



**FACULDADE DE ENGENHARIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
**CURSO DE LICENCIATURA EM ENGENHARIA DO AMBIENTE (LABORAL)**

Trabalho de Licenciatura

**Produção e Caracterização Energética de Briquetes *In natura* e Carbonizado de Sabugo de Milho**

**Autor:**

Edmilson Orlando Lourenço Nhamússua

**Supervisor:**

Doutor Carlos Lucas, Eng.º

**Co-supervisores:**

Doutor Adolfo Condo, Eng.º

MSc. Karina Motani, Eng.<sup>a</sup>

**Maputo, Agosto de 2025**

**UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
**CURSO DE LICENCIATURA EM ENGENHARIA DO AMBIENTE (LABORAL)**

Trabalho de Licenciatura

**Produção e Caracterização Energética de Briquetes *In natura* e Carbonizado de  
Sabugo de Milho**

**Autor:**

Edmilson Orlando Lourenço Nhamússua

**Supervisor:**

Doutor Carlos Lucas, Eng.º

**Co-supervisores:**

Doutor Adolfo Condo, Eng.º

MSc. Karina Motani, Eng.<sup>a</sup>

**Maputo, Agosto de 2025**

## **TERMO DE ENTREGA DO RELATÓRIO DE TRABALHO DE LICENCIATURA**

Declaro que o estudante **Edmilson Orlando Lourenço Nhamússua** entregou no dia \_\_\_\_/\_\_\_\_/2025 as \_\_\_\_ cópias do relatório do seu Trabalho de Licenciatura intitulado:

**Produção e Caracterização Energética de Briquetes *In natura* e Carbonizado de Sabugo de Milho.**

Maputo, \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2025

O Chefe de Secretaria

---

## **DECLARAÇÃO SOB PALAVRA DE HONRA**

Eu, **Edmilson Orlando Lourenço Nhamússua**, declaro por minha honra que o presente trabalho foi realizado inteiramente por mim, no Departamento de Engenharia Química da Faculdade de Engenharia da Universidade Eduardo Mondlane, no âmbito da conclusão do curso de Licenciatura em Engenharia do Ambiente.

Maputo, \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2025

---

(Edmilson Orlando Lourenço Nhamússua)

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho, fruto de dedicação e esforço, às pessoas que foram fundamentais na minha jornada acadêmica e pessoal:

À minha família especialmente à minha mãe, Gertrudes Venâncio Macuacua, aos meus irmãos especialmente Dércio, Eucléusia, Joice e Núria, à minha Avó Genoveva Teles, pelo amor incondicional, apoio nos momentos difíceis e por sempre acreditarem no meu potencial, mesmo quando eu próprio duvidava.

Aos meus amigos e colegas de curso, que compartilharam as dificuldades, as gargalhadas e os aprendizados, tornando esta caminhada mais leve e enriquecedora.

Aos meus professores e orientadores, que me guiaram com sabedoria e paciência, inspirando-me a procurar conhecimento e a contribuir para um futuro mais sustentável.

E, por fim, dedico este trabalho à Mãe Natureza, que me motivou a escolher a Engenharia do Ambiente e que me recorda, todos os dias, da importância de preservar e regenerar o nosso planeta para as gerações actuais e futuras.

Que este seja apenas o início de uma caminhada em prol do equilíbrio entre o progresso e a conservação ambiental.

## **AGRADECIMENTOS**

A realização deste trabalho só foi possível graças ao apoio e contribuição de diversas pessoas que acompanharam minha trajetória académica e pessoal. Por isso, expresso minha profunda gratidão a todos que, directa e indirectamente, colaboraram para a conclusão deste projecto.

Em primeiro lugar, agradeço ao meu Supervisor, Prof. Carlos Lucas Eng.<sup>o</sup>, e aos meus Co-supervisores, Adolfo Condo, Eng.<sup>o</sup>, e à Mestre Karina Motani, Eng.<sup>a</sup>, pela paciência, orientação valiosa e incentivo constante durante todo o desenvolvimento deste trabalho. O Seu conhecimento e dedicação foram fundamentais para o aperfeiçoamento desta investigação.

Aos professores do curso de Engenharia do Ambiente, que compartilharam conhecimentos e inspiraram minha formação técnica e crítica, contribuindo para minha visão sobre os desafios ambientais contemporâneos.

À minha família, especialmente Orlando Lourenço Nhamússua, meu pai, Gertrudes Venâncio Macuacua, minha mãe, Euclússia Orlando Nhamússua, minha irmã gémea e ao meu irmão mais velho Dércio Cumbana, pelo amor incondicional, apoio emocional e compreensão nos momentos de pressão e cansaço. Vocês são meu alicerce e motivação.

Aos amigos e colegas de turma, que tornaram essa jornada mais leve com a troca de conhecimentos, parcerias em projectos e momentos de descontração. Em especial, agradeço ao Issufo Dadá, por estar sempre disponível, oferecendo o seu ombro amigo em momentos difíceis, pelas discussões enriquecedoras e pelo apoio mútuo.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para minha formação como Engenheiro Ambiental. Que os frutos deste trabalho possam ser um pequeno passo em direcção a soluções mais sustentáveis para o nosso planeta.

## RESUMO

Este estudo teve como objectivo investigar a produção e a caracterização energética de briquetes elaborados a partir de sabugo de milho *in natura* (SM) e da mistura de sabugo de milho com o seu carbonizado, na proporção de 50%–50% (SMC-50%-50%), comparando-os com lenha e carvão vegetal. O propósito foi o de avaliar o potencial desses briquetes como combustíveis sustentáveis, com vistas à redução da dependência de fontes fósseis e à mitigação das emissões de gases de efeito estufa. Os briquetes foram produzidos sob pressão de 10 MPa e temperatura de 120 °C. As análises realizadas incluíram a determinação da granulometria, teor de humidade, voláteis, cinzas, carbono fixo e poder calorífico. Os resultados indicaram que o SM apresenta elevado teor de voláteis (82,15%) e baixo teor de cinzas (2,82%), favorecendo a ignição. Já a amostra SMC-50%-50% destacou-se pelo elevado teor de carbono fixo (33,25%) e poder calorífico superior (4.790 kcal/kg), reflectindo em maior estabilidade térmica. A densidade energética dos briquetes foi de 2 a 3 vezes superior à da biomassa não compactada. Nos testes de combustão, os briquetes SMC-50%-50% demonstraram desempenho térmico próximo ao do carvão vegetal, com Índice de Combustão (ICOM) de 0,65 e rendimento de 55,99% no teste de fervura de água, superando significativamente a lenha, cujo rendimento foi de 29,35%. Conclui-se que os briquetes produzidos a partir de sabugo de milho, especialmente na mistura com o carbonizado, configuram-se como alternativas viáveis e ambientalmente sustentáveis para substituição parcial da lenha e do carvão vegetal, promovendo o aproveitamento de resíduos agrícolas e contribuindo para a redução da desflorestação.

**Palavras-chave:** Briquetes, Sabugo de milho, Energia renovável, Biomassa, Sustentabilidade.

## **ABSTRACT**

This study investigated the production and energy characterization of briquettes made from fresh corncobs (MC) and a 50%–50% blend of corncobs and carbonized corncobs, comparing them with firewood and charcoal. The aim was to evaluate the potential of these briquettes as sustainable fuels, aiming to reduce dependence on fossil fuels and mitigate greenhouse gas emissions. The briquettes were produced under 10 MPa pressure and 120°C. The analyses included determination of particle size, moisture content, volatiles, ash, fixed carbon, and calorific value. The results indicated that MC has a high volatile content (82.15%) and low ash content (2.82%), favoring ignition. The SMC-50%-50% sample stood out for its high fixed carbon content (33.25%) and superior calorific value (4,790 kcal/kg), resulting in greater thermal stability. The energy density of the briquettes was 2 to 3 times greater than that of uncompressed biomass. In combustion tests, the SMC-50%-50% briquettes demonstrated thermal performance close to that of charcoal, with a Combustion Index (ICOM) of 0.65 and a yield of 55.99% in the water boiling test, significantly surpassing firewood, which yielded 29.35%. It is concluded that briquettes produced from corncobs, especially when mixed with carbonized corncobs, are viable and environmentally sustainable alternatives for partially replacing firewood and charcoal, promoting the use of agricultural waste and contributing to the reduction of deforestation.

**Keywords:** Briquettes, Corncob, Renewable energy, Biomass, Sustainability.

## ÍNDICE

LISTA DE SÍMBOLOS .....	ix
LISTA DE ACRÓNIMOS .....	x
LISTA DE FIGURAS .....	xi
LISTA DE TABELAS .....	xii
LISTA DE GRÁFICOS .....	xiv
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Objectivos .....</b>	<b>2</b>
1.1.1. Geral .....	2
1.1.2. Específicos .....	2
<b>1.3. Metodologia .....</b>	<b>3</b>
1.3.1. Recolha da amostra .....	3
1.3.2. Armazenamento .....	3
1.3.3. Processamento e análise das amostras .....	3
<b>2. REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>4</b>
2.3. Biomassa em Moçambique .....	4
2.4. Resíduos agrícolas e briquetes .....	5
2.5. Produção do Milho no Mundo .....	7
2.6. Produção do Milho em Moçambique .....	7
2.7. Briquetagem .....	8
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>9</b>
3.1. Materiais .....	9
3.2. Métodos .....	9
3.2.1. Preparação e Caracterização da amostra .....	9
3.2.2. Carbonização .....	10
3.2.3. Análise Granulométrica .....	10
3.2.4. Análise imediata .....	11
3.2.5. Análise elementar .....	13
3.2.6. Poder calorífico .....	14
3.2.7. Densidade .....	15
3.2.8. Produção de briquetes .....	17
3.2.9. Estabilidade e Teste de expansão .....	17
3.2.10. Friabilidade .....	18
3.3. Índice de combustão .....	19
3.4. Teste de fervura da água .....	20
3.5. Análise estatística dos resultados .....	22

<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>23</b>
<b>4.1. Carbonização .....</b>	<b>23</b>
<b>4.2. Análise granulométrica .....</b>	<b>23</b>
<b>4.3. Análise imediata.....</b>	<b>24</b>
<b>4.3.1. Teor de humidade .....</b>	<b>24</b>
<b>4.3.2. Teor de voláteis .....</b>	<b>25</b>
<b>4.3.3. Teor de cinzas.....</b>	<b>27</b>
<b>4.3.4. Teor de carbono fixo .....</b>	<b>28</b>
<b>4.4. Análise elementar .....</b>	<b>29</b>
<b>4.5. Poder calorífico .....</b>	<b>30</b>
<b>4.6. Densidade .....</b>	<b>31</b>
<b>4.6.1. Densidade a granel .....</b>	<b>31</b>
<b>4.6.2. Densidade aparente.....</b>	<b>31</b>
<b>4.6.3. Densidade energética .....</b>	<b>32</b>
<b>4.7. Produção de briquetes .....</b>	<b>32</b>
<b>4.8. Estabilidade dimensional e teste de expansão .....</b>	<b>33</b>
<b>4.9. Friabilidade .....</b>	<b>34</b>
<b>4.10. Índice de combustão.....</b>	<b>34</b>
<b>4.11. Teste de fervura da água .....</b>	<b>37</b>
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>40</b>
<b>6. RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>42</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>43</b>
<b>Apêndices.....</b>	<b>A-1</b>
<b>Apêndice 1: Análise granulométrica .....</b>	<b>A1-1</b>
<b>Apêndice 2: Análise imediata.....</b>	<b>A2-1</b>
<b>Apêndice 3: Densidades.....</b>	<b>A3-1</b>
<b>Apêndice 4: Carbonização do sabugo do milho .....</b>	<b>A4-1</b>
<b>Apêndice 5: Expansão longitudinal e Friabilidade.....</b>	<b>A5-1</b>
<b>Apêndice 6: Índice de combustão e Teste de Fervura de Água .....</b>	<b>A6-1</b>

## LISTA DE SÍMBOLOS

**P** - Densidade

**μg** - Microgramas

**μm** - Micrómetros

**°C** - Graus Celsius

**Cm** - Centímetros

**G** - Grama

**Hz** - Hertz

**Kg** - Quilograma

**kJ** - Quilojoule

**kcal** - Quilocaloria

**kW** - Quilowatt

**m** - Metro

**m<sup>3</sup>** - Metro cúbico

**min** - Minutos

**mm** - Milímetros

**ml** - Mililitro

**MPa** - Mega Pascal

**MJ** - Megajoule

**Rpm** - Rotações por minuto

**t** - Tempo

**η** - Rendimento da carbonização

**X<sub>i</sub>** - Fração retida na peneira

**h** - Altura do briquete

**L** - Calor latente de vaporização

**Q** - Calor

**P** - Potência

**C<sub>e</sub>** - Consumo específico

## **LISTA DE ACRÓNIMOS**

**ALER** - Associação Lusófona de Energias Renováveis

**A.P.** - Alta Potência

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

**B.P.** - Baixa Potência

**BEST** - *Biomass Energy Strategy*

**CF** - Teor de Carbono Fixo

**CO** - Monóxido de Carbono

**CO<sub>2</sub>** - Dióxido de Carbono

**FENG** - Faculdade de Engenharia

**FUNAE** - Fundo Nacional de Energia

**GEE** - Gases de Efeito Estufa

**GW** - *Gigawatt*

**ICOM** - Índice de Combustão

**ISO** - *International Standard Organization*

**NO<sub>x</sub>** - Óxidos de Nitrogênio

**PCI** - Poder Calorífico Inferior

**PCS** - Poder Calorífico Superior

**PCU** - Poder Calorífico Útil

**SM** - Sabugo de Milho *in natura*

**SMC** - Mistura de Sabugo de Milho com seu Carbonizado

**TC** - Teor de Cinzas

**TH** - Teor de Humidade

**TV** - Teor de Voláteis

**UEM** - Universidade Eduardo Mondlane

**WBT** - *Water Boiling Test*

**HHV** - *Higher Heating Value*

**LHV** - *Lower Heating Value*

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: BIOMASSA (FONTE: <a href="HTTPS://IMAGES.MODISHSTORE.COM/MOD/CURIOSIDADES-SOBRE-A-BIOMASSA.HTML">HTTPS://IMAGES.MODISHSTORE.COM/MOD/CURIOSIDADES-SOBRE-A-BIOMASSA.HTML</a> ) .....	4
FIGURA 2: PERCENTAGEM DO FORNECIMENTO TOTAL DE ENERGIA PRIMÁRIA POR FONTE EM 2014 (ALER, 2017) .....	5
FIGURA 3: A- RESÍDUOS DE PROCESSAMENTO; B- EMBALAGENS E PLÁSTICOS AGRÍCOLAS; C- RESTOS DE COLHEITAS; E D- ESTERCOS. ....	5
FIGURA 4: BRIQUETES FEITOS POR MATERIAL AGRÍCOLA .....	7
FIGURA 5: A-SABUGO DE MILHO; B-LENHA-(BRACHYSTEGIA); C-FARINHA DE SABUGO DE MILHO E D-CARVÃO VEGETAL .....	9
FIGURA 6: A-MOINHO DE FACAS E B-MOINHO ULTRACENTRIFUGO .....	9
FIGURA 7: REACTOR COM AS AMOSTRAS ANTES E DEPOIS DA CARBONIZAÇÃO .....	10
FIGURA 8: EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA A ANALISE GRANULOMÉTRICA (A- BALANÇA ANALÍTICA; B- PENEIROS E C- PENEIRADOR VIBRATÓRIO) .....	10
FIGURA 9: MEDIDOR DE HUMIDADE .....	11
FIGURA 10: EQUIPAMENTOS USADOS PARA MEDIÇÃO DO TEOR DE VOLÁTEIS (A- MUFLA; B- CADINHOS DE NÍQUEL E C- DESSECADORES).....	12
FIGURA 11: INTERIOR DA MUFLA COM CADINHOS CONTENDO CINZAS.....	13
FIGURA 12: EQUIPAMENTO UTILIZADO PARA A PRODUÇÃO DE BRIQUETES; BRIQUETES DE SABUGO DE MILHO (SM); BRIQUETES DA MISTURA DE SABUGO DE MILHO E SABUGO DE MILHO CARBONIZADO EM 50:50 (SMC-50%-50%) .....	17
FIGURA 13: PAQUÍMETRO DIGITAL UTILIZADO PARA A MEDIÇÃO DA EXPANSÃO DOS BRIQUETES .....	18
FIGURA 14: TAMBOR ROTATIVO UTILIZADO PARA A FRIABILIDADE E BRIQUETES DEPOIS DO TESTE DE FRIABILIDADE.....	18
FIGURA 15: EQUIPAMENTOS USADOS PARA MEDIÇÃO DE ICOM .....	19
FIGURA 16: EQUIPAMENTO USADO PARA O TESTE DE FERVURA DA ÁGUA .....	21
FIGURA 17: PERFIL DE CARBONIZAÇÃO E RENDIMENTO DE CARBONIZAÇÃO (%) .....	23
FIGURA 18: RESULTADOS DA ANÁLISE GRANULOMÉTRICA .....	23
FIGURA 19: BRIQUETE QUEBRADO PELA INFLUÊNCIA DE HUMIDADE ALTA, ACIMA DE 12%.....	25
FIGURA 20: RESULTADOS DE DENSIDADE A GRANEL E SEUS RESPECTIVOS INTERVALOS DE CONFIANÇA .....	31
FIGURA 21: RESULTADOS DE DENSIDADE APARENTE E SEUS RESPECTIVOS INTERVALOS DE CONFIANÇA .....	31
FIGURA 22: RESULTADOS DE DENSIDADE ENERGÉTICA.....	32
FIGURA 23: BRIQUETE QUEBRADO E ESFARELADO PRODUZIDO A PARTIR DE SMC- 25%-75% .....	33
FIGURA 24: BRIQUETES PRODUZIDOS A PARTIR DE A- SM E B- SMC-50%-50%.....	33
FIGURA 25: ESTABILIDADE DIMENSIONAL DOS BRIQUETES .....	33
FIGURA 26: RESULTADOS DE FRIABILIDADE .....	34

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1: ANÁLISE IMEDIATA.....	24
TABELA 2: ANÁLISE ELEMENTAR.....	29
TABELA 3: PODER CALORÍFICO.....	30
TABELA 4: RESULTADOS DO TESTE DE ICOM.....	36
TABELA 5: RESULTADOS DO TESTE DE FERVURA DA ÁGUA.....	38
TABELA A1- 1: ANÁLISE GRANULOMETRIA DO SABUGO DE MILHO (SM).....	A1-1
TABELA A1- 2: ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DE SABUGO DE MILHO MISTURADO COM O SEU CARBONIZADO (SMC-50%-50%).....	A1-1
TABELA A2- 1: TEOR DE VOLÁTEIS DAS BIOMASSAS.....	A2-1
TABELA A2- 2: TEOR DE CINZAS DAS BIOMASSAS.....	A2-1
TABELA A2- 3: TEOR DE CARBONO FIXO DAS BIOMASSAS.....	A2-2
TABELA A2- 4: TEOR DE HUMIDADE DA BIOMASSA.....	A2-2
TABELA A3- 1: DENSIDADE APARENTE DAS BIOMASSAS.....	A3-1
TABELA A3- 2: DENSIDADE A GRANEL DAS BIOMASSAS.....	A3-1
TABELA A3- 3: DENSIDADE ENERGÉTICA DAS BIOMASSAS.....	A3-1
TABELA A4- 1: TEMPERATURA DA CARBONIZAÇÃO DO SABUGO DO MILHO E SEU TEMPO DE RESIDÊNCIA.....	A4-1
TABELA A4- 2: RENDIMENTO DA CARBONIZAÇÃO DO SABUGO DO MILHO.....	A4-1
TABELA A5- 1: EXPANSÃO LONGITUDINAL DO SABUGO DO MILHO (SM).....	A5-1
TABELA A5- 2: RESULTADOS DA EXPANSÃO LONGITUDINAL DO BRIQUETE SMC-50%-50%.....	A5-1
TABELA A5- 3: RESULTADOS DO TESTE DE FRIABILIDADE DOS BRIQUETES.....	A5-1
TABELA A6- 1: RESULTADOS DA TEMPERATURA E MASSA NO TESTE DE ÍNDICE DE COMBUSTÃO DOS BRIQUETES, LENHA E CARVÃO VEGETAL.....	A6-1
TABELA A6- 2: RESULTADO DO ÍNDICE DE COMBUSTÃO DE SM.....	A6-5
TABELA A6- 3: RESULTADO DO ÍNDICE DE COMBUSTÃO DE CARVÃO VEGETAL.....	A6-5
TABELA A6- 4: RESULTADO DO ÍNDICE DE COMBUSTÃO DE SMC-50%-50%.....	A6-6
TABELA A6- 5: RESULTADO DO ÍNDICE DE COMBUSTÃO DA LENHA.....	A6-6
TABELA A6- 6: RESULTADOS DO TESTE DE FERVURA DA ÁGUA DE BRIQUETES DE SMC-50%-50%.....	A6-6
TABELA A6- 7: RESULTADOS DO TESTE DE FERVURA DA ÁGUA DE BRIQUETES DE SM.....	A6-7
TABELA A6- 8: RESULTADOS DO TESTE DE FERVURA DA ÁGUA DE BRIQUETES DE CARVÃO VEGETAL.....	A6-8
TABELA A6- 9: RESULTADOS DO TESTE DE FERVURA DA ÁGUA DE BRIQUETES DE LENHA.....	A6-9

TABELA A6- 10: RESULTADOS DO CÁLCULO DO CALOR LIBERTADO, ABSORVIDO, DE VAPOR DA ÁGUA E RENDIMENTO DO TESTE DE FERVURA DA ÁGUA .....A6-9

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1: EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA EM FUNÇÃO DO TEMPO DE COMBUSTÃO DA BIOMASSA .....	35
GRÁFICO 2: PERDA DE MASSA DA BIOMASSA EM FUNÇÃO DO TEMPO DE COMBUSTÃO	36
GRÁFICO 3: EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA VERSOS TEMPO NA FASE DE ALTA E BAIXA POTÊNCIA, DURANTE O TESTE DE FERVURA DA ÁGUA. ....	37

## 1. INTRODUÇÃO

É um facto que a emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) é um dos principais factores que contribuem para as mudanças climáticas globais. Os gases, que incluem dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) e óxidos de azoto (NO<sub>x</sub>), são libertados na atmosfera através de diversas actividades humanas, como a queima de combustíveis fósseis, desflorestação e processos industriais. A crescente concentração de gases na atmosfera intensifica o efeito estufa natural, resultando no aquecimento global e em mudanças climáticas adversas (Albuquerque *et al.*, 2010).

Actualmente, a queima de combustíveis fósseis como carvão, petróleo e gás natural, é a principal fonte de emissões de CO<sub>2</sub>, o gás de efeito estufa mais abundante. O metano, embora presente em quantidades inferiores, possui um potencial de aquecimento global significativamente superior ao do CO<sub>2</sub>, sendo libertado principalmente através de actividades agrícolas, como a criação de gado e o cultivo de arroz, além de fugas em sistemas de gás natural (Soares & Cunha, 2019). Os óxidos de azoto, por sua vez, são emitidos sobretudo pela queima de combustíveis fósseis e pela utilização de fertilizantes azotados na agricultura.

Acima de tudo, é importante promover o uso de tecnologias mais limpas e eficientes na queima de combustíveis fósseis, bem como adoptar práticas agrícolas mais sustentáveis para reduzir as emissões de óxidos de azoto e os seus impactos negativos no ambiente.

A crescente preocupação com as mudanças climáticas tem levado à busca por alternativas sustentáveis que possam reduzir a emissão de GEE. Neste contexto, a utilização de biomassa residual, como o sabugo de milho, para a produção de briquetes, surge como uma solução promissora. Os briquetes são blocos compactados de biomassa que podem ser utilizados como combustível, substituindo parcial ou totalmente os combustíveis fósseis e, assim, contribuindo para a redução da emissão de gases de efeito estufa (Wessling & Schabbach, 2022).

A produção de briquetes a partir de resíduos agrícolas, como o sabugo de milho, não só aproveita um material que seria descartado, como também oferece uma fonte de energia renovável e sustentável. O sabugo de milho, após a colheita, é geralmente considerado um resíduo agrícola sem valor comercial significativo. A sua conversão em briquetes pode proporcionar uma alternativa energética viável, reduzindo a

dependência de combustíveis fósseis e mitigando as emissões de GEE associadas à sua combustão (Soares & Cunha, 2019).

A utilização de briquetes de sabugo de milho pode contribuir para uma gestão sustentável dos resíduos agrícolas, evitando a queima a céu aberto que liberta grandes quantidades de gases de efeito estufa e outros poluentes atmosféricos. A produção de briquetes também pode gerar benefícios socioeconómicos, criando oportunidades de emprego e rendimento para comunidades rurais envolvidas na recolha e processamento desses resíduos. A produção e caracterização energética dos briquetes envolve uma série de estudos iniciais já definidos, como a mistura adequada das amostras e a sua análise imediata, para proporcionar melhores resultados e conclusões. Este estudo pode ser realizado através de quantificação de cinzas, voláteis e humidade das amostras, permitindo a caracterização energética que tornará possível determinar o conteúdo energético dos briquetes.

No contexto geral, a emissão de gases de efeito estufa e a importância da sua redução são fundamentais para entender o papel dos briquetes de sabugo de milho como uma alternativa sustentável aos combustíveis fósseis. A produção e utilização destes briquetes não só contribuem para a mitigação das mudanças climáticas, como também promovem uma gestão mais responsável dos resíduos agrícolas e geram benefícios sociais e económicos para as comunidades rurais.

A produção e caracterização energética de briquetes é essencial para garantir que esta alternativa energética seja realmente benéfica para o ambiente e para a sociedade como um todo.

## **1.1. Objectivos**

### **1.1.1. Geral**

- Caracterizar energeticamente briquetes *in natura* e carbonizados de sabugo de milho.

### **1.1.2. Específicos**

- Realizar análise imediata e elementar de sabugo de milho;
- Produzir briquetes a partir de sabugo de milho *in natura* e carbonizado;
- Determinar o Índice de combustão dos briquetes de sabugo de milho;
- Comparar os resultados com os da lenha e carvão vegetal.

### **1.3. Metodologia**

#### **1.3.1. Recolha da amostra**

O sabugo de milho foi recolhido no campo agrícola de um agricultor local que planta milho anualmente, na província de Inhambane, concretamente no distrito de Inharrime, na localidade Nhanombe, no bairro de Nhacolola.

#### **1.3.2. Armazenamento**

Após a recolha, o sabugo de milho foi armazenado em sacos de plástico e transportado para a cidade de Maputo, concretamente para a faculdade de engenharia (UEM). Para garantir melhor armazenamento foram utilizados sacos plásticos permeáveis.

#### **1.3.3. Processamento e análise das amostras**

As amostras de sabugo de milho foram processadas e analisadas na faculdade de engenharia, nos laboratórios do Departamento de Engenharia Química.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.3. Biomassa em Moçambique

Moçambique é um país rico em recursos de biomassa, com cerca de metade do território coberto por florestas. A energia gerada a partir da biomassa é fundamental no fornecimento energético, especialmente sob a forma de lenha e carvão vegetal. Segundo o Fundo Nacional de Energia (FUNAE) (*apud Biomass Energy Strategy* (BEST), 2013), Moçambique possui um potencial superior a 2 GW de projectos de biomassa, incluindo biomassa florestal residual, das indústrias açucareiras, da pasta de papel e de resíduos sólidos urbanos. O país tem extensos recursos de biomassa, com 50% do território coberto por florestas. Além disso, sistemas de energia renovável como painéis solares e fogões melhorados estão a ser instalados em zonas rurais para uso em escolas, clínicas, agricultura e pequenos negócios (Namburete, 2012).

Esta abundância de recursos naturais oferece várias oportunidades para o desenvolvimento sustentável e para a transição energética.



Figura 1: Biomassa (Fonte: <https://images.modishstore.com/mod/curiosidades-sobre-a-biomassa.html>)

De acordo com Van der Plas *et al.*, (2012), reitera que a visão proposta para a energia de biomassa em Moçambique é a de que a biomassa deve desempenhar um papel central na matriz energética do país. Este autor defende a necessidade de transformar a biomassa numa fonte de energia limpa, moderna e acessível, rompendo com a sua tradicional associação à degradação ambiental e à pobreza.

A Associação Lusófona de Energias Renováveis (ALER, 2017) estima que o sector de biomassa, representa cerca 80% do balanço energético nacional. Para a entidade, é essencial promover intervenções que valorizem a biomassa, nomeadamente o carvão vegetal, para que se torne uma mercadoria sustentável, contribuindo para o desenvolvimento económico e social do país.

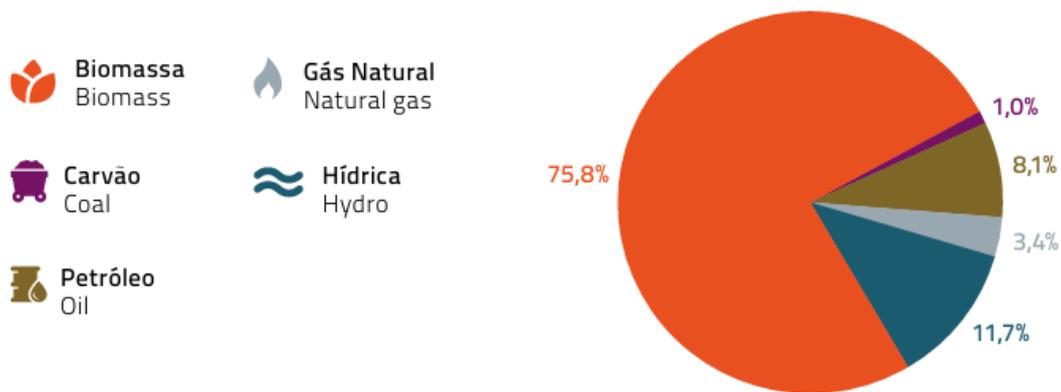


Figura 2: Percentagem do fornecimento total de energia primária por fonte em 2014 (ALER, 2017)

## 2.4. Resíduos agrícolas e briquetes

Os resíduos agrícolas incluem todos os materiais remanescentes após a colheita, abrangendo tanto resíduos orgânicos como inorgânicos (LeanPio, 2022), (Reciclamás, 2020); (Agro News, 2024).

Estes resíduos agrícolas podem ser:

- **Restos de colheitas** (Palha, folhas, caules e raízes);
- **Esterco** (Dejectos de animais utilizados como fertilizante);
- **Resíduos de processamento** (Casca, sementes e polpas);
- **Embalagens** (Sacos de papel, plástico e cartolina);
- **Plásticos agrícolas** (Filmes de cobertura, tubos de irrigação, etc.).



Figura 3: A- Resíduos de processamento; B- Embalagens e Plásticos agrícolas; C- Restos de colheitas; e D- Estercos.

Esses resíduos são gerados em grandes quantidades no sector agrícola e, muitas vezes, são considerados descartáveis. A valorização desses resíduos é vital do ponto de vista económico e ambiental. Uma das formas mais eficazes de valorização é a sua

conversão em briquetes. Um tipo de bioenergia na qual os resíduos são compactados e transformados num combustível sólido. Este processo contribui para a sustentabilidade ao transformar resíduos em energia renovável, reduzir a poluição ambiental, evitar queimadas a Céu aberto e fornecer uma alternativa viável aos combustíveis fósseis, emitindo menos poluentes durante a combustão (Reciclamás, 2020).

Os briquetes oriundos de resíduos agrícolas têm aplicações diversas, incluindo aquecimento doméstico, preparação de alimentos e geração de electricidade. Além disso, o seu uso pode contribuir para a mitigação da desflorestação, já que diminui a necessidade de corte de árvores para obtenção da lenha. A utilização de resíduos agrícolas também promove uma melhor gestão de resíduos, reduzindo os impactos ambientais associados ao descarte inadequado. A valorização destes materiais pode também oferecer uma nova fonte de rendimento para os agricultores e fomentar práticas agrícolas sustentáveis (Fundación Global Nature & Sigfito, 2021).

A gestão e tratamento adequado dos resíduos agrícolas é também, essencial para minimizar impactos ambientais e promover a sustentabilidade. Como a compostagem que consiste em transformar resíduos orgânicos em composto, que pode ser utilizado como fertilizante natural. A produção de biogás, que consiste em utilizar resíduos orgânicos para a produção de biogás, uma fonte de energia renovável. A reciclagem, que consiste em reciclar materiais inorgânicos, como plásticos e metais, para reduzir a quantidade de resíduos enviados para aterros. A queima controlada, que consiste em realizar a queima de resíduos em condições controladas para evitar incêndios descontrolados e a emissão de gases tóxicos. Deve-se garantir a colecta e transporte desses resíduos que consiste em garantir que os resíduos sejam colectados e transportados por empresas autorizadas para tratamento adequado (Fundación Global Nature & Sigfito, 2021; LeanPio, 2022; Agro News, 2024).

Os resíduos agrícolas são uma parte importante da biomassa e podem ser utilizados como fonte de energia em Moçambique. A biomassa é composta por materiais biológicos, incluindo resíduos de agricultura e seus derivados. A utilização desses resíduos pode contribuir para a diversificação das fontes de energia e ajudar a atender à crescente demanda por combustíveis, ao mesmo tempo em que promove a sustentabilidade e a redução de desperdícios (Van der Plas *et al.*, 2012).



Figura 4: Briquetes feitos por material agrícola

A estratégia de energia de biomassa propõe o desenvolvimento de soluções múltiplas e complementares para garantir uma oferta sustentável de biomassa no futuro, o que inclui o manejo adequado de resíduos agrícolas. Isso não apenas ajudaria a fornecer energia, mas também poderia melhorar as condições de subsistência nas áreas rurais, ao transformar resíduos em recursos valiosos (BEST, 2013).

## 2.5. Produção do Milho no Mundo

O milho (*Zea mays*) é uma gramínea originária da América Central, domesticada há cerca de 9.000 anos no território do actual México. Actualmente, é o cereal mais produzido do mundo, à frente do arroz e do trigo devido à sua versatilidade, elevada produtividade e capacidade de adaptação a diferentes climas (Smith *et al.*, 2004).

Segundo Magalhães *et al.* (2002), a planta de milho pode atingir até 2,5 metros de altura com espigas cilíndricas cobertas por folhas e cascas, sendo amplamente utilizada para consumo humano e animal.

Borghezán (2024), refere que os principais produtores do milho no mundo são os Estados Unidos da América, a China, o Brasil e a África do Sul. A China e o Brasil têm registado aumentos na produção devido a investimentos em tecnologia agrícola e sustentabilidade. A África do Sul destaca-se no continente africano, apesar de enfrentar desafios climáticos.

## 2.6. Produção do Milho em Moçambique

Moçambique produziu cerca de 1.632.321 toneladas de milho em 2020, com um crescimento médio anual de 2,9% desde 2002. A área cultivada totalizou cerca de 2.286.362 hectares, com um rendimento médio de 803 kg/há. A província de Tete foi a maior produtora de milho, com mais de 461.394 toneladas.

Apesar do crescimento, a produtividade continua baixa, devido à limitada utilização de sementes certificadas, práticas agrícolas pouco eficientes e factores climáticos adversos (Marcos *et al.*, 2023).

## **2.7. Briquetagem**

Os briquetes são blocos compactos obtidos a partir de resíduos de biomassa, como a serragem, bagaço de cana-de-açúcar, sabugo e casca de milho. A sua Produção contribui para a sustentabilidade ambiental ao evitar o desperdício e reduzir a poluição (Bianchet, et al., 2020).

O objectivo da briquetagem é de aumentar o poder energético da biomassa por meio da compactação. A preparação dos briquetes consiste na mistura desses resíduos, que após serem processados e submetidos a uma prensagem mecânica, formam blocos que podem actuar como combustíveis sólidos. Os briquetes possuem alta qualidade, resistência à compressão, baixa humidade e teor de cinzas relativamente baixo, o que os torna uma alternativa eficiente para substituição da lenha.

Segundo Santos *et al.* (2015), a composição e proporções dos resíduos influenciam directamente a eficiência energética e a geração de fumo e cinzas durante a combustão.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios realizados neste trabalho foram conduzidos nos Laboratórios de Engenharia Química e no Laboratório da Engenharia Civil, ambos da Faculdade de Engenharia (FENG) da Universidade Eduardo Mondlane (UEM), situada na Cidade de Maputo.

#### 3.1. Materiais

Para a realização deste trabalho foram utilizadas farinhas moídas de sabugo de milho *in natura* e sabugo carbonizado. Além disso, lenha e carvão vegetal foram usados como materiais de comparação. O sabugo foi recolhido na província de Inhambane, no distrito de Inharrime, já a lenha e o carvão foram adquiridos na Cidade de Maputo, Bairro de Maxaquene C.



Figura 5: A-Sabugo de milho; B-Lenha-(*Brachystegia*); C-Farinha de sabugo de milho e D-Carvão vegetal

#### 3.2. Métodos

##### 3.2.1. Preparação e Caracterização da amostra

A amostra foi submetida a moagem em dois equipamentos: primeiro num moinho de facas de marca *Crompton Controls* (modelo séries 2000), Figura 6-A e em seguida num moinho ultracentrifugo *Retsch ZM 200*, Figura 6-B. A moagem tem como finalidade reduzir o tamanho das partículas, garantindo homogeneidade e facilitando a compactação (ISO, 2021).

Para tal, o sabugo de milho foi previamente partido com um pilão, de forma a obter pedaços pequenos para a moagem.



Figura 6: A-Moinho de facas e B-Moinho ultracentrifugo

A caracterização da amostra inclui as seguintes análises: granulométrica, imediata, elementar e densidade.

### 3.2.2. Carbonização

Segundo Amuji (2024), a carbonização é um processo de aquecimento da biomassa na ausência de oxigênio, com o objectivo de aumentar o teor de carbono fixo, sendo este princípio por trás da produção de carvão vegetal.

Neste trabalho as amostras foram colocadas num reactor Figura 7 e, em seguida, introduzidas numa mufla durante 2 horas a uma temperatura de 400 °C. Segue-se abaixo a equação do rendimento da carbonização.

$$\eta = \frac{m_{final}}{m_{inicial}} \times 100\% \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

n- Rendimento da carbonização (%);

m<sub>final</sub>- Massa final após a carbonização (g);

m<sub>inicial</sub>- Massa inicial antes da carbonização (g);



Figura 7: Reactor com as amostras antes e depois da carbonização

### 3.2.3. Análise Granulométrica

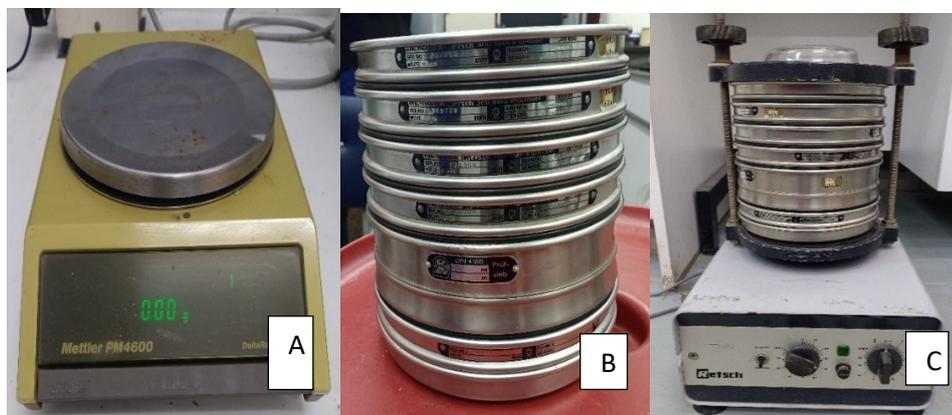


Figura 8: Equipamentos utilizados para a análise granulométrica (A- Balança analítica; B- Peneiros e C- Peneirador vibratório)

A peneiração é um método clássico para realização da análise granulométrica que, permite obter fracções classificadas da amostra com especificações de tamanhos

máximos, médio e mínimo das partículas. Este procedimento foi realizado usando peneiros padronizados (2,5 a 0,9 mm), com 100 g de amostra em cada ensaio. A vibração ocorreu por 10 minutos a 80 Hz num peneirador orbital *Tampson* (modelo VS 1000).

Após a peneiração vibratória, as amostras retidas em cada peneiro foram pesadas e as respectivas fracções foram determinadas usando a equação abaixo.

$$X_i = \frac{\text{Massa retida no peneiro}}{\text{Massa total}} \times 100\% \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

X<sub>i</sub>-Fracção retida (%)

### 3.2.4. Análise imediata

A análise imediata é um método utilizado para caracterizar combustíveis sólidos, como biomassa e carvão vegetal, determinando os teores de humidade, material volátil, carbono fixo e cinzas. Esses parâmetros influenciam directamente o comportamento da queima e a eficiência energética do combustível. A caracterização do sabugo de milho em termos de análise imediata foi realizada conforme a metodologia recomendada pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM). Os ensaios foram realizados em triplicata para garantir a reprodutibilidade dos mesmos.

#### 3.2.4.1. Teor de humidade

Para a determinação do teor de humidade da amostra, foi utilizado um medidor de humidade da marca *Sartorius*, modelo MA 35. Esse equipamento é amplamente utilizado em laboratórios devido à sua precisão e confiabilidade na medição do conteúdo de água presente em diferentes tipos de materiais ver Figura 9.



Figura 9: Medidor de humidade

O procedimento adoptado consistiu em pesar aproximadamente 1 grama da amostra em uma placa de alumínio, que foi então submetida a um aquecimento a 105<sup>0</sup>C. Essa

temperatura é comumente empregada para a secagem de amostras, pois é suficiente para promover a evaporação da água presente, sem causar danos ou alterações significativas na composição do material analisado. O uso do medidor de humidade *Sartorius MA 35* assegurou a obtenção de resultados precisos e reprodutíveis, contribuindo para a confiabilidade dos dados colectados durante a análise.

### 3.2.4.2. Teor de voláteis

Após a determinação do teor de humidade, para o teor de voláteis da amostra, foi determinado de acordo com a metodologia recomendada pela norma ASTM E-872. Pesa-se 1 g da amostra seca, com uma granulometria inferior a 0,25 mm, é colocada num cadinho com tampa para evitar contacto com o ar durante a devolatilização. O cadinho contendo a amostra é disposto no interior da mufla a uma temperatura de 950°C durante 7 minutos, ver Figura 10. Em seguida, as amostras são removidas, arrefecidas num dessecador e pesadas para determinar a perda de massa devido a devolatilização (ASTM, 2019). A massa final foi então determinada. Para o teor de voláteis da amostra usou-se a fórmula abaixo:

$$TV(\%) = \left(1 - \frac{m_2 - m_1}{m_0}\right) \times 100\% \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

TV (%) - Teor de voláteis (%);

$m_0$  - Massa de amostra fresca (g);

$m_1$  - Massa de cadinho vazio (g);

$m_2$  - Massa de cadinho + carvão (g);

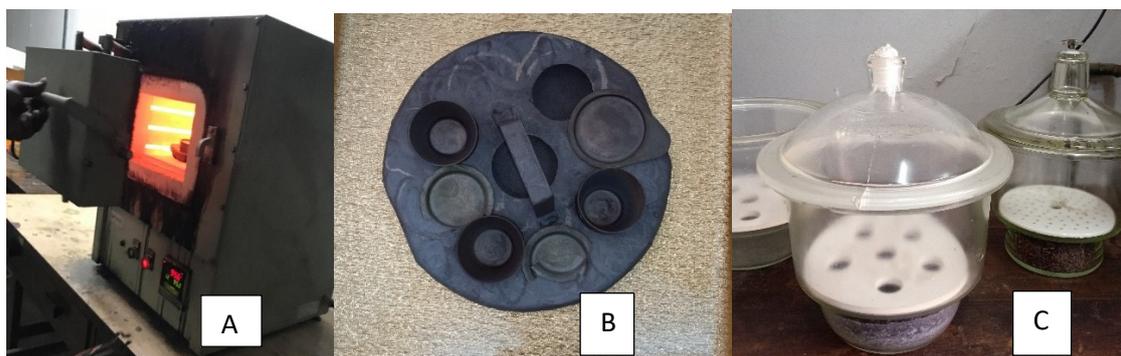


Figura 10: Equipamentos usados para medição do teor de voláteis (A- Mufla; B- Cadinhos de níquel e C- Dessecadores)

### 3.2.4.3. Teor de cinzas

Após a determinação do teor de voláteis, para o teor de cinzas da amostra, foi determinado de acordo com a metodologia recomendada pela norma ASTM E-1755-01.

Pesa-se 1 g da amostra seca, com uma granulometria inferior a 0,25 mm, é colocada num cadinho com tampa. O cadinho contendo a amostra é disposto no interior da mufla aquecido inicialmente até 250°C a uma taxa de aquecimento de 10°C por minuto, e mantido a esta temperatura por 30 minutos. A temperatura é novamente elevada até 575°C e mantida até que todo carbono seja queimado. Em seguida, as amostras são removidas, arrefecidas num dessecador e pesadas para determinar a perda de massa. A massa final foi então determinada (ASTM, 2020). Para o teor de cinzas da amostra usou-se a fórmula abaixo:

$$TC(\%) = \left( \frac{m_2 - m_1}{m_0} \right) \times 100\% \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

TC (%) - Teor de cinzas (%);

M<sub>0</sub>-Massa de amostra fresca (g);

m<sub>1</sub> - Massa de cadinho vazio (g);

m<sub>2</sub> - Massa de cadinho + cinzas (g);



Figura 11: Interior da mufla com cadinhos contendo cinzas

#### 3.2.4.4. Carbono fixo

Após a obtenção dos teores de humidade, voláteis e cinzas, o teor de carbono fixo foi determinado de forma indirecta pela diferença conforme a equação abaixo.

$$CF(\%) = 100\% - (TV(\%) + TC(\%)) \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

CF (%) -Carbono fixo em (%);

TV (%) -Teor de voláteis em (%);

TC (%) -Teor de cinzas em (%);

#### 3.2.5. Análise elementar

A análise elementar determina a percentagem da massa que representa um elemento químico. Baseadas nas correlações propostas por Parikh (2007, citado em Pereira & Seye, 2012).

As fórmulas de correlações estão abaixo:

$$C(\%) = 0,637 \times CF + 0,455 \times TV \quad \text{Equação 6}$$

$$H(\%) = 0,052 \times CF + 0,062 \times TV \quad \text{Equação 7}$$

$$O(\%) = 0,304 \times CF + 0,476 \times TV \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

C (%) - Teor de Carbono em (%);

H (%) - Teor de Hidrogénio em (%);

O (%) - Teor de Oxigénio em (%);

CF (%) - Carbono fixo em (%); e

TV (%) - Teor de voláteis em (%).

### 3.2.6. Poder calorífico

O poder calorífico representa a quantidade de energia produzida com a queima da biomassa, ele é obtido com ajuda de uma bomba calorimétrica. De acordo com Silva & Ataíde (2019) o poder calorífico da biomassa serve como um indicador do valor energético de um combustível, o que justifica a utilização deste parâmetro quando se deseja comparar um combustível com outro. O poder calorífico foi estimado com base em equações empíricas de Parikh *et al.* (2005), utilizando o poder calorífico superior, inferior e útil.

Segue-se abaixo as equações:

$$PCS \left[ \frac{kcal}{kg} \right] = 84,5104 \times CF + 37,3601 \times TV - 1,8642 \times TC \quad \text{Equação 9}$$

$$PCI \left[ \frac{kcal}{kg} \right] = PCS - (0,09 \times 600 \times H(\%)) \quad \text{Equação 10}$$

$$PCU \left[ \frac{kcal}{kg} \right] = [PCI \times (1 - 0,01 \times Hr(\%) - 6 \times Hr(\%))] \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

PCS [kcal/kg] – Poder Calorífico Superior em (kcal/kg);

PCI [kcal/kg] - Poder Calorífico Inferior em (kcal/kg);

PCU [kcal/kg] - Poder Calorífico Útil em (kcal/kg);

CF (%) - Carbono fixo em (%);

TV (%) - Teor de voláteis em (%);

TC (%) - Teor de cinzas em (%);

H (%) - Teor de Hidrogénio em (%);

Hr (%) - Teor de Humidade em (%).

Os coeficientes da equação 9 revelam como o conteúdo de cinzas, matérias voláteis e carbono fixo influenciam o valor calorífico. Enquanto o teor de matérias voláteis e carbono fixo têm um impacto positivo, o teor de cinzas afecta negativamente esse valor, (Ferreira, *et al.*, 2014).

### 3.2.7. Densidade

A densidade é uma propriedade física importante que descreve a relação entre a massa e o volume de uma determinada substância ou material. É definida como a quantidade de massa por unidade de volume, geralmente expressa em quilogramas por metro cúbico (kg/m<sup>3</sup>) no Sistema Internacional de Unidades (SI).

De acordo com Garcia *et al.*, (2013), essa propriedade é fundamental para diversas áreas, como a física, a química, a engenharia e a geologia, pois permite entender e prever o comportamento de diferentes materiais e substâncias. Por exemplo, a densidade é um factor crucial na determinação da flutuabilidade de objecto, na compreensão da estrutura interna de materiais sólidos e no desenvolvimento de novos produtos e tecnologias.

A densidade pode variar significativamente entre diferentes estados da matéria (sólido, líquido e gasoso) e entre diferentes substâncias, devido a diferenças em sua composição molecular e estrutura atômica. Esse conhecimento é essencial para diversas aplicações, como a análise de amostras, a separação de misturas e a compreensão de fenômenos naturais, como a formação de rochas e minerais (Garcia, *et al.*, 2013).

#### 3.2.7.1. Densidade a granel

Para determinar a densidade a granel, utilizou-se um balão volumétrico de 100 ml, com massa conhecida. Com o auxílio de uma colher e um funil, a amostra previamente moída e peneirada foi colocada dentro do balão, preenchendo-o até o volume de 100 ml. O balão contendo a amostra foi então pesado para obter a massa inserida. Este procedimento foi repetido três vezes para garantir a confiabilidade dos dados.

Para o cálculo da densidade a granel, a seguinte fórmula foi utilizada:

$$\rho_{granel} \left[ \frac{kg}{m^3} \right] = \frac{m}{V}$$

Equação 12

Onde:

$\rho_{granel} \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$  - Densidade a granel em (kg/m<sup>3</sup>);

m - Massa da amostra em (g); e  
V - Volume do balão em (m<sup>3</sup>).

### 3.2.7.2. Densidade aparente

A densidade aparente foi determinada pelo método estequiométrico, que consiste em obter o volume a partir de medições de diâmetro utilizando-se um paquímetro e a massa utilizando-se uma balança com precisão de 5 mg dos briquetes já estabilizados. Para este cálculo foram repetidas 3 vezes para se obter uma média e garantir a confiabilidade dos resultados.

Para obter a densidade aparente a seguinte fórmula foi utilizada:

$$\rho_{aparente} \left[ \frac{kg}{m^3} \right] = \frac{m}{V} \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

$\rho_{aparente} \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$  - Densidade aparente em (kg/m<sup>3</sup>);

m - Massa do briquete em (g); e

V - Volume do briquete em (m<sup>3</sup>).

### 3.2.7.3. Densidade energética

A densidade energética da biomassa é uma propriedade que avalia o seu desempenho como combustível. Ela é calculada ou estimada com base na densidade aparente do material e no seu poder calorífico útil. Essa medida engloba as características físicas, químicas e térmicas da biomassa, como densidades, composição química e poder calorífico, sendo definida como o produto entre o poder calorífico e a densidade do material (Matos, 2021).

Para calcular a densidade energética do resíduo:

$$\rho_{energetica} = \rho_{granel} \times PCU \quad \text{Equação 14}$$

Para calcular a densidade energética do briquete:

$$\rho_{energetica} = \rho_{aparente} \times PCU \quad \text{Equação 15}$$

Onde:

$\rho_{energetica}$  - **Densidade** energética em (kcal/m<sup>3</sup>);

$\rho_{granel}$  - **Densidade** a granel em (kg/m<sup>3</sup>);

$\rho_{aparente}$  - **Densidade** aparente em (kg/m<sup>3</sup>); e

PCU- Poder calorífico Útil em (kcal/kg).

### 3.2.8. Produção de briquetes

Os briquetes foram confeccionados no Laboratório de Engenharia Química, utilizando uma prensa hidráulica laboratorial acoplado a um painel de controle de temperaturas e um molde cilíndrico feito de aço inoxidável de diâmetro 50 mm e altura 33 mm, no qual 60 g de amostra foram introduzidas, neste molde, e colocadas na prensa, como ilustra a Figura 12. No presente trabalho foram produzidos briquetes de sabugo de milho *in natura* (SM) e sabugo de milho misturado com sabugo de milho carbonizado numa proporção de 50:50 (SMC-50%-50%). A proporção de 25:75 (SMC-25%-75%) da mesma mistura não foi possível avançar com a produção de briquetes, por vários motivos como a não compactação após a prensagem, e ao longo da análise imediata notou-se um baixo teor de poder calorífico, elevados teores de cinzas e baixos teores de carbono fixo, mostrando-se não viável para testes subsequentes, como o teste de friabilidade.

A compactação foi realizada aplicando-se uma pressão constante de 10 MPa e temperatura de 120°C. Após a compactação, um ventilador foi usado para permitir um resfriamento rápido.



Figura 12: Equipamento utilizado para a produção de briquetes; Briquetes de sabugo de milho (SM); Briquetes da mistura de sabugo de milho e sabugo de milho carbonizado em 50:50 (SMC-50%-50%)

### 3.2.9. Estabilidade e Teste de expansão

A estabilidade dos briquetes é avaliada em diferentes momentos após a sua fabricação, como 0h, 2h, 24h e 48h, quando eles já atingiram a estabilização, ou seja, não há mais alterações em sua altura e diâmetro. Esses dados de estabilidade são importantes para prever possíveis variações nos briquetes durante o armazenamento, devido a factores como temperatura, pressão e humidade do ambiente. Após a avaliação da estabilidade, são realizados outros testes, como de expansão, friabilidade, resistência à compressão, índice de combustão, fervura e emissões.

O teste de expansão foi realizado por meio da medição da altura dos briquetes utilizando um paquímetro digital da marca *Mitutoyo*, modelo *CD-6 CSX*. Foram feitas três medições em três briquetes diferentes, produzidos nas mesmas condições de temperatura, pressão e humidade. As medições foram realizadas nos intervalos de 0,

2, 24 e 48 horas, após a verificação de que os briquetes não apresentavam mais alterações em suas dimensões.

A fórmula abaixo foi usada para calcular a expansão:

$$\text{Expansão}_{(t=t)} = \frac{h_{(t=t)} - h_{(t=0)}}{h_{(t=0)}} \times 100\% \quad \text{Equação 16}$$

Onde:

h - Altura do briquete em (mm); e

t - Tempo em (horas).



Figura 13: Paquímetro digital utilizado para a medição da expansão dos briquetes

### 3.2.10. Friabilidade

Para medir a facilidade de desintegração ou o nível de desgaste e atrito dos briquetes, foi necessário colocá-los em um tambor rotativo a 40 rotações por minuto durante 5 minutos. Foram usados três briquetes neste teste, sendo pesados antes e depois de serem colocados no tambor rotativo, a fim de calcular a percentagem de friabilidade.

De acordo com Quirino (1991), para o teste de friabilidade foram necessários 15 minutos de rotação em um tambor rotativo de 35 rpm (rotações por minuto), onde por cada teste foi necessário 500 g de briquetes.

Para calcular a friabilidade dos briquetes a fórmula abaixo foi necessária:

$$\text{Friabilidade} = \frac{m_{\text{antes}} - m_{\text{depois}}}{m_{\text{antes}}} \times 100\% \quad \text{Equação 17}$$

Onde:

$m_{\text{antes}}$  - Massa antes de introduzir no tambor em (g); e

$m_{\text{depois}}$  - Massa depois da retirada do tambor em (g).



Figura 14: Tambor rotativo utilizado para a friabilidade e Briquetes depois do teste de friabilidade

### 3.3. Índice de combustão

O teste de índice de combustão em briquetes é um conjunto de parâmetros técnicos que avaliam a eficiência, qualidade e desempenho de um combustível durante seu processo de queima. Para avaliar o comportamento dos briquetes durante a queima foi usado um equipamento semelhante ao proposto por Quirino (1991).

O sistema foi equipado conforme Figura 15, sendo composto pelo combustor, um anteparo de chapa metálica (para proteger a combustão da movimentação do ar), uma balança de precisão 5g e uma placa de madeira (para proteger a balança do calor da combustão).



Figura 15: Equipamentos usados para medição de ICOM

De acordo com Quirino (1991), o sistema permite avaliar o comportamento dos briquetes durante a combustão, também possibilita a verificação da temperatura e a variação da massa do combustível que está sendo consumida a cada instante durante a combustão, para possivelmente determinar curvas de temperatura versus tempo, massa versus tempo e massa versus temperatura.

O cálculo do ICOM segue a equação abaixo:

$$ICOM = \frac{A \times B}{C \times 100}$$

Equação 18

Onde:

**ICOM** - Índice de combustão (Adimensional)

**A**- Percentagem do tempo de teste no qual a temperatura permanece acima de 150°C, tomada em relação ao tempo total de 120 min;

**B**- Percentagem da temperatura máxima atingida no teste, em relação à temperatura de 150°C;

**C**- Percentagem da massa total consumida gerando temperaturas acima de 150°C.

Foram realizadas três repetições por cada tipo de briquete para garantir a reprodutibilidade dos ensaios. Para efeito comparativo, este ensaio também foi realizado para o carvão vegetal e lenha.

### 3.4. Teste de fervura da água

De acordo com Victorino (1995), o teste de fervura da água é uma curta e simples simulação do procedimento padrão de cozedura de alimentos. Ele mede a lenha ou o carvão consumido e o tempo necessário para simular o processo de cozedura. O WTB (*Water Boiling Test*), usa água para simular a comida numa quantidade padrão de 2/3 de capacidade total da panela. O teste possui as fases de alta potência (A.P) e baixa potência (B.P).

A fase de alta potência envolve o aquecimento da quantidade padrão da água desde a temperatura ambiente até a ebulição o mais rápido possível e manter essa ebulição na alta potência durante 15 min.

A fase de baixa potência, a potência do fogão é reduzida a um nível mais baixo, suficiente para manter a água a 2°C abaixo da temperatura normal durante uma hora (60min).

O teste tomou a seguinte sequência:

- i. Pesou-se a quantidade inicial de briquetes (600 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. Exactamente 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;
- ix. Depois dos 60 minutos, repetiu-se os passos descritos no ponto.

Neste trabalho o WBT é repetido 3 vezes para cada tipo de amostra para assegurar a reprodutibilidade dos resultados.



Figura 16: Equipamento usado para o teste de fervura da água

1) **Calor libertado durante a combustão:** Corresponde a quantidade de calor libertado durante a combustão total de uma unidade de massa de combustível.

$$Q_{lib} = PCI \times m_{cc}$$

Equação 19

Onde:

$Q_{lib}$  - Calor libertado durante a combustão em (kcal);

$PCI$  - Poder calorífico inferior do combustível em (kcal/kg); e

$m_{cc}$  - Massa de combustível consumido em (kg).

2) **Calor absorvido pela água:** É o calor necessário para elevar a temperatura de uma certa massa de água até a ebulição.

$$Q_{abs} = m_{início} \times C_e \times (T_{final} - T_{início})$$

Equação 20

Onde:

$Q_{abs}$  - Calor absorvido pela água em (kcal);

$m_{início}$  - Massa da água no início do teste em (kg);

$C_e$  - Calor específico da água em (1kcal/kg.°C);

$T_{final}$  - Temperatura final da água em (°C); e

$T_{início}$  - Temperatura inicial da água em (°C).

3) **Calor latente de vaporização:** É a quantidade de calor necessário para transformar uma certa massa de água em vapor.

$$Q_{vap} = \Delta m_{vap} \times L$$

Equação 21

Onde:

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

$\Delta m_{vap}$  - Massa de água evaporada em (kg); e

$L$  - Calor latente de vaporização da água em (539 kcal/kg).

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

$$\eta = \frac{Q_{vap} \times Q_{abs}}{Q_{lib}} \quad \text{Equação 22}$$

5) **Potência:** Exprime a quantidade de calor libertado pelo combustível por unidade de tempo.

$$P = \frac{Q_{lib}}{t} \quad \text{Equação 23}$$

Onde:

**P** - Potência em (kW);

**Q<sub>lib</sub>** - Calor libertado durante a combustão em (kcal); e

**t** - Duração do teste em (s).

6) **Consumo específico:** É a razão entre a massa de combustível consumido e a massa de água vaporizada.

$$C_e = \frac{m_{cc}}{\Delta m_{vap}} \quad \text{Equação 24}$$

Onde:

**m<sub>cc</sub>** - Massa de combustível consumido em (kg);

**Δm<sub>vap</sub>** - Massa de água evaporada em (kg); e

**C<sub>e</sub>** - Consumo específico.

### 3.5. Análise estatística dos resultados

Microsoft Excel foi utilizado para realizar uma análise detalhada dos resultados obtidos. Foi aplicado um intervalo de confiança de 95% com o teste *t-student*, que é amplamente utilizado em estudos estatísticos para verificar a significância das diferenças entre médias amostrais. Além disso, foram calculados os desvios padrão das amostras. O desvio padrão é uma medida estatística importante que indica a dispersão ou variabilidade dos dados em relação à média. A análise estatística realizada com o auxílio do Microsoft Excel permitiu uma avaliação rigorosa e embasada dos dados colectados. Essa abordagem garante a confiabilidade e a robustez dos resultados, uma vez que possibilita identificar padrões, tendências e diferenças relevantes, contribuindo para uma melhor compreensão do fenómeno estudado.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Carbonização

A carbonização do sabugo de milho a 400°C foi realizada durante 2 horas. De acordo com Amuji (2024), variou-se o tempo de residência em 1h, 2h e 3h e obteve-se resultados quase semelhantes nos tempos 2h e 3h. Para facilitar o presente estudo e evitar gasto energético na carbonização do sabugo de milho optou-se pelo tempo de residência de 2h conforme mostra a Figura 17.

De acordo com os resultados obtidos, o sabugo de milho teve um rendimento de carbonização de 93,81% ± 0,04, superior aos 63,54% encontrados por Amuji (2024). A diferença significativa pode ser atribuída ao tamanho de partículas no momento de carbonização, neste trabalho a carbonização ocorreu após a redução de tamanho de partículas em partículas menores para reduzir os interstícios dentro do reactor.

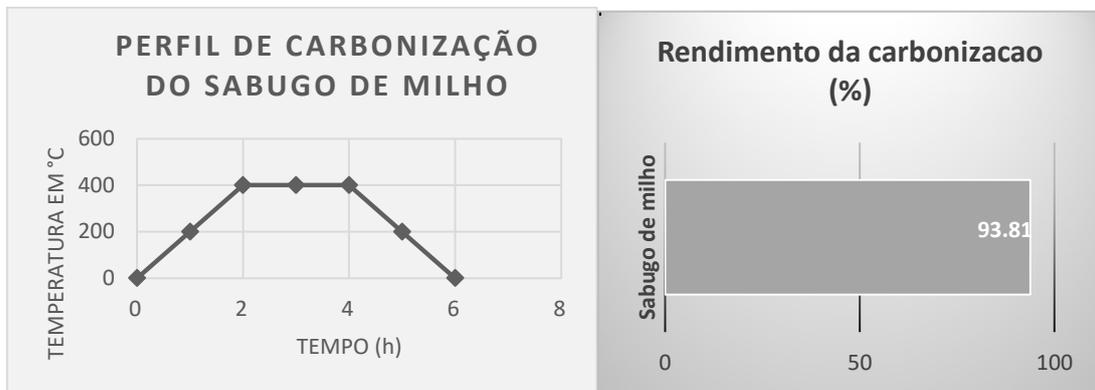


Figura 17: Perfil de carbonização e rendimento de carbonização (%)

### 4.2. Análise granulométrica

Os resultados da análise granulométrica são apresentados no Figura 18.



Figura 18: Resultados da Análise granulométrica

Pode-se observar por meio do Figura 18, que após o processo de peneiração as frações retidas incrementam ao longo da redução do tamanho da abertura do crivo

demonstrando assim que a maior fracção retida foi com partículas abaixo de 0,90 mm para ambas as amostras.

Segundo Alves (2014), o sabugo de milho obteve a maior percentagem de massa retida, 62,03% de retenção entre crivos de 0,106 a 0,425 mm. No presente estudo, obteve-se 97,26%  $\pm$  0,00, para o crivo de 0,90 mm. De acordo com Amuji (2024), 95% do sabugo de milho carbonizado apresentava granulometria abaixo de 0,50 mm. No presente estudo, obteve-se 97,86%  $\pm$  0,00, é ainda mais expressivo, mesmo sendo mistura com o sabugo *in natura*.

Diante disso a partir do estudo realizado com as duas amostras, SM e SMC-50%-50%, foi possível avaliar, que as duas amostras apresentaram diâmetro inferior a 0,90 mm. Observando-se homogeneidade do tamanho das partículas.

### 4.3. Análise imediata

A análise imediata avaliou parâmetros fundamentais para caracterização de biomassa, onde os resultados são apresentados pela média e a margem de erro (Intervalo de confiança). A análise imediata é fundamental para a escolha do combustível adequado, pois materiais com maior material volátil e menor carbono fixo são mais indicados para processos de combustão rápida, enquanto aqueles com maior teor de carbono fixo são mais eficientes para aplicações de longa duração. Assim, a caracterização dos combustíveis permite otimizar seu uso conforme a necessidade energética e térmica específica.

Tabela 1: Análise imediata

Análise imediata						
Biomassa	SM	SMC-100%	Mistura com carbonizado		Lenha ( <i>Brachystegia</i> )	Carvão Vegetal
			SMC-50%- 50%	SMC-25%- 75%		
TV (%)	82,15 $\pm$ 0,07	30,45 $\pm$ 0,08	53,80 $\pm$ 0,03	67,64 $\pm$ 0,03	83,00 $\pm$ 0,06	9,98 $\pm$ 0,03
TC (%)	2,82 $\pm$ 0,00	2,68 $\pm$ 0,00	12,95 $\pm$ 0,08	27,20 $\pm$ 0,08	1,18 $\pm$ 0,01	8,03 $\pm$ 0,00
CF (%)	15,03 $\pm$ 0,08	66,87 $\pm$ 0,08	33,25 $\pm$ 0,10	5,17 $\pm$ 0,06	15,81 $\pm$ 0,05	81,99 $\pm$ 0,03
Hr (%)	7,82 $\pm$ 0,00	10,33 $\pm$ 0,01	7,25 $\pm$ 0,02	8,05 $\pm$ 0,01	9,59 $\pm$ 0,02	5,94 $\pm$ 0,01

#### 4.3.1. Teor de humidade

O teor de humidade do sabugo de milho *in natura* (SM) apresentou um valor de 7,82%  $\pm$  0,00, próximo aos relatados na literatura por Silva (2020) (7,09%), Pereira & Seye (2012) (7,00%) e Oyelaran & Tudunwada, 2015) (9,19%). Essa proximidade sugere que o material estudado apresenta características semelhantes às já documentadas.

A humidade desempenha um papel crítico na qualidade dos briquetes, influenciando directamente o poder calorífico e a estabilidade mecânica. Uma amostra a ser usada para a produção de briquetes deve ter humidade entre 8% e 12%, (Ibrahim *et al.*, 2023). Valores inferiores ou superiores comprometem a integridade estrutural, resultando em produtos quebradiços como ilustra a Figura 19. Para o sabugo de milho carbonizado (SMC-100%) obteve-se um teor médio de humidade de  $10,33\% \pm 0,01$ , a mistura do sabugo de milho carbonizado e sabugo de milho *in natura* (SMC-25%-75%) obteve-se um teor médio de humidade de  $8,05\% \pm 0,01$  e a lenha obteve-se  $9,59\% \pm 0,02$  como teor de humidade, estes na faixa recomendada. Uma humidade controlada de briquetes favorece um melhor desempenho na combustão, facilidade de transporte e armazenamento.

No presente estudo, a mistura de sabugo de milho *in natura* e sabugo de milho carbonizado (SMC 50%-50%) apresentou um teor médio de humidade de  $7,25\% \pm 0,02$ , próximo ao valor do sabugo *in natura* (7,82%) e carvão vegetal um teor médio de  $5,94\% \pm 0,01$ , mas ainda abaixo da faixa recomendada. O valor baixo de humidade proporciona briquetes quebradiços, e com maior formação de pó, para além de favorecer o risco de combustão instantânea.

Os resultados encontrados demonstram a necessidade de humedecimento controlado das amostras durante a produção de briquetes, visando atingir a humidade ideal para garantir um elevado poder calorífico, combustão eficiente e sem fumaça e fuligem. A proximidade dos valores obtidos do sabugo de milho e lenha reforça a viabilidade do uso do sabugo de milho como matéria-prima, enquanto a análise da mistura evidencia a necessidade de optimização para equilibrar propriedades físicas e energéticas.



Figura 19: Briquete quebrado pela influência de humidade alta, acima de 12%

#### 4.3.2. Teor de voláteis

O teor de voláteis, uma propriedade crucial para avaliar o comportamento térmico da biomassa. Esta propriedade, representa a porção de materiais voláteis que se libertam da biomassa transformando-se em gases de CH<sub>4</sub>, CO, H<sub>2</sub> e compostos voláteis (aldeídos, alquenos, etc.) durante o aquecimento, entre 200<sup>o</sup>C e 600<sup>o</sup>C, (Mckendry, 2002). De acordo com Klautau (2008), quanto maior a concentração de voláteis

presentes na biomassa, maior será sua reactividade e essa maior reactividade, por sua vez, facilita a ignição.

No presente estudo, o sabugo de milho (SM) revelou um teor de voláteis notavelmente alto, atingindo 82,15%, conforme ilustrado na Tabela 1, este valor é próximo aos resultados obtidos por Silva & Ataíde (2019), 83,11%, e Alves (2014), 87,47%. Entretanto, ao submeter o sabugo de milho a um processo de carbonização completa (SMC-100%), observou-se uma queda significativa no teor de voláteis, que se estabilizou em 30,45%. Este valor está em consonância com os resultados encontrados por Rattanaphaiboon *et al.* (2022), que reportaram um teor de 33,05% para materiais similares. A redução no teor de voláteis após a carbonização é um fenômeno esperado, uma vez que o processo remove grande parte dos componentes voláteis presentes na biomassa original.

Ao analisar as misturas de sabugo de milho carbonizado (SMC) em diferentes proporções, constatou-se que a mistura SMC-25%-75% apresentou um teor de voláteis de 67,64%, enquanto a mistura SMC-50%-50% apresentou um teor de 53,80%. Esses resultados demonstram que a proporção de sabugo de milho carbonizado influencia directamente o teor de voláteis da mistura, com maiores proporções de material carbonizado resultando em menores teores de voláteis.

De acordo com a presente pesquisa, a análise do teor de materiais voláteis revelou uma disparidade significativa entre o carvão vegetal e a lenha. O carvão vegetal apresentou um teor de voláteis notavelmente baixo, registrando apenas 9,98%, mostrando deste modo que o carvão produz menos fumaça e menos gases de combustíveis em relação a lenha. A lenha ao exibir um teor de voláteis em cerca de 83,00%, mostra que este combustível contém mais compostos orgânicos leves que se desprendem em forma de gases quando aquecidos. A baixa quantidade de voláteis observada no carvão vegetal, bem como no SMC-100%, resulta do processo de carbonização ao qual o carvão vegetal assim como SMC-100% foram submetidos. A carbonização é um processo de tratamento térmico que remove grande parte dos compostos voláteis da biomassa, concentrando o carbono fixo. Essencialmente, a carbonização transforma a biomassa original, em um material mais rico em carbono e com menor teor de componentes que se vaporizam facilmente sob aquecimento (Lehmann & Joseph, 2015). Portanto, a diferença marcante no teor de voláteis entre a

lenha e o carvão vegetal reflecte directamente a eficácia do processo de carbonização em alterar a composição da biomassa.

#### **4.3.3. Teor de cinzas**

Com base nos dados apresentados na Tabela 1, o teor médio de cinzas do SM foi encontrado em cerca de 2,82%. Este valor se aproxima de resultados reportados em estudos anteriores por Silva & Ataíde (2019) (1,60%), Silvério (2013) (2,00%), e Paula (2010) (1,16%). Teores de cinzas baixo, sugerem uma maior percentagem de biomassa que foi queimada no processo de combustão, consequentemente uma boa eficiência térmica.

Em contraste, a biomassa proveniente de SMC-100% apresentou um teor de cinzas de 2,68%, um valor consideravelmente diferente dos 6,13% relatados por Rattanaphaiboon *et al.* (2022). Essa disparidade pode ser atribuída à presença de materiais inorgânicos, como areia, durante o processo de colecta da biomassa. A lenha demonstrou o menor teor de cinzas entre as amostras analisadas, com uma média de 1,18%.

Por outro lado, os teores de cinzas mais elevados foram observados nas amostras de SMC-25%-75% com 27,20%, SMC-50%-50% com 12,95% e no carvão vegetal com 8,03%, sugerindo neste caso que há alguma percentagem de biomassa que não foi queimada no processo de combustão. Valores altos de cinzas em briquetes podem sugerir uma fraca qualidade na matéria-prima inicial. Podem também proporcionar baixo rendimento energético. É importante notar que a alta concentração de cinzas em algumas amostras pode impactar negativamente sua qualidade como combustível.

Segundo Quirino (1991), as cinzas representam as substâncias que não sofrem combustão durante o processo de queima. Portanto, é esperado que materiais combustíveis de alta qualidade apresentem teores de cinzas mais baixos. Um baixo teor de cinzas não só contribui para uma maior resistência do briquete, como também está associado a um poder calorífico mais elevado, tornando o combustível mais eficiente.

O teor de cinzas é um indicador crucial da eficiência energética de um combustível. Altos valores de cinzas podem reduzir o poder calorífico, uma vez que a presença de materiais não combustíveis diminui a quantidade de energia libertada durante a

queima. Além disso, um alto teor de cinzas pode levar a uma combustão incompleta, resultando na liberação de emissões poluentes na atmosfera. Portanto, o controle do teor de cinzas é fundamental para garantir a utilização eficiente e sustentável de biomassa como fonte de energia (Quirino, 1991).

#### **4.3.4. Teor de carbono fixo**

Segundo Quirino (1991), combustíveis que apresentam elevados teores de carbono fixo tendem a possuir um processo de queima mais lento. Isso ocorre porque a maior quantidade de carbono fixo requer mais tempo para ser completamente consumida durante a combustão, resultando em um período de residência mais prolongado nos fornos. Em contrapartida, materiais com menor teor de carbono fixo queimam mais rapidamente, reduzindo o tempo necessário para a combustão completa.

Os resultados obtidos demonstraram que os teores de carbono fixo variam consideravelmente entre os diferentes tipos de biomassa analisados. O SMC-25%-75% apresentou um baixo teor de carbono fixo, de 5,17%, enquanto o SM registrou valor de 15,03%. Esse resultado é próximo ao encontrado por Silva & Ataíde (2019), 15,27%, e também relativamente próximo dos 18,32% identificados por Paula (2010). No entanto, os valores encontrados no presente estudo são significativamente inferiores aos 29,41% relatados por Amuji (2024) superiores aos 10,02% encontrados por Alves (2014).

A lenha apresentou um teor de carbono fixo de 15,81%, o que indica que esse material possui uma combustão relativamente rápida. Essa característica pode ser atribuída à sua composição e estrutura, que favorecem a liberação acelerada de energia durante a queima.

No entanto, entre as biomassas analisadas, os teores mais elevados de carbono fixo foram observados no carvão vegetal, mostrando, que este combustível queima mais devagar e por mais tempo em relação a lenha e aos briquetes em estudo. O SMC-100% apresentou um valor de 81,99%, enquanto o SMC-50%-50% registrou teor de 66,87%. Resultados esses superiores aos 59,04% reportados por Rattanaphaiboon *et al.* (2022), demonstrando que esse tipo de biomassa possui uma combustão mais lenta. Além disso, o SMC-50%-50% apresentou um teor de carbono fixo de 33,25%, evidenciando um comportamento intermediário em relação à taxa de queima. Os resultados obtidos reforçam a ideia de que biomassa com maior teor de carbono fixo é

mais eficiente para aplicações que exigem combustão prolongada, como em fornos e caldeiras industriais, onde a estabilidade térmica e a duração da queima são factores essenciais.

Dessa forma, os resultados obtidos confirmam que diferentes tipos de biomassa possuem características distintas de combustão, sendo que aquelas com maior teor de carbono fixo queimam mais lentamente, proporcionando uma libertação de energia mais gradual, enquanto aquelas com menor teor tendem a ser consumidas mais rapidamente pelo fogo. Essa variação no comportamento da queima tem implicações importantes para a escolha do combustível adequado para cada aplicação específica, seja para geração de calor em processos industriais, seja para uso doméstico.

#### 4.4. Análise elementar

A análise elementar na produção de briquetes tem como principal objectivo determinar a composição química dos materiais utilizados, garantindo qualidade, eficiência e sustentabilidade do produto final (Klautau, 2008). Os dados da análise elementar complementam os da análise imediata, neste estudo foram apenas obtidos valores de teores de hidrogénio, carbono e oxigénio. Os resultados apresentados na Tabela 2, estão em média.

Tabela 2: Análise elementar

Análise elementar						
Biomassa	SM	SMC-100%	Mistura com carbonizado		Lenha (Brachystegia)	Carvão Vegetal
			SMC-50%-50%	SMC-25%-75%		
Hidrogénio (%)	5,87	5,37	5,06	4,46	5,97	4,88
Carbono (%)	46,95	56,45	45,66	34,06	47,84	56,77
Oxigénio (%)	43,67	34,82	35,72	33,76	44,32	29,67

Os resultados encontrados para do SM, SMC-50%-50% e lenha foram próximos. Esse facto foi observado para o teor de hidrogénio, teor de carbono e o teor de oxigénio, o que demonstra a similaridade dos valores para o sabugo de milho obtidos por Paula (2010) (6,7%, 45,5% e 47,0% respectivamente) e por Rattanaphaiboon *et al.* (2022) (5%, 47,6% e 44,6% respectivamente). O carbono, hidrogénio e oxigénio são responsáveis pelo poder calorífico. O SMC-50%-50% obteve valores equilibrados o que sugere potencial para uso energético e com boa eficiência e menor emissão de gases (Rattanaphaiboon *et al.*,2022).

A análise elementar do SMC-100% foi próximo aos resultados encontrados para o carvão vegetal. Esses materiais apresentam um maior teor de carbono devido ao processo de carbonização a que foram submetidos (Lehmann & Joseph, 2015).

Valores baixos foram observados para o SMC-25%-75% que para o hidrogénio obteve-se a menor percentagem, 4,46%. Para carbono e oxigénio, foram obtidos 34,06% e 33,76%, respectivamente.

#### 4.5. Poder calorífico

Os resultados do poder calorífico estão apresentados na tabela abaixo.

Tabela 3: Poder calorífico

Poder calorífico						
Biomassa	SM	SMC-100%	Mistura com carbonizado		Lenha (Brachystegia)	Carvão Vegetal
			SMC-50%-50%	SMC-25%-75%		
PCS (kcal/Kg)	4325,55	6781,03	4790,64	2905,90	4426,93	7285,92
PCI (kcal/Kg)	4008,31	6491,30	4517,15	2664,95	4104,63	7022,29
PCU (kcal/Kg)	3647,79	5759,01	4145,99	2402,23	3653,61	6569,77

Os dados na Tabela 3, demonstram os resultados do poder calorífico superior (PCS), poder calorífico inferior (PCI) e poder calorífico útil (PCU), em Kcal/kg. O SMC-25%-75% obteve um menor valor do poder calorífico de 2.905,90kcal/kg. Os resultados do poder calorífico para SM, SMC-50%-50% e Lenha são similares, embora os resultados estejam abaixo do 5.045,41kcal/kg relatados por Amuji (2024). De acordo com Adetogun, *et al.*, (2014) o alto poder calorífico do sabugo do milho está directamente relacionado a baixa humidade, baixo teor de cinzas e ao elevado teor de carbono fixo, que aumenta com o tamanho aparente e a condição física do sabugo de milho.

O carvão vegetal obteve maiores valores em PCS de 7.285,92kcal/kg, PCI de 7.022,29kcal/kg e PCU de 6.569,77kcal/kg esses resultados encontram-se próximos aos 6.496kcal/kg, 5.722kcal/kg e 5.043kcal/kg encontrado por Matos (2021) respectivamente e 6.291,04kcal/kg, 6.258,64kcal/kg e 5.877,30kcal/kg respectivamente relatados por Makonya (2022). Júnior, *et al.*, (2014) na sua pesquisa encontrou o PCS de 6.427,01kcal/kg e PCI de 5.379,88kcal/kg para o carvão vegetal. Estes valores são inferiores aos determinados no presente estudo.

## 4.6. Densidade

### 4.6.1. Densidade a granel

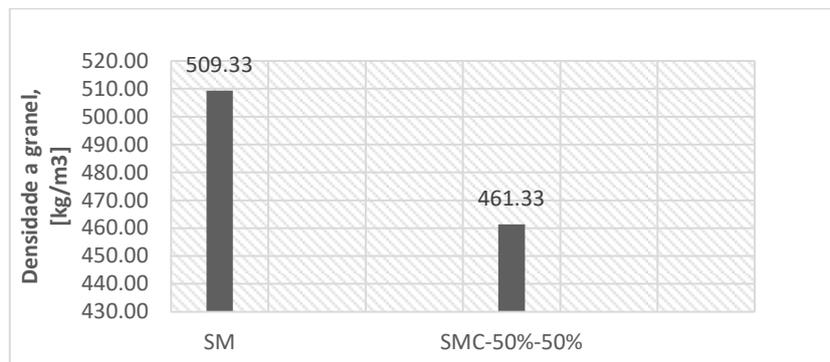


Figura 20: Resultados de densidade a granel e seus respectivos intervalos de confiança

O sabugo de milho (SM) apresentou maior valor de densidade a granel  $509,33 \pm 0,06\text{kg/m}^3$ , em relação ao SMC-50%-50%,  $461,33 \pm 0,17\text{kg/m}^3$ . Significando que durante o transporte e armazenamento o SM levará menor volume comparado com o SMC-50%-50%.

Para o sabugo de milho, Amuji (2024) em seu estudo, obteve um valor de densidade a granel de  $210,94\text{kg/m}^3$ . Essa diferença pode se dar devido a diferença de tamanho das partículas utilizadas.

A densidade a granel por levar em consideração os espaços vazios entre as partículas, fornece informações importantes para a logística, transporte e armazenamento da biomassa (Manjate, 2023).

### 4.6.2. Densidade aparente

O resultado da densidade aparente e seu intervalo de confiança estão apresentados na figura abaixo.

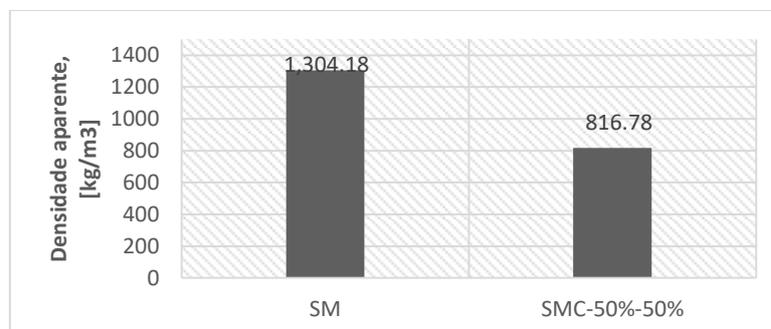


Figura 21: Resultados de densidade aparente e seus respectivos intervalos de confiança

No Erro! A origem da referência não foi encontrada., observa-se o resultado da densidade aparente de SM e SMC-50%-50%,  $1.304,18 \pm 0,66\text{kg/m}^3$  e  $816,78 \pm 0,45\text{kg/m}^3$  respectivamente. O resultado da densidade aparente é 2 duas vezes mais

que o resultado obtido da densidade a granel, facto que demonstra que na produção dos briquetes, o volume mássico dos briquetes reduziu 2 vezes mais comparado com o volume mássico antes da sua produção. O sabugo de milho no presente trabalho apresentou melhores resultados comparados com a pesquisa feita por Paula (2010) ( $869\text{kg/m}^3$ ), quanto menor o tamanho da partícula mais compactado o briquete será, aumentando assim a sua densidade aparente. Facto que justifica altos valores de densidade aparente do presente estudo.

#### 4.6.3. Densidade energética

O resultado da densidade energética esta apresentado na figura abaixo.

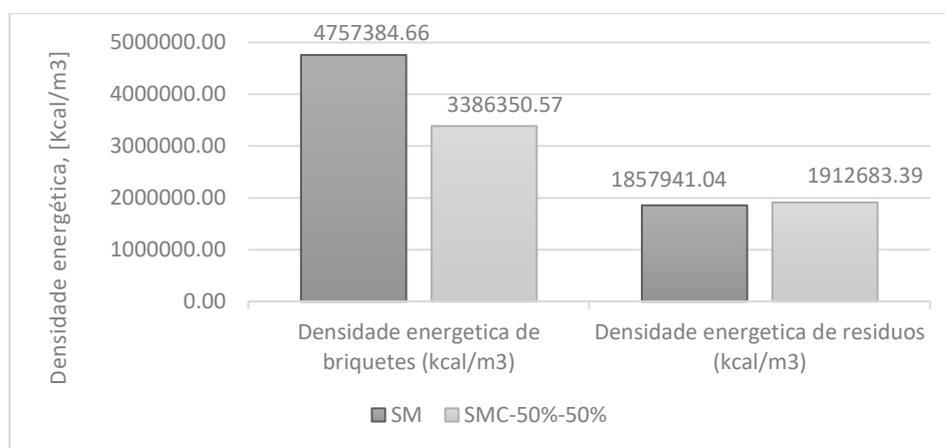


Figura 22: Resultados de densidade energética

Observando o resultado da densidade energética verifica-se que a densidade energética dos briquetes é quase 2 a 3 vezes maior que a densidade energética dos resíduos, isso mostra que os briquetes produzem maior energia por unidade de volume comparado com os seus resíduos (biomassa antes da compactação).

A densidade energética do SM ( $4.757.384,66\text{ kcal/m}^3$ ) é muito superior do que de SMC ( $3.386.350,57\text{ kcal/m}^3$ ) devido a sua densidade aparente, facto que influenciou muito, mesmo o SMC tendo maior poder calorífico, porque a relação é directa entre densidade aparente e o poder calorífico.

#### 4.7. Produção de briquetes

No presente trabalho, os briquetes foram produzidos à pressão de 10MPa e  $120^\circ\text{C}$  de temperatura. Foram produzidos briquetes de sabugo de milho (SM), briquetes de sabugo de milho misturado com o sabugo de milho carbonizado com proporção mássica de 50:50 (SMC-50%-50%) e briquetes de sabugo de milho misturado com o sabugo de milho carbonizado com proporção mássica de 25:75 (SMC-25%-75%).



Figura 23: Briquete quebrado e esfarelado produzido a partir de SMC-25%-75%

Porém, não foi possível continuar com a produção dos briquetes de SMC-25%-75%, pois estes após a compactação apresentavam deformidades. Estes briquetes apresentavam-se muito friáveis, por vezes quebradiços e não compactados.



Figura 24: Briquetes produzidos a partir de A- SM e B- SMC-50%-50%

#### 4.8. Estabilidade dimensional e teste de expansão

O resultado do teste de estabilidade dimensional dos briquetes está apresentado na figura abaixo.

A estabilidade dimensional dos briquetes foi avaliada pela sua expansão após a sua fabricação, em 0h, 2h, 24h e 48h, até atingirem a estabilização, ou seja, quando não houvesse mais alterações nas suas dimensões (altura e diâmetro).

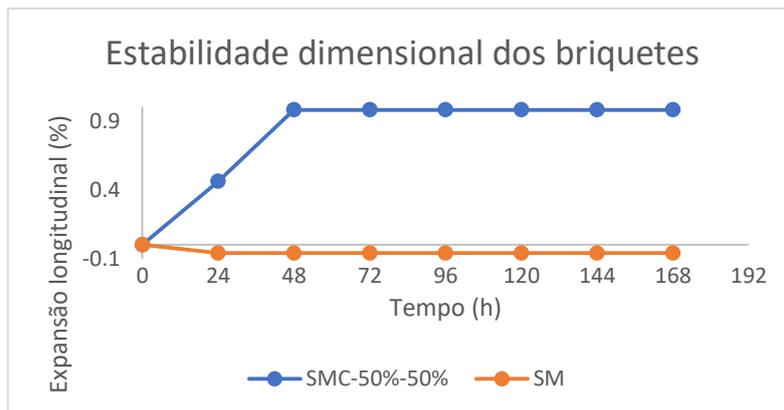


Figura 25: Estabilidade dimensional dos briquetes

O sabugo de milho (SM) estabilizou dentro de 24h com uma expansão longitudinal de  $-0,1 \pm 0,00\%$ , enquanto que para o SMC-50%-50% foram necessários 48h, ou seja, 2 dias para estabilizar com uma expansão longitudinal de  $0,98 \pm 0,01\%$ .

O briquete de SM durante o seu tempo de estabilização baixou a sua expansão, isso quer dizer que reduziu a sua altura com andar do tempo, e para os briquetes feitos por SMC-50%-50% a sua expansão aumentou com o andar do tempo. Este facto justifica a qualidade dos briquetes pelo nível de compactação e a não influência da humidade do ambiente em que foram armazenados dos briquetes após a sua produção, sendo o briquete de SM mais estável, não foi muito influenciado pelo ambiente.

#### 4.9. Friabilidade

Os resultados do teste de friabilidade estão apresentados na figura abaixo.

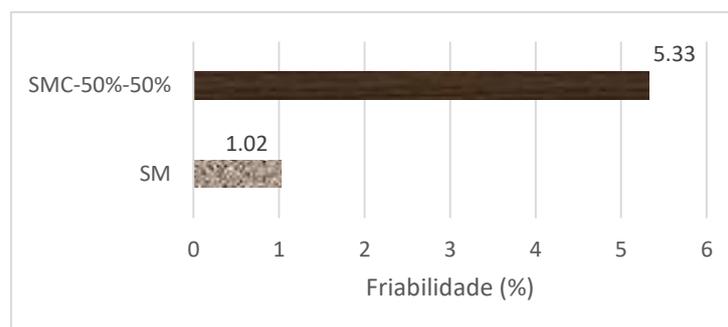


Figura 26: Resultados de friabilidade

A partir da figura acima, pode-se notar que os briquetes feitos de SMC-50%-50% ( $5,33 \pm 0,02\%$ ) se desfazem mais facilmente ou seja apresentam um índice de friabilidade superior em relação aos briquetes de SM ( $1,02 \pm 0,01\%$ ). Este fenómeno pode ter ocorrido devido a diferença dos materiais usados. O SMC-50%-50% apresenta fibras que provavelmente não se agregaram tão perfeitamente quando transformadas em briquetes, uma vez que estas foram misturadas com o sabugo carbonizado, o que pode ter deixado o produto final mais quebradiço e friável.

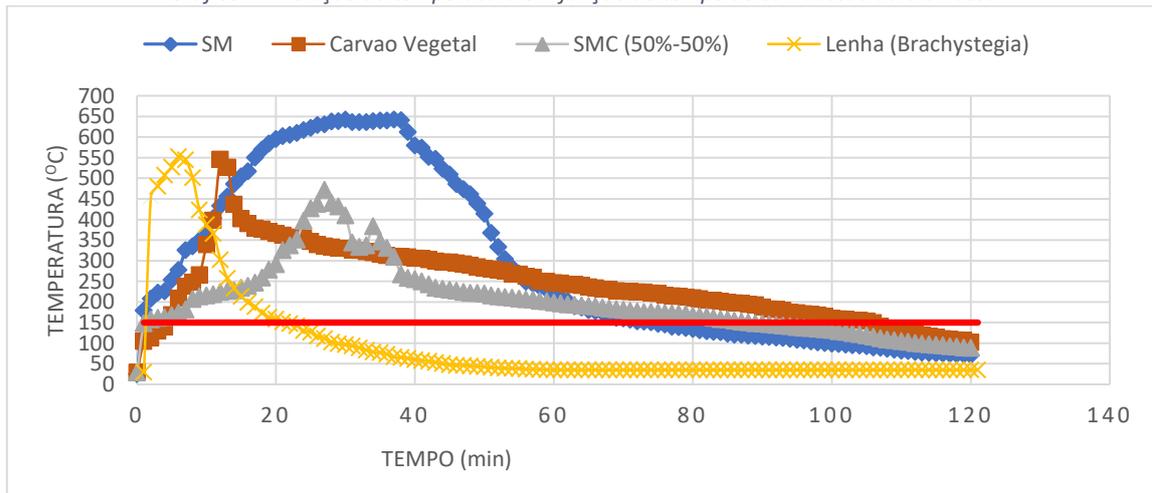
De acordo com Oliveira *et al.* (1978) briquetes com teor de a friabilidade abaixo de 10%, classificam-se como sendo pouco friáveis.

Os briquetes produzidos no presente trabalho apresentam friabilidade abaixo de 10%, mostrando-se pouco friáveis.

#### 4.10. Índice de combustão

Na Tabela 4, são apresentados os resultados de índice de combustão dos briquetes em estudo, e nos Gráfico 1 e Gráfico 2. O ICOM avalia o desempenho térmico do combustível durante a combustão, considerando o tempo, temperatura e massa consumida.

Gráfico 1: Evolução da temperatura em função do tempo de combustão da biomassa



O gráfico acima ilustra o comportamento da temperatura dos combustíveis sólidos durante a combustão em função do tempo. O carvão vegetal obteve a maior temperatura, onde atingiu cerca de 550<sup>0</sup>C em 12 min. Para essa biomassa, após 12 min, nota-se diminuição da temperatura em função do tempo.

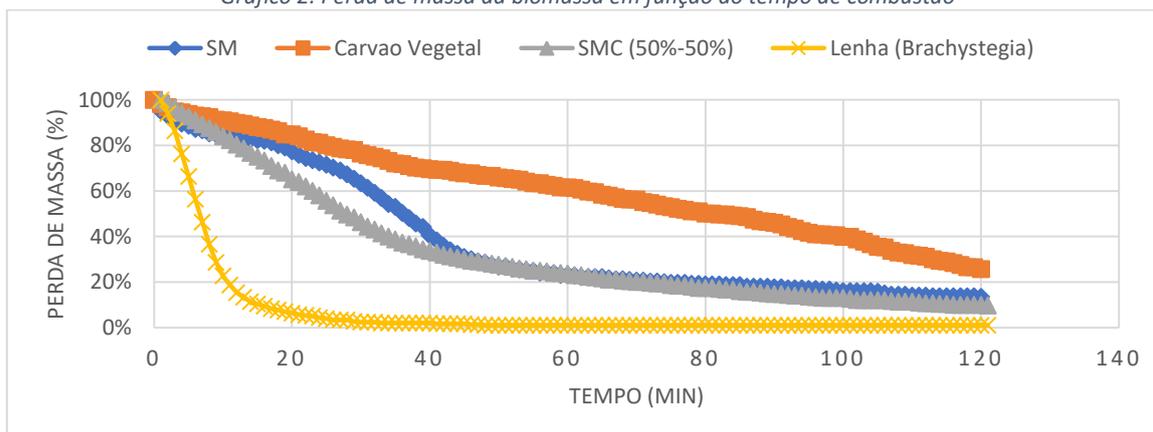
Para o briquete SMC-50%-50%, verificou-se uma temperatura máxima em cerca de 500<sup>0</sup>C em 27 min. Após atingir o pico, verificou-se uma diminuição da temperatura com o tempo até aos 32 min, depois desse tempo, houve um pequeno acréscimo da temperatura em cerca de 400<sup>0</sup>C e voltou a observar-se a diminuição da temperatura em função do tempo. Este comportamento, pode ser devido ao estado do tempo no dia de teste, mostrando a importância de manter o local fora das influências externas para obter melhores resultados.

O briquete produzido a partir de SM apresentou uma temperatura máxima em cerca de 650<sup>0</sup>C aos 25 min, esta temperatura teve a tendência de manter constante por cerca de 12 min, depois desse tempo, verificou-se a perda da temperatura em função do tempo.

A lenha obteve resultados baixos fora do esperado, com uma temperatura máxima de 553<sup>0</sup>C, em cerca de 6 min, depois desse tempo verificou-se uma redução gradual de temperatura, ficando desta forma a temperatura mínima acima dos 150<sup>0</sup>C.

A presença de voláteis pode influenciar na redução da temperatura no momento da combustão, quanto menor for o teor de voláteis, maiores são as chances de obter temperaturas altas durante a combustão do combustível, a humidade também desempenha uma função importante na combustão.

Gráfico 2: Perda de massa da biomassa em função do tempo de combustão



O gráfico acima ilustra a perda mássica dos combustíveis em estudo em função do tempo de combustão do combustível, mostrando que o melhor rendimento foi obtido pelo carvão vegetal, ou seja, o carvão vegetal conseguiu reter temperaturas acima de 150°C por longo tempo e perdendo pouca massa. O SM que teve resultados quase similares ao do SMC-50%-50%, mas o que teve um resultado uniforme foi SMC-50%-50%.

A lenha obteve resultados admiravelmente baixos, a lenha perde facilmente a massa mantendo temperaturas elevadas, isso significa que, para garantir melhor rendimento na combustão é preciso de grande quantidade em quilogramas de lenha.

De acordo com Quirino (1991), para o teste de ICOM dos briquetes, espera-se que um bom briquete forneça as mais altas temperaturas durante o maior tempo e consumindo menor quantidade de massa possível.

Tabela 4: Resultados do teste de ICOM

Material ou Briquete	ICOM
Briquete de SM	0,61 ± 0,01
Briquete de SMC-50%-50%	0,65 ± 0,00
Lenha (Brachystegia)	0,13 ± 0,00
Carvão vegetal	0,99 ± 0,00

O índice de combustão (ICOM) obtido para os briquetes em estudo apresentou variação entre 0,65 ± 0,00 e 0,61 ± 0,01. O valor mais elevado foi registrado para o briquete formulado com a mistura de sabugo de milho carbonizado, SMC-50%-50%, atingindo 0,65 ± 0,00, enquanto o menor valor foi observado para o briquete composto exclusivamente por sabugo de milho (SM), com 0,61 ± 0,01. Esses resultados indicam uma maior eficiência na combustão do briquete SMC-50%-50%, possivelmente devido

à interação entre as propriedades físico-químicas das biomassas combinadas e consequentemente é ideal para o uso doméstico.

Para efeito de comparação, os valores médios de ICOM para as biomassas convencionais, como a lenha e o carvão vegetal, situaram-se entre  $0,13 \pm 0,00$  e  $0,99 \pm 0,00$ , respectivamente, demonstrando a ampla variabilidade entre diferentes tipos de biocombustíveis sólidos.

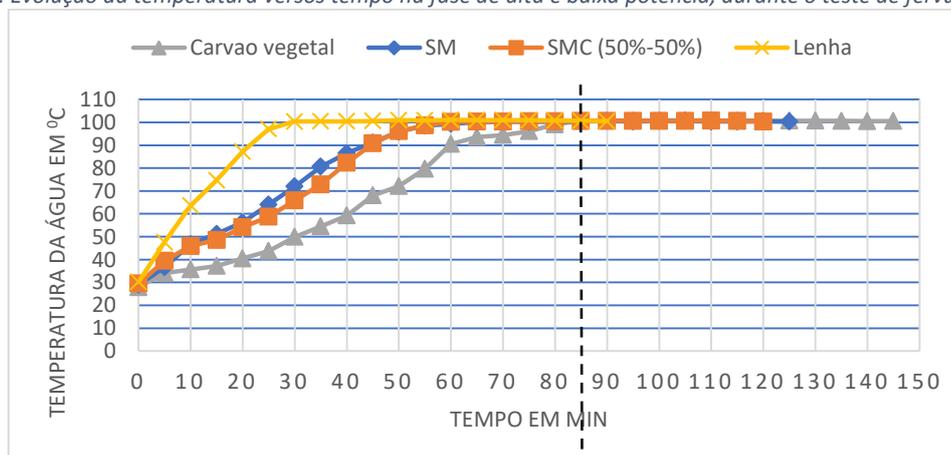
Os resultados obtidos por Paula (2010), reportaram um ICOM de 0,6308 para briquetes de sabugo de milho, valor comparável aos encontrados neste estudo. No mesmo trabalho, os índices de combustão para madeira e carvão vegetal foram de 0,5169 e 0,5572, respectivamente, evidenciando a superioridade dos briquetes em termos de combustíveis frente a essas biomassas tradicionais. Adicionalmente, o estudo de Manjate (2023), relatou um ICOM de  $0,82 \pm 0,17$  para a madeira, indicando que factores como tipo de espécie, grau de secagem e densidade aparente influenciam significativamente no desempenho térmico.

Esses dados obtidos reforçam o potencial dos briquetes produzidos a partir de misturas otimizadas como alternativas viáveis e eficientes em processos de conversão energética, superando inclusive alguns biocombustíveis amplamente utilizados.

#### 4.11. Teste de fervura da água

O teste de fervura da água simulou o uso dos briquetes na cozedura dos alimentos, medindo o tempo para ferver a água, a massa de combustível consumida e o rendimento térmico. Os resultados presentes no Gráfico 3 mostram a evolução da temperatura da água com o tempo, para os dois tipos de briquetes, lenha e carvão vegetal. A fase de alta potência (A.P.) vai de 0 a 85 minutos e a fase de baixa potência (B.P.) começa do minuto 85 até ao minuto 150.

Gráfico 3: Evolução da temperatura versus tempo na fase de alta e baixa potência, durante o teste de fervura da água.



A partir desse gráfico, nota-se que a taxa de variação de temperatura cresce de forma moderada desde a temperatura inicial da água até a um instante em que ela tende a estabilizar-se em volta de um ponto (temperatura de ebulição) que é designada da fase de alta potência.

Na baixa potência, o calor consumido pelo sistema é responsável por transformar a água em estado líquido para o estado gasoso, sem a variação da temperatura da água, por isso, a temperatura da água é praticamente constante.

A Tabela 5 abaixo, apresenta os resultados quantitativos de potência, consumo específico e eficiência do teste de fervura da água nas fases de (A.P. e B.P.).

*Tabela 5: Resultados do teste de fervura da água*

Biomassa	Tempo (min)		Potência (kW)		Consumo específico (kg/kg)		Rendimento (%)
	A. P	B. P	A. P	B. P	A. P	B. P	
SM	65	110	1,644	1,279	1,024	0,913	33,840
SMC-50%-50%	67,667	112,667	1,817	1,469	0,508	0,478	55,991
Lenha (Brachystegia)	40	85	3,709	1,978	1,510	0,802	29,349
Carvão vegetal	83	128	1,565	1,397	0,253	0,199	66,385

O fogão à carvão usado para o teste de fervura teve um rendimento energético das biomassas utilizadas que variam entre 29,349% a 66,385%. Onde 29,349% são da lenha, um aproveitamento de 33,840% foi observado para SM, 55,991% observado para SMC-50%-50% e 66,385% para o carvão vegetal. Em termos quantitativos de massa, isso significa que em 1.000kg de lenha apenas 294kg de lenha foram aproveitados energeticamente. Em 1.000kg de briquetes apenas 338kg e 560kg de SM e SMC-50%-50% foram aproveitados energeticamente, respectivamente e em 1.000kg de carvão vegetal apenas 664kg de carvão vegetal foram aproveitados energeticamente. A restante quantidade constitui as perdas mássicas e conseqüentemente perdas energéticas no fogão à carvão. Observa-se também que o SMC-50%-50% apresenta resultados próximos ao do carvão vegetal, mostrando-se um ótimo substituto do carvão vegetal, vindo a superar a potência do carvão vegetal tanto na alta potência assim como na baixa potência. O briquete SM supera a lenha e pode ser um substituto ideal da lenha, reduzindo assim o abate de árvores nas comunidades para obtenção da lenha para o confeccionamento dos seus alimentos.

Para o consumo específico, importa referir que a fase de alta potência indica a massa de combustível consumida para produzir um quilograma de vapor de água, e a fase da baixa potência indica a massa de combustível consumida para manter um quilograma de água no patamar ou dois graus abaixo da temperatura de ebulição. Para a evaporação de 1kg de água são necessários 0,253kg de carvão vegetal na alta potência e 0,199kg de carvão vegetal na baixa potência, estes resultados superam das outras biomassas. Porém, o SMC-50%-50% apresenta resultados próximos do carvão vegetal sendo necessário 0,508kg de briquetes na alta potência e 0,478kg de briquetes na baixa potência para evaporar 1kg de água. Os briquetes de Sabugo de milho (SM), precisam de 1,024kg para evaporar 1kg de água e a lenha de 1,510kg na fase de alta potência, e 0,913kg para evaporar 1kg de água na fase de baixa potência e a lenha precisa de 0,802kg.

A potência do fogão em relação a lenha foi elevada devido ao tempo em que esta leva para fazer com que a temperatura da água alcance o seu ponto de ebulição (alta potência), ela levou muito pouco tempo comparado com as outras biomassas.

Notavelmente os briquete feitos neste trabalho podem substituir de forma sustentável a lenha e alternativamente substituírem o carvão vegetal, embora o carvão vegetal tenha obtido maior rendimento e menor consumo específico.

## 5. CONCLUSÕES

O presente estudo demonstrou o potencial energético do sabugo de milho, tanto *in natura* quanto carbonizado, como matéria-prima para a produção de briquetes sustentáveis. Por meio da caracterização física, química e térmica das amostras, verificou-se que os briquetes produzidos apresentam propriedades energéticas relevantes em comparação com lenha e carvão vegetal, com destaque para a mistura de sabugo de milho com seu carbonizado na proporção 50%-50%.

Entre os principais resultados obtidos, destacam-se:

- O sabugo de milho *in natura* (SM) apresentou alto teor de voláteis (82,15%) e baixo teor de cinzas (2,82%), características que favorecem uma ignição rápida e eficiente.
- A mistura sabugo de milho com o seu carbonizado (SMC-50%-50%) apresentou o melhor equilíbrio entre carbono fixo (33,25%) e poder calorífico útil (4.145,99 kcal/kg), além da boa densidade energética, revelando-se a alternativa mais eficiente entre os briquetes estudados, com combustão mais lenta e estável.
- O poder calorífico superior (PCS) do briquete SMC-50%-50% (4.790 kcal/kg) aproximou-se do valor observado para o carvão vegetal (7.285 kcal/kg), evidenciando seu potencial como fonte energética renovável.
- A densidade energética dos briquetes foi duas a três vezes superior à da biomassa não compactada, o que destaca as vantagens da briquetagem, sobretudo para fins de armazenamento e transporte.
- No teste de combustão (Índice de Combustão – ICOM), o briquete SMC-50%-50% apresentou desempenho próximo ao do carvão vegetal e superior ao da lenha, com ICOM de 0,65, garantindo maior tempo de queima e temperaturas estáveis.
- No teste de fervura de água (Water Boiling Test-WBT), os briquetes SMC-50%-50% alcançaram rendimento de 55,99%, frente aos 29,35% da lenha, demonstrando eficiência térmica significativamente superior para uso doméstico.
- Os briquetes apresentaram boa estabilidade dimensional e baixa friabilidade, atendendo aos parâmetros aceitáveis para aplicações energéticas.
- A utilização do sabugo de milho contribui para a redução do descarte inadequado de resíduos agrícolas, evitando emissões de gases de efeito estufa associadas à queima a céu aberto.

- Os briquetes mostraram-se uma alternativa viável à lenha e ao carvão vegetal, promovendo a redução do desmatamento e impulsionando práticas alinhadas à economia circular.

Com base nesses resultados, conclui-se que o uso do sabugo de milho, seja *in natura* ou misturado ao seu carbonizado, constitui uma alternativa energética viável, sustentável e amplamente disponível, com elevado potencial para substituir parcialmente a lenha e o carvão vegetal.

## 6. RECOMENDAÇÕES

Com base nos resultados da pesquisa, apresentam-se as seguintes recomendações:

- Investigar o uso de aglutinantes naturais que melhorem a resistência mecânica dos briquetes sem comprometer sua performance energética.
- Avaliar o impacto de diferentes temperaturas de carbonização sobre o rendimento energético e as propriedades físico-químicas dos briquetes.
- Realizar estudos adicionais sobre as emissões atmosféricas durante queima dos briquetes, com objectivo de assegurar a conformidade ambiental.
- Testar diferentes proporções de mistura entre o sabugo de milho *in natura* e o carbonizado, com vista a otimizar tanto a resistência mecânica quanto o desempenho energético.
- Avaliar o desempenho dos briquetes em equipamentos de queima, como fogões melhorados e caldeiras industriais, para avaliar a eficiência energética.
- Estudar a viabilidade económica da produção em larga escala, considerando custos de matéria-prima, processamento e logística de distribuição.
- Promover a capacitação de agricultores e cooperativas para a colecta, processamento e comercialização de briquetes, criando alternativas sustentáveis de geração de renda.
- Avaliar o impacto socioeconómico da produção de briquetes em comunidades locais, com enfoque na criação de empregos e melhoria da qualidade de vida.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adetogun, A. C., Ogunjobi, K. M., & Are, D. B. (2014). *Combustion Properties of Briquettes Produced From Maize Cob of Different Particle Sizes*. Journal of Research in Forestry, Wildlife and Environmental.
- Agro NEWS. (24 de Julho de 2024). *O que é: Resíduos Agrícolas*. Obtido de AgroNEWS: <https://agronews.tv.br/glossario/o-que-e-residuos-agricolas/>
- Albuquerque, I., Alencar, A., Angelo, C., Azevedo, T., Barcellos, F., Coluna, I., . . . Zimbres, B. (2010). *ANÁLISE DAS EMISSÕES BRASILEIRAS DE GASES DE EFEITO ESTUFA E SUAS IMPLICAÇÕES PARA AS METAS DE CLIMA DO BRASIL 1970-2019*. Brasil: Observatório do Clima.
- Alves, D. A. (2014). *Avaliação do potencial energético de resíduos de produção agrícola provenientes do beneficiamento da mandioca e do milho*. Maceio: CTEC.
- Amuji, Y. N. (2024). *Estudo do potencial da biomassa (casca e sabugo de milho) para produção e uso de briquetes*. Maputo.
- Associação Lusófona de Energias Renováveis (ALER). (2017). *Energias Renováveis em Moçambique – Relatório Nacional do Ponto de Situação (Segunda Edição)*. (I. S. Bandeira, Trad.) Moçambique .
- ASTM. (2019). *Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels*. USA: ASTM.
- ASTM. (2020). *Standard Test Method for Ash in Biomass*. USA: ASTM.
- Bianchet, R. T., Provin, A. P., Garcia, G. D., Cubas, A. L., Dutra, A. R., & Magnago, R. F. (2020). *PRODUÇÃO DE BRIQUETES UTILIZANDO RESÍDUOS AGRÍCOLAS DA LARANJA E BORRA DO CAFÉ*. Brasil : Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental . doi:10.19177/rgsa.v9e0120204-19
- (2013). *Biomass Energy Strategy (BEST) Mozambique*. Ministry of Energy Mozambique. EUEI PDF.
- Borghezan, F. (23 de Janeiro de 2024). *Galeria Rural*. Obtido em 02 de Abril de 2025, de Os 10 Maiores Produtores Mundiais de Milho e seu Impacto Global na Agricultura: <https://galeriarural.com.br/os-10-maiores-produtores-mundiais-de-milho/>
- Ferreira, I. T., Schirmer, W. N., Machado, G. d., & Gueri, M. V. (2014). Estimativa do Potencial Energético de Resíduos Celulósicos de Fabricação de Papel Através de Análise Imediata. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, pp. 284-297.
- FUNAE. (s.d.). *Recurso Biomassa*. Obtido em 23 de Agosto de 2024, de Funae: <https://funae.co.mz/recurso-biomassa/>
- Fundación Global Nature y SIGFITO. (2021). *GUÍA PARA LA GESTIÓN DE LOS RESIDUOS AGRARIOS*. Madrid.
- GARCIA, D. P., CARASCHI, J. C., & VENTORIM, G. (2013). *Caracterização energética de pellets de madeira* (Vol. 24). Revista da madeira.
- Ibrahim, O. H., Al-Farga , A., El Saeidy , E. A., & Abdel Aal, A. M. (31 de Julho de 2023). Impact of Biomass Moisture Content on the Physical Properties of Briquettes Produced from Recycled Ficus nitida Pruning Residuals. *Sustainability*, pp. 1-16.
- ISO 17225-3:2021. (2021). Padrões para biocombustíveis sólidos. *Graded wood briquettes*.

- Júnior, A. F., Andrade, A. M., & Júnior, D. S. (2014). *Caracterização de briquetes produzidos com resíduos agroflorestais*. Brasil : Brazilian Journal of Forestry Research. doi:10.4336/2014.pfb.34.79.613
- Klautau, J. V. (2008). *Análise Experimental de uma Fornalha a lenha de Fluxo Cocorrente Para Secagem de Grãos*. Curitiba: UFPR.
- LEANpio. (31 de Janeiro de 2022). *Resíduos agrícolas y su tratamiento*. Obtido de <https://www.leanpio.com/es/blog/residuos-agricolas-tratamiento>
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2015). *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation* (2nd Edition ed.). London: Routledge. doi:<https://doi.org/10.4324/9780203762264>
- Magalhães, P. C., Duraes, F. O., & Paiva, E. (1995). *FISIOLOGIA DA PLANTA DE MILHO*. Circular Técnica número 20, Sete Lagoas, MG.
- Magalhães, P. C., Duraes, F. O., Carneiro, N. P., & Paiva, E. (2002). *Fisiologia do Milho*. Circular Técnica 22, Sete Lagoas, MG.
- Makonya, T. Z. (2022). *Produção e Caracterização de Briquetes Provenientes de Serradura de Tronco de Coqueiro e Resíduos de Mandioca (Casca de Mandioca)*. Maputo.
- Manjate, E. A. (2023). *Produção e caracterização dos briquetes de biomassa florestal: Serradura de Umbila, Chanfuta e Pinho*. Maputo.
- Marcos, R. A., Dutra, Í. P., Silva, M. B., Borges, A. L., Capelini, V. A., & Dalvi, L. P. (2023). *PRODUÇÃO E PRODUTIVIDADE DE MILHO EM MOÇAMBIQUE: PANORAMA DE TECNOLOGIAS DE SEMENTES*. doi:<https://dx.doi.org/10.18066/inic0102.23>
- Matos, J. P. (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*. Maputo.
- MCKENDRY, P. (2002). *Energy production from biomass (part 1): overview of biomass*. (Vol. 83).
- Namburete, S. (04 de Abril de 2012). A ambiciosa estratégia energética de Moçambique na 'oportunidade de ouro' na luta contra a pobreza. (B. Mundial, Entrevistador)
- OLIVEIRA, J. B., GOMES, P. A., & ALMEIDA, M. D. (1978). *Estudos Preliminares de Normalização de Testes de Controle de Qualidade do Carvão Vegetal*. Belo Horizonte : Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais,.
- Oyelaran, O. A., & Tudunwada, Y. Y. (2015). Determination of the Bioenergy Potential of Melon Shell and Corn Cob Briquette. *Iranica Journal of Energy and Environment*, 167-172.
- PARIKH, J., CHANNIWALA, S. A., & GHOSAL, G. K. (2005). A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. *Fuel*.
- Paula, L. E. (2010). *Produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulosicos*. Minas Gerais: UFLA.
- Pereira, T. V., & Seye, O. (2012). Caracterização física termica de biomassa local. *Encontro de Ensino, Pesquisa e Extensão*, pp. 1-9.
- QUIRINO, W. F. (1991). *CARACTERÍSTICAS E INDICE DE COMBUSTÃO DE BRIQUETES DE CARVÃO VEGETAL*. Estado de São Paulo -Brasil.

- Rattanaphaiboon, P., Homdoun, N., & Tippayawong, N. (2022). *Production and characterization of corncob biochar for agricultural use* (Vol. 2681). Chiang Mai, Thailand. doi:<https://doi.org/10.1063/5.0117160>
- Reciclamás. (15 de Outubro de 2020). *Los residuos agrícolas y su tratamiento*. Obtido de Reciclamás: <https://reciclamas.eu/blog/los-residuos-agricolas-y-su-tratamiento/>
- Santos, J. O., Santos, R. M., Costa, L. M., Medeiros, A. C., Coelho, D. C., & Maracajá, P. B. (2015). *Produção e utilização de briquetes no Brasil*. Revista Brasileira de Agrotecnologia. Obtido de <http://www.gvaa.com.br/revista/index.php/REBAGRO>
- Silva, A. C. (2020). *PIRÓLISE RÁPIDA CATALÍTICA DE SABUGO DE MILHO: SELETIVIDADE DOS CATALISADORES HZSM-5 E H $\beta$  PARA A PRODUÇÃO DE HIDROCARBONETOS AROMÁTICOS*. Uberlândia - MG.
- SILVA, A. C., & ATAÍDE, C. H. (2019). *CARACTERIZAÇÃO DO SABUGO DE MILHO E COMPOSIÇÃO DO BIO-ÓLEO PRODUZIDO NO PROCESSO DE PIRÓLISE RÁPIDA EM REATOR DE LEITO FLUIDIZADO BORBULHANTE*. Belém-Pará: ENEMP.
- Silvério, H. A. (2013). *Extração e caracterização de nanocristais de celulose a partir de sabugo de milho, e sua aplicação como agente de reforço em nanocompositos polimericos utilizando poli(Álcool Vinílico) como matriz*. Uberlandia-MG.
- Smith, C. W., Betrán, J., & Runge, E. C. (2004). *Corn: Origin, History, Technology, and Production*. Wiley.
- Soares, T. C., & Cunha, D. A. (2019). Emissões de gases de efeito estufa e eficiência ambiental no Brasil. 29(2), pp. 429-458. doi:<http://dx.doi.org/10.1590/0103-6351/3795>
- van der Plas, R. J., Sepp, S., Pigaht, M., Malalane, A., Mann, S., & Madon, G. (2012). *Estratégia de Energia de Biomassa para Moçambique*. Ministério de Energia. EUEI PDF.
- Victorino, A. (1995). *Estudo sobre o fogão a carvão vegetal e o ensino da física em Moçambique*. Beira, Sofala, Moçambique.
- Wessling, C. A., & Schabbach, L. M. (2022). *Análise do impacto ambiental causado pelas emissões e resíduos gerados no processo de pintura industrial de motores elétricos*. Blumenau.

# Apêndices

## Apêndice 1: Análise granulométrica

Tabela A1- 1: Análise granulometria do Sabugo de milho (SM)

Granulometria SM							
Peneiros (MESH)	Peneiros (mm)	Massa Retida 01	Massa Retida 02	Massa Retida 03	Media	D.Padrão	I.Conf
	2,50	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,00
10,00	2,00	0,02	0,02	0,08	0,04	0,03	0,00
	1,60	0,02	0,06	0,07	0,05	0,03	0,00
	1,25	0,02	0,07	0,10	0,06	0,04	0,00
18,00	1,00	0,07	0,05	0,20	0,11	0,08	0,00
	0,90	2,98	2,64	0,64	2,09	1,26	0,05
<b>Base</b>	<b>Base</b>	96,49	96,65	98,63	97,26	1,19	0,05
	<b>Total</b>	99,61	99,50	99,74	99,62	0,12	0,00

Tabela A1- 2: Análise granulométrica de Sabugo de milho misturado com o seu carbonizado (SMC-50%-50%)

Granulometria SMC (50%-50%)						
Peneiros (mm)	Massa Retida 01	Massa Retida 02	Massa Retida 03	Media	D.Padrão	I.Conf
2,50	0,00	0,01	0,02	0,01	0,01	0,00
2,00	0,00	0,04	0,01	0,02	0,02	0,00
1,60	0,04	0,02	0,03	0,03	0,01	0,00
1,25	0,10	0,07	0,12	0,10	0,03	0,00
1,00	0,46	0,39	0,61	0,49	0,11	0,00
0,90	0,64	0,53	0,49	0,55	0,08	0,00
<b>Base</b>	97,76	98,12	97,70	97,86	0,23	0,01
<b>Total</b>	99,00	99,18	98,98	99,05	0,11	0,00

## Apêndice 2: Análise imediata

Tabela A2- 1: Teor de voláteis das biomassas

Teor de voláteis								
Tipo de Biomassa	Número	Cadinho Vazio(g)	Amostra Seca (g)	Cadinho + Carvão (g)	Materiais voláteis (%)	Materiais voláteis médios (%)	D. padrão (%)	I. confiança-95% (%)
SM	I	48,35	1,00	48,53	81,74	82,15	1,83	0,07
	II	57,92	1,00	58,08	84,15			
	III	48,30	1,00	48,50	80,57			
SMC (100%)	I	57,86	1,00	58,55	31,24	30,45	2,03	0,08
	II	58,25	1,00	58,97	28,14			
	III	46,78	1,00	47,46	31,97			
SMC (50%-50%)	I	48,38	1,00	48,83	54,32	53,80	0,82	0,03
	II	46,79	1,00	47,26	52,85			
	III	57,96	1,00	58,41	54,21			
SMC (25%-75%)	I	46,50	1,00	46,83	67,09	67,64	0,82	0,03
	II	58,23	1,00	58,56	67,23			
	III	48,39	1,00	48,70	68,58			
Lenha (Brachystegia)	I	47,25	1,00	47,42	82,75	83,00	1,35	0,06
	II	46,87	1,00	47,05	81,80			
	III	47,65	1,00	47,80	84,46			
Carvão Vegetal	I	47,06	1,00	47,95	10,21	9,98	0,68	0,03
	II	57,98	1,00	58,88	9,20			
	III	57,86	1,00	58,76	10,51			

Tabela A2- 2: Teor de cinzas das biomassas

Teor de Cinzas								
Tipo de Biomassa	Número	Cadinho Vazio(g)	Amostra Seca (g)	Cadinho + cinzas (g)	Teor de cinzas (%)	Teor de cinzas médios (%)	Desvio padrão (%)	Intervalo de confiança-95% (%)
SM	I	42,31	2,00	42,37	2,92	2,82	0,09	0,00
	II	43,28	2,00	43,34	2,80			
	III	46,11	2,00	46,17	2,74			
SMC (100%)	I	12,84	2,00	12,90	2,63	2,68	0,07	0,00
	II	13,49	2,00	13,55	2,64			
	III	12,34	2,00	12,40	2,75			
SMC (50%-50%)	I	29,11	2,00	29,41	15,11	12,95	1,90	0,08
	II	25,21	2,00	25,46	12,20			
	III	27,39	2,00	27,62	11,53			
SMC (25% + 75%)	I	36,37	2,00	36,96	29,36	27,20	2,02	0,08
	II	51,36	2,00	51,90	26,88			
	III	44,80	2,00	45,30	25,36			
Lenha (Brachystegia)	I	23,16	2,00	23,18	1,31	1,18	0,13	0,01
	II	38,63	2,00	38,66	1,17			
	III	38,72	2,00	38,74	1,06			
Carvão	I	41,81	2,00	41,98	8,01	8,03	0,02	0,00

Vegetal	II	29,10	2,00	29,26	8,04			
	III	27,37	2,00	27,53	8,04			

Tabela A2- 3: Teor de carbono fixo das biomassas

Teor de carbono Fixo				
Tipo de Biomassa	Carbono fixo	Media	D.Padrão	Erro 95%
SM	15,34	15,03	1,84	0,08
	13,04			
	16,69			
SMC (100%)	66,13	66,87	2,07	0,08
	69,22			
	65,27			
SMC (50%-50%)	30,57	33,25	2,35	0,10
	34,94			
	34,25			
SMC (25%-75%)	3,55	5,17	1,40	0,06
	5,89			
	6,06			
Lenha (Brachystegia)	15,94	15,81	1,28	0,05
	17,03			
	14,47			
Carvão Vegetal	81,78	81,99	0,68	0,03
	82,75			
	81,45			

Tabela A2- 4: Teor de humidade da biomassa

Humidade In Natura								
Tipo de Biomassa	Número	Massa (g)	Temperatura (°C)	Tempo de secagem (min)	Humidade (%)	Humidade media (%) voláteis médios (%)	Desvio padrão (%)	Erro 95%
SM	I	1,0000	105	5,0	7,90	7,82	0,09	0,00
	II	1,0002	105	4,9	7,72			
	III	1,0000	105	3,4	7,85			
SMC (100%)	I	1,0001	105	5,0	10,74	10,33	0,36	0,01
	II	1,0000	105	5,8	10,16			
	III	1,0002	105	3,8	10,08			
SMC (50%-50%)	I	1,0002	105	3,8	6,80	7,25	0,45	0,02
	II	1,0001	105	2,6	7,26			
	III	1,0001	105	3,0	7,70			
SMC (25%-75%)	I	1,0003	105	4,6	8,40	8,05	0,31	0,01
	II	1,0001	105	2,6	7,84			
	III	1,0001	105	3,4	7,90			
Lenha (Brachystegia)	I	1,0000	105	5,7	9,97	9,59	0,44	0,02
	II	1,0000	105	8,2	9,11			
	III	1,0000	105	5,0	9,68			
Carvão Vegetal	I	1,0000	105	7,1	6,16	5,94	0,29	0,01
	II	1,0000	105	6,2	5,61			
	III	1,0000	105	6,8	6,04			

## Apêndice 3: Densidades

Tabela A3- 1: Densidade aparente das biomassas

Densidade Aparente									
Biomassa	Número	Massa (g)	Altura (mm)	Diâmetro (mm)	Volume (m <sup>3</sup> )	Densidade (Kg/m <sup>3</sup> )	Densidade média (Kg/m <sup>3</sup> )	D.Padrão (%)	Erro 95%
SM	I	59,77	23,11	49,99	4,53E-05	318,40	1304,18	16,09	0,66
	II	59,67	23,63	50,00	4,64E-05	286,72			
	III	59,63	23,24	50,00	4,56E-05	307,43			
SMC-50%-50%	I	59,40	36,57	50,10	7,21E-05	824,36	816,78	11,04	0,45
	II	58,90	36,30	50,15	7,17E-05	821,86			
	III	59,70	37,56	50,18	7,42E-05	804,11			

Tabela A3- 2: Densidade a granel das biomassas

Densidade a granel							
	Massa do balão (g)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Massa do balão + Amostra (g)	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Densidade média	D. padrão	erro 95%
SM	16,30	100,00	67,10	508,00	509,33	1,53	0,06
	16,30	100,00	67,40	511,00			
	16,30	100,00	67,20	509,00			
SMC-50%-50%	16,60	100,00	62,30	457,00	461,33	4,04	0,17
	16,60	100,00	63,10	465,00			
	16,60	100,00	62,80	462,00			
SMC-25%-75%	16,60	100,00	66,40	498,00	498,00	2,00	0,08
	16,60	100,00	66,60	500,00			
	16,60	100,00	66,20	496,00			

Tabela A3- 3: Densidade energética das biomassas

Densidade energética			
Biomassa	PCU (kcal/kg)	Densidade energética de briquetes (kcal/m <sup>3</sup> )	Densidade energética de resíduos (kcal/m <sup>3</sup> )
SM	3.647,79	4.757.384,66	1.857.941,04
SMC-50%-50%	4.145,99	3.386.350,57	1.912.683,39

## Apêndice 4: Carbonização do sabugo do milho

Tabela A4- 1: Temperatura da Carbonização do sabugo do milho e seu tempo de residência

Tempo(h)	Temperatura (C)
0	0
1	200
2	400
3	400
4	400
5	200
6	0

Tabela A4- 2: Rendimento da carbonização do sabugo do milho

Rendimento de carbonização						
Número	Massa da amostra antes (g)	Massa do reactor depois (g)	Rendimento médio (%)	Rendimento (%)	D. Padrão	I. Confiança
I	380	360	94.74	93.81	1.04	0.04
II	500	470	94.00			
III	410	380	92.68			

## Apêndice 5: Expansão longitudinal e Friabilidade

Tabela A5- 1: Expansão longitudinal do sabugo do milho (SM)

Expansão Longitudinal (%) SM									
Altura (mm)			Expansão Longitudinal (%)					Desvio. P	Erro 95%
Tempo(h)	I	II	III	I	II	III	Média		
0.00	23.11	23.65	23.26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.00	23.12	23.63	23.22	0.04	-0.08	-0.17	-0.07	0.11	0.00
24.00	23.11	23.63	23.24	0.00	-0.08	-0.09	-0.06	0.05	0.00
48.00	23.11	23.63	23.24	0.00	-0.08	-0.09	-0.06	0.05	0.00
72.00	23.11	23.63	23.24	0.00	-0.08	-0.09	-0.06	0.05	0.00
96.00	23.11	23.63	23.24	0.00	-0.08	-0.09	-0.06	0.05	0.00
120.00	23.11	23.63	23.24	0.00	-0.08	-0.09	-0.06	0.05	0.00
144.00	23.11	23.63	23.24	0.00	-0.08	-0.09	-0.06	0.05	0.00
168.00	23.11	23.63	23.24	0.00	-0.08	-0.09	-0.06	0.05	0.00

Tabela A5- 2: Resultados da expansão longitudinal do briquete SMC-50%-50%

Expansão Longitudinal (%) SMC (50%-50%)									
Altura (mm)			Expansão Longitudinal (%)				Expansão média	Desvio. P	Erro 95%
Tempo(h)	I	II	III	I	II	III			
0,00	36,13	36,09	37,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,00	36,56	36,04	37,27	1,19	-0,14	0,35	0,47	0,67	0,03
24,00	36,44	36,17	37,25	0,86	0,22	0,30	0,46	0,35	0,01
48,00	36,57	36,30	37,56	1,22	0,58	1,13	0,98	0,34	0,01
72,00	36,57	36,30	37,56	1,22	0,58	1,13	0,98	0,34	0,01
96,00	36,57	36,30	37,56	1,22	0,58	1,13	0,98	0,34	0,01
120,00	36,57	36,30	37,56	1,22	0,58	1,13	0,98	0,34	0,01
144,00	36,57	36,30	37,56	1,22	0,58	1,13	0,98	0,34	0,01
168,00	36,57	36,30	37,56	1,22	0,58	1,13	0,98	0,34	0,01

Tabela A5- 3: Resultados do teste de friabilidade dos briquetes

Friabilidade							
Biomassa	Número	Massa antes (g)	Massa depois (g)	Friabilidade (%)	Media (%)	D.Padrão (%)	Erro 95%
SM	I	58.60	58.10	0.85	1.02	0.18	0.01
	II	57.90	57.20	1.21			
	III	59.50	58.90	1.01			
SMC-50	I	58.20	55.30	4.98	5.33	0.45	0.02
	II	58.20	55.20	5.15			
	III	58.20	54.80	5.84			

## Apêndice 6: Índice de combustão e Teste de Fervura de Água

Tabela A6- 1: Resultados da temperatura e massa no teste de índice de combustão dos briquetes, lenha e carvão vegetal

Sabugo de milho (SM)			SMC-50%-50%		Lenha (Brachystegia)		Carvão	
Tempo (min)	Massa (g)	Temperatura (C)	Massa (g)	Temperatura (C)	Massa (g)	Temperatura (C)	Massa (g)	Temperatura (C)
0	0.510	25.033	0.500	28.867	0.500	30.133	0.460	28.833
1	0.485	179.333	0.493	148.633	0.470	456.000	0.452	103.967
2	0.475	208.233	0.483	157.867	0.432	480.667	0.445	113.567
3	0.465	223.000	0.472	161.600	0.382	507.667	0.437	129.933
4	0.457	226.067	0.463	163.133	0.332	527.333	0.435	139.167
5	0.452	253.667	0.455	167.933	0.282	553.000	0.432	169.533
6	0.445	277.667	0.447	174.067	0.232	545.000	0.428	209.633
7	0.442	325.333	0.438	181.667	0.183	501.333	0.427	237.900
8	0.435	334.667	0.430	207.433	0.143	423.667	0.425	248.500
9	0.433	348.667	0.420	213.000	0.113	387.667	0.420	266.333
10	0.432	366.000	0.412	215.433	0.093	366.000	0.418	338.667
11	0.427	403.333	0.402	219.000	0.077	302.333	0.417	398.333
12	0.425	433.333	0.393	224.333	0.067	257.667	0.413	546.667
13	0.423	456.000	0.383	226.667	0.057	233.333	0.412	527.333
14	0.422	486.000	0.375	228.333	0.052	213.333	0.408	437.000
15	0.420	504.333	0.367	234.333	0.047	198.333	0.405	401.667
16	0.418	517.000	0.355	238.667	0.042	188.667	0.403	390.000
17	0.415	550.333	0.345	246.333	0.038	172.800	0.400	379.000
18	0.408	569.333	0.340	259.333	0.035	162.833	0.397	376.667
19	0.403	584.667	0.325	278.333	0.032	158.367	0.390	370.667
20	0.395	595.000	0.320	292.000	0.028	151.233	0.390	366.000
21	0.387	602.333	0.310	326.000	0.027	147.767	0.387	362.000
22	0.380	605.333	0.300	337.000	0.025	141.900	0.380	357.333

23	0.37 5	610.000	0.29 0	351.333	0.02 2	130.367	0.37 5	356.333
24	0.37 0	616.667	0.27 8	397.000	0.02 0	126.933	0.37 3	354.667
25	0.36 5	622.667	0.26 8	427.000	0.01 7	117.133	0.36 8	347.000
26	0.35 8	629.333	0.25 7	438.333	0.01 7	111.133	0.36 5	338.667
27	0.35 2	631.000	0.24 8	472.333	0.01 7	102.867	0.36 2	335.667
28	0.34 3	637.667	0.24 2	440.333	0.01 3	98.900	0.36 0	333.333
29	0.33 3	639.000	0.23 2	431.667	0.01 2	96.300	0.35 8	330.667
30	0.32 3	642.667	0.22 2	410.333	0.01 2	93.467	0.35 2	330.667
31	0.31 3	636.667	0.21 5	344.000	0.01 2	88.900	0.34 8	326.333
32	0.30 2	636.667	0.20 7	333.333	0.01 0	82.900	0.34 5	324.667
33	0.29 0	636.667	0.20 0	337.333	0.01 0	78.700	0.34 2	321.667
34	0.27 7	638.333	0.19 3	383.667	0.01 0	77.200	0.33 7	319.667
35	0.27 0	640.000	0.18 7	347.000	0.01 0	73.100	0.33 2	315.667
36	0.25 7	640.000	0.18 3	331.000	0.01 0	66.767	0.33 0	312.667
37	0.24 5	642.333	0.17 8	309.667	0.01 0	65.100	0.32 7	311.333
38	0.23 3	641.000	0.17 2	266.667	0.01 0	63.267	0.32 3	310.000
39	0.22 5	612.333	0.16 8	258.667	0.01 0	60.267	0.32 2	309.667
40	0.20 7	579.667	0.16 5	255.333	0.00 8	58.067	0.32 0	306.667
41	0.19 5	574.000	0.16 0	250.000	0.00 8	55.867	0.31 8	305.333
42	0.18 3	552.000	0.15 7	242.667	0.00 8	53.300	0.31 8	302.333
43	0.17 3	547.000	0.15 3	234.667	0.00 8	50.467	0.31 7	299.333
44	0.16 5	523.333	0.15 0	231.667	0.00 8	47.800	0.31 3	297.333
45	0.15 8	509.667	0.14 7	229.333	0.00 7	46.400	0.31 2	297.000
46	0.15 3	485.667	0.14 5	227.000	0.00 7	45.867	0.31 2	294.333
47	0.14 8	474.000	0.14 3	224.000	0.00 5	44.867	0.30 8	292.333
48	0.14 5	461.333	0.14 0	222.000	0.00 5	43.800	0.30 7	289.000
49	0.14 0	439.000	0.13 8	222.000	0.00 5	42.667	0.30 7	285.333

50	0.13 7	414.000	0.13 5	220.000	0.00 5	41.100	0.30 3	281.333
51	0.13 7	367.333	0.13 3	216.000	0.00 5	40.033	0.30 2	279.667
52	0.13 2	333.333	0.13 0	213.667	0.00 5	39.400	0.30 0	278.000
53	0.13 0	303.667	0.12 8	211.667	0.00 5	38.967	0.29 8	275.667
54	0.12 8	283.333	0.12 5	210.333	0.00 5	38.033	0.29 5	268.700
55	0.12 7	268.633	0.12 5	208.000	0.00 5	37.100	0.29 2	267.333
56	0.12 3	249.000	0.12 3	206.667	0.00 5	36.467	0.29 2	262.000
57	0.12 3	244.600	0.12 0	205.333	0.00 5	36.267	0.28 8	259.000
58	0.12 2	237.433	0.12 0	202.667	0.00 5	35.500	0.28 7	250.333
59	0.11 8	230.167	0.11 8	202.000	0.00 5	35.400	0.28 3	250.000
60	0.11 8	220.300	0.11 5	198.333	0.00 5	34.900	0.28 3	247.000
61	0.11 7	210.233	0.11 5	196.333	0.00 5	34.900	0.28 2	245.667
62	0.11 3	201.667	0.11 2	194.000	0.00 5	34.900	0.27 8	242.333
63	0.11 3	189.367	0.11 0	193.000	0.00 5	34.900	0.27 5	241.667
64	0.11 3	186.033	0.10 8	191.667	0.00 5	34.900	0.27 3	240.000
65	0.11 3	179.933	0.10 5	190.000	0.00 5	34.900	0.26 8	236.333
66	0.11 0	178.100	0.10 5	189.067	0.00 5	34.900	0.26 7	234.333
67	0.10 8	174.400	0.10 3	185.900	0.00 5	34.900	0.26 3	231.000
68	0.10 8	163.567	0.10 2	184.100	0.00 5	34.900	0.26 0	230.667
69	0.10 7	161.500	0.10 0	182.333	0.00 5	34.900	0.25 8	227.000
70	0.10 5	159.867	0.10 0	180.967	0.00 5	34.900	0.25 8	226.000
71	0.10 5	156.667	0.09 8	178.367	0.00 5	34.900	0.25 3	225.333
72	0.10 3	153.000	0.09 7	177.033	0.00 5	34.900	0.25 2	224.000
73	0.10 3	152.267	0.09 7	175.633	0.00 5	34.900	0.24 8	224.000
74	0.10 2	150.533	0.09 3	175.400	0.00 5	34.900	0.24 5	221.667
75	0.10 0	146.833	0.09 2	174.267	0.00 5	34.900	0.24 3	220.000
76	0.10 0	145.000	0.09 2	173.467	0.00 5	34.900	0.24 0	216.667

77	0.10 0	140.033	0.09 0	172.400	0.00 5	34.900	0.23 8	215.000
78	0.09 8	139.200	0.08 7	171.600	0.00 5	34.900	0.23 5	213.200
79	0.09 8	136.900	0.08 7	170.533	0.00 5	34.900	0.23 5	211.667
80	0.09 7	134.567	0.08 7	167.200	0.00 5	34.900	0.23 0	210.333
81	0.09 7	131.167	0.08 5	165.167	0.00 5	34.900	0.23 0	208.133
82	0.09 7	128.967	0.08 3	164.400	0.00 5	34.900	0.22 8	204.433
83	0.09 5	127.767	0.08 3	161.533	0.00 5	34.900	0.22 8	203.600
84	0.09 5	126.333	0.08 0	158.733	0.00 5	34.900	0.22 7	201.933
85	0.09 5	122.667	0.07 8	157.800	0.00 5	34.900	0.22 5	199.733
86	0.09 2	120.667	0.07 8	154.800	0.00 5	34.900	0.22 3	198.267
87	0.09 2	120.300	0.07 7	152.000	0.00 5	34.900	0.21 8	196.933
88	0.09 2	118.467	0.07 5	150.833	0.00 5	34.900	0.21 5	194.000
89	0.09 2	116.967	0.07 3	148.633	0.00 5	34.900	0.21 3	192.900
90	0.09 0	116.100	0.07 3	147.233	0.00 5	34.900	0.21 2	188.067
91	0.09 0	115.100	0.07 2	146.300	0.00 5	34.900	0.20 8	183.200
92	0.08 8	113.767	0.07 0	144.767	0.00 5	34.900	0.20 3	181.700
93	0.08 8	112.800	0.07 0	143.167	0.00 5	34.900	0.20 0	179.400
94	0.08 8	110.067	0.06 8	141.300	0.00 5	34.900	0.19 5	174.267
95	0.08 7	107.833	0.06 7	139.100	0.00 5	34.900	0.19 2	173.900
96	0.08 7	106.700	0.06 5	137.633	0.00 5	34.900	0.18 8	171.233
97	0.08 5	104.167	0.06 5	136.667	0.00 5	34.900	0.18 8	169.733
98	0.08 5	101.933	0.06 5	135.067	0.00 5	34.900	0.18 7	168.400
99	0.08 3	100.100	0.06 5	133.600	0.00 5	34.900	0.18 7	164.633
100	0.08 2	98.633	0.06 3	131.900	0.00 5	34.900	0.18 3	160.000
101	0.08 2	97.767	0.06 0	129.000	0.00 5	34.900	0.18 3	159.100
102	0.08 2	96.700	0.06 0	127.733	0.00 5	34.900	0.17 8	157.933
103	0.08 2	95.233	0.06 0	124.133	0.00 5	34.900	0.17 3	156.000

104	0.08 2	93.900	0.06 0	122.100	0.00 5	34.900	0.16 8	155.100
105	0.08 0	92.200	0.06 0	118.633	0.00 5	34.900	0.16 3	153.500
106	0.07 7	89.133	0.05 8	115.667	0.00 5	34.900	0.16 2	150.000
107	0.07 3	88.500	0.05 7	111.967	0.00 5	34.900	0.15 5	141.533
108	0.07 3	86.200	0.05 7	109.067	0.00 5	34.900	0.15 2	135.000
109	0.07 3	84.167	0.05 7	107.333	0.00 5	34.900	0.15 0	134.133
110	0.07 2	82.033	0.05 5	105.167	0.00 5	34.900	0.14 7	130.333
111	0.07 2	80.600	0.05 3	103.733	0.00 5	34.900	0.14 5	129.267
112	0.07 2	78.967	0.05 3	100.300	0.00 5	34.900	0.14 3	122.600
113	0.07 0	77.433	0.05 2	99.100	0.00 5	34.900	0.13 8	119.233
114	0.07 0	76.300	0.05 2	97.567	0.00 5	34.900	0.13 5	116.867
115	0.07 0	75.700	0.05 0	95.400	0.00 5	34.900	0.13 3	114.633
116	0.07 0	74.933	0.05 0	95.033	0.00 5	34.900	0.13 0	110.933
117	0.07 0	73.833	0.05 0	92.533	0.00 5	34.900	0.12 7	109.300
118	0.07 0	73.267	0.05 0	91.400	0.00 5	34.900	0.12 2	107.933
119	0.07 0	72.233	0.05 0	89.367	0.00 5	34.900	0.12 2	106.867
120	0.06 8	71.233	0.04 8	88.767	0.00 5	34.900	0.11 8	101.633

Tabela A6- 2: Resultado do índice de combustão de SM

Material	Número	A (%)	B (%)	C (%)	ICOM	ICOM médio	D.Padrão	I.Conf
SM	I	50.83	78.81	82.65	0.48	0.61	0.14	0.01
	II	55.00	79.51	74.74	0.59			
	III	79.17	76.27	79.59	0.76			

Tabela A6- 3: Resultado do índice de combustão de carvão vegetal

Material	Número	A (%)	B (%)	C (%)	ICOM	ICOM médio	D.Padrão	Erro 95%
Carvão Vegetal	I	84.17	77.13	59.21	1.10	0.99	0.10	0.00
	II	82.50	71.10	64.77	0.91			
	III	85.00	74.79	65.59	0.97			

Tabela A6- 4: Resultado do índice de combustão de SMC-50%-50%

Material	Número	A (%)	B (%)	C (%)	ICOM	ICOM médio	D.Padrão	Erro 95%
SMC-50%-50%	I	73.33	73.73	85.87	0.63	0.65	0.05	0.00
	II	83.33	73.45	86.60	0.71			
	III	67.50	77.54	83.84	0.62			

Tabela A6- 5: Resultado do índice de combustão da lenha

Material	Número	A (%)	B (%)	C (%)	ICOM	ICOM médio	D.Padrão	Erro 95%
LENHA	I	15.00	75.88	93.62	0.12	0.13	0.01	0.00
	II	17.50	74.00	94.79	0.14			
	III	16.67	70.82	93.48	0.13			

Tabela A6- 6: Resultados do teste de fervura da água de briquetes de SMC-50%-50%

Descrição	I ensaio			II ensaio			III ensaio			Média		
	t=0min	t=15min	t=45min	t=0min	t=15min	t=45min	t=0min	t=15min	t=45min	t=0min	t=15min	t=45min
Fogao (Kg)												
Panela + tampa (Kg)	0.645	0.645	0.645	0.645	0.645	0.645	0.645	0.645	0.645	0.645	0.645	0.645
Panela + tampa + água (Kg)	3.975	2.730	2.655	3.975	3.795	3.095	3.975	3.095	3.020	3.975	3.207	2.923
Massa do briquete SMC-50%-50%(Kg)	0.600	0.220	0.100	0.600	0.215	0.095	0.600	0.195	0.095	0.600	0.210	0.097
Temperatura Ambiente( C )	27.100	29.600	29.100	29.300	29.500	35.600	29.500	39.400	34.600	28.633	32.833	33.100
Temperatura da água( C )	27.300	100.300	100.300	27.700	100.800	100.500	33.500	100.100	100.600	29.500	100.400	100.467
Tempo em que a água fria ferve (min)	59.000	74.000	119.000	51.000	66.000	111.000	48.000	63.000	108.000	52.667	67.667	112.667

	I	II	III	
Tempo(min)	T (C)	T (C)	T (C)	Média (C)
0	27.300	27.700	33.500	29.500
5	37	38.400	42.800	39.400
10	43.9	45.600	48.200	45.900
15	47	49.400	49.400	48.600
20	53.5	54.800	53.900	54.067
25	56.7	62.700	56.900	58.767
30	61.8	71.400	64.300	65.833
35	67.6	80.200	70.800	72.867
40	75.9	86.500	84.500	82.300
45	82.1	93.600	96.700	90.800
50	88.6	99.400	100.300	96.100
55	94.9	100.600	100.300	98.600
60	100	100.500	100.200	100.233
65	100.3	100.500	100.100	100.300
70	100.3	100.500	100.400	100.400
75	100.3	100.700	100.500	100.500
80	100.5	100.600	100.500	100.533
85	100.7	100.800	100.500	100.667

90	100.9	100.500	100.500	100.633
95	100.7	100.700	100.500	100.633
100	100.7	100.700	100.400	100.600
105	100.8	100.800	100.400	100.667
110	101	100.500	100.600	100.700
115	100.7	100.500	100.500	100.567
120	100.3	100.400	100.500	100.400

Tabela A6- 7: Resultados do teste de fervura da água de briquetes de SM

Descrição	I ensaio			II ensaio			III ensaio			Média		
	t=0min	t=15min	t=45min	t=0min	t=15min	t=45min	t=0min	t=15min	t=45min	t=0min	t=15min	t=45min
Fogão (Kg)												
Panela + tampa (Kg)	0.645	0.645	0.645	0.650	0.650	0.650	0.650	0.650	0.650	0.648	0.648	0.648
Panela + tampa + água (Kg)	3.975	3.720	3.620	3.980	3.835	3.350	3.980	3.260	3.240	3.978	3.605	3.403
Massa do briquete SM(Kg)	0.600	0.185	0.065	0.600	0.250	0.090	0.600	0.220	0.070	0.600	0.218	0.075
Temperatura Ambiente( C )	30.500	39.100	31.300	24.000	30.400	32.000	32.600	28.500	31.200	29.033	32.667	31.500
Temperatura da água( C )	29.500	100.300	100.800	28.000	100.100	100.300	29.400	100.100	100.000	28.967	100.167	100.367
Tempo em que a água fria ferve (min)	55.000	70.000	115.000	63.000	78.000	123.000	32.000	47.000	92.000	50.000	65.000	110.000

	I	II	III	
Tempo (min)	T (C)	T (C)	T (C)	Média (C)
0	29.500	28.000	29.400	28.967
5	31.7	36.300	42.000	36.667
10	39.1	42.000	59.100	46.733
15	43.3	44.000	66.300	51.200
20	43.5	46.500	78.800	56.267
25	47.7	57.400	87.200	64.100
30	55.9	64.000	96.000	71.967
35	66.2	75.300	100.300	80.600
40	80.1	79.400	100.200	86.567
45	87.5	85.700	100.200	91.133
50	96	91.400	100.300	95.900
55	100	95.600	100.000	98.533
60	100.2	97.800	100.000	99.333
65	100	100.300	100.000	100.100
70	100.3	100.100	100.200	100.200
75	100.4	100.000	100.300	100.233
80	100.6	100.100	100.200	100.300
85	100.8	100.300	100.100	100.400
90	101.2	100.500	100.000	100.567
95	100.9	100.300	100.000	100.400
100	101.2	100.400	100.100	100.567
105	101.1	100.500	100.100	100.567
110	100.8	100.300	100.000	100.367
115	100.8	100.400	100.000	100.400
120	100.7	100.300	100.100	100.367

125	100.7	100.300	100.000	100.333
-----	-------	---------	---------	---------

Tabela A6- 8: Resultados do teste de fervura da água de briquetes de carvão vegetal

	t=0min	t=15min	t=45min									
Fogao (Kg)												
Panela + tampa (Kg)	0.640	0.640	0.640	0.650	0.650	0.650	0.650	0.650	0.650	0.647	0.647	0.647
Panela + tampa + agua (Kg)	3.970	2.775	2.715	3.980	3.280	3.134	3.980	2.735	2.535	3.977	2.930	2.795
Massa do carvao(Kg)	0.600	0.340	0.235	0.600	0.335	0.289	0.600	0.330	0.180	0.600	0.335	0.235
Temperatura Ambiente( C )	27.800	32.000	30.000	30.700	29.100	29.000	28.900	31.200	30.900	29.133	30.767	29.967
Temperatura da agua( C )	27.800	100.700	101.100	29.200	100.300	100.100	28.100	100.500	101.100	28.367	100.500	100.767
Tempo em que a agua fria ferve (min)	56.000	71.000	116.000	83.000	98.000	143.000	65.000	80.000	125.000	68.000	83.000	128.000

	I	II	III	
Tempo (min)	T (C)	T (C)	T (C)	Média (C)
0	27.900	27.800	28.100	27.933
5	34.600	37.300	30.300	34.067
10	36.600	39.400	31.000	35.667
15	38.500	40.600	32.500	37.200
20	45.400	42.000	34.100	40.500
25	50.300	43.700	37.200	43.733
30	56.500	50.000	43.200	49.900
35	61.200	56.400	46.000	54.533
40	67.000	58.400	52.400	59.267
45	76.400	61.800	66.000	68.067
50	79.000	66.800	70.600	72.133
55	85.400	71.1	82.500	79.667
60	100.500	76.500	94.500	90.500
65	100.700	79.800	100.300	93.600
70	100.700	82.400	100.300	94.467
75	100.700	87.100	100.500	96.100
80	100.700	96.200	100.500	99.133
85	100.700	100.000	101.200	100.633
90	100.800	100.200	101.300	100.767
95	100.800	100.200	101.200	100.733
100	100.900	100.200	101.200	100.767
105	100.900	100.300	101.300	100.833
110	101.000	100.200	101.100	100.767
115	101.100	100.100	101.000	100.733
120	101.000	100.100	101.300	100.800
125	100.900	100.100	101.100	100.700
130	100.900	100.000	101.200	100.700
135	100.700	100.200	101.100	100.667
140	100.600	100.000	101.000	100.533
145	100.600	100.100	101.100	100.600

Tabela A6- 9: Resultados do teste de fervura da água de briquetes de lenha

Descrição	I ensaio			II ensaio			III ensaio					
	t=0min	t=15min	t=45min	t=0min	t=15min	t=45min	t=0min	t=15min	t=45min	t=0min	t=15min	t=45min
Fogao (Kg)												
Panela + tampa (Kg)	0.655	0.655	0.655	0.655	0.655	0.655	0.655	0.655	0.655	0.655	0.655	0.655
Panela + tampa + agua (Kg)	3.985	3.640	3.095	3.985	3.655	3.250	3.985	3.630	3.415	3.985	3.642	3.253
Massa da lenha(Kg)	0.600	0.055	0.005	0.600	0.145	0.020	0.600	0.045	0.015	0.600	0.082	0.013
Temperatura Ambiente( C )	31.100	33.700	34.100	32.600	35.400	32.300	31.300	31.500	31.400	31.667	33.533	32.600
Temperatura da agua( C )	29.600	100.400	100.300	30.700	100.500	101.000	30.300	100.300	100.400	30.200	100.400	100.567
Tempo em que a agua fria ferve (min)	25.000	40.000	85.000	22.000	37.000	82.000	28.000	43.000	88.000	25.000	40.000	85.000

	I Ensaio	II Ensaio	III Ensaio	
Tempo (min)	T (C)	T (C)	T (C)	Média (C)
0	29.6	30.700	30.300	30.200
5	46.6	51.300	44.800	47.567
10	62.3	67.300	61.100	63.567
15	72	82.500	69.600	74.700
20	87.2	96.900	77.700	87.267
25	100.2	100.700	90.300	97.067
30	100.3	100.500	100.400	100.400
35	100.3	100.600	100.400	100.433
40	100.4	100.600	100.400	100.467
45	100.8	100.600	100.300	100.567
50	100.7	100.800	101.300	100.933
55	101.1	100.500	101.000	100.867
60	101.1	100.900	101.300	101.100
65	100.6	100.600	101.700	100.967
70	100.8	100.700	101.500	101.000
75	100.6	100.600	101.500	100.900
80	100.3	101.100	100.900	100.767
85	100.3	101.000	100.600	100.633
90	100.2	101.000	100.400	100.533

Tabela A6- 10: Resultados do cálculo do calor libertado, absorvido, de vapor da água e rendimento do teste de fervura da água

Biomassa	Tempo (min)		Qlib(kcal)		Qabs (Kcal)		Qvap (kcal)		Rendimento (%)		
	A.P	B.P	A.P	B.P	A.P	B.P	A.P	B.P	A.P	B.P	media
SM	65.000	110.000	1531.174	2016.180	237.096	237.762	201.047	309.925	31.131	36.549	33.840
SMC-50%-50%	67.667	112.667	1761.689	2371.504	236.097	236.320	413.952	567.028	55.477	56.504	55.991
Lenha	83.000	128.000	2126.198	2409.418	233.766	234.322	184.877	394.548	20.326	38.371	29.349
Carvão vegetal	40.000	85.000	1860.907	2563.136	240.203	241.092	564.333	637.098	72.843	59.926	66.385