



**FACULDADE DE ENGENHARIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
**LICENCIATURA EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**TRABALHO DE LICENCIATURA**

**Produção e caracterização dos briquetes de biomassa florestal:  
Serradura de Umbila, Chanfuta e Pinho**

**Autor:** Edson Alfredo Miguel Manjate

**Supervisor:** Doutor Carlos Lucas, Eng.<sup>o</sup>

**Co-Supervisor:** Doutor Adolfo Condo, Eng.<sup>o</sup>

Maputo, Junho de 2023



**FACULDADE DE ENGENHARIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
**LICENCIATURA EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**TRABALHO DE LICENCIATURA**

**Produção e caracterização dos briquetes de biomassa florestal:  
Serradura de Umbila, Chanfuta e Pinho**

**Autor:** Edson Alfredo Miguel Manjate

**Supervisor:** Doutor Carlos Lucas, Eng.º

**Co-Supervisor:** Doutor Adolfo Condo, Eng.º

Maputo, Junho de 2023

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

Declaro que o estudante Edson Alfredo Miguel Manjate entregou no dia \_\_\_/\_\_\_/2023 as 4 cópias do relatório do seu Trabalho de Licenciatura com a referência: \_\_\_\_\_ Intitulado: **Produção e caracterização dos briquetes de biomassa florestal: Serradura de Umbila, Chanfuta e Pinho**

Maputo, \_\_\_ de \_\_\_\_\_ 2023

A Chefe da Secretaria

---

## **DECLARAÇÃO DE HONRA**

Eu, Edson Alfredo Miguel Manjate, declaro sob palavra de honra que o presente Trabalho de Licenciatura foi elaborado por mim, com base nos conhecimentos adquiridos durante o curso e nos recursos disponíveis que ao longo do mesmo se faz referência.

Maputo, Junho de 2023

---

Edson Alfredo Miguel Manjate

## DEDICATÓRIA

"Dedico o presente trabalho à minha querida mãe Adília e à amada irmã Jéssica"

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradecer a Deus todo-poderoso pelo dom da vida, e por dar-me forças para trilhar este longo e tortuoso caminho até o presente momento.

Às três mulheres mais importantes da minha vida, a minha mãe Adília Jaquelina Mazuze, a minha irmã Jéssica Miguel Manjate, e tia Sónia Francisco Mondlane por todo apoio moral, material e acima de tudo pelo amor incondicional.

Aos meus prezados supervisores Dr. Carlos Lucas e Dr. Adolfo Condo, pela orientação prestada durante a realização do presente trabalho.

Aos meus companheiros de "trincheiras" e grandes amigos Diocrecio Nomen Microsse, Arcanjo Rodrigues Cuamba, Osvaldo Rafael Nhamirre, Octávio João Lemos e Cláudio Fernando Nhampossa, pelas horas de estudos, pelos dramas e "*science*" compartilhada. Tenho por vós um inestimável apreço.

Aos meus bons amigos e colegas Vera Nhantumbo, Eduardo Mboa, Camilo Cossa, Humberto Tandane, João Matos, Gonçalo Machatine, Honória Macamo e aos demais que não foram citados, mas que contribuíram e ajudaram-me de alguma forma durante este trajecto.

A todo corpo docente, técnico e demais funcionários da Faculdade de Engenharia, em especial os pertencentes ao Departamento de Engenharia Química por contribuírem decisivamente para a minha formação.

## RESUMO

A utilização da biomassa lenhosa residual, especificamente a serradura de madeira, para a produção de briquetes constitui uma boa forma de aproveitá-la. E para uma melhor utilização dos briquetes é necessário que se conheçam as suas características. Neste sentido, o presente trabalho teve como objectivo principal produzir e avaliar as características dos briquetes de serradura de *Azelia quanzensis* (chanfuta), *Pterocarpus angolensis* (umbila) e *Pinus* (pinho), recolhidos numa serração localizada no bairro de Chamanculo, Cidade de Maputo.

Os briquetes foram produzidos de forma manual com recurso a uma prensa hidráulica. O processo de briquetagem foi feito a uma temperatura de 150°C, pressão de 10 MPa, sem uso de aglutinante e sendo utilizados 60 g de biomassa para cada briquete. As serraduras de chanfuta, umbila e pinho foram avaliadas em relação à densidade a granel (514,88; 318,18 e 139,96 kg/m<sup>3</sup>); teor de humidade (13,37, 13,07 e 11,63%); teor de voláteis (72,69, 75,80 e 84,35%); teor de cinzas (4,03, 4,45 e 0,65%); teor de carbono fixo (23,28, 19,74 e 15,00%) e poder calorífico superior (19,53, 18,76 e 18,45 MJ/kg). Os briquetes mostraram-se muito pouco friáveis e com boa estabilidade dimensional. Apresentaram densidade aparente no intervalo de 1016,46 a 1043,73 kg/m<sup>3</sup>; densidade energética na faixa de 13,58.10<sup>3</sup> a 14,70.10<sup>3</sup> MJ/m<sup>3</sup>; tensão máxima no intervalo de 2,40 a 2,93 MPa; força máxima variou de 5676,4 a 7304,7 N; índices de combustão (ICOM) compreendidos no intervalo de 0,4439 a 0,5594; potência na faixa de 3,50 a 3,67 kW e consumo específico no intervalo de 1,99 a 2,53 kg/kg.

Esses resultados indicam que os briquetes reúnem as características & comportamento térmico necessário para serem utilizados como combustíveis. Atendendo a todos estes parâmetros, observa-se que os melhores biocombustíveis, daqueles que foram estudados, foram os briquetes produzidos a partir da serradura de chanfuta.

**Palavras-chave:** Biomassa, Briquetes, Serradura de Chanfuta, Umbila e Pinho, combustíveis alternativos.

## ÍNDICE

<b>DEDICATÓRIA .....</b>	<b>II</b>
<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>III</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>IV</b>
<b>LISTA DE SIGLAS E ACRÓNIMOS .....</b>	<b>VIII</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>IX</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>X</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 Justificativa.....	2
1.2 Objectivos .....	2
1.2.1 Objectivo geral.....	2
1.2.2 Objectivos específicos .....	2
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>4</b>
2.1 Biomassa lenhosa para fins energéticos em Moçambique .....	4
2.2 Biomassa .....	5
2.2.1 Composição da Biomassa .....	6
2.2.2 Classificação da biomassa .....	7
2.3 Conversão energética da biomassa .....	7
2.4 Briquetagem.....	9
2.4.1 Vantagens dos briquetes .....	10
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>11</b>
3.1 Materiais.....	11
3.2 Métodos .....	12
O presente trabalho obedeceu o fluxograma apresentado na Figura 3.2. ....	12
3.2.1 Preparação das amostras.....	12
3.2.2 Análise granulométrica .....	13

3.2.3	Densidade a granel.....	14
3.2.4	Teor humidade (TH) .....	15
3.2.5	Teor de Voláteis (TV).....	15
3.2.6	Teor de cinzas (TCZ).....	16
3.2.7	Teor de carbono fixo (TCF) .....	17
3.2.8	Poder calorífico.....	17
3.2.9	Produção dos briquetes .....	18
3.2.10	Expansão axial .....	19
3.2.11	Densidade aparente e energética.....	19
3.2.12	Teste de friabilidade .....	20
3.2.13	Ensaio de resistência à compressão .....	21
3.2.14	Índice de Combustão.....	21
3.2.15	Ensaio em equipamentos de combustão de combustíveis sólidos .	23
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>26</b>
4.1	Análise granulométrica.....	26
4.2	Densidade a granel .....	27
4.3	Análise imediata.....	28
4.3.1	Teor de Humidade (TH).....	28
4.3.2	Teor de Voláteis (TV).....	29
4.3.3	Teor de cinzas (TCZ).....	29
4.3.4	Teor de carbono Fixo (TCF) .....	30
4.4	Poder Calorífico .....	31
4.5	Produção dos Briquetes .....	33
4.6	Expansão axial.....	33
4.7	Densidade aparente e energética dos briquetes.....	34
4.7.1	Densidade aparente .....	35
4.7.2	Densidade energética.....	36

4.8	Teste de Friabilidade.....	36
4.9	Resistência à compressão .....	38
4.10	Índice de Combustão .....	39
4.11	Ensaio em equipamentos de combustão de combustíveis sólidos.....	41
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>45</b>
5.1	Conclusões .....	45
5.2	Recomendações .....	46
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>47</b>
	<b>APÊNDICES .....</b>	<b>541</b>

## LISTA DE SIGLAS E ACRÓNIMOS

---

Aler	Associação lusófona de energias renováveis
ASTM	American Society for testing and Materials
A.P.	Alta potência
B.P.	Baixa potência
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations

---

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Percentagem do fornecimento total de energia primária por fonte em 2014 (Aler, 2017).....	4
Figura 2.2: Fontes de biomassa e seus processos de conversão (Marafon, 2016 <i>apud</i> Silva, 2021). .....	8
Figura 3.1: (a) Serradura de Chanfuta (b) Serradura de Umbila e (c) Serradura de Pinho. ....	11
Figura 3.2: Fluxograma das actividades executadas. ....	12
Figura 3.3: (a) Estufa e (b) moinho ultracentrifugo. ....	13
Figura 3.4: Conjunto de peneiros e agitador orbital.....	14
Figura 3.5: Balões volumétricos contendo biomassa para determinação de densidade a granel.....	15
Figura 3.6: Analisador de Humidade .....	15
Figura 3.7: Mufla e os cadinhos utilizados na determinação do teor de voláteis..	16
Figura 3.8: Cadinhos contendo cinzas .....	17
Figura 3.9: (a) Prensa laboratorial; (b) Equipamento de controlo de temperatura.	19
Figura 3.10: Moinho utilizado para executar o teste de friabilidade.....	21
Figura 3.11: Equipamento utilizado para o ensaio de resistência à compressão.	21
Figura 3.12: Equipamentos utilizados na realização do teste de índice de combustão.....	22
Figura 3.13: Sistema usado durante a execução do ensaio.....	24
Figura 4.1: Distribuição granulométrica da serradura de chanfuta, umbila e pinho. ....	26
Figura 4.2: Briquetes produzidos.....	33
Figura 4.3: Variação axial dos briquetes com o tempo.....	34
Figura 4.4: Resultados do ensaio de friabilidade dos briquetes. ....	37
Figura 4.5: Evolução da temperatura em função do tempo de combustão das biomassas .....	40
Figura 4.6: Perda percentual de massa em função do tempo de combustão das biomassas .....	41
Figura 4.7: Evolução da temperatura com o tempo nas fases de alta e baixa potência, durante o decurso do teste de fervura. ....	42

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1: Valores médios da densidade a granel das biomassas com seus respectivos desvios padrão .....	27
Tabela 4.2: Resultados da análise imediata das biomassas.....	28
Tabela 4.3: Resultados do poder calorífico das biomassas utilizadas. ....	31
Tabela 4.4: Valores das densidades aparentes e energéticas.....	35
Tabela 4.5: Resultados do ensaio de resistência à compressão.....	38
Tabela 4.6: Resultados do ensaio de combustão.....	39
Tabela 4.7: Resultados do teste de fervura da água.....	42

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 3.1: Frações retidas em cada peneiro .....	13
Equação 3.2: Densidade a granel .....	14
Equação 3.3: Teor de voláteis .....	16
Equação 3.4: Teor de cinzas .....	17
Equação 3.5: Teor de carbono fixo .....	17
Equação 3.6: Poder calorífico superior .....	18
Equação 3.7: Poder calorífico inferior .....	18
Equação 3.8: Poder calorífico útil .....	18
Equação 3.9: Expansão axial .....	19
Equação 3.11: Densidade aparente .....	20
Equação 3.12: Densidade energética do briquete .....	20
Equação 3.13: Densidade energética do resíduo .....	20
Equação 3.14: Percentual de perda de massa .....	20
Equação 3.15: índice de combustão .....	22
Equação 3.16: Calor libertado durante a combustão .....	24
Equação 3.17: Calor absorvido pela água .....	24
Equação 3.18 Calor latente de vaporização.....	25
Equação 3.19: Rendimento .....	25
Equação 3.20: Potência .....	25
Equação 3.21: Consumo específico .....	25

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria madeireira em Moçambique opera com baixos níveis de eficiência de conversão da árvore, toro e madeira serrada. Estima-se que o rendimento conseguido durante o processamento da madeira situa-se dentro da faixa de 30 a 45% (Chitará, 2003; Ribeiro, 1992 *apud* Gonçalves, 2004; Van Der Plas *et al.*, 2012; Nanvonamuquitxo *et al.*, 2017). Diante deste cenário, são gerados volumes enormes de resíduos que na maioria dos casos são acumulados e descartados de forma inadequada. Esse descarte inadequado de resíduos pode causar problemas ambientais, tais como a poluição atmosférica devido aos póis e aos produtos da inceneração inconveniente dos mesmos. Mas também, podem prejudicar as operações nos estabelecimentos de processamento da madeira devido ao espaço ocupado pelos respectivos resíduos (Protássio *et al.*, 2011).

O reaproveitamento energético dos resíduos gerados durante o processamento da madeira pode constituir uma forma de dar um destino adequado a esses resíduos e reduzir ou amenizar a pressão sobre recursos naturais que são explorados directamente como fonte de combustível (lenha e carvão vegetal). É importante ressaltar que no estudo feito por Chandamela (2021), apontou que a produção do carvão vegetal e da lenha têm contribuído para o desflorestamento e degradação florestal em Moçambique.

Entretanto, os resíduos *in natura* apresentam algumas características que podem limitar até mesmo inviabilizar o seu uso directo como combustível, tais como o alto teor de humidade, a baixa densidade, granulometria irregular e baixa densidade energética (Filho, 2013). Portanto, com o intuito de tornar o seu uso como combustível mais eficiente e eficaz, é necessário padronizar e melhorar a qualidade dos resíduos, e isso por ser conseguido através do processo da briquetagem. O produto resultante deste processo é denominado briquete. O briquete pode ser directamente competitivo com a lenha e carvão vegetal, podendo, em alguns casos, ser um óptimo substituto destes. Os briquetes podem ser utilizados por combustão directa em caldeiras, fornos, bem como em fogões domésticos (Dias *et al.*, 2012).

Desta forma, o presente trabalho propõe-se a estudar as características dos briquetes produzidos a partir da serradura de madeira das espécies umbila, chanfuta e pinho, visando seu uso como fonte de energia. Pois, deve-se, primeiramente, conhecer as características físico-químicas, mecânicas e energéticas da biomassa (briquetes) para poder avaliar qual a melhor forma de utilizá-la como fonte de energia.

## **1.1 Justificativa**

Moçambique à semelhança de outros países enfrenta o desafio de encontrar fontes de energia mais limpas, sustentáveis e renováveis, nesse contexto enquadra-se a ideia de estudar os briquetes (biocombustível sólido) produzidos a partir de resíduos resultantes do processamento da madeira, concretamente a serradura. Em Moçambique parte significativa destes resíduos são subaproveitados, em muitos casos são utilizados como estrume em campos de cultivo e cama de animais na criação de aves especialmente frangos com intuito de evitar o contacto directo com chão devido a humidade ou são descartados de forma indevida para o ambiente. Esses resíduos (serradura) podem ser reaproveitados para a produção de briquetes, melhorando assim a sua gestão.

Paralelamente, a reutilização dos desperdícios (serradura) resultantes do processamento mecânico da madeira, reduziria consideravelmente a pressão sobre os recursos que são utilizados para produção do carvão vegetal e da lenha. Dado que os briquetes podem ser substitutos da lenha e o do carvão vegetal em muitas aplicações, como a confecção de alimentos.

## **1.2 Objectivos**

### **1.2.1 Objectivo geral**

- Produzir e caracterizar os briquetes de serradura de *Azelia quanzensis* (chanfuta), *Pterocarpus angolensis* (umbila) e *Pinus* (pinho).

### **1.2.2 Objectivos específicos**

- Fazer a análise granulométrica;

- Caracterizar química e fisicamente as biomassas (densidade a granel, teor de humidade, teor de voláteis, teor de cinzas, teor de carbono fixo e poder calorífico);
- Produzir os briquetes;  
Fazer a caracterização energética, física, e mecânica dos briquetes (densidade aparente, densidade energética, friabilidade, expansão axial e resistência à compressão);
- Determinar o índice de combustão (ICOM) dos briquetes;
- Executar ensaios de combustão em equipamentos de combustão de combustíveis sólidos – teste de fervura da água.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Biomassa lenhosa para fins energéticos em Moçambique

Moçambique possui uma matriz diversificada de fontes de energia, a saber: biomassa (lenha, carvão vegetal, entre outros), hídrica (barragens hidroeléctricas), combustíveis fósseis (petróleo, gás natural e o carvão mineral), solar e eólica (Cuvilas *et al.*, 2010; Aler, 2017). Porém, como a maioria dos países em vias de desenvolvimento, Moçambique é fortemente dependente da biomassa para satisfazer suas necessidades energéticas conforme ilustra a Figura 2.1, principalmente a biomassa lenhosa (carvão vegetal e a lenha). Dados indicam que o consumo de combustíveis lenhosos (lenha e carvão vegetal) em Moçambique foi estimado em cerca de 9,3 e 5,5 milhões de toneladas por ano na zona rural e urbana, respectivamente, totalizando 14,8 milhões de toneladas a nível nacional (Sitoe *et al.*, 2007 *apud* Fernandes, 2014). Cerca de 80% da população moçambicana, com principal incidência para as camadas de baixo rendimento, utiliza o carvão vegetal e lenha para confeccionar alimentos, aquecimento, e suprir outras necessidades energéticas (Falcão, 2013).

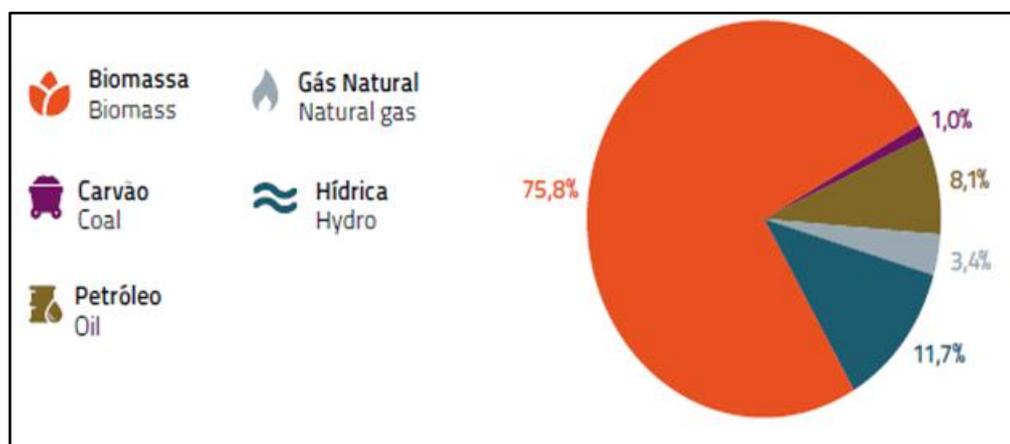


Figura 2.1 Percentagem do fornecimento total de energia primária por fonte em 2014 (Aler, 2017).

Como já foi referenciado anteriormente, a produção da lenha e do carvão vegetal contribuem de forma significativa para o desflorestamento em Moçambique. Os dados do Segundo Inventário Florestal apontam que até 2016, Moçambique possuía uma extensão florestal estimada em cerca de 34 milhões de hectares, representando cerca de 43% do território Moçambicano. A área de floresta em 2003 era de 37,0 milhões de hectares, o que significa que foram perdidos 3

milhões de hectares de floresta entre 2003 e 2016, (NOA, 2016). O estudo mais recente realizado pelo Consórcio CEAGRE e *Winrock*, em 2016 citado por MITADER (2018), mostrou que a exploração florestal para fins de combustíveis lenhosos e madeira contribui com 15% no desflorestamento.

Diante desta problemática, a busca por fontes alternativas para a geração de energia tornou-se necessária. Nesse sentido, a biomassa lenhosa residual (galhos, folhas, serradura, etc) posiciona-se como uma opção viável e potencialmente sustentável. A literatura sobre as estimativas mais apuradas e realistas sobre a quantidade de biomassa lenhosa residual produzida anualmente em Moçambique é quase que inexistente. Não obstante, existem alguns estudos que fornecem estimativas razoáveis, e que a partir destes pode-se ter uma ideia de quão promissora é essa fonte. Segundo os estudos feitos por Batidzirai & Faaij (2005) citados por Cuvilas *et al.* (2015), Moçambique possui uma capacidade estimada de 2,7 PJ em energia potencial de resíduos resultantes da exploração florestal e processamento de madeira.

Segundo Magalhães (2018), Moçambique é um país que possui um conteúdo florestal vasto, com mais de 17 milhões de hectares de floresta produtiva, sendo assim têm um grande potencial para aproveitamento da energia de biomassa lenhosa. De acordo com Aler (2017) citando Smeets *et al.* (2007), os resíduos resultantes da actividade florestal a nível de todo o país poderiam gerar aproximadamente 750 GWh de energia. E para a província de Maputo, Vasco & Costa (2007), estimaram um potencial de geração de 236.520 MWh em energia através biomassa lenhosa residual.

O sector madeireiro é um dos que mais contribui para geração de resíduos florestais. De acordo com o levantamento feito por Van Der Plas *et al.* (2012), Moçambique produz anualmente 144.602 mil  $m^3$  de resíduos provenientes do processamento da madeira (assumindo que a taxa de conversão da tora em madeira serrada é de 40%).

## **2.2 Biomassa**

Entende-se por *Biomassa* toda a matéria orgânica de origem animal, vegetal ou microbiana que directa ou indirectamente contém energia solar armazenada na

sua forma química, e ao ser submetida aos processos de conversão adequados pode ser utilizada para a geração de energia (McKendry, 2002a). A energia solar encontra-se armazenada nas ligações químicas dos componentes estruturais da biomassa e tal energia só pode ser libertada se as mesmas forem rompidas por processos termoquímicos (combustão, gaseificação e pirólise) ou bioquímicos (digestão celular e fermentação) (McKendry, 2002a; Lima, 2018; Morgado, 2019). São exemplos de biomassa os seguintes materiais: espécies florestais folhosas, culturas energéticas como o girassol, jatrofa e o milho, resíduos florestais, resíduos agrícolas e industriais, resíduos sólidos urbanos (biodegradáveis), plantas aquáticas, algas, etc (McKendry, 2002a; Pinto, 2016).

Assim sendo, biomassa pode ser descrita como um recurso renovável que pode ser utilizado como fonte de energia sem gerar muitas preocupações no se refere a emissão dos gases de efeito estufa (GEE'S), sobretudo o dióxido de carbono. Na realidade a biomassa é um combustível neutro em termos de emissões de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) (Braga, 2019). A biomassa pode ser convertida em combustíveis gasosos (nomeadamente biogás), líquidos (como, por exemplo, biodiesel, etanol ou metanol) ou sólidos (como é o caso dos *pellets* e dos briquetes).

### **2.2.1 Composição da Biomassa**

A biomassa é uma mistura complexa de compostos de diferentes famílias, a saber: as fibras (celulose, hemicelulose e lignina), os extractos (lípidos, proteínas, resinas, etc), água, cinzas, entre outros compostos, e as quantidades de cada um destes compostos está intimamente relacionado com a sua origem, condições de crescimento, ambientais entre outros (Barreto, 2008; Braga, 2019). A biomassa lignocelulósica (como é o caso da biomassa florestal) é constituída por três componentes principais: a celulose ( $C_5H_8O_4$ ), hemicelulose ( $C_6H_{10}O_5$ ), e a lignina ( $C_9H_{10}(OCH_3)_{0,9-1,7}$ ), resultantes das reacções fotossintéticas (Barreto, 2008).

A celulose é o polímero de origem natural mais abundante na natureza. É um polissacarídeo de elevada massa molar com cadeias lineares formadas por unidades de (1,4)-D-glicopirranose. A hemicelulose é um dos constituintes da madeira e está sempre associada à lignina e à celulose. É um hetero-

polissacarídeo formado por uma mistura de monómeros de pentoses e hexoses, comparativamente a celulose, possui um grau menor de polimerização. Por sua vez, a lignina é um polímero tridimensional amorfo, complexo formado por compostos aromáticos e alifáticos, cuja finalidade é manter as fibras juntas (McKendry, 2002a; Chrisostomo, 2011; Donate, 2014).

No concernente à composição química elementar, os diferentes tipos de biomassa apresentam quantidades bem próximas de oxigénio, hidrogénio e carbono, encontrando-se entre 30 a 45 %, 5 a 6%, e 30 a 60 % respectivamente (Braga, 2019).

### 2.2.2 Classificação da biomassa

De acordo com Fortes & Raimundo (2020), segundo as rotas tecnológicas e seu nível de desenvolvimento tecnológico, a biomassa pode ser dividida em dois grupos:

- a) **Biomassa tradicional:** composta essencialmente pela lenha, carvão vegetal e resíduos naturais.
- b) **Biomassa moderna:** é produzida a partir de processos tecnológicos avançados e mais eficientes que geram produtos capazes de competir com combustíveis de origem fóssil. São exemplos de biomassa moderna: o bio-óleo, o biodiesel, o biogás, os briquetes, *pellets* e os cultivos dedicados de espécies em florestas plantadas.

### 2.3 Conversão energética da biomassa

Há várias rotas de conversão da biomassa em energia útil (electricidade e calor) ou transportadores de energia (carvão, gás, óleo e briquetes), conforme o ilustrado na Figura 2.2. A conversão da biomassa pode dividir-se em dois grupos distintos: o dos processos termoquímicos e a dos processos bioquímicos (fermentação e digestão anaeróbica). Dentro dos processos termoquímicos encontra-se a combustão directa, ao qual se dá especial atenção, a pirólise, a gaseificação e a liquefacção. Em muitas situações os factores que influenciam a escolha do processo de conversão são a forma desejada de energia, restrições

ambientais, as condições económicas, os tipos e as quantidades de biomassa disponível (Mckendry, 2002b).

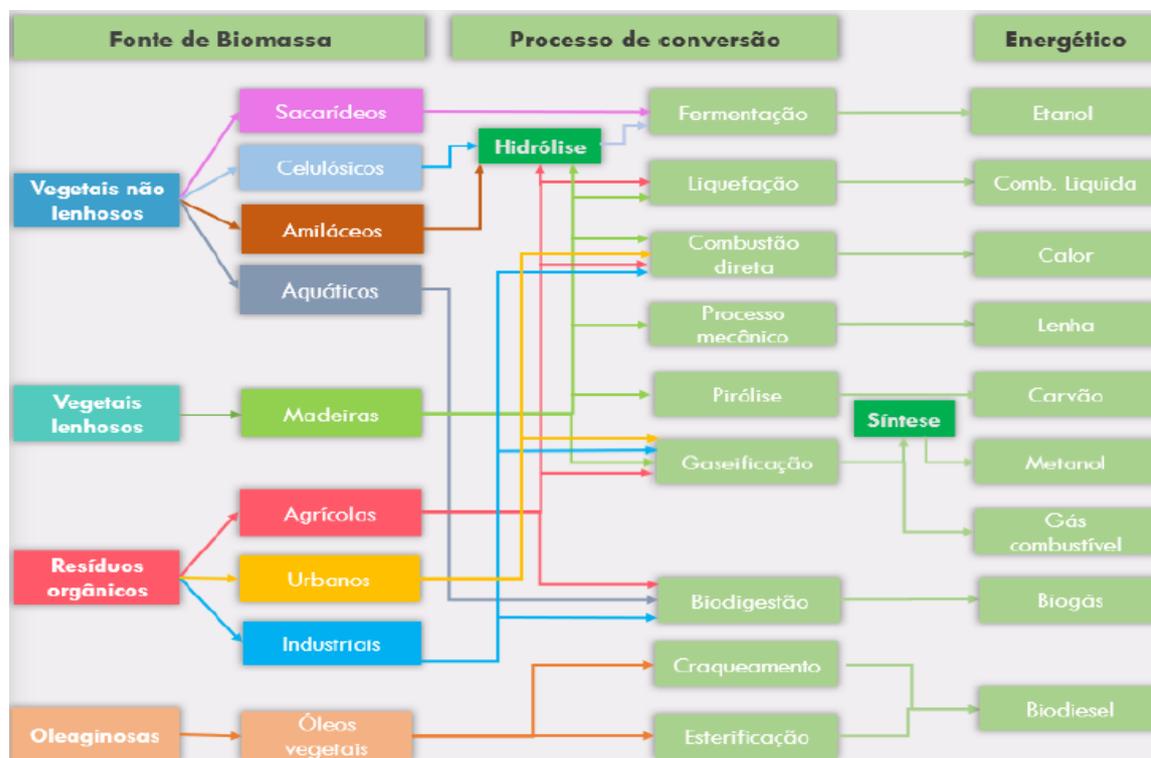


Figura 2.2: Fontes de biomassa e seus processos de conversão (Marafon, 2016 *apud* Silva, 2021).

**Combustão:** este processo de conversão gera calor através da queima de um combustível, a partir do qual a energia química é convertida em calor. É uma reacção química exotérmica, que envolve a queima a altas temperaturas de um combustível utilizando o ar, oxigénio puro ou qualquer outra mistura gasosa que contenha oxigénio (Barreto, 2008; Silva 2021). O calor está na forma de gases quentes de combustão.

Os produtos da reacção de combustão da biomassa são de enorme complexidade. Os principais produtos são o dióxido de carbono, água, mas há uma série de produtos que não deixam de ser também importantes como é o caso do monóxido de carbono, hidrocarbonetos, óxidos de nitrogénio e enxofre, entre outros (Barreto, 2008).

Segundo Lourinho (2012) citando Van Loo e Koppejan (2008), a combustão da biomassa é um processo que ocorre em 4 fases sequenciais, a saber:

Fase de aquecimento e secagem: Nesta fase ocorre a vaporização da água contida na biomassa, com recurso à energia térmica do sistema, isto é, a energia libertada pelo próprio processo de combustão. Por essa razão não é desejável uma biomassa com elevado teor de humidade, pois pode comprometer a eficiência do processo. Segundo McKendry (2002a) o máximo admissível de humidade presente na biomassa é de 55% uma vez que acima deste valor é libertada uma quantidade insuficiente de energia para satisfazer as necessidades do aquecimento dos reagentes e da evaporação da água.

Fase da volatilização ou pirólise: Esta fase inicia-se quando a biomassa alcança temperaturas altas (190 – 500°C), e caracteriza-se pela libertação, na ausência total ou em atmosfera bastante reduzida de oxigénio, do material volátil que está presente no mesmo. São formados produtos como hidrocarbonetos de cadeia curta, produtos orgânicos, resíduos carbonosos entre outros.

Fase da gaseificação: Consiste na degradação térmica da biomassa na presença de oxigénio em quantidades inferiores a estequiométrica. Ocorre a formação de um resíduo carbonoso, um produto constituído por cinzas, elevado teor de carbono (> 75%) e com pequenas quantidades de outros elementos constituintes da biomassa (hidrogénio, azoto, enxofre e oxigénio) e apresenta um aspecto poroso devido ao processo de desvolatilização.

Fase da combustão: Processa-se a decomposição termoquímica do resíduo carbonoso, na presença do oxigénio em quantidades estequiométricas. Como já foi dito, o resíduo carbonoso resulta da desvolatilização da biomassa e, portanto, a sua combustão só ocorre quando a chama resultante da oxidação dos voláteis é extinta. Posteriormente, o oxigénio entra em contacto com o resíduo carbonoso e inicia-se o processo de combustão propriamente dito.

## **2.4 Briquetagem**

É um processo de compactação que consiste na aplicação da pressão a uma massa de partículas trituradas ou finas (biomassa) e a uma determinada

temperatura, com o objectivo de formar sólidos compactos de formato definido e com elevada densidade (Quirino,1991; De Souza, 2021).

Durante esse processo de compactação, devido a elevação da temperatura, as substâncias que compõem a biomassa vegetal, principalmente a lignina, plastificam-se servindo como uma espécie de ligante natural entre as diversas partículas. Ademais, as proteínas, carboidratos, gorduras e amido, actuam de forma conjunta com a lignina, como adesivo (ligante) natural das partículas (Quirino,1991; Kaliyan & Morey, 2009; De Souza, 2021). A ausência destes aglutinantes (ligantes) naturais, implica normalmente o uso de aglutinantes artificiais como as ceras, resinas e alcatrão (Ohana, 2012).

Segundo Dias *et al.* (2012), o processo de briquetagem é composto pelas seguintes etapas, a saber: recepção da matéria-prima; secagem; trituração/moagem; condicionamento; processo de briquetagem e resfriamento dos briquetes.

O processo de briquetagem, para um mesmo volume concentra mais massa e por consequência mais energia, isto é,  $1m^3$  de briquetes pode conter 5 vezes mais energia que  $1m^3$  de biomassa residual *in natura*. Isso levando consideração a densidade a granel, a densidade aparente e o poder calorífico (Quirino,1991).

#### **2.4.1 Vantagens dos briquetes**

Segundo Paula *et al.* (2011) e Oshiro (2016) existe uma série de vantagens em torno da produção e do uso dos briquetes, das quais é possível destacar:

- Permite uma melhor gestão dos resíduos descartados no ambiente;
- Possui um formato geométrico que facilita o transporte, manuseamento, armazenamento;
- Apresentam menor humidade (10 a 12%), enquanto a lenha muitas vezes possui teores acima de 30% de humidade;
- Proporciona uma queima rápida e uniforme;
- Comparativamente à lenha geram menos fumos, fuligem e rapidamente atingem temperaturas mais altas;
- São combustíveis ecologicamente correctos.

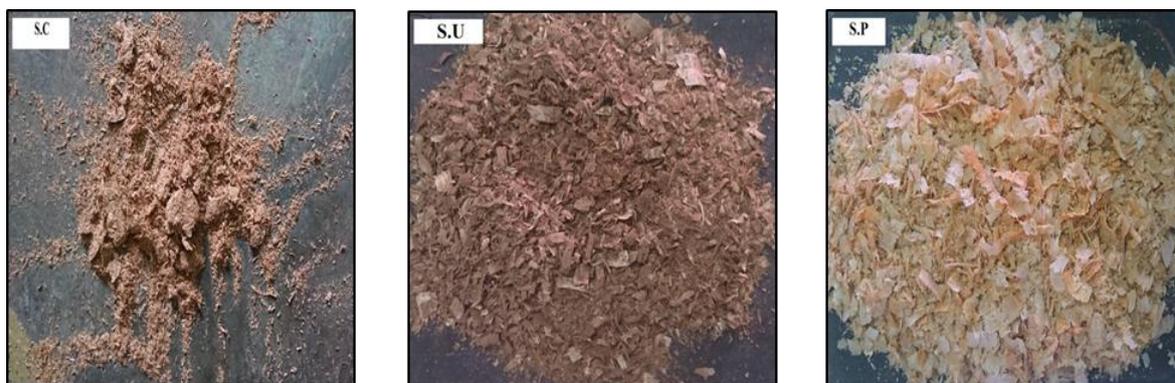
Segundo Oshiro (2016), o briquete pode ser utilizado como um substituto da lenha e do carvão vegetal, em padarias, hotéis, fábricas de tijolos, restaurantes, na indústria dos objectos cerâmicos, entre outros estabelecimentos comerciais e industriais que usem fornos e caldeiras.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios contemplados neste trabalho foram desenvolvidos nos Laboratórios de Engenharia Química da Faculdade de Engenharia e no Laboratório de Tecnologia da madeira na faculdade de Agronomia e Engenharia Florestal, ambos da Universidade Eduardo Mondlane-UEM, situada na Cidade de Maputo.

#### 3.1 Materiais

No desenvolvimento deste trabalho foram utilizadas as serraduras de *Azelia quanzensis* (chanfuta), de *Pterocarpus Angolensis* (umbila) e *Pinus* (pinho). Os resíduos ilustrados na Figura 3.1, foram colectados numa serração, localizada no Bairro do Chamanculo, Cidade de Maputo. A escolha recaiu sobre estas espécies de madeira, por estarem entre as mais utilizadas pelas serrações e carpintarias da Cidade e Província de Maputo, e por consequência gerarem quantidades elevadas de resíduos. O carvão vegetal utilizado como base de comparação foi obtido em Bobole - Província de Maputo. Ao longo do presente estudo, as espécies são referidas pelos seus nomes comuns, que estão entre parênteses.



(a)

(b)

(c)

Figura 3.1: (a) Serradura de Chanfuta (b) Serradura de Umbila e (c) Serradura de Pinho.

## 3.2 Métodos

O presente trabalho obedeceu o fluxograma apresentado na Figura 3.2.

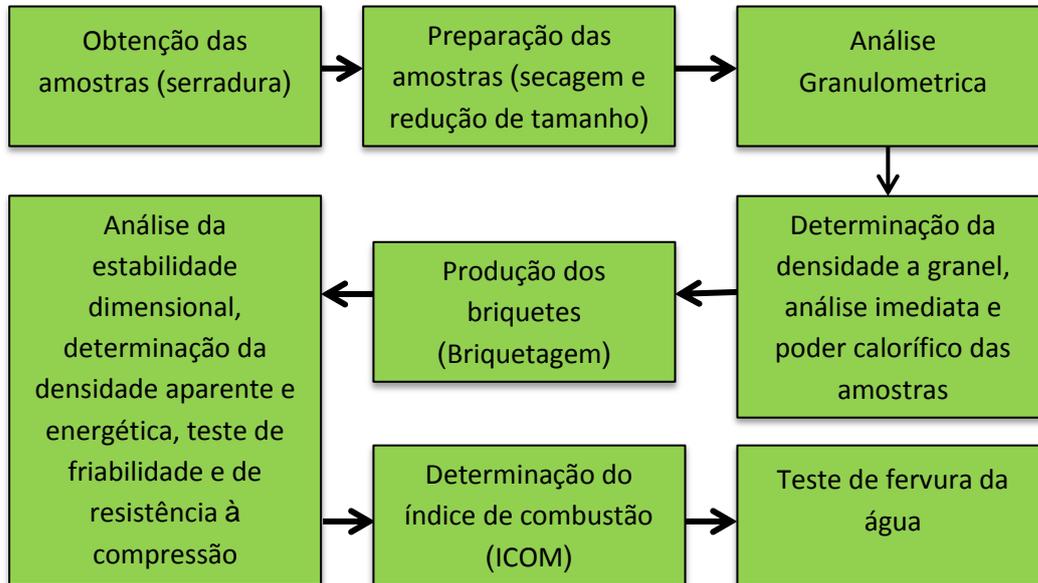


Figura 3.2: Fluxograma das actividades executadas.

### 3.2.1 Preparação das amostras

Após a recepção, as amostras passaram pelo processo de secagem numa estufa da marca *Labotec*, modelo *Ecotherm* conforme ilustra a Figura 3.2a, a uma temperatura de  $105 \pm 3^\circ\text{C}$  (que é a temperatura ideal para secagem de biomassa) por tempo suficiente a fim de reduzir o seu alto teor de humidade inicial. Seguidamente a essa etapa, as mesmas foram submetidas a um processo de redução de tamanho das partículas, em um moinho ultracentrifugo de marca *RETSH* e modelo *ZM 200* conforme ilustra a Figura 3.3b.



(a)



(b)

Figura 3.3: (a) Estufa e (b) moinho ultracentrifugo.

### 3.2.2 Análise granulométrica

Este ensaio foi feito com o objectivo de identificar o tamanho de partículas mais representativo dos resíduos escolhidos para este trabalho. Para o efeito, pesaram-se 100 g de amostra na balança analítica de marca *Denver Instrument*, modelo *M-310*, e em seguida colocadas em peneiros padronizados de mesh (18, 30, 35, 80, 120 e 170). O processo de peneiração foi realizado por 10 minutos, a uma amplitude de 90 rpm num dispositivo vibratório de marca *Tampson*, modelo *VS 1000*, conforme ilustra a Figura 3.4. As amostras retidas em cada peneiro foram pesadas e as respectivas fracções foram determinadas usando a Equação 3.1.

$$X_i = \frac{\text{massa retida no peneiro}}{\text{massa total}} \times 100\% \quad (\text{Equação 3.1})$$

Onde:

$X_i$  – É a fracção retida (%).



Figura 3.4: Conjunto de peneiros e agitador orbital

### 3.2.3 Densidade a granel

Exprime a quantidade total de biomassa (kg) por unidade de volume ( $m^3$ ) considerando os espaços vazios entre as partículas. A densidade a granel foi obtida empregando-se o método de pesagem com auxílio de um Becker, balança analítica, e três balões volumétricos de 100 ml. Inicialmente foram pesados os três balões volumétricos vazios, em seguida a amostra em conjunto com o processo de compactação, foi colocada nos balões até a linha que demarca o volume. E por fim, pesaram-se os balões mostrados na Figura 3.5 contendo a amostra para o cálculo da densidade. A massa da amostra foi obtida pela diferença entre o balão contendo a amostra e o balão vazio. A densidade a granel foi determinada utilizando a Equação 3.2.

$$D_{\text{granel}} = \frac{m_{\text{amostra}}}{V} \quad (\text{Equação 3.2})$$

Onde:

$D_{\text{granel}}$ - Densidade a granel ( $kg/m^3$ );

$m_{\text{amostra}}$ - Massa da amostra ( $g$  ou  $kg$ );

$V$ - Volume dos balões ( $cm^3$  ou  $m^3$ ).



Figura 3.5: Balões volumétricos contendo biomassa para determinação de densidade a granel

#### 3.2.4 Teor humidade (TH)

No presente trabalho foi determinada recorrendo a um analisador de humidade de marca *Sartorius* e modelo *MA 100*, conforme ilustra a Figura 3.6. A humidade foi determinada a uma temperatura de 105°C e cerca de 2 g de amostra foram usadas para o efeito.



Figura 3.6: Analisador de Humidade

#### 3.2.5 Teor de Voláteis (TV)

O teor de voláteis foi determinado seguindo a NORMA E-872, foi usado 1 g da amostra seca, com uma granulometria inferior a 0,475 mm, que foi colocada num cadinho de níquel com tampa para evitar contacto com ar durante a

devolatilização. O mesmo procedimento foi repetido para o segundo cadinho. Os cadinhos cobertos foram colocados na mufla (marca: *Termolab* – Fornos Eléctricos; modelo: *MLM*) já a uma temperatura de 950°C e mantidos durante 7 minutos. Em seguida, as amostras foram removidas, conforme mostra a Figura 3.7, arrefecidas num dessecador e pesadas para determinar a perda de massa devido a devolatilização. O teor de voláteis é determinado pela Equação 3.3.

$$TV = \frac{m_{\text{inicial}} - m_{\text{final}}}{m_{\text{amostra}}} \times 100\% \quad (\text{Equação 3.3})$$

Onde:

**TV**- Teor de Voláteis ( %);

**m<sub>inicial</sub>** – Massa do cadinho + massa da amostra (g);

**m<sub>Final</sub>** – Massa do cadinho sem voláteis (g);

**m<sub>amostra</sub>** – Massa da amostra (g).



Figura 3.7: Mufla e os cadinhos utilizados na determinação do teor de voláteis

### 3.2.6 Teor de cinzas (TCZ)

O teor de cinzas da amostra foi determinado usando a NORMA ASTM, protocolo D-1102 para a madeira. De acordo com o padrão D-1102, pesou-se 2 g de biomassa com granulometria inferior a 0,475 mm, previamente secada nas condições padrão. O procedimento consistiu em pesar o cadinho de porcelana vazio, introduzir 2g da amostra, e colocar o cadinho contendo a amostra (com a tampa removida) na mufla. A mufla foi ajustada a uma temperatura de 600°C por um período de 15 horas por forma a garantir que toda matéria orgânica fosse queimada. Os cadinhos foram removidos da mufla quando a temperatura interna desta baixou até 150°C. O arrefecimento das amostras foi continuado num

dessecador até atingir a temperatura ambiente. Os cadinhos contendo as cinzas conforme mostrado pela Figura 3.8, foram pesados e os valores foram usados para a determinação do teor de cinzas, usando a Equação 3.4.

$$\text{TCZ} = \frac{m_2 - m_1}{m_0} \times 100\% \quad (\text{Equação 3.4})$$

Onde:

**TCZ** – Teor de cinzas (%);

**m<sub>2</sub>** – Massa do cadinho + massa de cinzas (g);

**m<sub>1</sub>** – Massa do cadinho vazio (g);

**m<sub>0</sub>** – Massa da amostra (g).



Figura 3.8: Cadinhos contendo cinzas

### 3.2.7 Teor de carbono fixo (TCF)

O teor de carbono fixo foi obtido seguindo a Norma ASTM E870-82 por manipulação algébrica, fazendo a diferença entre 100% e o teor de cinzas e voláteis somados, conforme a Equação 3.5.

$$\text{TCF} = 100 - (\text{Teor de cinzas} + \text{Teor de voláteis}) \quad (\text{Equação 3.5})$$

Onde:

**TCF** – Teor de carbono fixo (%).

### 3.2.8 Poder calorífico

O poder calorífico superior (MJ/kg) foi determinado utilizando a correlação (Equação 3.6) de Parikha *et al.* (2005), que foi desenvolvida para uma ampla gama de combustíveis sólidos incluindo a madeira e o carvão de diversas

localizações geográficas, possui um erro absoluto médio de 3,74% e apresenta resultados satisfatórios para combustíveis com uma análise imediata dentro dos seguintes intervalos: 1,0 – 91,5 % teor de carbono fixo; 0,92 – 90,6 % de teor de voláteis e 0,12 – 77,7 % de teor de cinzas. O poder calorífico inferior (PCI, MJ/kg) foi estimado de acordo com a Equação 3.7, e o poder calorífico útil (PCU, kcal/kg) por meio da Equação 3.8 (Pinto, 2016).

$$PCS = 0,3536TCF + 0,1559TV - 0,0078TCZ \quad (\text{Equação 3.6})$$

$$PCI = PCS - 600[(9H/100)] \quad (\text{Equação 3.7})$$

$$PCU = PCI(1 - TH) - 600TH \quad (\text{Equação 3.8})$$

Onde:

PCS – poder calorífico superior [MJ.kg<sup>-1</sup>];

PCI – poder calorífico inferior [MJ.kg<sup>-1</sup>];

PCU – poder calorífico útil [kcal.kg<sup>-1</sup>];

TCZ – teor de cinzas [%];

TCF – teor de carbono fixo [%];

TV – teor de voláteis [%];

TH – teor de humidade (base húmida) [%];

H – Teor de Hidrogénio, ≈ 6% [%].

### **3.2.9 Produção dos briquetes**

O processo de compactação dos resíduos e a produção das amostras de briquetes, foi realizado manualmente com recurso a uma prensa hidráulica, conforme ilustra a Figura 3.9. As amostras dos briquetes foram produzidas recorrendo a um molde cilíndrico de aço inoxidável de diâmetro 50 mm e altura 33 mm. A massa de resíduos utilizados foi de 60 gramas, uma pressão de 10 MPa, e o tempo de aplicação da carga máxima foi de 5 minutos. O processo de densificação da biomassa foi realizado sem uso de aglutinante, com aquecimento e a uma temperatura de 150°C. E para o arrefecimento foi utilizado um ventilador.



(a)



(b)

Figura 3.9: (a) Prensa laboratorial; (b) Equipamento de controlo de temperatura.

### 3.2.10 Expansão axial

Para verificar a expansão, mediu-se a altura do briquete com auxílio de um paquímetro digital (marca: *Mitutoyo*; modelo: *CD-6"CSX*) logo após a sua produção. Inicialmente, a altura foi medida em cada 20 minutos nas três primeiras horas, depois o intervalo foi alterado para 60 minutos. Após outras três horas as medições foram a cada 24 horas. Este processo revelou-se necessário, pois nas primeiras horas em que o briquete fica em contacto com a humidade a taxa de expansão axial aumenta rapidamente. O processo descrito foi realizado até o momento em que as dimensões permaneceram constantes. A expansão axial é calculada usando a Equação 3.9.

$$EA = \frac{h_f - h_0}{h_0} \times 100\% \quad (\text{Equação 3.9})$$

Onde:

$h_0$ - Comprimento longitudinal imediatamente após a confecção do briquete;

$h_f$ - Comprimento longitudinal após um determinado tempo (mm);

$EA$ - Expansão axial (%).

### 3.2.11 Densidade aparente e energética

Para determinar a densidade aparente usou-se a Equação 3.10, na qual a massa do briquete foi obtida através da pesagem do mesmo numa balança analítica, e o

volume por meio das dimensões (diâmetro e altura). As densidades energéticas dos briquetes e dos resíduos foram estimadas usando as Equações 3.11 e 3.12.

$$D_{\text{aparente}} = \frac{m_{\text{briquete}}}{V_{\text{briquete}}} \quad (\text{Equação 3.10})$$

$$D_{\text{EB}} = D_{\text{aparente}} \times \text{PCU} \quad (\text{Equação 3.11})$$

$$D_{\text{ER}} = D_{\text{granel}} \times \text{PCU} \quad (\text{Equação 3.12})$$

Onde:

$D_{\text{aparente}}$  – Densidade aparente ( $kg/m^3$ );

$D_{\text{granel}}$  - Densidade a granel  $kg/m^3$ );

$m_{\text{briquete}}$  – Massa do briquete ( $kg$ );

$V_{\text{briquete}}$  – Volume do Briquete ( $m^3$ );

$D_{\text{EB}}$  – Densidade energética do briquete ( $kJ/m^3$  ou  $kcal/m^3$  );

$D_{\text{ER}}$  – Densidade energética do resíduo ( $kJ/m^3$  ou  $kcal/m^3$  ).

### 3.2.12 Teste de friabilidade

O teste de friabilidade ou tamboramento foi realizado inserindo-se um briquete de cada vez, previamente pesado numa balança analítica, no moinho de bolas (marca: *Anand A.C Induction Motor*) (Figura 3.10), ajustado para 40 rotações por minuto durante 5 minutos (200 rotações por briquete). Os briquetes foram retirados do moinho e pesados novamente. Acrescentar que não existe uma norma específica para realização deste teste. Para calcular a percentagem da massa perdida durante o ensaio de friabilidade dos briquetes usou-se a Equação 3.13.

$$\% \text{Perda} = \frac{m_o - m_f}{m_o} \times 100\% \quad (\text{Equação 3.13})$$

Onde:

$m_o$  - Massa do briquete antes do teste de friabilidade (kg);

$m_f$  – Massa final do briquete depois do teste de friabilidade (kg).



Figura 3.10: Moinho utilizado para executar o teste de friabilidade

### 3.2.13 Ensaio de resistência à compressão

Para determinar a resistência à compressão dos briquetes, estes foram posicionados numa equipamento apropriado para testes de compressão (marca *Testometric*, modelo: *M500-50AT*) conforme ilustrado na Figura 3.11. Para a realização deste teste o equipamento foi ajustado para exercer uma força de compressão perpendicular de 5000 N sobre os briquetes a uma velocidade de ensaio de 3,0 mm/minuto. Os resultados de resistência à compressão foram exibidos por um *software* acoplado ao equipamento. Foram realizados 9 ensaios no total, e todos ensaios totalmente automatizados.



Figura 3.11: Equipamento utilizado para o ensaio de resistência à compressão.

### 3.2.14 Índice de Combustão

Para executar o ensaio de combustão dos briquetes, construiu-se um sistema semelhante ao desenvolvido por Quirino (1991), conforme ilustra a Figura 3.12. O conjunto é constituído pelo combustor, um anteparo de chapa metálica (para proteger a combustão da movimentação do ar), duas placas de madeira (para proteger a balança do calor da combustão), um leitor de temperatura de marca

*Cole-parmer*, modelo 91000-00 onde é acoplado a um termopar do tipo K (para medir a temperatura de chama), um cronómetro para controlar o tempo, e uma balança com a precisão de 5 g (marca: *ADAM*; modelo: *SA 1422*).

Esse sistema permitiu 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. Com esses dados é possível elaborar curvas de temperatura versus tempo, massa versus tempo e massa versus temperatura, que tornará possível elaborar o índice denominado "Índice de combustão" ou ICOM, segundo Quirino (1991).

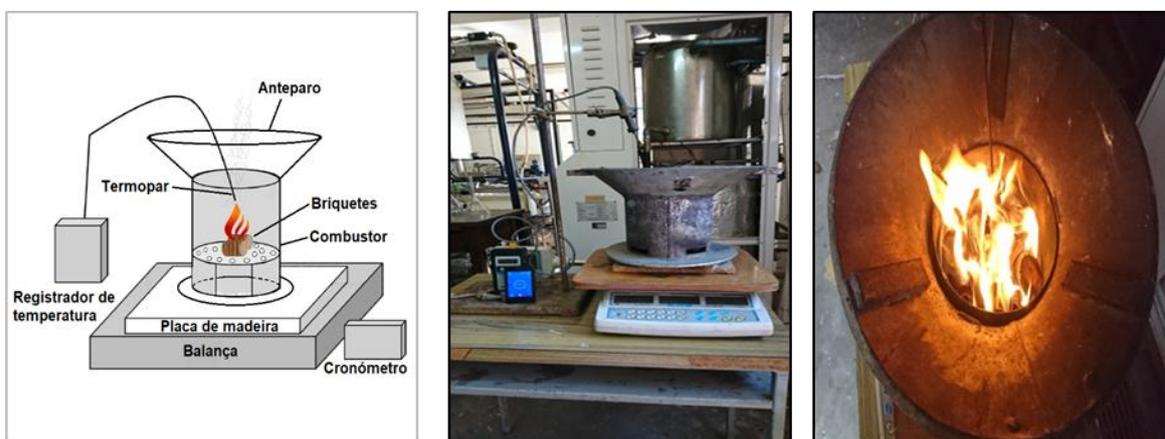


Figura 3.12: Equipamentos utilizados na realização do teste de índice de combustão.

O ensaio foi executado durante 120 minutos. A massa consumida e a temperatura foram anotados a cada 5 minutos, durante 120 minutos (Quirino, 1991). Para o efeito foram utilizados 300 gramas de briquetes por teste e 40 mililitros de querosene para dar ignição ao combustível.

O índice de combustão (ICOM) é um número adimensional calculado usando a Equação 3.14.

$$\text{ICOM} = \frac{A \times B}{C \times 100\%} \quad (\text{Equação 3.14})$$

Onde:

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

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

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

### **3.2.15 Ensaios em equipamentos de combustão de combustíveis sólidos**

O ensaio de fervura da água foi realizado seguindo a metodologia descrita por Victorino (1995). A quantidade de água utilizada durante a execução do teste foi de 2/3 da capacidade total da panela. O teste de fervura abarca duas fases: a fase de alta potência (A.P) e a de baixa potência (B.P). A fase de alta potência envolveu o aquecimento da quantidade padrão de água desde a temperatura ambiente até a ebulição, mantendo-a em ebulição durante 15 minutos. Por sua vez, a fase de baixa potência consistiu na redução da quantidade de combustível para a manutenção da temperatura da água alguns graus abaixo da temperatura de ebulição normal da água durante 60 minutos.

O sistema usado para a aquisição de dados experimentais é ilustrado na Figura 3.13 e, seguiu 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 (vii).

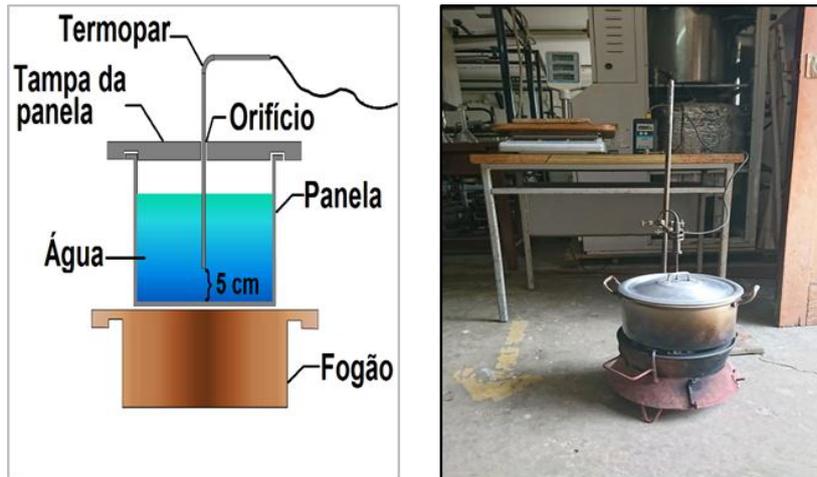


Figura 3.13: Sistema usado durante a execução do ensaio

Os cálculos térmicos fizeram-se necessários. Pelo que, as quantidades consideradas necessárias foram obtidas usando o conjunto de equações que se seguem:

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

$$Q_{lib} = PCI \times m_{cc} \quad (\text{Equação 3.15})$$

PCI – Poder calorífico inferior do combustível (kJ/kg);

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

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

$$Q_{abs} = m_{ic} \times c_a \times (T_{af} - T_{ai}) \quad (\text{Equação 3.16})$$

$m_{ic}$  – Massa da água no início do teste (kg);

$c_a$  – Calor específico da água (4,2kJ/kg. K);

$T_{af}$  – Temperatura final da água (K);

$T_{ai}$  – Temperatura inicial da água (K).

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

$$Q_{vap} = \Delta m_a \times L \quad (\text{Equação 3.17})$$

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

L – Calor latente de vaporização da água ( $2,26 \cdot 10^6$  kJ/kg)

**4. Rendimento ( $\eta$ , %):** 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.

$$\eta = \frac{Q_{vap} + Q_{abs}}{Q_{lib}} \quad (\text{Equação 3.18})$$

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

$$P = \frac{Q_{lib}}{t} \quad (\text{Equação 3.19})$$

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

t – Duração do teste (s).

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

$$C_c = \frac{m_{cc}}{\Delta m_a} \quad (\text{Equação 3.20})$$

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Análise granulométrica

Na Figura 4.1 são apresentadas as distribuições granulométricas das biomassas depois da moagem e peneiração.

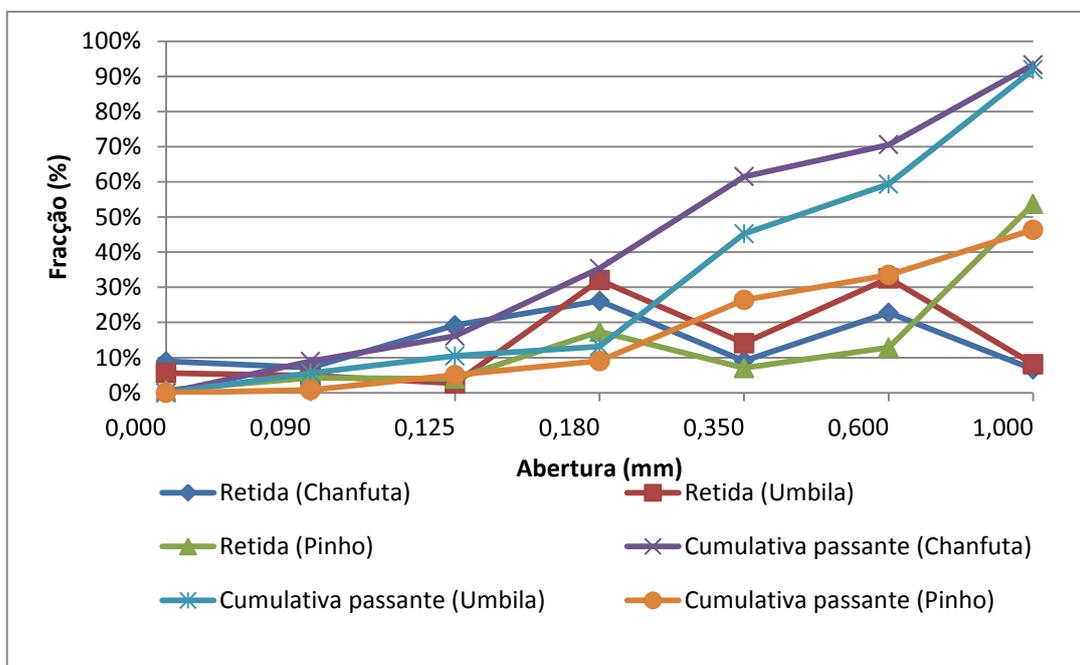


Figura 4.1: Distribuição granulométrica da serradura de chanfuta, umbila e pinho.

Este ensaio foi feito com o objectivo de identificar o tamanho de partículas mais representativo dos resíduos escolhidos para este trabalho. O tamanho das partículas é um importante parâmetro a ser avaliado pois afecta a qualidade e durabilidade dos briquetes produzidos.

Observa-se na Figura 4.1 que as partículas que constituem as serraduras de chanfuta e umbila foram maioritariamente retidas nos peneiros com abertura de 0,125 mm a 0,600 mm. Para a serradura de pinho, as partículas que a constituem foram retidas, consideravelmente, no peneiro com abertura de 1,000 mm. Estes resultados podem ser considerados aceitáveis para a briquetagem, pois estão abaixo da granulometria utilizada por Silva *et al.* (2015) que efectuou a briquetagem de resíduos agrícolas e madeireiros com partículas de tamanho inferior a 1,70 mm, tendo os briquetes apresentado boa resistência mecânica. Neste trabalho, para a produção dos briquetes foram utilizadas partículas com tamanho até 1,000 mm. Kpalo *et al.* (2020) indica que biomassa com tamanho

das partículas menor que 2 mm é a ideal para a briquetagem, pois os briquetes resultantes possuem alta densidade e resistência mecânica.

Durante a briquetagem, as partículas com maior granulometria podem dificultar o processo de aglomeração e compactação, com isso, o briquete resultante pode apresentar baixa densidade aparente, um grau de porosidade acentuado, baixa resistência à compressão e propensão a esfarelar-se (Dias *et al.* 2012).

#### 4.2 Densidade a granel

Os resultados obtidos da densidade a granel das biomassas encontram-se apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Valores médios da densidade a granel das biomassas com seus respectivos desvios padrão

<b>Biomassa</b>	<b>Densidade a granel (kg/m<sup>3</sup>)</b>
Serradura de chanfuta	514,88 ± 0,89
Serradura de umbila	318,18 ± 0,76
Serradura de pinho	139,96 ± 0,85

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. É uma medida de grande importância para determinar o grau de compactação dos materiais briquetados (Faustino *et al.*, 2019).

O valor da densidade a granel da serradura de chanfuta (514,88 kg/m<sup>3</sup>) foi superior ao da serradura de umbila (318,18 kg/m<sup>3</sup>) e o da serradura de pinho (139,96 kg/m<sup>3</sup>). Isso indica que durante o transporte e armazenamento a serradura de chanfuta demandará menor volume quando comparada com as demais serraduras. Há uma relação de proporcionalidade inversa entre o tamanho das partículas e a densidade a granel. Quanto menor o tamanho das partículas, maior é o valor da densidade a granel.

Os valores da densidade a granel observados para as serraduras de chanfuta e umbila foram superiores aos encontrados por Hillig *et al.* (2009) e Schneid (2020)

para serraduras provenientes de diferentes espécies madeireiras, pois, estes encontraram 223 kg/m<sup>3</sup> e 179,22 a 231,46 kg/m<sup>3</sup>. Possivelmente estes valores inferiores podem ser explicados pela utilização de serradura com uma granulometria maior por parte destes autores durante a realização dos seus estudos. O mesmo argumento serve para justificar o baixo valor encontrado de densidade a granel para a serradura de pinho no presente trabalho

### 4.3 Análise imediata

Nesta secção são apresentados e discutidos os resultados (Tabela 4.2) referentes aos teores de humidade, voláteis, cinzas, assim como carbono fixo.

Tabela 4.2: Resultados da análise imediata das biomassas.

Biomassa	TH (%)	TCZ (%)	TV (%)	TCF (%)
Serradura de chanfuta	13,37±0,10	4,03±0,04	72,69±0,20	23,28
Serradura de umbila	13,07±0,10	4,45±0,13	75,80±0,35	19,74
Serradura de pinho	11,63±0,37	0,65±0,06	84,35±0,51	15,00

#### 4.3.1 Teor de Humidade (TH)

Após a colheita das biomassas investigadas no presente trabalho, os teores de humidade revelaram valores elevados, principalmente para a serradura de pinho a exhibir valores na ordem de 47%. Por outro lado, as serraduras de chanfuta e umbila apresentaram 18,75% e 21,49 % de humidade, respectivamente. O elevado valor encontrado para a serradura de pinho pode ser explicado pelo facto deste, ter sido recolhido no momento em que foi gerado. Em vista, disso, ficou menos tempo exposto ao sol e às condições de maior ventilação e baixa humidade relativa, quando comparado aos demais resíduos.

As biomassas foram colocadas na estufa com o intuito de garantir que a humidade estivesse dentro do padrão considerado ideal para a briquetagem, que de acordo com Marafon *et al.* (2019) deve estar na faixa de 8 a 15%. Os valores dos teores de humidade finais estão patentes na Tabela 4.2

A humidade é uma variável de extrema importância para o processo de briquetagem pois a água promove gelatinização do amido, fragmentação de proteína e a solubilização de fibras, garantindo assim a ligação entre as

partículas. Entretanto, elevados teores de humidade reduzem a resistência mecânica, o tempo de vida do briquete e o rendimento no processo de combustão, assim como podem provocar fracturas dos mesmos devido a expansão dos gases durante a compactação. Baixos teores dificultam a aglomeração das partículas (Dias *et al.*, 2012; Oshiro, 2016).

#### **4.3.2 Teor de Voláteis (TV)**

O teor de voláteis corresponde à quantidade de gases voláteis condensáveis (compostos orgânicos e água) e não condensáveis (CO, CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>) que são libertados durante a combustão da biomassa (McKendry, 2002a; Filho, 2013). Os materiais voláteis desempenham um papel importante no processo de ignição e nas etapas iniciais da combustão da biomassa, pois degradam-se mais facilmente e ajudam a manter a chama da combustão. Assim sendo, o teor de voláteis evidencia a reactividade da biomassa, quanto maior o teor de voláteis, maior a reactividade, mais rápida é a ignição e a queima da mesma. (Marafon *et al.*, 2016).

Os teores de voláteis apresentados pela serradura de chanfuta, umbila, pinho foram de 72,69 %, 75,80% e 84,35 % respectivamente. Estes valores são comparáveis aos obtidos por Ali *et al.* (2010) citados por Cuvilas *et al.* (2014) para madeira de chanfuta e umbila. Os mesmos obtiveram 76,34% para chanfuta e 79,58 % para umbila. Quanto ao teor de voláteis da serradura de pinho estão bem próximos dos 84,2% observados por Souza & Vale (2016).

Em geral, os resultados obtidos estão dentro da faixa considerada aceitável para a biomassa, que varia de 75 a 85 % (Arola, 1976 *apud* Chaves *et al.*, 2013). Paula (2010) produziu briquetes a partir de resíduos lignocelulósicos com teor de voláteis dentro do intervalo de 66,36% à 83,19 %.

#### **4.3.3 Teor de cinzas (TCZ)**

O teor de cinzas corresponde ao material inorgânico restante após a combustão, e seus constituintes são a sílica, o cálcio, sódio, potássio, magnésio e ferro (Barreto, 2008). Segundo Dias *et al.* (2012). A maioria dos resíduos de biomássicos possuem baixo teor de cinzas. Este baixo teor de cinzas faz com que haja maior eficiência durante a combustão, pois haverá maior quantidade de elementos que irão queimar e libertar energia na forma de calor.

Os teores de cinzas encontrados para a serradura de chanfuta (4,03%) e umbila (4,45%) estão dentro da faixa percentual citada por Mate (2016) para os resíduos madeireiros, que varia de 2,20% a 4,70%. Para a serradura de pinho, o resultado obtido (0,65%) é comparável, mas ligeiramente maior, que aos resultados alcançados por Chrisostomo (2011) e por Souza & Vale (2016). Estes obtiveram 0,45% e 0,19%, respectivamente.

De modo geral, todas amostras de serraduras de chanfuta, umbila e pinho apresentaram teores de cinzas dentro da faixa citada por Nagaishi (2017) para a madeira, que varia de 0,5 a 5%.

Dos resultados do presente trabalho, o melhor valor para o teor de cinzas foi da serradura de pinho (0,65%). Kpalo *et al.* (2020) recomenda valores abaixo de 6% para o teor de cinzas.

Os altos teores cinzas são indesejáveis, pois dificultam a transferência de calor, consomem energia térmica, podem levar à corrosão e a formação de incrustações nos equipamentos combustão, exigindo manutenções mais frequentes e aumentando os custos da produção. Cabe salientar, que o mesmo proporciona uma ideia da quantidade de escórias que serão retiradas no forno (Dias *et al.*, 2012; Filho, 2013; Oshiro, 2016).

#### **4.3.4 Teor de carbono Fixo (TCF)**

Consiste essencialmente em carbono e, é a massa que resta após a libertação de compostos voláteis, excluindo as cinzas e teores de humidade (McKendry, 2002a; Barreto, 2008).

Os teores de carbono fixo encontrados para a serradura de pinho, chanfuta e umbila foram de 15,00%, 23,28 % e 19,74%, respectivamente. O valor obtido para a serradura de pinho é bem próximo de 16,76 % alcançado por Chrisostomo (2011) e 14,89 % obtido por Souza & Vale (2016). No caso da serradura de chanfuta e umbila exibiram resultados comparáveis aos 20 % encontrados por Cuvilas *et al.* (2015) para a madeira da espécie umbila, e 21,64% (chanfuta) juntamente com os 19,65 % (umbila) obtidos por Ali *et al.* (2010) citados por Cuvilas *et al.* (2014). O teor de carbono fixo da serradura de chanfuta mostrou-se superior quando comparada a serradura de umbila e pinho.

Segundo Lima (2018) citando Brito & Barrichelo (1982) o teor de carbono fixo para madeira varia entre 15 e 25 %, o que mostra que os resultados encontrados estão dentro desta faixa percentual. Paula *et al.* (2011) para diferentes tipos de resíduos agro-florestais encontraram teores de carbono fixo que variam de 16,66 a 21,03 %.

Segundo Quirino (1991), o teor carbono fixo de um material é um dos parâmetros que melhor expressa a qualidade da matéria-prima lignocelulósica, para a produção de briquetes e carvão vegetal visto que ele está directamente ligado ao poder calorífico. Maior teor de carbono fixo implica um elevado poder calorífico. Sem prejuízo de outras propriedades (ex.: teor de voláteis), é desejável que o combustível apresente o máximo possível de teor de carbono fixo, pois combustíveis com alto teor de carbono fixo apresentam uma combustão mais lenta e por consequência permanecem mais tempo nos equipamentos de combustão (Dos Santos *et al.*, 2019).

#### 4.4 Poder Calorífico

A Tabela 4.3 apresenta os resultados obtidos do poder calorífico para as biomassas em estudo no presente trabalho.

Tabela 4.3: Resultados do poder calorífico das biomassas utilizadas.

<b>Biomassa</b>	<b>PCS (MJ/kg)</b>	<b>PCI (MJ/kg)</b>	<b>PCU (MJ/kg)</b>
Serradura de chanfuta	19,53	16,29	14,08
Serradura de umbila	18,76	15,52	13,44
Serradura de pinho	18,45	15,21	13,36

O poder calorífico indica a energia específica armazenada quimicamente na biomassa, sendo uma das propriedades mais importantes para a escolha de um combustível para os processos termoquímicos (Barreto, 2008; Marafon *et al.*, 2016). O poder calorífico inferior (PCI) é definido como a quantidade de calor libertado durante a combustão completa de um combustível, sem incluir a energia necessária para vaporizar a água formada devido ao hidrogénio contido na biomassa (McKendry,2002a; Barreto, 2008). E o poder calorífico útil (PCU)

corresponde a correcção do PCI em relação à humidade que o próprio combustível apresenta (Souza & Vale, 2016).

Os resultados encontrados referentes aos poderes caloríficos para serradura de chanfuta (19,53 MJ/kg) e umbila (18,76 MJ/kg) são condizentes, embora ligeiramente menores, com os 20,52 MJ/kg para a madeira da espécie chanfuta e 21,12 MJ/kg para a madeira da espécie umbila, relatados por Ali *et al.* (2010) citados por Cuvilas *et al.* (2014). Mate (2016), para os resíduos madeireiros das referidas espécies, encontrou poderes caloríficos superiores dentro da faixa de 18,70 à 20,10 MJ/kg. Com relação à serradura de pinho que apresentou o resultado de 18,45 MJ/kg, este valor é consideravelmente próximo a 19,64 MJ/kg estimado por Chrisostomo (2011) e 19,73 MJ/kg determinado por Souza & Vale (2016).

De modo geral, os valores encontrados do poder calorífico estão próximos do intervalo proposto pela FAO (2012) que é de 17 – 18 MJ/kg para os briquetes obtidos de resíduos agro-industriais e madeireiros. Um valor alto do poder calorífico implica maior quantidade de calor libertado por unidade de massa durante o processo de combustão.

Os resultados do poder calorífico para a serradura de chanfuta mostram-se melhores que os das serraduras de umbila e pinho (Tabela 4.3). Isso pode justificar-se pelo elevado teor de carbono fixo (Tabela 4.2), pois como foi referido anteriormente, na subsecção 4.3.4, o poder calorífico superior é fortemente dependente do teor de carbono fixo.

Além da humidade e teor de carbono fixo, há outros parâmetros que estão também relacionados com o conteúdo energético de um combustível, a saber, o teor de voláteis e teor de cinzas. O material volátil tem uma relação de proporcionalidade directa com o poder calorífico, porém a sua influência não é tão considerável quanto a do carbono fixo. Por outro lado, quanto maior o teor de cinzas de um combustível menor será o seu conteúdo energético.

No que se refere ao poder calorífico inferior e útil, observa-se (Tabela 4.3) que a serradura de chanfuta possui o maior valor destas propriedades, seguida da

serradura de umbila e por fim a serradura de pinho. Deve-se, sempre, determinar o PCI, pois este representa melhor as condições da combustão.

#### 4.5 Produção dos Briquetes

O processo de densificação foi executado a uma temperatura 150°C, com teores de humidades das biomassas a variarem entre 11,63 a 13,18%, com a granulometria não superior a 1 mm, tempo de compactação de 5 minutos e à pressão 10 MPa. Todos os briquetes apresentaram estrutura íntegra e sem rachaduras, conforme apresentado na Figura 4.2. Os valores da caracterização química e energética da biomassa *in natura* são igualmente válidos para os briquetes, pois segundo De Souza (2021) e Oliveira (s.d.) o processo de briquetagem só afecta a conformação física da biomassa.



Figura 4.2: Briquetes produzidos.

#### 4.6 Expansão axial

A Figura 4.3 apresenta os resultados da média da expansão axial dos três tipos de briquetes (serradura de chanfuta, umbila, e pinho) por um período de 120 horas (período em que se alcançou a estabilidade das dimensões dos briquetes).

De acordo com Santos (2017), à expansão axial dos briquetes pode ser ocasionada por diversos factores, pela higroscopicidade<sup>1</sup> das biomassas, pelo relaxamento natural inerente às suas fibras e os constituintes das fibras (celulose, hemicelulose e lignina), por uma menor adesão entre as partículas compactadas, ou ainda, pela granulometria utilizada para a produção dos briquetes.

---

<sup>1</sup> A higroscopicidade é a tendência que certo material possui em absorver a água presente no ar, elevando sua humidade na composição. Essa análise se torna importante, porque a partir dela se pode determinar o comportamento do briquete quando armazenado em locais com alta humidade.

Em relação à expansão axial (Figura 4.3) pode-se observar que foi ligeiramente significativa. O aumento percentual foi de 1,99% para os briquetes feitos de serradura de pinho, 1,58 % para os confeccionados de serradura de chanfuta e 1,31 % para os produzidos a partir da serradura de umbila.

Em comparação ao estudo feito por Chrisostomo (2011), pode-se perceber que os briquetes feitos de serradura de chanfuta, umbila e pinho apresentam uma variação percentual dimensional menor que alguns outros resíduos como a serradura de eucalipto (expansão axial= 9,44%) e serradura de *pinus* (expansão axial= 10,76%). Estes valores elevados estimados por Chrisostomo (2011), possivelmente podem ser explicados pela utilização de diferentes condições operatórias (granulometria das partículas, humidade, pressão de compactação e tempo de aplicação da carga máxima). Variações dimensionais elevadas podem contribuir para a redução da resistência mecânica e densidade dos briquetes (Protássio *et al.*, 2011).

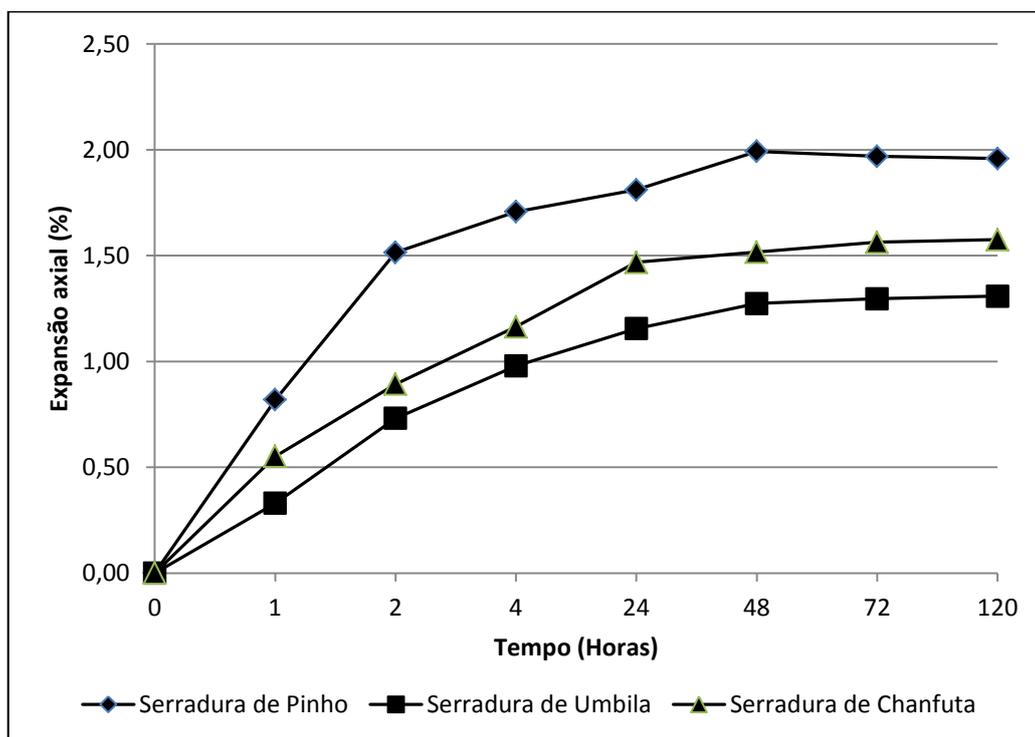


Figura 4.3: Variação axial dos briquetes com o tempo.

#### 4.7 Densidade aparente e energética dos briquetes

Os resultados da densidade aparente e energética dos resíduos e dos briquetes estão patentes na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Valores das densidades aparentes e energéticas.

<b>Biomassa</b>	<b>D<sub>aparente</sub>(kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>D<sub>EB</sub> (MJ/m<sup>3</sup>)</b>	<b>D<sub>ER</sub> (MJ/m<sup>3</sup>)</b>
Serradura de chanfuta	1043,73 ±10,04	14.695,71	7.249,51
Serradura de Umbila	1039,94 ±1,53	13.972,76	4.276,34
Serradura de Pinho	1016,46 ±3,97	13.579,90	1.869,87

Onde: **D<sub>aparente</sub>**= Densidade aparente do briquete; **D<sub>EB</sub>**= Densidade energética do briquete; **D<sub>ER</sub>**= Densidade energética do resíduo

#### 4.7.1 Densidade aparente

Os briquetes apresentaram densidades aparentes (Tabela 4.4) compreendidas no intervalo de 1016,46 à 1043,73 kg/m<sup>3</sup>. Estes valores estão dentro dos propostos por Quirino (2002) para briquetes (1000 a 1300 kg/m<sup>3</sup>). Paula *et al.* (2011) ao estudarem diversos resíduos agro-industriais, obtiveram briquetes com densidades aparentes compreendidas entre 606 a 1077 kg/m<sup>3</sup>. Segundo Souza & Vale (2016) são desejáveis briquetes com maior densidade aparente, pois quanto maior for a densidade aparente, maior será a densidade energética, visto que existe uma relação directamente proporcional entre o aumento da densidade aparente e a densidade energética do briquete.

Spadim *et al.*, (2020) sustentam que os briquetes com maiores densidades levam mais tempo para se degradar termicamente, pois, a alta compactação reduz a taxa de queima dos combustíveis sólidos prensados por diminuírem o fluxo de oxigénio no interior do briquete durante a queima.

De acordo com Kaliyan & Morey (2009), quanto menor o tamanho das partículas mais efectiva é a compactação e por consequência maior é o valor da densidade aparente. Isso é demonstrável pelos resultados obtidos no presente trabalho, pois os briquetes produzidos a partir da serradura de chanfuta, biomassa predominantemente constituída de partículas de menor tamanho em relação às outras biomassas, apresentaram o maior valor da densidade aparente (1043,73 kg/m<sup>3</sup>). O aumento da densidade a granel da biomassa para a densidade aparente dos briquetes representa uma diminuição do espaço ocupado pela biomassa, o que favorece o seu manuseamento, transporte e armazenamento.

#### **4.7.2 Densidade energética**

A densidade energética é a quantidade de combustível por unidade de volume. Essa propriedade permite avaliar e comparar o potencial energético de fontes diferentes. De acordo com Souza & Vale (2016), a densidade energética é uma das principais propriedades que definem a qualidade do briquete, pois resume as características químicas, físicas as condições de humidade e a quantidade de calor do produto final em uma única variável.

Na Tabela 4.4 observa-se que os valores da densidade energética dos briquetes de serradura de chanfuta são superiores em relação aos briquetes produzidos a partir da serradura de umbila e pinho. Isso já era se esperar, pois os briquetes feitos de serradura de chanfuta apresentam maior poder calorífico e densidade aparente em relação aos demais tipos de briquetes.

Os resultados obtidos (Tabela 4.4) demonstram que há um aumento do conteúdo energético por unidade de volume para as biomassas, devido a redução do volume por compactação. As quantidades de energia recuperável disponível nas biomassas *in natura* estavam na faixa de 1.869,87 a 7.249,51 MJ/m<sup>3</sup>, porém depois da briquetagem os valores aumentaram para 13.579,90 a 14.695,71 MJ/m<sup>3</sup>. Constatou-se também, que o comportamento da densidade energética mostrou-se semelhante ao comportamento da densidade aparente, isto deve-se ao facto de existir uma relação de proporcionalidade directa entre estas características.

Os resultados do presente trabalho são comparáveis aos observados por Souza & Vale (2016), que para briquetes produzidos a partir de diversos tipos resíduos entre eles a serradura de madeira, obtiveram valores de densidade energética compreendidos entre 13.060 – 19.610 MJ/m<sup>3</sup>.

#### **4.8 Teste de Friabilidade**

Os valores médios dos resultados do ensaio de friabilidade estão patentes na Figura 4.4.

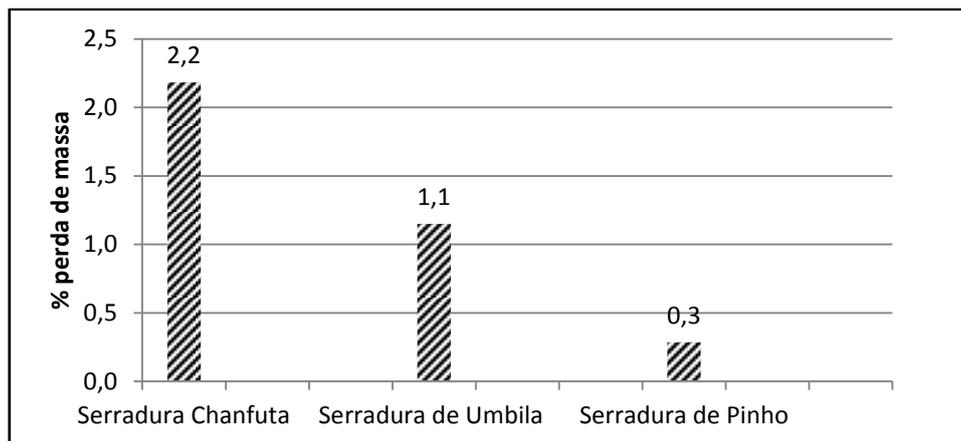


Figura 4.4: Resultados do ensaio de friabilidade dos briquetes.

De acordo com classificação proposta por Pereira (2009) citado por Nakashima *et al.* (2018), os briquetes (Figura 4.4) foram considerados muito pouco friáveis, pois apresentaram perdas percentuais de massa menores que 10%.

Tendo em conta que quanto menores os tamanhos das partículas, menos friável o briquete será, esperava-se que os briquetes feitos de serradura de chanfuta apresentassem menor friabilidade, isso porque segundo os resultados da análise granulométrica são constituídos, na sua maioria, de partículas de tamanho menor quando comparados com os outros tipos de briquetes. No entanto isso não se verificou, os valores encontrados mostram que os briquetes feitos a partir da serradura de chanfuta apresentaram maior friabilidade (2,2%), seguido dos produzidos utilizando a serradura de umbila (1,1%) e por fim os confeccionados a base de serradura de pinho (0,3%).

A possível explicação para esse comportamento reside no facto de que a influência da humidade pode ter sido mais significativa que a influência do tamanho das partículas. Pois segundo Nakashima *et al.* (2018) e Dias *et al.* (2012) a água (humidade) influencia negativamente na estrutura e integridade do briquete. Em vista disso, os briquetes produzidos a partir da serradura de pinho apresentaram menor friabilidade (0,3%) por possuírem baixo teor de humidade e os confeccionados a partir de serradura de chanfuta mostraram-se relativamente friáveis (2,2%) devido ao seu alto teor de humidade.

A friabilidade permite determinar a quantidade de resíduos que o briquete pode desprender nas fases de produção, transporte, manuseio e armazenamento. É

um bom método para prever o comportamento dos briquetes durante sua cadeia de fornecimento (Padilha *et al.*, 2016).

#### 4.9 Resistência à compressão

Na Tabela 4.5 encontram-se apresentados os valores médios dos resultados do ensaio de resistência à compressão.

Tabela 4.5: Resultados do ensaio de resistência à compressão.

<b>Biomassa</b>	<b>Tensão máxima (MPa)</b>	<b>Força máxima (N)</b>
Serradura de Chanfuta	2,40 ± 0,55	5676,4 ± 893,2
Serradura de Umbila	2,92 ± 0,31	7278,0 ± 751,1
Serradura de Pinho	2,93 ± 0,29	7304,7 ± 822,4

A resistência à compressão pode ser interpretada como a força máxima que pode suportar um corpo (briquetes) antes da ruptura durante o armazenamento, pois, estes são constantemente submetidos aos impactos, quedas, abrasões e compressões, sendo um parâmetro importante para analisar a viabilidade de produção dos briquetes (Padilha *at al.*, 2016).

Analisando os resultados do ensaio de compressão percebe-se que os briquetes produzidos a partir da serradura de pinho apresentaram a maior resistência (2,93 MPa e 7304,7N) quando comparados aos de umbila (2,92 MPa e 7278,0 N) e serradura de chanfuta (2,40 MPa e 5676,4 N).

É importante notar que os briquetes menos friáveis são os que mostraram melhor desempenho durante os ensaios de resistência à compressão, o que era de se esperar. Pois os dois testes servem para avaliar o mesmo aspecto, a resistência mecânica dos briquetes. De acordo com Quirino (1991) os ensaios de resistência à compressão, teste de friabilidade, e expansão dimensional complementam-se.

De acordo com Kpalo *et al.* (2020), briquetes mais resistentes são mais fáceis de armazenar, transportar sem sofrer rachas ou quebrar-se.

#### 4.10 Índice de Combustão

Os resultados experimentais do ensaio de combustão estão evidenciados nas Figuras 4.5 e 4.6, e na Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Resultados do ensaio de combustão.

<b>Biomassa</b>	<b>ICOM</b>
Serradura de Chanfura	0,5594±0,0155
Serradura Umbila	0,4439±0,0121
Serradura pinho	0,4525±0,0872
Carvão vegetal	0,8191±0,1706

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

Como exposto na Tabela 4.7, os resultados do ensaio de índice de combustão variaram de 0,4915 a 0,5594. O maior valor de ICOM foi observado para os briquetes produzidos a partir da serradura de chunfuta (0,5594) e o menor para os que foram produzidos a partir da serradura de pinho (0,4525). Estes valores são comparáveis aos encontrados por Paula (2010), que obteve índices de combustão dentro da faixa de 0,4293 a 0,6464 para briquetes produzidos a partir de diversos resíduos, entre eles a serradura de madeira. São preferíveis briquetes com elevado índice de combustão porque estes geram mais calor consumindo menor quantidade de massa em dado intervalo de tempo.

A Figura 4.5 corresponde as curvas temperatura versus tempo das biomassas e, segundo Quirino (1991) a área sob as referidas curvas representa a quantidade de calor gerada durante a combustão das biomassas. Na Figura 4.5 é possível observar os briquetes apresentaram picos de temperatura no intervalo de 550-603°C. Estes valores foram superiores aos observados para o carvão vegetal, cujo valor do seu pico foi de 358°C. Constata-se também que os briquetes e o carvão vegetal alcançaram suas temperaturas mais altas em torno de 20 a 25 minutos depois da ignição e início do ensaio. O tempo que os combustíveis levam para

atingir 150°C<sup>2</sup> e as temperaturas máximas, está directamente relacionado com a quantidade de material volátil, isto é, combustíveis com maiores concentrações de voláteis rapidamente atingem altas temperaturas.

Ainda sobre as curvas de temperatura versus tempo, os briquetes produzidos a partir da serradura de chanfuta permaneceram acima da 150°C por aproximadamente 51 minutos, os da serradura de umbila 49 minutos e os da serradura de pinho 40 minutos. Por sua vez, o carvão vegetal permaneceu 90 minutos acima de 150°C. Esse comportamento está intrinsecamente relacionado com a concentração de carbono fixo, e de uma forma bastante simples pode-se afirmar que, os combustíveis que permaneceram mais tempo acima de 150°C são os que possuíam maior teor de carbono fixo. E isto, implicou uma queima mais demorada, mantendo a produção de calor por mais tempo.

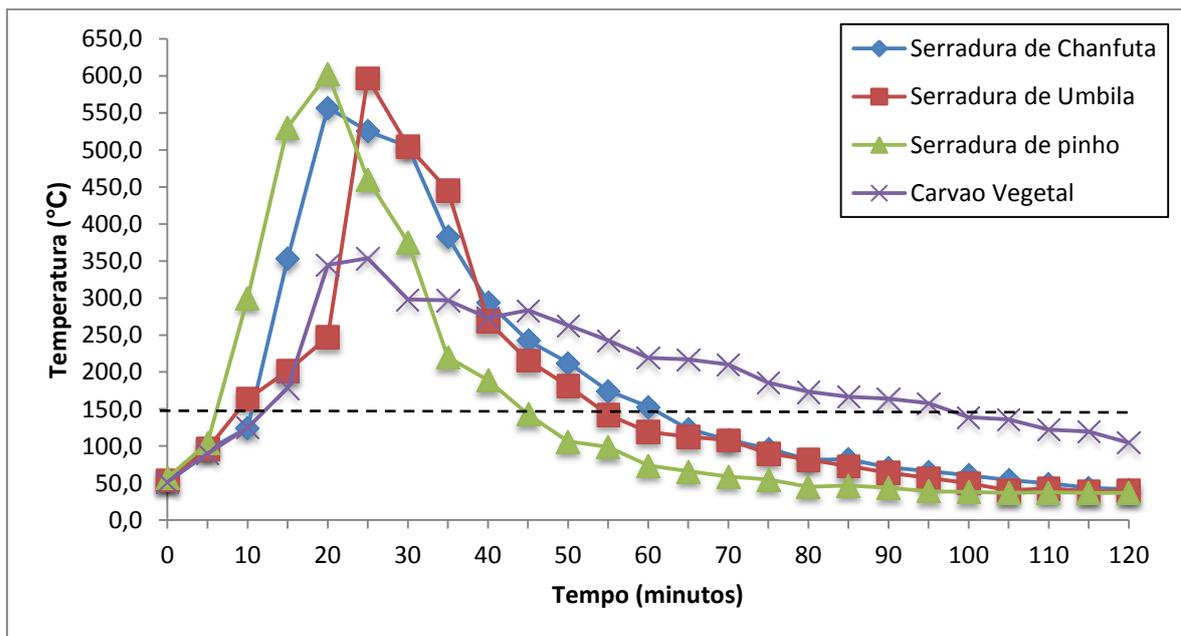


Figura 4.5: Evolução da temperatura em função do tempo de combustão das biomassas

Analisando a percentagem de perda de massa com o tempo (Figura 4.6), percebe-se que os briquetes produzidos a partir da serradura de pinho foram consumidos mais rapidamente, quando comparados aos briquetes produzidos a

<sup>2</sup> Temperatura de trabalho do teste de índice de combustão fixada após verificação prévia de que, em nenhum ensaio realizado, a temperatura máxima durante a combustão dos briquetes foi inferior a este valor (Quirino, 1991).

partir da chanfuta e umbila, que apresentaram uma combustão mais lenta e portanto, maior tempo de residência. Esses resultados já eram de se esperar, pois os briquetes produzidos a partir da serradura de pinho apresentam maior teor de voláteis, menor teor de carbono fixo e menor densidade aparente. Pois como referido anteriormente por Spadim (2020), a alta compactação diminui a taxa de queima de combustíveis sólidos prensados por diminuírem o fluxo de oxigênio e escoamento dos produtos da combustão. Por sua vez, os briquetes produzidos a partir da serradura de chanfuta tiveram uma combustão mais lenta, por possuir maior densidade aparente e maior concentração de carbono fixo. Resultados similares foram encontrados por Dias Junior *et al.* (2014), em seu estudo sobre a qualidade dos briquetes produzidos a partir de resíduos agro-florestais.

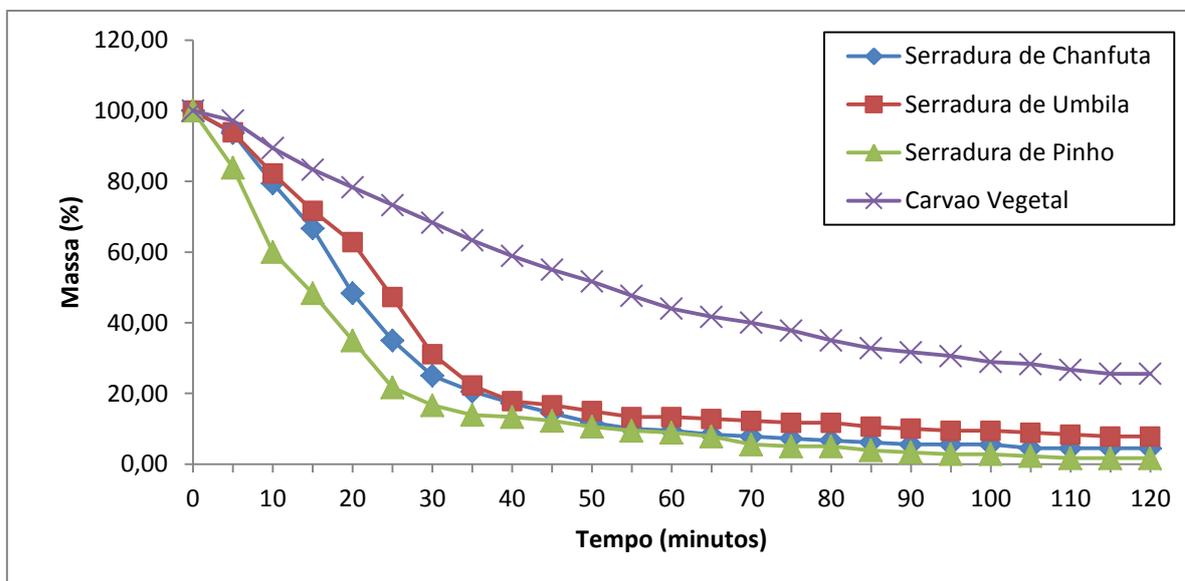


Figura 4.6: Perda percentual de massa em função do tempo de combustão das biomassas

Estes resultados indicam que para algumas aplicações, nas quais é importante que as temperaturas de operação sejam consideravelmente altas (na faixa de 500 a 600 °C) e os tempos de residência dentro dos equipamentos de combustão sejam moderadamente curtos, os briquetes podem ser ótimos substitutos do carvão vegetal.

#### 4.11 Ensaio em equipamentos de combustão de combustíveis sólidos

É uma simulação simplificada do processo de cozedura dos alimentos, e pode ser usado na comparação rápida do desempenho de combustíveis diferentes. Expressa a quantidade de energia no combustível que realmente pode ser

utilizada, isto é, a energia transferida pelo combustível para o recipiente (Panela) que é utilizado durante o cozimento, aquando da sua combustão num fogão (Faxälv & Nyström, 2007).

Os resultados patentes na Figura 4.7 mostram a evolução da temperatura da água com o tempo, para os três tipos de briquetes e carvão vegetal. A fase de alta potência (A.P.) vai de 0 a 45 minutos e a fase de baixa potência (B.P.) começa do minuto 45 até ao minuto 110. A Tabela 4.7 apresenta os resultados quantitativos (potência, consumo específico eficiência) do teste de fervura da água (A.P. e B.P.).

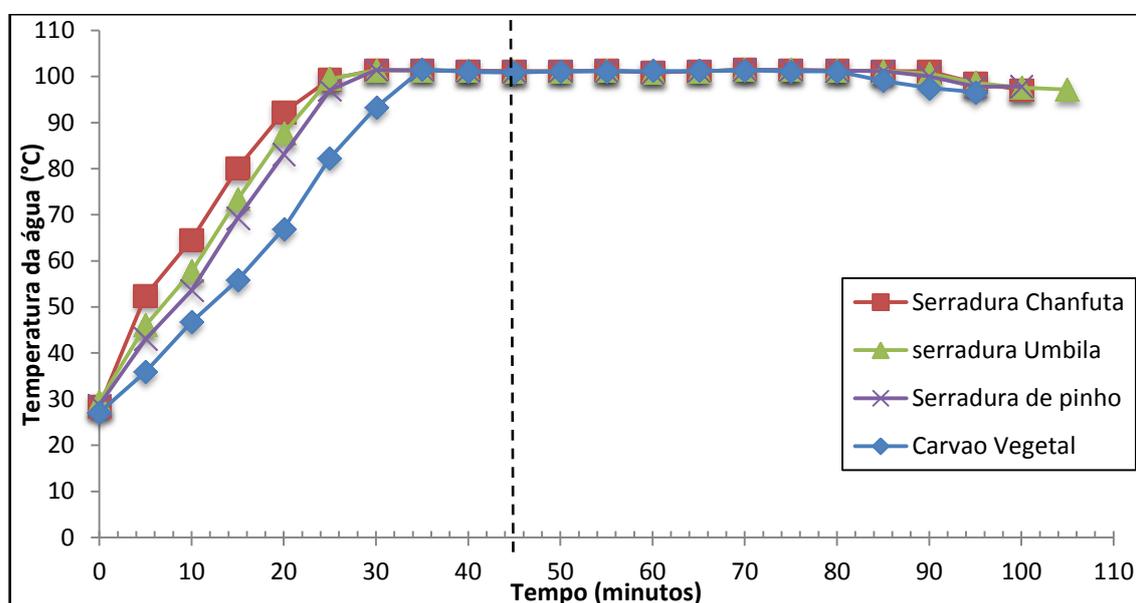


Figura 4.7: Evolução da temperatura com o tempo nas fases de alta e baixa potência, durante o decurso do teste de fervura.

Tabela 4.7: Resultados do teste de fervura da água

Biomassa	Potência (kW)		Consumo específico		Eficiência (%)
	A.P	B.P	A.P	B.P	
Serradura de chanfuta	3,27	0,40	1,72	0,27	25%
Serradura de umbila	3,17	0,39	2,28	0,25	25%
Serradura de pinho	3,14	0,36	1,90	0,33	24%
Carvão vegetal	2,78	1,10	1,47	0,21	26%

Na fase de alta potência mede-se o tempo e o combustível necessário para levar uma certa quantidade de água desde a temperatura ambiente até ao ponto de ebulição local. Na fase de baixa potência mede-se a quantidade de combustível necessária para manter a água fervendo por 60 minutos.

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

Primeiramente na Figura 4.7 observa-se que os briquetes quando comparados ao carvão vegetal, levaram menos tempo para elevar a temperatura da água desde a temperatura ambiente até ao seu ponto de ebulição. Sendo este tempo de aproximadamente 25 minutos para os briquetes e 30 minutos para o carvão vegetal. Os resultados dos tempos necessários para vaporizar a água por biomassa obedecem a seguinte ordem: briquetes de serradura de pinho <briquetes de serradura de umbila <briquetes de serradura de chanfuta <carvão vegetal. Sendo este comportamento perfeitamente harmónico com os resultados do ensaio de combustão, concretamente a Figura 4.5 referente a evolução da temperatura em função do tempo. Termicamente significa que nos primeiros estágios do teste de fervura os briquetes forneceram mais calor sensível a água em relação ao carvão vegetal. E isso deveu-se ao enorme poder que os briquetes têm de gerar mais calor nos primeiros instantes da combustão, facto que deriva das consideráveis quantidades de material volátil que os mesmos possuem.

Sobre a potência alcançada, que conforme o mencionado anteriormente na secção de métodos, exprime a quantidade de calor libertado pelo combustível por unidade de tempo, os resultados (Tabela 4.7) mostram que no conjunto das duas fases (A.P. e B.P.) o carvão vegetal apresentou os melhores resultados em relação aos briquetes. Entretanto, se a análise for feita por fases, observa-se que na fase de alta potência os briquetes foram substancialmente melhores quando comparados ao carvão vegetal, sendo que o melhor resultado foi observado nos briquetes de chanfuta (3,67 kW). Este resultado não surpreende, pois nos primeiros 20-30 minutos de combustão os briquetes rapidamente alcançam temperaturas elevadas em relação ao carvão vegetal e por consequência geram mais calor (vide a Figura 4.5). Por outro lado, durante a fase de baixa potência os

briquetes apresentaram resultados similares entre si, porém menores que os do carvão vegetal.

No concernente ao consumo específico, é importante dizer que na fase de alta potência indica a massa de combustível consumida para produzir um quilograma de vapor água, e na fase da baixa potência indica a massa de combustível consumida para manter um quilograma de água no patamar ou dois graus abaixo da temperatura de ebulição. Conforme a Tabela 4.7, os resultados apontam que no geral os briquetes apresentaram maior consumo específico em relação ao carvão vegetal. Entre os briquetes, o melhor resultado foi observado para os briquetes feitos da serradura de chanfuta que apresentou resultados comparáveis aos do carvão vegetal. Em linhas gerais os briquetes comportam-se razoavelmente bem, sobretudo na fase de baixa potência, na qual forneceram calor suficiente para que a água se mantivesse a temperatura de ebulição por um longo período tempo (vide a Figura 4.7).

No que diz respeito a eficiência, tanto os briquetes assim como o carvão vegetal apresentaram (Tabela 4.7) valores análogos. Não obstante, este é um parâmetro relacionado com o próprio equipamento de combustão em si, do que com os próprios combustíveis.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 5.1 Conclusões

Com base nos resultados obtidos e discussões feitas, é possível constatar que:

- Os resultados obtidos referentes à análise imediata e ao poder calorífico demonstram que as serraduras de chanfuta, umbila e pinho possuem um potencial energético considerável, pois todos valores determinados estavam dentro do recomendado pela literatura;
- Os briquetes produzidos a partir da serradura de chanfuta, umbila e pinho apresentaram uma estrutura livre de rachaduras, com estabilidade dimensional e resistência mecânica (resistência à compressão e friabilidade) satisfatórios;
- O processo de briquetagem de facto aumentou conteúdo energético por unidade de volume para todas biomassas, pois inicialmente (antes da briquetagem) a densidade energética estava compreendida entre 1.869,87 a 7.249,51 MJ/m<sup>3</sup> e, após a briquetagem os valores aumentaram para o intervalo compreendido entre 13.579,90 a 14.695,71 MJ/m<sup>3</sup>;
- Em relação índice de combustão, todos briquetes apresentam valores que estão dentro dos citados na literatura. No geral os briquetes foram capazes de atingir temperaturas elevadas (550-603°C), por consequência produziram muito calor, entretanto foram rapidamente consumidos quando comparados ao carvão vegetal;
- Relativamente ao teste de fervura da água, os briquetes comportaram-se suficientemente bem, sobretudo os briquetes feitos de serradura de chanfuta, pois apresentaram uma potência e consumo específico de combustível comparável ao do carvão vegetal;
- No conjunto de todos parâmetros (teor de humidade, teor de voláteis, teor de carbono fixo, teor de cinzas, poder calorífico, densidade energética, índice de combustão, potência e consumo específico) que são determinantes para a escolha de uma biomassa visando seu uso como fonte energética, os briquetes produzidos a partir da serradura de chanfuta

são os que mais se destacam por possuir os melhores valores para a maioria dos referidos parâmetros.

## **5.2 Recomendações**

Para estudos futuros, com vista a dar seguimento a presente pesquisa sobre a valorização energética dos resíduos florestais, recomenda-se:

- Avaliar as características dos briquetes confeccionados a base da mesma biomassa, porém a temperaturas e pressões diferentes, com o intuito de entender em detalhe a influência destas variáveis na qualidade dos briquetes;
- Estudar a viabilidade da realização de uma pré-carbonização da biomassa com intuito de aumentar o teor de carbono fixo, antes de ser empregada na confecção dos briquetes;
- Analisar os gases e fumos provenientes da combustão dos briquetes destas biomassas,
- Realizar um estudo de viabilidade técnica e económica de uma unidade industrial vocacionada a produção de briquetes de biomassa lenhosa residual.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aler-Associação Lusófona de Energias Renováveis, (2017), Energias renováveis em Moçambique: Relatório Nacional do ponto de situação. 2. Ed. Maputo, p. 70-84.

Barreto, E. J. F. (2008). Combustão e Gasificação de Biomassa Sólida: Soluções Energéticas para a Amazónia. Brasília: MME.

Braga, B. B. C., (2019), Estudo do comportamento térmico de uma caldeira doméstica a briquetes a funcionar com resíduos vegetais, dissertação de mestrado, INEGI- Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Universidade do Porto, Portugal.

Costa, D.R., Yamaji, F.M., Vendrasco,L., Flores, W.De.P., Chirisostomo,W. (2010) Efeito da granulometria nas propriedades físico-mecânico de briquetes de Pinus sp, Artigo Técnico. *Revista da Madeira*.

Cuvilas, C., Jirjis, R. & Lucas, C. (2010). Energy situation in Mozambique: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), p. 2139-2146.

Cuvilas, C., Lhate, I., Jiris, R., Terziev, N., (2014), The Characterization of Wood Species from Mozambique as a Fuel, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, p. 851-857.

Cuvilas, C., Kantarelis, Yang, E., (2015), The Impact of a Mild Sub-Critical Hydrothermal Carbonization Pretreatment on Umbila Wood. A Mass and Energy Balance Perspective. *Submitted to Energies*.

Chandamela, M. (2021). Cobertura Florestal em Moçambique. Maputo: Observatório do Meio Rural, página 1.

Chaves, A. M. B.; Vale, A. T.; Melido, R. C. N.; Zoch, V. P., (2013), Características Energéticas Da Madeira E Carvão Vegetal De Clones De Eucalyptus Spp. *Enciclopédia biosfera, Centro Científico Conhecer - Goiânia*, v.9, n.17; p. 534. 2013.

Chitará, S., (2003) Instrumentos para a promoção do investimento privado na indústria florestal moçambicana- DNFFB.

Chrisostomo, W., (2011), Estudo da compactação de resíduos ligno-celulósicos para utilização como combustível sólido, Dissertação de mestrado, Universidade federal de são Carlos, Sorocaba, Brasil, p. 3-50.

Da Silva, D. A., Yamaji, F. M., Barros, J. L., Da Róz, A. L., Nakashima, G. T., (2015), Caracterização de Biomassas para a Briquetagem, *Floresta*, v. 45, n. 4, p. 713 – 722.

De Souza, C. B., (2021), Reaproveitamento de Cascas de Cupuaçu através da transformação em briquetes para a produção de energia renovável, monografia, Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, Brasil, p. 25 – 40.

Dias, J. M. C. S., Souza, D. T., Braga, M., Onoyama, M. M., Miranda, C. H. B., Barbosa, P. F. D., Rocha, J. D. (2012). Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agro-industriais e florestais. Brasília, *Embrapa Agroenergia*, p. 130.

Dias Júnior, A. F., Andrade, A. M., Costa Júnior, D. S., (2014), Caracterização de briquetes produzidos com resíduos agro-florestais, *Pesq. flor. bras.*, Colombo, v. 34, n. 79, p. 225-234

Donate, P. M., (2014), Síntese ambientalmente correta a partir de Biomassa. *Orbital: the electronic journal of chemistry*, Vol. 6, n. 2, p. 101 – 103.

Dos Santos, R. C., Carneiro, A. C. O., Damasceno, G. R. F., Castro, A. F. N. M., Castro R. V. O., Costa, L. S., Costa, S. E., (2019), Efeito da variabilidade de resíduos madeireiros na produção e qualidade de briquetes, *Adv. For. Sci., Cuiabá*, v.6, n.1, p.529-534.

Falcão, D. M. (2013) - Produção e Consumo Doméstico de Combustíveis Lenhosos em Moçambique, Dissertação de mestrado, Universidade de Nova Lisboa, Portugal.

FAO. CHAPTER 4. Technical aspects of briquetting. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/T0275E/T0275E03.htm>>.

Faustino, F. C., Santana Júnior, J. A., Cerqueira, D. A., Ataíde, C. H., Cardoso, C. R. (2019). Avaliação do Potencial Pirolítico dos Resíduos Agroindustriais de Arroz e Milho, *Rev. Virtual Quim.*, v. 11, n. 6, p. 1882-1893.

Faxälv, O., Nyström, O., (2006), Briquetes de biomassa no Malawi, Projecto de graduação, Linkoping University- Institute of Tecnology, p. 33.

Fernandes, A. M., (2014), Análise da Produção de Madeira para o Fornecimento Sustentável de Energia Doméstica aos Centros Urbanos de Moçambique, Tese de doutorado, Universidade Federal do Paraná, Brasil.

Fortes, A. G., Raimundo, B. (2020). Bioenergia em Moçambique: tecnologias de produção, uso e aspectos sustentáveis, *Revista Desenvolvimento Socioeconômico em debate*, v.6, n.1, p. 60-77

Filho, J. P., (2013), Analise Térmica e Energética dos Briquetes de Capim Briquiara, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Uberlândia, Brasilda silva

Gonçalves, Y. M. M., (2004), Caracterização da Industria Madeireira na província de Maputo, Projecto Final, Universidade Eduardo Mondlane, Maputo.

Hillig, E.; Schneider, V. E.; Pavoni, E. T. (2009), Geração de resíduos de madeira e derivados da indústria moveleira em função das variáveis de produção. *Produção*, 19,13-22.

Kaliyan, N., Morey, R. V. (2009) Factors affecting strength and durability of densified biomass products, *Biomass and Bioenergy*, v. 33, n. 3, p. 337-359.

Kpalo, S.Y; Zainuddin, M. F; Manaf, L. A; Roslan. A. M. (2020) – A Review of Technical and Economic Aspects of Biomass Briquetting. *Sustainability*

Lima, R. N., Avaliação do potencial energético da palha e talo da carnaúba, (2018), Dissertação de mestrado, Universidade Estadual do Ceara, Brasil.

Lourinho, G., (2012), Avaliação Do Potencial Energético Em Biomassa Do Alto Alentejo, Instituto Superior do Portalegre, Portugal, p. 25 – 58.

Magalhães T. (2018). Inventário florestal nacional, Direcção Nacional de Florestas. Ministério da Terra, Ambiente e Desenvolvimento Rural. Maputo, Moçambique. 118p.

Mate, R., (2016), Potentials and Wood Fuel Quality of Logging Residues from Indigenous and Planted Forests in Mozambique, Doctoral Thesis, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala.

Marafon, A. C., Santiago, A. D., Amaral, A. F. C., Bierhals, A. N., Paiva, H. L., Guimarães, V. S., (2016), Uso da Biomassa Para Geração de Energia, *Embrapa Tabuleiros Costeiros*, Aracaju, p. 13 – 17.

Marafon, A.C, Nunes, M.U.C, Amaral, A.F.C, Santos, J.P. (2019), Aproveitamento de cascas de coco para geração de energia térmica: potencialidades e desafios. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros.

MITADER, (2018), Desflorestamento em Moçambique (2003- 2016). MITADER, Maputo

Morgado, G. A. G. (2019), Estudo da queima de briquetes de biomassa numa caldeira, dissertação de mestrado, INEGI- Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Universidade do Porto, Portugal.

McKendry, P., (2002a), “Energy production from biomass (Part 1): Overview of biomass.,” *Bioresource technology*, vol. 83, no. 1, pp. 37–46.

McKendry, P. (2002b). Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. *Bioresource Technology* 83, 47-54.

Nanvonamuquitxo, S. J. A., Rojas, F. G., Hofiço, N. S. A., (2017), Desperdício de madeira na concessão florestal da indústria Sotomane, *Nativa*, Sinop, v.5, n.3, p.208-211 na província da Zambézia, Moçambique.

Nagaishi, Thaís Yuri Rodrigues. Aproveitamento de biomassa do coco (cocos nucifera L.) para uso energético.2019

Nakashima, G. T., Akiyama, W. H., Ricardo, L., Santos, O., Padilla, E. R. D., Belini, G. B., Viranda, L., De Pádua, F. A., Yamaji, F. M., (2018), Briquetes

produzidos a partir do aproveitamento de resíduos provenientes do aterro de resíduos inertes da Cidade de Sorocaba, *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, v.7, n.2, p. 231- 243.

NOA, Mário Paulo Falcão e Micas. (2016), Definição de Florestas, Desmatamento e Degradação Florestal no âmbito do REDD+. Maputo.

Oshiro, T. L., (2016), Produção e Caracterização de Briquetes Produzidos com Resíduos Lignocelulosicos, Trabalho de Conclusão de curso, Universidade Tecnológica do Paraná, Brasil.

Ohana, C. C., (2012), Utilização dos resíduos do Processamento de teca (*tectona grandis* L.f.) na produção de briquetes, Dissertação de mestrado, UFRRJ-Instituto de Florestas, Brasil.

Oliveira, A., (s.d.), Definições e conceitos, Programa de pós graduação em bioenergia-Mestrado, UFPR-Sector Pelotina, Brasil.

Paula, R. L., (2010), Produção e avaliação de resíduos lignocelulosicos, Dissertação de pós-graduação, Universidade Federal de Lavras, Brasil.

Padilla, E. R. D, Pires, I. C. S. A, Yamaji, F. M, Fandiño, J. M. M. (2016), Produção e Caracterização Físico-Mecânica de Briquetes de Fibra de Coco e Palha de Cana-de-Açúcar. *Rev. Virtual Quim.*

Paula, L. E. R, Trugilho, P. F., Rezende, Nogueira Raphael, Assis, C. O., Baliza, A. E. R., (2011), Produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulosicos, *Revista pesquisa florestal brasileira*, vol.31, n. 66, p. 103-112.

Parikh, J., Channiwala, S. A., Ghosal, G. K., (2005), A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels, *EISEVIER-Fuel* 84, p. 487 – 494.

Pinto, Q. M. A., (2016), Análise do desempenho Energético de Briquetes de Resíduos Agro-indústriais gerados no Distrito Federal, Monografia, Universidade de Brasília, Brasil

Protássio, T. de P.; Alves, I.C.N., Trugilho; P.F.; Silva, V.O. Baliza, A.E.R., (2011), Compactação de biomassa vegetal visando à produção de biocombustíveis sólidos. *Pesquisa Florestal Brasileira*. v.31.n 38, p.273-283. Colombo.

Quirino, W., (1991). Características e índice de combustão de briquetes de carvão vegetal, dissertação de mestrado, Escola superior de agricultura Luiz Queiroz, Piracicaba-Brasil.

Quirino, W. F., (2002), Utilização energética de resíduos vegetais. Editora IBAMA. Brasília.

Santos, L.R.O, Primiano-Filho, M.C, Da Silva,D.A, Alesi, L.S. Varanda, L.D, Yamaji, F.M. (2017),Produção de combustível sólido a partir da palha de cana-de-açúcar e braquiária. Sorocaba-SP, Brasil.

Silva, D. A; F. A; Yamaji; Barros, J. L; Róz, A. L; Nakashima, G. T. (2015), Caracterização de biomassas para a briquetagem, *Revista Floresta*, vol. 45, n. 4, p. 713 – 722.

Silva, V., (2021), Processos Termoquímicos de conversão de Biomassa, Dissertação de mestrado, Instituto Superior de Bragança, Portugal.

Souza, F., Vale, A. T., (2016), Densidade energética de briquetes de biomassa lignocelulósica e sua relação com os parâmetros de briquetagem, *Pesq. flor. bras.*, Colombo, v. 36, n. 88, p. 405-413.

Schneid, E., (2020), Uso de serragem de diferentes espécies florestais no processo de compactação, *Advances In Forest Science*, v. 7, n. 4, p. 1203-1212.

Spadim. E. R, Junior, H. J.E, Arruda. N.L.F.V, Guerra. S.P.S, Leonello, E.C. (2020), Determinação do índice de combustão e da taxa de queima de briquetes de resíduos lignocelulósicos por meio de um aplicativo de computador com colecta de dados automatizados. *Botucatu*, v. 35, 2020

Van der Plas, R. J., Sepp, S., Pigaht, M., Malalane, A., Mann, S., Madon, G., (2012), Mozambique Biomass Energy Strategy, EUEI-PDF, Mozambique.

Vasco, H., Costa, M., (2009), Quantification and use of forest biomass residues in Maputo Province, Mozambique, *EISEVIER - biomass and bioenergy* n. 33, p. 122.

Victorino, A. (1995). Estudo sobre o fogão a carvão vegetal e o ensino de Física em Moçambique, Monografia (Ensino de Física), Universidade Pedagógica, Beira.

# APÊNDICES

## Apêndice 1: Caracterização física, química e energética da biomassa

Tabela A1-1: Densidade a granel para serradura de chanfuta

Serradura de Chanfuta							
Nº	Balão vazio (g)	Balão + amostra (g)	Balão - amostra (g)	Volum e (ml)	Densidad e (Kg/m3)	Densidad e a granel (Kg/m3)	Desvio padrão
1	16,7509	68,1812	51,4303	100	514,30	514,88	0,89
2	16,4083	67,8517	51,4434	100	514,43		
3	16,5137	68,1043	51,5906	100	515,91		

Tabela A1-1: Densidade a granel para serradura de umbila

Serradura de Umbila							
Nº	Balão vazio (g)	Balão + amostra (g)	Balão - amostra (g)	Volum e (ml)	Densidad e (Kg/m3)	Densidad e a granel (Kg/m3)	Desvio padrão
1	17,2410	48,9930	31,7520	100	317,52	318,18	0,76
2	17,3065	49,1057	31,7992	100	317,99		
3	16,0311	47,9325	31,9014	100	319,01		

Tabela A1-3: Densidade a granel para serradura de Pinho

Serradura de Pinho							
N	Balão vazio (g)	Balão + amostra (g)	Balão - amostra (g)	Volum e (ml)	Densidad e (Kg/m3)	Densidad e a granel (Kg/m3)	Desvio padrão
1	16,4581	30,4051	13,9470	100	139,47	139,96	0,85
2	16,4840	30,4300	13,9460	100	139,46		
3	16,6811	30,7750	14,0939	100	140,94		

Tabela A1-4: Teor de humidade da serradura de chanfuta

Serradura de Chanfuta					
N.º	Massa (g)	Tempo de secagem (min)	Humidade (%)	Humidade média (%)	Desvio padrão
1	1,002	10,2	13,2614	13,37	0,10
2	1,000	11,3	13,4591		
3	1,001	11,8	13,4021		

Tabela A1-5: Teor de humidade da serradura de Umbila

Serradura de Umbila					
N.º	Massa (g)	Tempo de secagem (min)	Humidade (%)	Humidade média (%)	Desvio padrão
1	1,001	8	13,1323	13,07	0,10
2	1,001	7	12,9512		
3	1,001	7,5	13,1278		

Tabela A1-6: Teor de humidade do carvão vegetal

Carvão vegetal					
N.º	Massa (g)	Tempo de secagem (min)	Humidade (%)	Humidade média (%)	Desvio padrão
1	1,002	4,1	4,89	4,71	0,21
2	1,001	5	4,48		
3	1,004	4,6	4,76		

Tabela A1-7: Teor de humidade da serradura de pinho

Serradura de Pinho					
N.º	Massa (g)	Tempo de secagem (min)	Humidade (%)	Humidade média (%)	Desvio padrão
1	1,000	9,2	11,2451	11,63	0,37
2	1,000	8,0	11,6724		
3	1,000	10,3	11,9871		

Tabela A1-8: Teor de cinzas das biomassas

Serradura de Chanfuta						
N.º	Cadinho vazio (g)	Amostra (g)	Cadinho + cinzas (g)	Teor de Cinzas (%)	Teor de Cinzas médio (%)	Desvio padrão
1	26,5876	2,0004	26,6674	3,99	4,03	0,04
2	26,3620	2,0003	26,4426	4,03		
3	29,3423	2,0000	29,4235	4,06		
Serradura de Umbila						
1	27,5791	2,0005	27,6657	4,33	4,45	0,13
2	29,7406	2,0005	29,8297	4,45		
3	27,2165	2,0004	27,3081	4,58		
Serradura de Pinho						
1	29,847	2,0001	29,8586	0,58	0,65	0,06
2	27,2047	2,0003	27,2183	0,68		
3	30,157	2,0003	30,1708	0,69		
Carvão vegetal						
1	26,2214	2,004	26,3135	4,60	4,61	0,10
2	27,1512	2,001	27,2455	4,71		
3	28,2134	2,001	28,3036	4,51		

Tabela A1-9: Teor de voláteis das biomassas

Serradura de Chanfuta						
N.º	Cadinho vazio – m <sub>1</sub> (g)	Amostra – m <sub>0</sub> (g)	Cadinho + carvão – m <sub>2</sub> (g)	Teor de voláteis (%)	Teor de voláteis médios (%)	Desvio padrão
1	53,1193	2,0001	53,6610	72,92	72,69	0,20
2	52,7667	2,0002	53,3141	72,63		
3	52,1666	2,0001	52,7160	72,53		
Serradura de Umbila						
1	52,5748	2,0002	53,0518	76,15	75,80	0,35
2	52,7077	2,0001	53,1915	75,81		
3	53,1363	2,0002	53,6274	75,45		
Serradura de pinho						
1	52,5990	2,0002	52,9185	84,03	84,35	0,51
2	53,0815	2,0003	53,3829	84,93		
3	52,1016	2,0001	52,4200	84,08		
Carvão vegetal						
1	52,7706	2,0002	54,3590	20,59	20,56	0,03
2	52,6181	2,0005	54,2074	20,55		
3	52,7611	2,0003	54,3508	20,53		

## Apêndice 2: Caracterização dos briquetes

Tabela A2-1: Teste de friabilidade

Biomassa	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Massa perdida (%)	Desvio padrão
Briquetes de Chanfuta	59,6558	58,4231	2,0664	0,3
	59,9132	58,3878	2,5460	
	59,0840	57,9430	1,9311	
Briquetes de Umbila	59,4548	58,0860	2,3023	1,0
	59,1693	58,8310	0,5717	
	59,7685	59,4256	0,5737	
Briquetes de Pinho	59,2372	59,1158	0,2049	0,2
	59,0840	58,9887	0,1613	
	59,7549	59,4638	0,4872	

Tabela A2-2: Densidade aparente dos briquetes de serradura de chanfuta

Serradura de Chanfuta							
Briquete	Massa (g)	Altura (mm)	Diâmetro (mm)	Volume (m <sup>3</sup> )	Densidade (Kg/m <sup>3</sup> )	Densidade aparente (Kg/m <sup>3</sup> )	Desvio padrão
1	59,58	28,86	50,05	5,68E-05	1049,48	1043,73	10,04
2	58,60	28,87	50,04	5,68E-05	1032,13		
3	59,67	28,90	50,05	5,69E-05	1049,57		

Tabela A2-2: Densidade aparente dos briquetes de serradura de Umbila

Serradura de Umbila							
Briquete	Massa (g)	Altura (mm)	Diâmetro (mm)	Volume (m <sup>3</sup> )	Densidade (Kg/m <sup>3</sup> )	Densidade aparente (Kg/m <sup>3</sup> )	Desvio padrão
1	58,73	28,78	50,02	5,66E-05	1038,37	1039,94	1,53
2	58,83	28,80	50,01	5,66E-05	1040,05		
3	58,98	28,81	50,03	5,66E-05	1041,41		

Tabela A2-3: Densidade aparente dos briquetes de serradura de pinho

Serradura de Pinho							
Briquete	Massa (g)	Altura (mm)	Diâmetro (mm)	Volume (m <sup>3</sup> )	Densidade (Kg/m <sup>3</sup> )	Densidade aparente (Kg/m <sup>3</sup> )	Desvio padrão
1	59,52	29,88	50,03	5,87E-05	1013,28	1016,46	3,97
2	59,95	29,87	50,03	5,87E-05	1020,91		
3	59,68	29,89	50,04	5,88E-05	1015,19		

Tabela A2-4: Dados do teste de fervura

	Carvão vegetal		Serradura de Chanfuta		Serradura de Umbila		Serradura de Pinho	
	A.P	B.P	A.P	B.P	A.P	B.P	A.P	B.P
Massa de carvão consumida (kg)	0,265	0,140	0,465	0,085	0,490	0,090	0,495	0,085
Massa de água evaporada (kg)	0,180	0,680	0,270	0,310	0,215	0,355	0,260	0,255
Varição da temperatura (°C)	74,8	3,8	71,8	3,0	71,9	3,1	71,5	1,7
Duração do teste (min)	45	60	40	60	40	60	40	60
Calor libertado (kJ)	7494	3959	7859	1437	7605	1397	7524	1292
Calor absorvido pela água (kJ)	1017,878		977,054		978,415		972,972	
Calor de vaporização (kj/kg)	1943,6		1310,8		1288,2		1163,9	
Potência (kW)	2,78	1,10	3,27	0,40	3,17	0,39	3,14	0,36
Consumo específico	1,47	0,21	1,72	0,27	2,28	0,25	1,90	0,33
Rendimento (%)	26%		25%		25%		24%	

Tabela A2-6: Resultados do índice de combustão

ICOM - Serradura de Chanfuta						
N.º	A	B	C	ICOM	ICOM	Desvio
1	41,67	74,66	57,23	0,5436	0,5594	0,0155
2	44,17	74,45	57,23	0,5745		
3	43,33	73,96	57,23	0,5600		
ICOM - Serradura de umbila						
1	41,67	75,00	68,87	0,4538	0,4439	0,0121
2	40,00	74,09	68,87	0,4303		
3	40,83	75,49	68,87	0,4476		
ICOM - Serradura de Pinho						
1	33,33	79,17	47,78	0,5523	0,4525	0,0872
2	32,50	70,12	58,34	0,3906		
3	32,50	74,45	58,34	0,5317		
ICOM - Carvão Vegetal						
1	73,33	62,59	58,88	0,7796	0,8191	0,1706
2	72,50	54,55	58,88	0,6716		
3	73,33	80,77	58,88	1,0060		