion characteristics of coal briquettes reaction kinetics. Energy Fuel 17(5):1277– 1282 pp.
3. Awogbemi, O; Von Kallon, D. V; Onuh, E. I; Aigbodion, V .S. 2021. An Overview of the Classification, Production and Utilization of Biofuels for Internal Combustion Engine Applications. MDPI, Vol 14. 18-20 pp.
4. Asamoah, B; Nikiema, J; Gebrezgabher, S; Odonkor, E; Njenga, M. 2016. A Review on Production, Marketing and Use of Fuel Briquettes. International Water Management Institute (IWMI), Vol 7. 9-30 pp.
5. Barros, L. O. 2012. Densidade energética de briquetes produzidos a partir de resíduos lignocelulósicos. Monografia apresentada ao curso de Engenharia Florestal. Universidade de Brasília. Brasília-DF.
6. Borsato, D.; Galão, O. F.; Moreira, I. 2009. Combustíveis Fósseis: Carvão e petróleo. Londrina: Eduel 166 p.
7. Borne. K. 2022. Síntese E Análise Do Processo De Produção De Briquetes Constituídos Com Resíduos Lignocelulósicos E Matéria Graxa. UNILA- Universidade Federal da Integração Latino-Americana.
8. Brand, M. A. 2010. Energia de Biomassa Florestal. Tese (Doutor em ciências florestais), Interciência. Rio de Janeiro 8-10 pp.
9. Briane, D; Doat, J; Riedacker, A. 1985. Guide technique de la carbonisation: la fabrication du charbon de bois. Aix-en-Provence: É disud, 179 p.
10. Cabral, M. M. S. 2015. Aproveitamento da casca do coco verde para a produção de etanol de segunda geração. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química. Universidade Federal de Alagoas, Maceió.
11. Cavalcante, A .K. L., Vale, A; Galvão, L. G. O., Chaves, B.S.A. 2017. Produção e caracterização de briquetes de carvão de resíduos agrícolas. Congresso Brasileiro de Ciências e Tecnologia da Madeira. Universidade de Brasília. Florianópolis, P. 1-11.
12. Chaney, J.; Clifford, M.; Wilson, R. 2010. An experimental study of the combustion

- characteristics of low-density biomass briquettes. Biomass Magazine, 1, 1–8.
13. Chen, W. H.; Hsu, H. C.; Lu, K. M.; Lee, W. J.; Lin, T. C. 2011. Thermal pretreatment of wood (Lauan) block by torrefaction and its influence on the properties of the biomass. Energy, v.36, p.3012-3021.
  14. De Melo, V. D. P. S. 2010. Produção De Briquetes De Carvão Vegetal Com Alcatrão De Madeira.
  15. De Oliveira, R. R. L. 2013. Moldagem de briquetes com finos de carvão vegetal aglutinados com parafina: caracterização de algumas propriedades. Ciências dos Materiais, Universidade Federal de São, Sorocaba- SP.
  16. De Souza, F; Do Vale, A, T 2015.Densidade energética de briquetes de biomassa lignocelulósica e sua relação com os parâmetros de briquetagem.
  17. Demirbas, A. 2009. Biorefineries: Current activities and future developments. Energy Conversion and Management, v.50, p.2782 -2801.
  18. Demirbas, K; Sahin-Demirbas, A. 2009. Compacting of biomass for energy densification, Energy Sources, Part A Recovery, Util. Environment
  19. Dias, J. M. C. S., Souza, D.T., Braga, M., Onoyama, M. M., Miranda, C. H. B., Barbos, P.F.D., Rocha, J. D. 2012. Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agro-industriais e florestais. Documento 13. Embrapa Agro-energia Brasília, DF. v 1 n. 13 1-119 pp.
  20. Egas, A. F.; Fenandes, A. M.; Bila, N. F.; Wilissone, A. 2016. Cadeia de fornecimento e consumo de combustíveis lenhosos nas cidades de Pemba e Montepuéz. Relatório, p.1. Maputo. Moçambique.
  21. Faxälv, O., Nyström, O. 2006. Briquetes de biomassa no Malawi, Projecto de graduação. Linkoping University- Institute of Tecnology, p. 33
  22. Furtado, T. S.; Valin, M.; Brand, M. A.; Bellote, A. F. J. 2010.Variáveis do processo de briquetagem e qualidade de briquetes de biomassa florestal. Pesquisa Florestal Brasileira, v. 30, 101-106 pp.
  23. Garcia, D. P.; Caraschi, J. C.; Vantorim, G. 2013. Caracterização energética de pellets de madeira. Revista da Madeira, v. 135, 14-18 pp.
  24. Gebrezgabher, S.; Amewu, S.; Taron, A.; Otoo, M. 2016. Energy recovery from domestic and agro-waste streams in Uganda: a socioeconomic assessment.

- International Water Management Institute (Iwmi). Reuse 9, 7-12 pp.
25. Gilvari, H.; de Jong, W.; Schott, D.L. 2019. Quality parameters relevant for densification of biomaterials: Measuring methods and affecting factors-a review. Biomass Bioenergy 120, 117–134.
  26. Gonçalves, J. E. 2010. Avaliação energética e ambiental de briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de Eucalyptus grandis. Tese (Doutorado em Agronomia- Energia da Agricultura) – Universidade Estadual Paulista- Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu – SP.
  27. Grover, P.D. and Mishra, S.K. (1996) Biomass Briquetting: Technology and Practice. Regional Wood Energy Development Programme in Asia. Field Document No. 46, Food and Agricultural Organization.
  28. Gentil, L. V. B. 2008. Tecnologia e economia do briquete de madeira. Tese Doutorado em Engenharia Florestal Departamento de Engenharia Florestal – Faculdade de Tecnologia, Universidade Federal de Brasília. 56p.
  29. Padilla, E. R. D; Pires, I. C. S. A; Yamaji, F. M., Fandiño, J. M.M. 2016. Produção E Caracterização Físico-Mecânica De Briquetes De Fibra De Coco E Palha De Cana-De-Açúcar. Revista Virtual De Química, Montería, V. 20, N. 20, P.1-13
  30. Jenkins, B.M., Baxter, L.H., Miles Jr., T.R., Miles, T.R. 1998. Combustion properties of biomass” Fuel Processing Technology, Vol.54 17-46.
  31. Jerônimo, C. E. M. 2012. Tecnologias limpas aplicadas a gestão dos resíduos do coco. Revista Qualidade Emergente, v.3; n.1, 20-29 pp.
  32. Kambo, H.S.; Dutta, A. 2014. Strength, storage, and combustion characteristics of densified lignocellulosic biomass produced via torrefaction and hydrothermal carbonization. Appl. Energy, 135, 182–191.
  33. Lora, E. E. S.; Venturini, O. J. 2012. Biocombustíveis. Rio de Janeiro: Interciência, 1200 p.
  34. Junior, C.R.S.; Lima, P.A.F.; Lopes, D.M.M.; Barbosa, P.V.G.; Coneglian, A.; Almeida, R.D.A. 2017. Characterization of biomass, charcoal and briquette of *Phyllostachys aurea* Carr.
  35. M. Gil, D. Schott, I. Arauzo; E. Teruel. 2013. Handling behavior of two-milled biomass: SRF poplar and corn stover, Fuel Process. Technology.

36. Manjate, E. A. M. 2023. Produção e caracterização dos briquetes de biomassa florestal: Serradura de Umbila, Chanfuta e Pinho. Licenciatura Em Engenharia Química. UEM, Faculdade de Engenharia.
37. Marafon, A. C., Nunes, M. U. C., Amaral, A. F. C., Santos, J. P. 2019. Aproveitamento de cascas de coco para geração de energia térmica: potencialidades e desafios. Embrapa Tabuleiros Costeiros, Aracaju.
38. Matos, J. P. M. 2021. Estudo E Caracterização Das Cascas De Coco Verde E Coco Seco Para Produção De Briquetes E Utilização Em Equipamentos De Combustão De Combustíveis Sólidos. Licenciatura Em Engenharia Química. UEM, Faculdade de Engenharia.
39. Martinez, C.L.M.; Sermyagina, E.; Carneiro, A.D.C.O.; Vakkilainen, E.; Cardoso, M. 2019. Production and characterization of coffee-pine wood residue briquettes as an alternative fuel for local firing systems in Brazil. Biomass-Bioenergy, 123, 70–77 pp.
40. Njagi, G.; Njenga, M.; Sirima, S. B, 2013. The Millennium Fuel Briquette Handbook.
41. Do Nascimento, T. L.; Veloso, D. N.; Fernandes, E. E.B; De Melo, A. T; Bertini, L. M.; Rios, M. A. S. 2021. Avaliação e caracterização do resíduo da manga (mangifera indica l) para a produção de briquetes. Holos. 37(5), 1-15 pp.
42. Obi, O. F; Pecenka, R; Clifford, M. J, 2022. A Review of Biomass Briquette Binders and Quality Parameters. Mdpi 1-22 pp.
43. Obi, O.; Akubuo, C.; Okonkwo, W. 2013. Development of an appropriate briquetting machine for use in rural communities. Int. J. Eng. Adv. Techno, 2, 578–582.
44. Onuegbu T.U., Ekpunobi U.E., Ogbu I.M., Ekeoma M.O. and Obumselu F.O. 2011. Comparative Studies of Ignition Time and Water Boiling Test of Coal and Biomass Briquettes Blend. Ijrras. Vol 7. 08 p.
45. Olugbade, T; Ojo, O; Mohammed, T. Influence of Binders on Combustion Properties of Biomass Briquettes: A Recent Review. BioEnergy Research. Vo 12. 241-259 pp.
46. Paula, L.E.R. 2010. Produção e avaliação e briquetes de resíduos lignocelulósicos. Dissertação (Mestrado). Lavras: UFLA.
47. Pires, M. M.; Costa, R. S.; Jose, A. R. S; Midlej, M. M. B; Alves, J. M. A. 2004. Cultura do coco: Uma análise economica. Revista Brasileira de Fruticultura, v. 26; n.1, 173-176pp.

48. Protásio, T. P.; Alves, I. C. N.; Trugilho, P. F.; Silva, V. O.; Baliza, A. E. R. 2011. Compactação de biomassa vegetal visando à produção de biocombustíveis sólidos. Pesquisa Florestal Brasileira, v.31, p.273-283.
49. Quirino, W. F.; Brito, J. O. 1991. Características e índice de combustão de briquetes de carvão vegetal. Brasília: Laboratório de Produtos Florestais: Bama, Circular Técnica, nº 13. 19 pp.
50. Rajaseenivasan, T.; Srinivasan, V.; Qadir, G.S.M.; Srithar, K. 2016. An investigation on the performance of sawdust briquette blending with neem powder. Alex. Eng. J. 55, 2833–2838 pp.
51. Rendeiro, G. 2008. Combustão e Gasificação de Biomassa Sólida Soluções Energéticas para a Amazônia. 66 pp.
52. Rendeiro, G.; Nogueira, M. F. M.; Brasil, A. C. M.; Cruz, D. O. A.; Guerra, D. R. S.; Macêdo, E. N., Ichihara, J. A. 2008. Combustão e gasificação de biomassa sólida: soluções energéticas para a amazônia, Brasília.
53. S. Weatherstone, N. Simonsson, G. Karlsson, N. Padban, A.A. i Arnuelos, P. Abelha 2015. Final Report on Bulk Tests in Existing Storage and Handling Facilities. 20 pp.
54. Salgueiro, T. G. O. 2014. Estudo de Biocombustíveis Sólidos: Importância das Cinzas para Processos de Combustão. Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente Universidade de Lisboa.
55. Silva, R. G. C.; Marinho, M. S. S.; Cola, R. E.; Nobre, S. C. M.; Sá, V. A. 2018. Caraterização de diferentes resíduos lignocelulósicos para a geração de energia. V Congresso Nordestino de Engenharia Florestal. Bom Jesus, Piauí.
56. Souza, S. N. M. 2012. Potencial de geração de bioeletricidade com casca de arroz no Brasil. Cultivando o Saber, v. 5, n. 1, 1-8 pp.
57. Spadim. E. R, Junior, H. J.E, Arruda. N.L.F.V, Guerra. S.P.S, Leonello, E.C. (2020), Determinação do índice de combustão e da taxa de queima de briquetes de resíduos lignocelulósicos por meio de um aplicativo de computador com colecta de dados automatizados. Botucatu, v. 35
58. Stanley, R. 2003. Fuelling development. Boiling Point, vol. 49, 13–14 pp.
59. Steffler, V. 2019. Produção De Briquetes A Partir De Coprodutos Agroindustriais: Bagaço De Cana De Açúcar, Cama De Aviário E Resíduo De Aminodaria. Dissertação de Pós Graduação em Bioenergia. Universidade Federal do Paraná.

60. Tumuluru, J.S; Fillerup, E. 2020. Briquetting characteristics of woody and herbaceous biomass blends: Impact on physical properties, chemical composition, and calorific value. Biofuels Bioproduct. Biorefin, 14, 1105–1124 pp.
61. Tumuluru, J.S; Wright, C.T; Kenny, K. L; Hess, J.R. 2010. A Review on Biomass Densification Technologies for Energy Application. Inl 4-35p.
62. Victorino, A. (1995). Estudo sobre o fogão a carvão vegetal e o ensino de Física em Moçambique. Monografia (Ensino de Física), Universidade Pedagógica, Beira.
63. Vieira, A.C. 2012. Caracterização da biomassa Proveniente de resíduos agrícolas para geração de energia. Dissertação de mestrado. Universidade estadual de Oeste do Paraná, Cascavel. 56p.
64. Vieira, N. A. D. 2014. Obtenção de briquetes a partir da casca do arroz e avaliação do seu potencial energético. Monografia de Conclusão de Curso Graduação em Engenharia Ambiental – Centro Universitário UNIVATES, Lajeado.
65. Yang, Y.B., Sharifi, V.N., Swithenbank, J. 2004. Effect of airflow rate and fuel moisture on the burning behaviors of biomass and simulated municipal solid wastes in packed beds. Volume 83. 1553-1562 pp.
66. Zhang, L., Xu, C., Champagne, P. 2010. Overview of recent advances in thermochemical conversion of biomass. Energy Conversion and Management 51. 969-982 pp.
67. Zhang, H.; Fredriksson, M.; Mravec, J.; Felby, C. 2017. Hydration properties of briquetted wheat straw biomass feedstock. BioResources 12, 9024–9037p.
68. Kunrath, N F..2016. Avaliação de briquetes produzidos a partir da casca do coco do murmuru (Astrocaryum spp) para diferentes fins energéticos. Dissertação de Pós-Graduação Em Ciência, Inovação E Tecnologia. Universidade Federal Do Acre. 31p.
69. Khorasgani, N.B.; Sengul, A.B.; Asmatulu, E. 2020. Briquetting grass and tree leaf biomass for sustainable production of future fuels. Biomass Convers. Biorefin, 10, 915–924.
70. Wu, M.R; Schott, D.L; Lodewijks, G. 2011. Physical properties of solid biomass, Biomass Bioenergy 35 2093–2105p.
71. Orisaleye, J.; Jekayinfa, S.; Pecenka, R.; Onifade, T. 2019. Effect of densification

variables on water resistance of corncob briquettes. Agron. Res., 17, 30–150p.

## 7. APÊNDICES

### Análises de variância

Tabela 1. Análise de variância para densidade aparente.

ANOVA						
<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	69903,84032	2	34951,92016	34,296005	0,000520447	5,14325285
Within Groups	6114,750712	6	1019,125119			
Total	76018,59103	8				

Tabela 2. Análise de variância para densidade energética.

ANOVA						
<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	9241320,438	2	4620660,219	13,5136318	0,005995646	5,14325285
Within Groups	2051555,18	6	341925,8633			
Total	11292875,62	8				

Tabela 3. Análise de variância para densidade à granel.

ANOVA						
<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	2124,09696	2	1062,04848	143,6133995	8,56728E-06	5,14325285
Within Groups	44,37114434	6	7,395190723			
Total	2168,468104	8				
Between Groups	661,34434	2	330,67217	171,8437475	5,05142E-06	5,14325285
Within Groups	11,5455642	6	1,924260701			
Total	672,8899042	8				

Tabela 4. Análise de variância para friabilidade.

Tabela 5. Análise de variância para o teor de humidade.

ANOVA						
<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	0,04656	2	0,02328	0,656699577	0,536233274	3,885293835
Within Groups	0,4254	12	0,03545			
Total	0,47196	14				

Tabela 6. Análise de variância para o teor de cinzas.

ANOVA						
<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>d f</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	393,3685179	2	196,6842589	1211,814368	1,50603E-08	5,14325285
Within Groups	0,973833604	6	0,162305601			
Total	394,3423515	8				

### Teste de tukey

Tabela 7. Teste de Tukey para densidade aparente

Densidade aparente	Mistura A	Mistura B	Mistura C
Mistura A		0,0008723 <sup>a</sup>	0,0009417 <sup>b</sup>
Mistura B	10,21 <sup>a</sup>		0,9944 <sup>b</sup>
Mistura C	10,07 <sup>a</sup>	0,1434 <sup>a</sup>	

Segundo o teste de Tukey a 5% de nível de significância, as médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si ou células pintadas demonstram a existência de diferenças significativas

Tabela 8. Teste de Tukey para densidade energética

Densidade energetica	Mistura A	Mistura B	Mistura C
Mistura A		0,02043 <sup>a</sup>	0,006098 <sup>b</sup>
Mistura B	5,407 <sup>a</sup>		0,5271 <sup>b</sup>
Mistura C	7,018 <sup>a</sup>	1,611 <sup>a</sup>	

Segundo o teste de Tukey a 5% de nível de significância, as médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si ou células pintadas demonstram a existência de diferenças significativas

significativas

Tabela 9. Teste de Tukey para densidade à granel

Densidade a granel	Mistura A	Mistura B	Mistura C
Mistura A		3,59E-06 <sup>a</sup>	0,0001839 <sup>b</sup>
Mistura B	26,21 <sup>a</sup>		0,0002632 <sup>c</sup>
Mistura C	13,52 <sup>a</sup>	12,69 <sup>a</sup>	

Segundo o teste de Tukey a 5% de nível de significância, as médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si ou células pintadas demonstram a existência de diferenças significativas

Tabela 10. Teste de Tukey para friabilidade

Friabilidade	Mistura A	Mistura B	Mistura C
Mistura A		6,31E-06 <sup>a</sup>	0,0001916 <sup>b</sup>
Mistura B	23,91 <sup>a</sup>		0,0007583 <sup>c</sup>
Mistura C	13,43 <sup>a</sup>	10,48 <sup>a</sup>	

Segundo o teste de Tukey a 5% de nível de significância, as médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si ou células pintadas demonstram a existência de diferenças significativas

Tabela 11. Teste de Tukey para teor de cinzas

Teor de cinzas	Mistura A	Mistura B	Mistura C
Mistura A		5,12E-09 <sup>a</sup>	1,43E-06 <sup>b</sup>
Mistura B	69,5 <sup>a</sup>		6,12E-07 <sup>c</sup>
Mistura C	31,24 <sup>a</sup>	38,27 <sup>a</sup>	

Segundo o teste de Tukey a 5% de nível de significância, as médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si ou células pintadas demonstram a existência de diferenças significativas

Tabela 12. Teste de Tukey para materias voláteis

Materiais Voláteis	Mistura A	Mistura B	Mistura C
Mistura A		0,04244 <sup>a</sup>	0,005061 <sup>b</sup>
Mistura B	6,293		0,001665 <sup>c</sup>
Mistura C	13,45	19,74	

Segundo o teste de Tukey a 5% de nível de significância, as médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si ou células pintadas demonstram a existência de diferenças significativas