



**FACULDADE DE AGRONOMIA E ENGENHARIA FLORESTAL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA RURAL  
LICENCIATURA EM ENGENHARIA AGRONÓMICA**

**TRABALHO DE LICENCIATURA**

**TEMA: AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS  
UTILIZANDO RESÍDUOS VEGETAIS HORTÍCOLAS COMO RESPOSTA  
AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS**



**Autora**

**Yolanda Adalmira Comé**

**Supervisor: Eng<sup>o</sup>. Kemal Vaz (EER'S)**

**Co-supervisor: Eng<sup>o</sup>. Freitas Garrine**

**Maputo, Setembro de 2025**

**Avaliação do potencial de produção de biogás utilizando resíduos vegetais de hortícolas como resposta as mudanças climáticas**

Projecto Final submetido à Universidade Eduardo Mondlane na Faculdade de Agronomia e Engenharia Florestal (Departamento de Engenharia Rural) em cumprimento parcial dos requisitos exigidos para obtenção do grau académico de Licenciatura em Engenharia Agrónómica, sob supervisão do Eng<sup>o</sup> Kemal Vaz e do Engenheiro Freitas Garrine.

**Maputo, Setembro de 2025**

## **DECLARAÇÃO DE HONRA**

Eu, Yolanda Adalmira comé, declaro, sob compromisso de honra, que o presente trabalho é resultado da minha própria investigação, não tendo sido anteriormente apresentado para a obtenção de qualquer grau académico, seja nesta ou em qualquer outra instituição de ensino superior. O trabalho reflete o esforço pessoal ao longo da pesquisa, com a realização de trabalho de campo e consulta de fontes bibliográficas, devidamente referenciadas no texto e na secção de referências, com o apoio dos meus supervisores. Este projecto é apresentado em cumprimento parcial dos requisitos para a obtenção do grau de Licenciatura em Engenharia Agronómica, no Departamento de Engenharia Rural.

**Maputo, Setembro de 2025**

---

## **DEDICATÓRIA**

Dedico primeiramente, a Deus, fonte de força, vida e inspiração, que me sustentou e capacitou em cada passo da minha trajetória. Sem sua graça, este momento não seria possível.

Dedico, com profundo amor e gratidão, a minha família, especialmente aos meus pais Admiro Geraldo Comé e Benícia da Felicidade Comé, e aos meus irmãos Isálvia da Felicidade Comé e Níquel Fernando Comé pelo suporte incondicional em todas as fases da minha vida. Obrigada pelo carinho, pelo apoio emocional, técnico e financeiro, por me suportarem nos momentos mais difíceis e me abraçarem quando mais precisei. Este trabalho é também fruto dos pequenos gestos que tornaram minha caminhada mais leve: as refeições levadas ao quarto durante longas noites de estudo, os resumos dos acontecimentos para que eu não ficasse desactualizada, a paciência diante das minhas ausências e o esforço constante para transformar desafios em soluções. A vocês, que abraçaram meus sonhos, metas e ideias como se fossem vossos, dedico cada conquista.

## AGRADECIMENTOS

Expressa minha sincera gratidão ao Departamento de Engenharia Rural, em especial aos meus supervisores, pelo suporte durante toda a execução deste trabalho. Agradeço ao Eng<sup>o</sup> Kemal, que me incentivou a expressar o meu máximo potencial e me encorajou a ser independente, dinâmica e proactiva, e ao Eng. Freitas pelo suporte técnico inicial. A Senhorita Aluésia Macambaco e a Senhorita Judite Jofrice pelo apoio gentileza e simpatia.

Estendo a minha gratidão ao Docente Tivana, pelo apoio incondicional e pela oportunidade de estar no Laboratório de Tecnologia Pós-Colheita, monitorando-me durante o desenvolvimento deste estudo. Agradeço também a Yuna Alexandre, pelo apoio técnico no laboratório, pelos risos e partilha de lanche, e à Docente Imaculada, pelas boleias para casa, confiança e carinho. Agradeço ao Docente Condo, que gentilmente cedeu o termopar para a realização do projecto, e a Engenheira Marília, pela partilha de conhecimento e apoio na execução do trabalho. Ao Chefe Cuna, pela valiosa intermediação junto aos produtores, e aos produtores da associação, pela abertura, inovação e entusiasmo com que acolheram a tecnologia, participando activamente das sessões e colocando em prática todo o aprendizado.

Sou grata ao Senhor Orlando e ao Docente Madal, que colaboraram no Laboratório de Energia e asseguraram condições mínimas para a realização dos ensaios. Agradeço também ao Senhor Betuel, por cuidar dos meus sapatos sempre que algum incidente acontecia, a Senhorita Fernanda, pela simpatia e bom atendimento no Registo Académico e ao Dany, pelo suporte nos desafios diários durante a execução do projecto.

Ao meu tio Alberto Geraldo Comé pelo suporte financeiro e ao meu primo Dalton Filimone pelo apoio técnico disponibilizado quando necessário. Reconheço o carinho e amizade de Iraquiza, Wilsa e Aníbal, pela partilha de conhecimentos durante os testes energéticos. Agradeço aos meus amigos Filipe Milando, Maria Augusta, Orlando Nhaca, Agnissio Baloi, Joel Horácio, Alquércio Palate, Menaie Munguambe, Amanda Sambo, Helena Souto, Márcia Chissico, Arnela Fineasse, Jorge Langa, Regino Comar, Victor Machaieie, Elton Clemente e Vilma Rosa pelo apoio e incentivo constantes ao longo da jornada académica.

Estendo meus agradecimentos aos colegas André Mazive, Nataniel Macuácuca, Amisse Abdala, Manuel Norbeto, Tomás Timba, Tandamo Famba, Rafael de Carvalho, Ecineta Moisés, António Cumbana e Safira Manuel, pelas conversas, partilha de conhecimento, oportunidades e momentos de descontração.

Por fim, a todos que, directa ou indirectamente, contribuíram para que eu alcançasse esta meta e evoluísse em todas as dimensões da minha vida, o meu muito obrigada.

## ÍNDICE

RESUMO .....	xxii
ABSTRACT .....	xiii
I. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Antecedentes .....	1
1.2. Problema de estudo e Justificação .....	2
1.3. OBJECTIVOS.....	3
1.3.1.Objectivo Geral .....	3
1.3.2.Objectivos Específicos .....	3
1.4. HIPÓTESES .....	4
1.4.1. Hipótese 1.....	4
1.4.2. Hipótese 2.....	4
1.5.QUESTÕES DE ESTUDO .....	4
1.5.1. Questão 1 .....	4
1.5.2. Questão 2.....	4
II.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	5
2.1. Mudanças Climáticas e Desafios Energéticos .....	5
2.1.1. Fundamentos das Mudanças Climáticas .....	5
2.1.1.1. Historial das mudanças climáticas .....	6
2.1.1.2. Acordos Internacionais sobre o Clima.....	7
2.1.1.3.Moçambique nos Acordos e Agendas sobre Mudanças Climáticas .....	8
2.1.1.4. Impactos das mudanças climáticas no mundo e em Moçambique .....	10
2.1.1.5. Contribuição dos combustíveis fósseis para as mudanças climáticas.....	12
2.1.2. O Biogás como Alternativa Energética Sustentável .....	14
2.1.2.1.História dos Biodigestores .....	15
2.1.2.2.Biodigestores.....	15
2.1.2.3.Biogás .....	16
2.1.2.4.Fermentação anaeróbica e formação do biogás .....	17
2.1.2.5. Factores que influenciam a digestão anaeróbica.....	19
2.1.2.6. Tipos de Biodigestores.....	21
2.1.2.7. Vantagens e Desvantagens do uso do biogás.....	23

2.1.2.8. Aplicação do biogás .....	24
2.1.2.8. Matérias-primas utilizados para a produção de biogás .....	25
2.1.2.9. Resíduos hortícolas como substrato para produção de biogás .....	27
2.1.3. Distribuição do biogás no mundo .....	28
2.1.4. Impacto Ambiental do Biogás .....	29
2.1.5. Importância do Biogás .....	29
2.1.6. Participação Comunitária na Produção de Biogás .....	30
III. MATERIAIS E MÉTODOS .....	31
3.1. Descrição da área de estudo .....	31
3.1.1. Clima .....	32
3.1.2. Solos .....	33
3.1.3. Aspectos Ambientais e Limitantes a prática agrícola .....	34
3.1.4. Tipo de agricultura e culturas prioritárias .....	34
3.1.5. Actividades desenvolvidas .....	34
3.1.6. Relatos de desperdício de hortícolas na Associação .....	35
3.1.8. Comercialização .....	36
3.1.9. Critérios de selecção da associação e do grupo focal .....	36
3.2. Metodologia .....	37
3.2.1. Tipo de estudo .....	37
3.2.2. local e período .....	37
3.2.3. Procedimentos Metodológicos .....	37
3.2.4. Procedimento de preparação e caracterização físico-química das amostras .....	41
3.2.4.1. Cálculo da humidade .....	44
3.2.4.2. Determinação do pH .....	44
3.2.4.3. Cálculo do teor de cinzas e da matéria orgânica .....	45
3.2.5. Procedimento para montagem, alimentação e monitoramento dos biodigestores experimentais .....	46
Sistema 2 – Testes de queima .....	47
Vedação e condições experimentais .....	48
3.2.6. Testes comparativos de desempenho energético .....	49
Local e materiais .....	49

Testes de fervura da biomassa .....	50
Testes de fervura decombustíveis gasosos.....	51
Testes de combustão da biomassa.....	54
Testes de combustão de combustíveis gasosos.....	55
3.2.7. Construção participativa do biodigestor no campo.....	56
Estrutura e materiais utilizados.....	57
Preparação e alimentação do biodigestor no campo.....	58
3.2.8. Limitações metodológicas .....	59
3.2.9. Cuidados a ter no laboratório.....	60
3.3. Análises estatísticas .....	61
IV.RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	61
4.1. Caracterização físico-química dos resíduos hortícolas .....	62
4.2. Produção de Biogás e Comparações Energéticas .....	63
4.2.1. Teste de Fervura.....	63
4.2.1.1.Perda de Massa e Evaporação da Água .....	64
4.2.1.2. Potência e consumo específico .....	69
4.2.1.3. Rendimento Térmico .....	71
4.2.2.Índice de Combustão.....	74
4.3. Percepção e aceitação dos produtores sobre o uso do biogás .....	77
4.4. Experiência Participativa de Construção do Biodigestor.....	82
V.CONCLUSÃO .....	83
VI.RECOMENDAÇÕES .....	84
VII.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	85
6. ANEXOS .....	99

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1, Gráfico da actual matriz energética mundial.....	13
Figura 2, Representação esquemática de um biodigestor em funcionamento .....	16
figura 3, Apresentação esquemática do processo de digestão anaeróbica .....	17
Figura 4, Modelo indiano de Biodigestor .....	21
Figura 5, Modelo chinês de Biodigestor .....	22
Figura 6, Modelo canadense de Biodigestor.....	22
Figura 7: Ilustração da área de estudo.....	32
Figura 8: Precipitação Pluviométrica em KaMavota.....	33
Figura 9.Etapas do processo de caracterização físico-química das amostras de resíduos hortícolas.....	43
Figura 10.Etapas do processo de preparação e alimentação dos biodigestores experimentais.....	49
Figura 11.Materiais utilizados durante os ensaios de fervura de biomassas.....	51
Figura 12.Materiais utilizados durante os ensaios de fervura para combustíveis gasosos .....	52
Figura 13. Processo de combustão de biomassas.....	55
Figura 14. Processo de combustão de combustíveis gasosos .....	56
Figura 15. Materiais utilizados para a construção participativa do biodigestor no campo.....	58
Figura 16.Momentos do processo de capacitação comunitária para montagem e alimentação do biodigestor.....	59

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Equivalência energética do biogás com outras fontes de energia.....	16
Tabela 2, Vantagens e Desvantagens do uso do biogás.....	23
Tabela 3. Resíduos de actividades industriais, agrícolas e agroindustriais utilizados para a produção de biogás. ....	26
Tabela 4. Características Morfológicas e Físicas dos solos Francos e Arenosos de Kamavota ...	34
Tabela 5. Determinação do teor de humidade em resíduos de alface (A) e couve (C).....	44
Tabela 6. Determinação do pH médio em resíduos de alface e couve .....	45
Tabela 7. Determinação do teor de cinzas e matéria orgânica.....	46
Tabela 8. Caracterização físico-química dos resíduos hortícolas utilizados.....	62

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Perda de massa e evaporação da água em função do tempo para a lenha no fogão convencional. ....	65
Gráfico 2. Perda de massa e evaporação da água em função do tempo para o carvão no fogão melhorado. ....	65
Gráfico 3. Perda de massa e evaporação da água em função do tempo para o carvão no fogão convencional. ....	66
Gráfico 4. Perda de massa e evaporação da água em função do tempo para o carvão no fogão melhorado. ....	66
Gráfico 5. Perda de massa e evaporação da água em função do tempo para o gás de cozinha. ....	67
Gráfico 6. Perda de massa e evaporação da água em função do tempo do biogás. ....	67
Gráfico 7. Comparação da potência e consumo específico lenha e do carvão entre fogão convencional e melhorado. ....	69
Gráfico 8. Comparação da potência e consumo específico geral entre todos os combustíveis (biomassa e gasosos) ....	69
Gráfico 9. Rendimento térmico das biomassas (lenha e carvão) em função do tipo de fogão utilizado (convencional e melhorado) ....	72
Gráfico 10. Rendimento térmico comparativo entre todos os combustíveis avaliados. ....	72
Gráfico 11. Índice de combustão da lenha e do carvão em função do tipo de fogão. ....	74
Gráfico 12. Índice de combustão médio comparativo entre todos os combustíveis testados. ....	74
Gráfico 13. Distribuição percentual das combinações de fontes de energia utilizadas pelos produtores locais. ....	77
Gráfico 14. Distribuição percentual dos custos mensais com energia reportados pelos produtores locais. ....	77
Gráfico 15- Fontes hortícolas mais produzidas pelos agricultores inquiridos. ....	79
Gráfico 16- Formas de descarte e aproveitamento de resíduos hortícolas pelos agricultores inquiridos. ....	79
Gráfico 17- Nível de conhecimento dos produtores sobre energias renováveis. ....	80
Gráfico 18 -Nível de Aceitação do biogás como fonte alternativa de energia. ....	80

## **LISTA DE SIGLAS E ACRÓNIMOS**

**ANOVA**-Análise de variância

**C/N**- Relação carbono/nitrogénio

**COP**- Conferência das partes

**DUAT**- Direito de Uso e Aproveitamento de Terra

**ICOM**- Índice de combustão

**kcal**-Quilocaloria

**kg**-Quilograma

**kJ**-Quilojoule

**kgSV**- Quilograma de Sólidos Voláteis

**kW**-Quilowatt

**m<sup>3</sup>**-Metro cúbico

**PCI** – Poder calorífico inferior

**PCS** – Poder calorífico superior

**ONGs**- Organizações não Governamentais

## RESUMO

O presente trabalho intitulado Avaliação do Potencial de Produção de Biogás a partir de Resíduos Hortícolas (Couve e Alface) teve como objectivo analisar a viabilidade técnica e social do aproveitamento de resíduos hortícolas para geração de biogás, caracterizando suas propriedades físico-químicas e comparando o desempenho energético do biogás com outros combustíveis utilizados em contextos urbanos e rurais de Moçambique (lenha, carvão e gás de cozinha).

A investigação foi desenvolvida em duas fases complementares: (i) fase experimental, com caracterização físico-química dos resíduos, montagem e alimentação de biodigestores de 10 L para ensaios energéticos de fervura e combustão; e (ii) fase participativa, com construção de um biodigestor de 20 L em campo, envolvendo produtores locais, e realização de inquérito para compreender práticas energéticas e percepções sobre o uso do biogás.

Os resultados da caracterização mostraram elevados teores de humidade (95,41% na couve e 88,70% na alface), baixa fração mineral (cinzas < 2%) e pH próximo da neutralidade (5,85–6,00), condições favoráveis à digestão anaeróbica. Nos ensaios energéticos, lenha e carvão apresentaram maior potência térmica (1,9–2,07 kW), mas o biogás revelou melhor aproveitamento relativo e menor consumo específico, apontando para maior eficiência de uso.

Os inquéritos indicaram que 46% dos produtores utilizam combinações de gás de cozinha e carvão, seguidos por lenha e carvão (34%), 60% dos produtores entrevistados já haviam ouvido falar sobre energias renováveis e 88% manifestaram predisposição para adoptar o biogás. A construção participativa do biodigestor de 20 L no campo demonstrou viabilidade técnica e social da tecnologia, além de potencial para replicação em outras comunidades. O estudo demonstrou que resíduos de couve e alface apresentam potencial para produção de biogás, e que a adopção da tecnologia pode contribuir para diversificação energética e redução do impacto ambiental.

**Palavras-chaves:** resíduos hortícolas; mudanças climáticas; sustentabilidade ambiental; energias renováveis; biogás.

## ABSTRACT

The present study, entitled Assessment of the Biogas Production Potential from Horticultural Waste (Cabbage and Lettuce), aimed to analyze the technical and social feasibility of using horticultural residues for biogas generation, characterizing their physicochemical properties and comparing the energy performance of biogas with other fuels commonly used in urban and rural contexts of Mozambique (firewood, charcoal, and liquefied petroleum gas – LPG).

The research was carried out in two complementary phases: (i) an experimental phase, which included physicochemical characterization of the residues, assembly and feeding of 10 L biodigesters for boiling and combustion energy tests; and (ii) a participatory phase, involving the construction of a 20 L biodigester in the field with local farmers and conducting a survey to assess energy practices and perceptions regarding biogas use.

Characterization results revealed high moisture contents (95.41% in cabbage and 88.70% in lettuce), low mineral fraction (ash < 2%), and near-neutral pH (5.85–6.00), all favorable conditions for anaerobic digestion. In energy performance tests, firewood and charcoal showed higher thermal power (1.9–2.07 kW), but biogas demonstrated better relative efficiency and lower specific consumption, indicating more efficient use.

The surveys indicated that 46% of farmers use combinations of LPG and charcoal, followed by firewood and charcoal (34%), 60% of the producers interviewed had already heard about renewable energy, and 88% expressed willingness to adopt biogas. The participatory construction of the 20 L biodigester in the field demonstrated both the technical and social feasibility of the technology, as well as its potential for replication in other communities. The study demonstrated that cabbage and lettuce residues have potential for biogas production, and that adopting this technology may contribute to energy diversification and reduction of environmental impacts.

**Keywords:** horticultural waste; climate change; environmental sustainability; renewable energy; biogas.

# I. INTRODUÇÃO

## 1.1 Antecedentes

As mudanças climáticas constituem actualmente um dos maiores desafios globais, afectando de forma mais severa os países menos desenvolvidos devido à sua vulnerabilidade socioeconómica (Reis, 2009). Resultam, sobretudo, do aumento da concentração de gases de efeito estufa (GEE), consequência do uso intensivo de combustíveis fósseis desde a Revolução Industrial, provocando o aquecimento global e alterações nos padrões de precipitação, com impactos significativos na produção agrícola (Araújo *et al.*, 2010).

Neste contexto, torna-se urgente a implementação de soluções sustentáveis que combinem resiliência ambiental com inclusão social. A transição para energias renováveis como solar, eólica, hídrica, biomassa e geotérmica tem sido apontada como alternativa viável para reduzir as emissões de GEE e promover o desenvolvimento equitativo (IPCC, 2021).

A produção de biogás a partir de resíduos orgânicos, sobretudo vegetais, destaca-se como uma solução promissora. Além de aproveitar recursos locais e reduzir a dependência energética, esse processo gera biofertilizantes, promovendo a fertilidade dos solos e fechando ciclos de nutrientes na agricultura familiar (Morales-Polo *et al.*, 2021).

Recentemente, cresce o interesse por inovações tecnológicas que, além de sustentáveis, impulsionem o desenvolvimento social. Em Moçambique, onde os desafios climáticos se somam aos socioeconómicos, tecnologias de baixo custo e adaptáveis, como os biodigestores, ganham relevância. Seu sucesso, porém, depende não só da eficiência técnica, mas do envolvimento activo das comunidades na concepção e gestão dos sistemas (Altieri & Toledo, 2011).

Nesse sentido, experiências no Sul Global têm destacado o papel das abordagens participativas na adopção de tecnologias sustentáveis, combinando inovação ambiental e transformação social (Lima & Schneider, 2014). O biogás é obtido pela digestão anaeróbica da matéria orgânica, produzindo metano (CH<sub>4</sub>) e outros gases, conforme o tipo de substrato (Prati, 2010).

Os biodigestores são sistemas simples, adaptáveis à realidade local, que possibilitam o acesso descentralizado à energia e fertilizantes (Prati, 2010). Portanto, a construção de biodigestores com resíduos hortícolas e participação directa dos produtores representa uma solução técnica e socialmente integrada aos desafios energéticos, ambientais e económicos no meio rural moçambicano.

## **1.2. Problema de estudo e Justificação**

O crescimento populacional e a intensificação da urbanização têm aumentado significativamente a demanda por alimentos, sobretudo hortícolas, essenciais para uma dieta equilibrada. Entretanto, essa produção gera grandes volumes de resíduos vegetais, cuja gestão inadequada contribui para sérios impactos ambientais, incluindo a emissão de gases com efeito de estufa (GEE), contaminação do solo e da água e redução da biodiversidade (Ramesh *et al.*, 2018). Em Moçambique, o descarte desses resíduos em lixeiras e aterros não controlados é comum e agrava os desafios ambientais urbanos, sobretudo pela libertação de metano – um GEE com elevado potencial de aquecimento global (Ferreira & Almeida, 2021).

Este cenário torna evidente a necessidade de soluções sustentáveis para a valorização dos resíduos hortícolas. A produção de biogás por meio da digestão anaeróbica desses resíduos surge como uma alternativa promissora. Em Maputo, por exemplo, cerca de 45% dos resíduos recolhidos são de origem orgânica (UN-Habitat, 2021), o que representa um enorme potencial energético e ambientalmente favorável, se bem aproveitado. O biogás pode ser utilizado como fonte de energia limpa, substituindo o carvão e a lenha que são ainda amplamente utilizados pelas famílias urbanas e periurbanas, cujos efeitos negativos incluem desmatamento, poluição doméstica e problemas respiratórios (INE, 2020).

Além do benefício ambiental, o uso de resíduos hortícolas para geração de biogás apresenta forte relevância social. O projecto propõe uma abordagem participativa, envolvendo produtores locais na seleção dos resíduos, construção e operação do biodigestor. Essa participação garante não só maior aceitação e apropriação da tecnologia, mas também reforça o empoderamento comunitário e a sustentabilidade social, conforme apontam Suharyat *et al.*, 2021.

Com isso, pretende-se promover uma mudança de paradigma na gestão de resíduos e na geração descentralizada de energia, com benefícios directos para a saúde, o ambiente e o bem-estar das comunidades.

Por fim, esta proposta está alinhada às políticas nacionais de desenvolvimento sustentável, como o Plano de Desenvolvimento Urbano e Rural (PDUR), que incentiva o uso de tecnologias amigas do ambiente (MITADER, 2021), e contribui para os Objectivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente os relacionados à energia limpa (ODS 7), cidades sustentáveis (ODS 11) e acção climática (ODS 13).

Diante disso, o presente estudo parte da necessidade de encontrar soluções integradas para o aproveitamento sustentável dos resíduos hortícolas urbanos, com vista à mitigação das mudanças climáticas, geração de energia renovável e fortalecimento do tecido social por meio da participação activa dos produtores.

### **1.3. OBJECTIVOS**

#### **1.3.1.Objectivo Geral**

Avaliação do potencial de produção de biogás a partir de resíduos vegetais hortícolas e suas contribuições como estratégia para mitigação das mudanças climáticas e promoção do envolvimento comunitário sustentável.

#### **1.3.2.Objectivos Específicos**

- Caracterizar os resíduos vegetais hortícolas utilizados, com base em parâmetros laboratoriais como teor de humidade, teor de matéria orgânica, cinzas e pH;
- Produzir biogás em maquetes sob condições controladas e comparar o seu desempenho energético com outras fontes de energia utilizadas na cozinha moçambicana, considerando os melhores desempenhos obtidos nos testes com fogões para biomassa (lenha e carvão);
- Identificar a perceção e o nível de aceitação dos produtores locais sobre o uso do biogás como fonte alternativa de energia;
- Promover junto aos produtores uma experiência prática de construção e alimentação de um biodigestor como ferramenta de aprendizagem e apropriação comunitária da tecnologia.

## **1.4.HIPÓTESES**

### **1.4.1. Hipótese 1**

**Hipótese nula ( $H_0$ ):** a composição dos resíduos vegetais hortícolas não influencia significativamente o volume de biogás produzido.

**Hipótese alternativa ( $H_1$ ):** a composição dos resíduos vegetais hortícolas influencia significativamente o volume de biogás produzido.

### **1.4.2. Hipótese 2**

**Hipótese nula ( $H_0$ ):** não existem diferenças significativas de desempenho energético entre os tipos de fogões para biomassa (lenha e carvão) nem entre o biogás e as principais fontes de energia utilizadas na cozinha moçambicana.

**Hipótese alternativa ( $H_1$ ):** Existem diferenças significativas de desempenho energético entre os tipos de fogões para biomassa (lenha e carvão) e/ou entre o biogás e as principais fontes de energia utilizadas na cozinha moçambicana.

## **1.5.QUESTÕES DE ESTUDO**

### **1.5.1. Questão 1:**

Qual é o nível de aceitação dos produtores locais em relação ao uso do biogás como fonte alternativa de energia?

### **1.5.2. Questão 2:**

De que forma a participação prática na construção e alimentação de um biodigestor contribui para o envolvimento e apropriação comunitária da tecnologia?

## **II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. Mudanças Climáticas e Desafios Energéticos**

#### **2.1.1. Fundamentos das Mudanças Climáticas**

Mudança climática refere-se a variação estatisticamente significativa, tanto na média quanto na variabilidade do clima, que persiste por período extenso (superior a décadas). Esta mudança pode dever-se a processos naturais internos, a forçantes externos, ou a alterações antropogénicas persistentes na composição da atmosfera ou do uso do solo (IPCC, 2022).

Segundo a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, mudança climática que é definida como uma alteração do clima atribuída, direta ou indiretamente, à actividade humana que modifica a composição da atmosfera global, somando-se à variabilidade climática natural observada ao longo de períodos de tempo comparáveis. A convenção, portanto, distingue entre “mudança climática”, atribuída a acção humana, e “variabilidade climática” resultante de causas naturais.

O clima é um dos elementos do meio ambiente, e sua alteração em nível global pode ocorrer por causas naturais, entre as quais destacam o vulcanismo, actividade solar e quedas de grandes meteoros. Contudo, pesquisas vêm apontando, há décadas que as actividades humanas nos dois séculos anteriores mudaram fortemente o meio ambiente e estão contribuindo para a aceleração das mudanças climáticas globais (IPCC, 2014).

Embora ainda existam vozes dissonantes no campo científico, múltiplos estudos indicam que as acções antrópicas estão a alterar de forma persistente a composição da atmosfera, resultando no aumento da temperatura média global. Este fenómeno tem potencial para intensificar a ocorrência de eventos climáticos extremos, tais como furacões e enchentes mais intensas, secas mais prolongadas e escassez de recursos hídricos em diversas regiões do planeta (IPEA, 2011).

### **2.1.1.1. Historial das mudanças climáticas**

O processo de industrialização iniciado com a Revolução Industrial, no final do século XIX, intensificou-se a partir da segunda metade do século XX. Este processo pautou-se pela combinação entre ciência, tecnologias avançadas e grandes investimentos económicos. Tanto o mercado como o padrão de consumo, na sua forma actual, são resultados consistentes do desenvolvimento do sistema capitalista, que se baseou na procura pela maximização do consumo e da produção (Kurz, 1992). Este novo sistema gerou um crescimento produtivo, e conseqüentemente uma intensificação das acções humanas sobre o meio ambiente, devido ao aumento das actividades económicas, do uso de combustíveis fósseis, da urbanização, da alteração na exploração dos recursos naturais e da intensificação da produção agrícola (Mendes, 2014; Estrela & Pott, 2017).

Neste sentido, a revolução tecnológica iniciada em 1750 contribuiu para o aumento das emissões dos Gases de Efeito Estufa (GEEs) – cujos principais são: dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) e óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) –, o que provocou o aumento da temperatura média da superfície (Mendes, 2014; Estrela & Pott, 2017).

Como resultado dessas transformações e da intensificação dos impactos ambientais, principalmente entre 1920 e 1940 e entre 1975 e 1990, os estudos sobre os gases de efeito de estufa e o aumento da temperatura média global tornaram-se mais frequentes. Esta crescente preocupação levou a criação da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), aberta para assinaturas em 1992 e em vigor desde 21 de Março de 1994, como um marco internacional na luta contra as mudanças climáticas (Ribeiro, 2002).

### **2.1.1.2. Acordos Internacionais sobre o Clima**

Em resposta à crescente preocupação científica e política com as mudanças climáticas globais, expressa nos relatórios do IPCC e nas discussões internacionais desde o início do século XX, surgiram diversos acordos internacionais destinados a estabelecer compromissos comuns para a mitigação e adaptação às alterações climáticas.

A Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano, realizada em 1972, na cidade de Estocolmo, Suécia, reuniu 113 países, todas as organizações internacionais existentes na época e cerca de 700 observadores de diversas organizações não governamentais, o que significou um interesse crescente da sociedade civil pela matéria ambiental. Para grande parte da doutrina, a Conferência de Estocolmo, constituiu no plano jurídico, o verdadeiro ponto de partida para uma percepção global da preocupação com o meio ambiente, tanto na esfera da construção de normas internacionais como no desenvolvimento da doutrina sobre o tema (Birnie, Boyle & Redgwell, 2009). É considerada o primeiro tratado internacional que apresentou princípios orientadores com objectivo de proteger o meio ambiente, entre os quais se destacou o princípio do desenvolvimento sustentável.

A primeira reunião internacional que concluiu, de forma estruturada, negociações sobre as alterações climáticas ocorreu em 1992, durante a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, realizada no Rio de Janeiro. Este evento ficou conhecido como Cimeira da Terra ou EC0-92, e contou com a presença de 178 delegações nacionais. Um dos principais resultados dessa conferência foi a criação da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) da qual resultou o texto da Convenção do Clima, assinado e ratificado por 175 países. Com a entrada em vigor da Convenção em 1994, foram criadas Conferências das Partes (COPs), reuniões anuais entre os países signatários para discutir e monitorar a implementação dos compromissos assumidos. A UNFCCC passou a funcionar como a base do regime internacional sobre mudanças climáticas, integrado a um conjunto mais amplo de tratados e instituições relacionados ao meio ambiente. De acordo com Keohane e Victor (2010) este regime climático é formado por diversas causas transversais, onde os países actuam tanto de forma integrada quanto fragmentada, dependendo dos seus interesses.

Em 1997, durante a COP3 que teve lugar em Quioto, Japão, adoptou-se o Protocolo de Quioto, sendo este o primeiro acordo internacional que legalmente obrigou países desenvolvidos a fixar metas de cortes para emissões de gases com efeito de estufa (GEE). Este protocolo foi sem dúvida um marco no avanço da implementação da Convenção do Clima, uma vez que estabelecia os equivalentes com reduções para a parte chamada anexo I da UNFCCC, que compreende as potências económicas e algumas nações em desenvolvimento. O período de cumprimento inicialmente estipulado foi de 2008 a 2012, sendo mais tarde prorrogado pela conhecida Emenda de Doha (2012–2020). Apesar dos avanços, o protocolo encontrou uma série de problemas de adesão e implementação, como a negação dos Estados Unidos em ratificá-lo e a retirada do Canadá. Ainda assim, trouxe mecanismos inovadores, como o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) e o comércio de emissões e implementação, que por sua vez proporcionaram algum grau de flexibilidade ao cumprimento das metas (UNFCCC, 2024).

Entre os resultados mais significativos das Conferências das Partes (COPs) destaca-se o Acordo de Paris, adoptado durante a COP21, em 2015, na capital francesa. Este acordo representou um marco histórico, ao reunir praticamente todos os países do mundo num compromisso comum para limitar o aquecimento global a menos de 2°C, preferencialmente 1,5°C acima dos níveis pré-industriais. Diferentemente do acordo de Quioto, o Acordo de Paris estabeleceu metas voluntárias (NDCs – Contribuições Nacionalmente Determinadas) para cada país, promovendo uma abordagem mais flexível e inclusiva. Além disso, reforçou a necessidade de financiamento climático, especialmente para os países em desenvolvimento, e destacou o papel da adaptação, resiliência e justiça climática como pilares da acção global (UNFCCC, 2015).

### **2.1.1.3. Moçambique nos Acordos e Agendas sobre Mudanças Climáticas**

Moçambique é signatário da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) desde 1994 e tem participado activamente nas conferências das partes (COPs). O país ratificou o Protocolo de Quioto e, posteriormente, adere ao Acordo de Paris submetendo suas Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs) com metas de mitigação e adaptação às mudanças climáticas.

Na relação com os demais signatários, e a partir da actuação em diversos fóruns, o país compromete-se em sua NDC atualizada de 2021, reduzindo cerca de 40 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente no período de 2020 a 2025 através de priorização em agricultura, energia, gestão de resíduos, recursos hídricos, e infraestrutura resiliente. A estratégia enfatiza, ainda, a necessidade de financiamento internacional e transferência de tecnologia para alcançar os objectivos propostos, bem como, metas de mitigação e adaptação (UNFCCC, 2021).

Em complemento, Moçambique formulou, em 2014, a sua Estratégia Nacional de Desenvolvimento para o período de 2015 a 2035, que define os sectores-chave e estabelece as diretrizes para um crescimento económico sustentável e inclusivo. Esta estratégia reconhece que a mitigação e adaptação às mudanças climáticas devem ser componentes centrais do desenvolvimento a médio e longo prazos. Por tanto, considera essencial a avaliação dos impactos dos eventos climáticos extremos e a implementação de medidas para reduzir a vulnerabilidade das populações, especialmente as mais carenciadas (MITADER, 2021).

Moçambique tem utilizado diversas formas de financiamento climático internacional, como o Fundo Verde para o Clima (GCF), o Fundo Global para o Meio Ambiente (GEF) e o apoio do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), por meio da iniciativa Climate Promise. Esses mecanismos têm apoiado projectos voltados à adaptação comunitária, resiliência energética e gestão sustentável dos recursos naturais. Moçambique foi incluído como país prioritário na segunda fase do projecto Climate Promise, focado na aceleração da acção climática contextualizada e inclusiva (UNDP, 2023).

Moçambique tem buscado conciliar os compromissos internacionais com acções nacionais tangíveis, considerando a sua alta vulnerabilidade climática. O país continua a elaborar suas políticas públicas e estratégias de adaptação e mitigação, mesmo com restrições financeiras, tecnológicas e institucionais. Esses desafios enfatizam a necessidade de soluções sustentáveis que sejam acessíveis e integradas ao contexto local. A energia alternativa, mais especificamente o biogás, oferece uma clara oportunidade de alavancar o desenvolvimento socioeconómico com uma resiliência ambiental e ainda cumprir os compromissos dos acordos climáticos globais (UNDP, 2023).

#### **2.1.1.4. Impactos das mudanças climáticas no mundo e em Moçambique**

As questões decorrentes da mudança climática são extremamente urgentes e prementes em escala global, tendo um impacto profundo nos ecossistemas, economias e na vida humana. Como relatado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), as emissões de gases de efeito estufa antropogénicas já aumentaram a temperatura média global em 1,1°C em comparação com os níveis pré-industriais. As actividades humanas também agravaram a intensidade e a frequência de fenómenos extremos como ondas de calor, secas prolongadas, inundações severas, furacões, derretimento de geleiras e incêndios florestais (IPCC, 2023).

A economia global, assim como os ecossistemas, continuam sendo severamente impactadas pelas mudanças climáticas. A segurança alimentar, o acesso à água, os serviços de saúde e a estabilidade económica estão em risco. Os serviços de pesca e aquicultura vêm sendo reduzidos devido ao aquecimento e à acidificação dos oceanos, enquanto a produtividade da agricultura está em declínio, especialmente em regiões de baixa latitude. Actualmente mais da metade da população mundial enfrenta escassez extrema de água, em pelo menos uma parte do ano e milhões de pessoas sofrem com insegurança alimentar aguda devido aos impactos das mudanças climáticas.

Alem disso, a mudança climática tem comprometido sistemas de infraestrutura crítica, como abastecimento de água, saneamento, energia, transporte e saúde pública. Em regiões áridas, o aumento das temperaturas e das ondas de calor intensificam a poluição do ar e desafiam o funcionamento urbano. Os efeitos climáticos contribuem para intensificação da migração forçada, sobretudo em países em desenvolvimento.

Também são registados impactos significativos na saúde física e mental da população mundial, incluindo aumento de doenças transmitidas por vectores, traumas psicológicos e novas doenças zoonóticas. Os danos económicos concentram-se nos sectores agrícola, pesqueiro, turístico e energético, com eventos como ciclones tropicais, enchentes e incêndios florestais provocando perdas materiais e perpetuando desigualdades sociais. Entre 2010 e 2020, as mortes por enchentes, secas e tempestades nas regiões altamente vulneráveis foram 15 vezes mais do que em países de baixa vulnerabilidade (IPCC, 2023).

Essas mudanças ameaçam a segurança alimentar, o acesso à água potável, a saúde pública, a biodiversidade e os meios de subsistência de milhões de pessoas, especialmente em nações em desenvolvimento que possuem baixa capacidade de responder e se adaptar a essas mudanças. Alterações nos padrões de precipitação, aumento do nível do mar e perda da cobertura vegetal são alguns dos impactos observados com consequências sociais e econômicas cada vez mais severas (IPCC, 2023).

Em Moçambique um dos países mais vulneráveis aos impactos das mudanças climáticas no sul da África, os efeitos são particularmente severos devido às fragilidades socioeconômicas. O país regularmente enfrenta eventos climáticos extremos, como secas severas, inundações e ciclones tropicais. Um exemplo marcante são os ciclones Idai e Kenneth em 2019, que causaram ampla destruição e uma crise humanitária para mais de dois milhões de pessoas, além de infligir um estimado de 1,4 bilhões de dólares em danos (PDNA, 2019). Mais recentemente, o ciclone Freddy em 2023 destacou mais uma vez a exposição crítica que o país tem a tais eventos.

Os desastres subsequentes impactam diretamente a agricultura, que continua sendo a principal actividade económica para o maior número de pessoas, bem como a infraestrutura, os sistemas de abastecimento de água, os cuidados de saúde, a educação e os serviços de segurança alimentar. As comunidades rurais, especialmente mulheres e crianças, sofrem mais devido à perda de meios de subsistência, juntamente com o aprofundamento da pobreza e o agravamento das desigualdades. Também houve um aumento no deslocamento forçado de pessoas, criando a necessidade de intervenções urgentes em relação à adaptação e à resiliência (PNUD, 2023).

Moçambique em buscado integrar medidas de adaptação às suas políticas públicas, mas desafios ainda permanecem. A implementação ineficaz da estratégia climática devido à capacidade institucional limitada, lacunas tecnológicas e financiamento inadequado (PNUD, 2023).

### **2.1.1.5. Contribuição dos combustíveis fósseis para as mudanças climáticas**

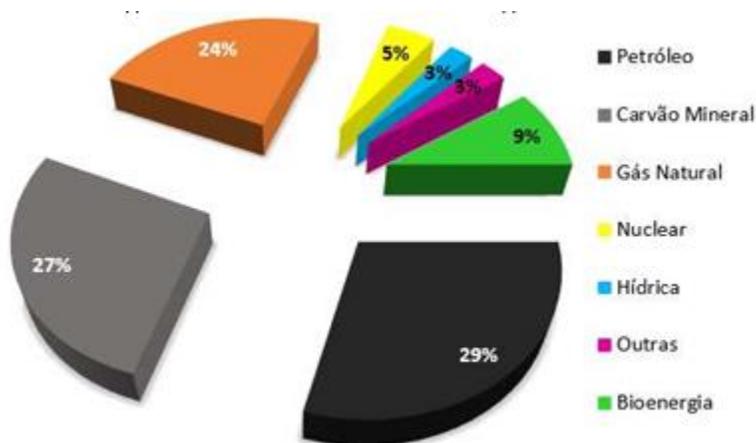
A combustão de combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás natural), é amplamente reconhecida como a maior origem antropogénica das emissões de gases de efeito estufa (GEE), notadamente, do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Desde a Revolução Industrial, o consumo intensivo destes recursos energéticos impulsionou o crescimento económico mundial, mas também contribuiu fortemente para o aquecimento global, bem como para a degradação ambiental (IEA, 2022).

Em torno de 75% das emissões globais de CO<sub>2</sub> procedem da queima de combustíveis fósseis para eletricidade, transporte e utilização industrial. O uso do carvão mineral, por exemplo, identifica-se como uma das fontes mais intensivas em carbono, dada a maior emissão de gases em uma unidade de energia produzida em comparação com o gás natural e o petróleo. Para além do CO<sub>2</sub>, estes combustíveis liberam igualmente metano (CH<sub>4</sub>) e óxidos de azoto (NO<sub>x</sub>), ambos potentes GEE com alto potencial de aquecimento global. Para além do impacto climático directo, a exploração e a combustão de combustíveis fósseis acarretam custos ambientais e sociais, incluindo poluição atmosférica, acidificação dos oceanos, perda de biodiversidade e conflitos geopolíticos associados à sua exploração e comercialização (IPCC, 2023).

A dependência global dos combustíveis fósseis têm-se mostrado um dos maiores desafios à mitigação das mudanças climáticas. Apesar dos compromissos internacionais, como o Acordo de Paris, os subsídios públicos a essas fontes permanecem um dos obstáculos à transição energética sustentável, em particular nos países em desenvolvimento (UNEP, 2022). A gradual substituição dos combustíveis fósseis pelas fontes renováveis, como o biogás, é considerada uma das estratégias mais eficientes para reduzir as emissões de GEE e alcançar a neutralidade carbónica nas próximas décadas.

A exploração de novas fontes renováveis em meados dos anos 2000, não alterou expressivamente a matriz energética mundial, pois apesar de haver um aumento no fornecimento de energias renováveis ao longo dos anos, também houve aumento no fornecimento das fontes não renováveis. Ao longo das últimas duas décadas, a parcela de energias renováveis na matriz energética mundial manteve-se permeando cerca de 1/8 do total de energia fornecida no mundo (IEA, 2023).

Assim, apesar de haver uma enorme variedade de fontes renováveis de energias que podem ser exploradas, a fim de diminuir o consumo das fontes não renováveis, o que se observa, é que os combustíveis fósseis continuam a ter papel proeminente na matriz energética mundial (Garcia, 2014). A partir dos dados fornecidos pela IEA (2023), pode-se visualizar no gráfico da Figura 1, que atualmente 80% da matriz energética mundial é composta por combustíveis fósseis e, se somada a parcela de energia nuclear, verifica-se que o actual modelo energético global compõe-se de 85% de fontes não renováveis de energia.



**Figura 1, Gráfico da actual matriz energética mundial Fonte: Ferreira e Furtado (2024, p.8), Adaptado de IEA, 2023.**

A gradual substituição dos combustíveis fósseis pelas fontes renováveis, é considerada uma das estratégias mais eficientes para reduzir as emissões de GEE e alcançar a neutralidade carbónica nas próximas décadas. Assim, uma alternativa as fontes não renováveis é o uso de biogás como fonte de energia, o qual é produzido a partir de resíduos orgânicos, através de uma digestão anaeróbia (Sousa & Rizzato, 2022).

### 2.1.2. O Biogás como Alternativa Energética Sustentável

A partir das Conferências das partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COP), torna-se evidente a urgência de uma transição energética que promova a renovação e, sobretudo a descarbonização das fontes de energéticas globais. Nesse cenário, o biogás e o biometano surgem como alternativas renováveis promissoras, capazes de substituir parcial ou totalmente os combustíveis fósseis (Roitman, 2023).

O biometano é um derivado do biogás, obtido através de um processo de purificação, no qual se reduz o teor de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e de vapor de água, obtendo-se uma composição superior a 90% de metano (Roitman, 2023). O biogás, por sua vez, é gerado a partir da digestão anaeróbica de matéria orgânica, que se apresenta em diversos resíduos como restos da indústria alimentar (cascas, sementes, bagaço de cana-de-açúcar), dejectos agropecuários e resíduos sólidos urbanos. Essa mistura gasosa é composta, em sua maioria, de metano ( $\text{CH}_4$ ) e gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ), e pode ser utilizada para geração de energia térmica, elétrica ou até mesmo de combustível veicular quando refinada (Fröner-Lacerda *et al.*, 2024).

Além do seu valor energético, o biogás é uma solução eficaz para a gestão de resíduos, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) que seriam liberadas na decomposição natural da biomassa (GNPW, 2024). Para além disso, o processo de digestão anaeróbia ainda gera um subproduto altamente nutritivo que pode ser utilizado como biofertilizante na agricultura, favorecendo a economia circular. A tecnologia do biogás, quando bem planeada, pode gerar benefícios ambientais, sociais e económicos importantes, principalmente no âmbito rural e em países em desenvolvimento (Fröner-Lacerda *et al.*, 2024).

Embora os sólidos fundamentos técnicos do biogás estejam bem estabelecidos, “a tecnologia de digestão anaeróbia evoluiu através de várias eras, desde a observação de gás inflamável sendo produzido em matéria orgânica em decomposição no século XVII, até os modernos sistemas de biodigestores que hoje combinam a produção de energia e a gestão de resíduos” (Abbasi, 2012). Este caminho histórico comprova que os biodigestores não são invenções recentes, mas sim o resultado de uma acumulada evolução que se estendeu por séculos.

### **2.1.2.1.História dos Biodigestores**

Dados literários registam a existência do biodigestor desde a segunda metade do século XIX, como a primeira instalação operacional com a finalidade de produzir gás combustível. Contudo, o biogás já era conhecido desde o século anterior. Em 1776, o pesquisador italiano Alessandro Volta descobriu que o gás metano já existia incorporado ao chamado "gás dos pântanos", sendo um resultado da decomposição de restos vegetais em ambientes confinados. Em 1806, na Inglaterra, Humphrey Davy identificou um gás rico em carbono e dióxido de carbono, sendo este resultante da decomposição de dejectos animais em lugares húmidos. Contudo, somente em 1857, em Bombaim, na Índia, instalou-se o biodigestor pioneiro que deu bases teóricas e experimentais da digestão anaeróbica (Nogueira, 1986).

Na década de 1970, com a crise do petróleo, houve um aumento do interesse global pela produção de biogás como uma alternativa de energia renovável. Neste período, foram introduzidas inovações significativas nos *designs* de biodigestores, com melhorias na eficiência da digestão anaeróbica e no controle de processos. A partir dos anos 2000, a tecnologia de biodigestores expandiu-se para aplicações urbanas e industriais, permitindo o tratamento de resíduos sólidos urbanos e esgoto sanitário, o que contribuiu para a popularização da tecnologia em países desenvolvidos e em desenvolvimento (Kelleher *et al.*, 2002; Deublein e Steinhäuser, 2008).

### **2.1.2.2.Biodigestores**

Biodigestores consistem em equipamentos herméticos e impermeáveis dentro dos quais se deposita material orgânico para fermentar anaerobiamente, ou seja, sem a presença de ar atmosférico, por um determinado tempo de retenção, no qual ocorre um processo bioquímico denominado biodigestão anaeróbica, que tem como resultado a formação de produtos gasosos, principalmente metano e dióxido de carbono, além também biofertilizante (Magalhães, 1986).

O biodigestor apresentado esquematicamente na Figura 2, segundo Amaral (2008), é constituído por um reservatório que armazena a biomassa por um determinado tempo, e por uma câmara (gasómetro) que armazena o biogás produzido.

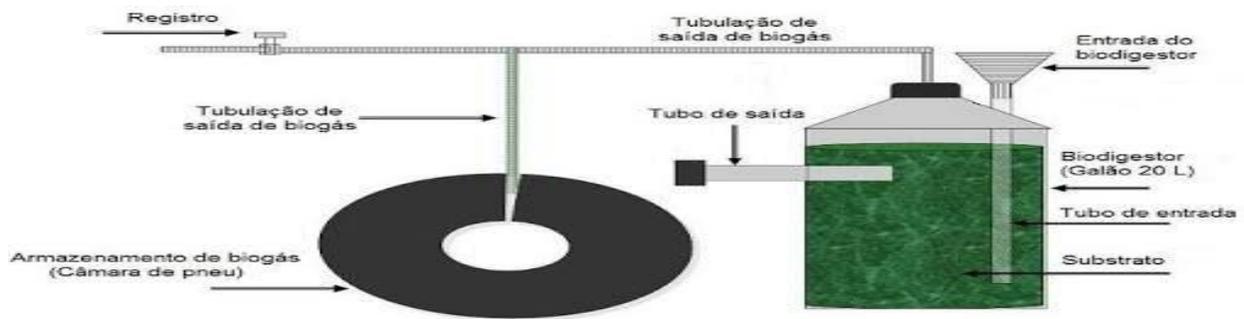


Figura 2, Representação esquemática de um biodigestor em funcionamento Fonte: [www.pinterest.com](http://www.pinterest.com)

O biogás fica retido na parte superior do biodigestor e em seguida pode ser canalizado para ser utilizado em diversas aplicações, como processos de aquecimento, resfriamento, ou na geração de energia eléctrica.

### 2.1.2.3. Biogás

Segundo Oliver et al., (2008), o biogás é um gás combustível com a queima de forma limpa, e renovável, sendo usado como combustível e fonte de energia alternativa. Seu poder calorífico varia de 5000 a 7000 Kcal/m<sup>3</sup>. Pode-se comparar a relação de 1m<sup>3</sup> de biogás com outras fontes de energia segundo ilustrado na Tabela 1.

Tabela 1: Equivalência energética do biogás com outras fontes de energia

1 m <sup>3</sup> de biogás equivale à:	
Combustíveis	Quantidade
Gasolina	0,613l
Querosene	0,579l
Óleo diesel	0,553l
Gás de cozinha	0,454l
Álcool hidratado	0,790l
Eletricidade	1,428 kWh

Fonte: elaborado pela Scot Consultoria, adaptado de Barrera (2011)

Através da conversão de biomassa em energéticos pode-se obter o biogás que é uma mistura gasosa produzida a partir da decomposição anaeróbia de materiais orgânicos, composto de 55-70% de metano (CH<sub>4</sub>) e 30-45% dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), com pequenas quantidades de ácido sulfídrico (H<sub>2</sub>S) e amónia (NH<sub>3</sub>), traços de hidrogénio (H<sub>2</sub>), nitrogénio (N<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), carboidratos e oxigénio (O<sub>2</sub>).

#### 2.1.2.4. Fermentação anaeróbica e formação do biogás

O processo de digestão anaeróbica apresentado esquematicamente na Figura 3, envolve a degradação e estabilização da matéria orgânica levando à formação de metano, produtos inorgânicos (dióxido de carbono) e resíduos líquidos ricos em minerais que pode ser utilizado como biofertilizante (matéria orgânica estabilizada). (Kelleher *et al.*, 2002).



Figura 3, Apresentação esquemática do processo de digestão anaeróbica Fonte: [www.infoescola.com](http://www.infoescola.com)

A formação do metano ocorre de forma espontânea em ambientes isentos de ar, quando a biomassa ou matéria orgânica cuja composição é feita por carboidratos, lípidos, proteínas entre outros nutrientes, ainda na presença de bactérias, se decompõem formando metano e impurezas. Parte do dióxido de carbono produzido se liga à amônia, enquanto o enxofre fica como resíduo, resultando em uma composição do biogás de CH<sub>4</sub>:CO<sub>2</sub>: 71%: 29% (Bezerra & Machado, 2016).

A digestão anaeróbica passa por quatro fases microbiológicas principais: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. A produção efectiva do biogás ocorre na última etapa do processo (Deublein e Steinhäuser, 2008).

A primeira etapa, a **hidrólise**, consiste na degradação de compostos orgânicos complexos em moléculas mais simples e solúveis. Durante esta fase, proteínas são transformadas em aminoácidos, polissacáridos em monossacáridos, lípidos em ácidos graxos e ácidos nucleicos em purinas e pirimidinas. Todo esse processo é catalisado por bactérias hidrolíticas (Lapa, 2012).

Entretanto, nesta fase, a conversão de compostos insolúveis tais como a lenhina e o material celulósico é um dos principais factores limitantes do processo de digestão anaeróbia (Grobicki, 1997).

A eficiência da hidrólise afecta a disponibilidade de carbono para a produção de biogás e depende de características do substrato, como tamanho das partículas e proporção de nutrientes. Substratos na forma de partículas poderão causar uma aglomeração excessiva de ácidos orgânicos voláteis e inibir o processo, na medida que partículas maiores diminuem a área de contacto com os microrganismos (Ferreira, 2010).

Perante esse problema, além de permitir maior aproveitamento do biogás, é comum submeter os efluentes ricos em compostos insolúveis a pré-tratamentos físicos, químicos ou biológicos para favorecer a quebra desses materiais e melhorar a digestão anaeróbia (Bhattacharyya et al. 2008).

Após a hidrólise, os compostos orgânicos simples obtidos - aminoácidos, monossacáridos e ácidos gordos - são degradados por microrganismos **acidogénicos**, originando ácidos orgânicos voláteis, como ácido acético, propiónico e butírico, assim como álcoois, dióxido de carbono, hidrogénio molecular e amónia (Lapa, 2012). Esta etapa é um passo importante para a sequência da digestão anaeróbia, pois os produtos gerados são substratos para as etapas subsequentes, especialmente acetogénese e metanogénese.

A população microbiana responsável por esta fase forma cerca de 90 % da população total de bactérias dos digestores anaeróbios e consiste principalmente em bactérias fermentativas anaeróbicas obrigatórias e um certo número de anaeróbicas facultativas. Dentre estas estão consorciadas as bactérias do género *Pseudomonas* e do género *Streptococcus* (Ferreira, 2010).

O número e a diversidade das espécies acidogénicas é variada na função da composição substrato, influenciando diretamente o perfil de ácidos e compostos intermédios produzidos. Estudos indicam que diferentes substratos selecionam diferentes consócios bacterianos, afectando a eficiência da digestão (Alves, 1998).

Durante a fase de **acetogénese**, os produtos provenientes da acidogénese - ácidos orgânicos voláteis, ácidos gordos, monossacáridos, aminoácidos e compostos nitrogenados - são convertidos em acetato, hidrogénio (H<sub>2</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), formato, metanol e metilaminas (Lapa, 2012). É uma conversão essencial, já que o acetato e o hidrogénio são os substratos directos para a metanogénese, a próxima etapa na digestão anaeróbia.

Duas classes de bactérias actuam nesta fase: as bactérias homoacetogénicas, como *Acetobacterium woodii* e *Clostridium acticum*, que produzem acetato e hidrogénio a partir de compostos multicarbonados; e as bactérias sintróficas, como *Syntrophobacter wolinii*, que apenas produzem hidrogénio, actuando em sinergia com arqueias metanogénicas, mantendo as condições termodinamicamente favoráveis para o seu crescimento (Lapa, 2012 & Ferreira, 2010).

A remoção eficiente do hidrogénio pelas bactérias metanogénicas e bactérias redutoras de sulfato é de extrema importância, porque a acumulação de hidrogénio no meio pode inibir a conversão dos intermédios, como o proprionato, em acetato, podendo afectar a estabilidade do processo digestivo (Ferreira, 2010). Desta forma, a acetogénese pode ser caracterizada como a fase de transição, que assegura o fornecimento de precursores energéticos para a geração final de biogás.

A **metanogénese** é a última fase da digestão anaeróbia, onde se dá a produção de metano (CH<sub>4</sub>) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), principalmente pela redução do CO<sub>2</sub> com hidrogénio e pela descarboxilação do ácido acético. Calcula-se que aproximadamente 70% do metano seja decorrente do acetato (Solera, 2008). Essa fase é realizada por microrganismos do grupo Archaea, as chamadas bactérias metanogénicas, as quais são divididas em dois grupos: as hidrogenofílicas (por exemplo, *Methanospirillum*), que utilizam H<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub> e as acetoclásticas (*Methanosarcina* e *Methanotherix*), que metabolizam o ácido acético (Ferreira, 2010).

Além de produzirem metano, essas bactérias ajudam a regular o pH do meio, formando bicarbonato a partir do CO<sub>2</sub>, estabilizando o sistema (Ferreira, 2010). A metanogénese também é importante para manter o funcionamento das bactérias sintróficas na etapa anterior (acetogénese), já que a remoção do hidrogénio evita sua acumulação, a qual inibiria o processo (Lapa, 2012).

#### **2.1.2.5. Factores que influenciam a digestão anaeróbica**

A digestão anaeróbica é afectada por uma série de parâmetros operacionais que influenciam a eficiência do processo e a produtividade de biogás. Karlsson et al. (2014) indicam que dados como temperatura, carga orgânica, tempo de retenção, degradabilidade do substrato, agitação, pH/alcalinidade desempenham um papel fundamental na performance dos biodigestores.

Os autores destacam que **a temperatura** é o parâmetro mais importante e é determinada em duas escalas: mesofílica (25 °C a 40 °C) e termofílica (50°C a 60°C). A digestão termofílica se mostra mais rápida, ainda promove a desinfecção e aumenta a solubilidade de compostos orgânicos, mas pede maior controle, uma vez que os microrganismos são mais sensíveis à variação da temperatura. Por exemplo, temperaturas abaixo de 32°C evitam a formação de metano e aumentam a formação de ácidos e álcoois. A temperatura deve ser estável, não pode variar mais do que  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ . Para serviços de adaptações de processos mesofílicos para termofílicos, recomenda-se aumentar gradualmente, cerca de 1°C por dia.

**Carga orgânica** quer dizer a quantidade de substrato fornecido ao biodigestor ao longo de um certo tempo. Para um melhor funcionamento do processo de biodigestão, a carga deve ser aumentada lentamente, para que microorganismos possam se acostumar com nutrientes. Cargas muito grandes podem causar a formação de ácidos graxos, redução de pH e até mesmo parar com o processo. Para digestão termofílica estabilizada, recomenda-se de 4 a 5 kgSV/m<sup>3</sup>.dia e para mesofílica de 2 a 3 kgSV/m<sup>3</sup>.dia.

**O tempo de retenção** é o tempo médio que o substrato permanece no digestor e varia de 10 a 25 dias. Ele deve ser ajustado conforme a carga e temperatura: os processos mesofílicos necessitam de um tempo mais longo (15 a 20 dias) e aqueles termofílicos funcionam de forma estável com 10 a 12 dias.

**A degradabilidade** é a eficiência da conversão da massa orgânica em biogás. Os substratos que apresentam uma alta biodegradabilidade, como restos de alimentos, conseguem ter degradações superiores a 90%, e os substratos fibrosos, em geral, não atingem mais que 60%.

**A agitação** do conteúdo do digestor é importante para manter a homogeneidade do sistema, facilitar o contacto entre os microrganismos e o substrato e prevenir sedimentações. Ela precisa ser moderada, pois agitações intensas podem romper os agregados microbianos.

Por último, **o pH** ideal está entre 7,0 e 8,5. Para manter esse intervalo, a alcalinidade do meio deve ser elevada, garantindo efeito tampão. A presença de substratos ricos em nitrogênio favorece a formação de bicarbonato de amônio, estabilizando o sistema. A interação equilibrada entre esses parâmetros assegura maior estabilidade e produtividade do processo de digestão anaeróbica.

### 2.1.2.6. Tipos de Biodigestores

O modelo de biodigestor indiano possui uma campânula flutuante como gasômetro que pode estar mergulhada sobre a biomassa em fermentação ou em um selo de água externo, para reduzir perdas durante o processo de produção de gás. Possui ainda uma parede central, fazendo do tanque de fermentação um tanque de câmara dupla, como pode ser visto na Figura 4. À medida que o volume de gás produzido não é imediatamente consumido, o gasômetro tende a deslocar-se verticalmente, aumentando seu volume e mantendo a pressão de operação constante. O abastecimento é contínuo, e o substrato utilizado neste modelo deve conter uma concentração de sólidos totais (ST) de até 8%, de modo que sua circulação pelo interior da câmara seja facilitada e para evitar entupimentos dos canos de entrada e saída do material (Deganutti et al, 2002).

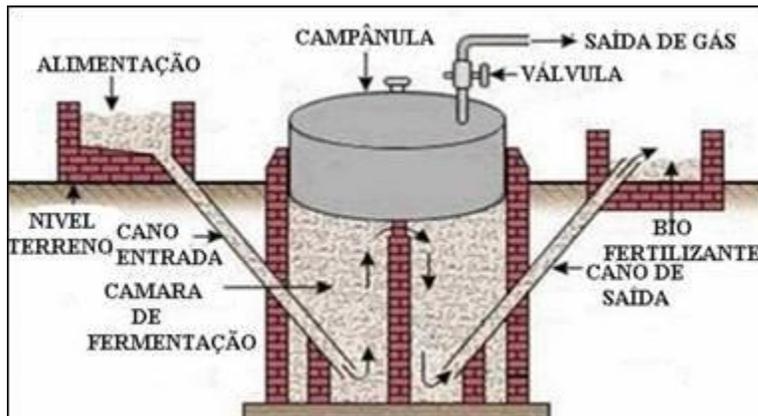


Figura 4, Modelo indiano de Biodigestor Fonte: AEQ, 2015, p. 06

O modelo de biodigestor chinês é formado por uma câmara de fermentação cilíndrica em alvenaria, com teto abobado (Figura 5), impermeável que armazena o biogás gerado. O aumento de pressão em seu interior devido ao acúmulo de biogás resulta no deslocamento do efluente da câmara de fermentação para a saída. Como no modelo indiano, o modelo chinês necessita de um substrato com teor de ST em torno de 8% para evitar entupimentos no sistema de entrada e facilitar a circulação do material, e a alimentação também deve ser contínua (Deganutti et al, 2002).

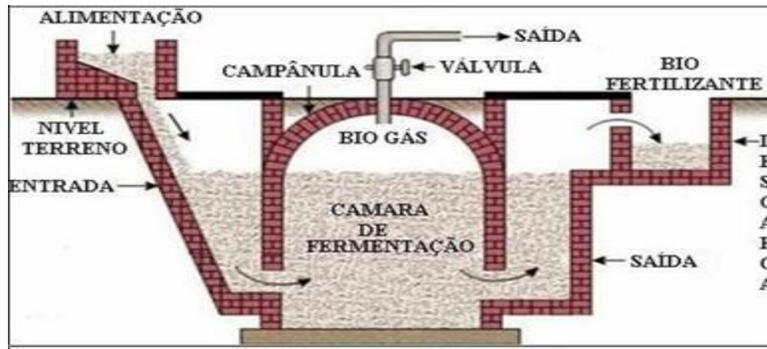


Figura 5, Modelo chinês de Biodigestor Fonte: AEQ, 2015, p. 09

O biodigestor de modelo canadense, desenvolvido pela Marinha Brasileira em 1970, apresenta uma tecnologia mais moderna, ainda que possua uma construção simples. Possui uma câmara de digestão escavada no solo e um gasômetro inflável feito de material plástico ou similar. É do tipo horizontal, com uma caixa de entrada em alvenaria, como pode ser observado na Figura 6. À medida que o biogás é produzido, a cúpula plástica maleável é inflada e o biogás é acumulado, ou pode ser enviado a um gasômetro separado para se obter um maior controle operacional (Junqueira, 2014). Em comparação ao modelo indiano, o modelo da Marinha apresenta a vantagem de poder receber grande quantidade de resíduos. Em comparação com o modelo chinês, a vantagem está no facto de aquele sofrer rachaduras e danos na sua estrutura dependendo da composição do solo, o que pode provocar perda de gás e exige monitoramento e manutenção constantes (Oliveira, 2006).

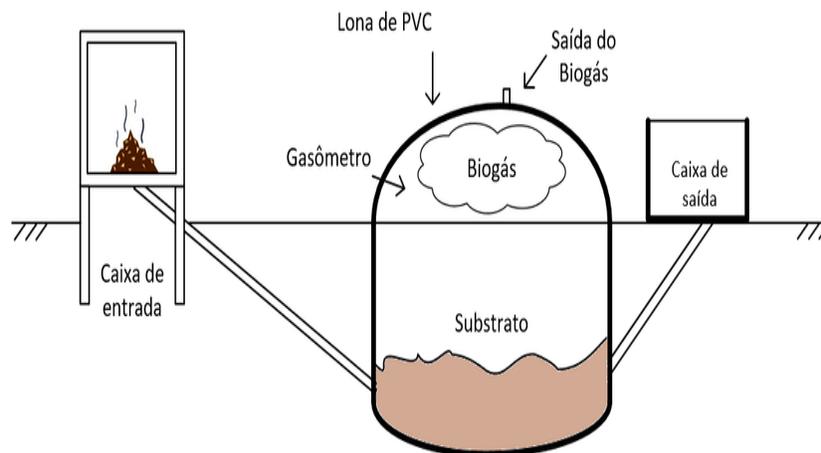


Figura 6, Modelo canadense de Biodigestor Fonte: <https://www.researchgate.net>

### 2.1.2.7. Vantagens e Desvantagens do uso do biogás

O aproveitamento de resíduos para produção de biogás acarreta ganhos diretos, como protecção do solo, das fontes de água e das águas subterrâneas, e a redução do volume de resíduos enviados para os aterros, (Goldemberg *et al.*, 2012). Entre os ganhos indiretos, estão os estímulos para a inovação tecnológica e para o emprego (Lora *et al.*, 2012). Entretanto, um obstáculo é a baixa densidade do metano, que dificulta seu armazenamento e transporte. A Tabela 2 ilustra outras vantagens, além das aqui mencionadas.

**Tabela 2: Vantagens e desvantagens da produção de biogás**

<b>Categorias</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<b>Tratamento de resíduos</b>	É um processo natural para tratar resíduos orgânicos Requer menos espaço que aterros sanitários ou compostagem Diminui o volume de resíduo a ser descartado	Caso a biodigestão não esteja a funcionar corretamente, produz-se gás sulfídrico (H <sub>2</sub> S), um gás tóxico; Escolha cuidadosa dos materiais de construção devido à formação de gases corrosivos.
<b>Em termos de energia</b>	E uma fonte de energia renovável Gera combustível de qualidade	
<b>Em termos ambientais</b>	Reaproveitamento da matéria orgânica Produz como resíduo um biofertilizante, rico em nutrientes e livres de microrganismos patogénicos; Reduz significativamente a quantidade emitida para a atmosfera de metano;	
<b>Em termos económicos</b>	Alto custo inicial, mas com economia significativa a longo prazo.	Custo inicial e possível manutenção de equipamentos podem ser elevados.

Fonte: Adaptado de Karlsson *et al.*, (2014); Goldemberg *et al.*, (2012); Lora *et al.* (2012).

### 2.1.2.8. Aplicação do biogás

O biogás apresenta-se como uma fonte de energia alternativa com grande potencial, devido ao seu alto poder calorífico, à utilização descentralizada e ao seu carácter de reaproveitamento de resíduos orgânicos. Em função dessas características, muitos aterros sanitários ao redor do mundo têm evoluído da simples queima do biogás para o aperfeiçoamento de sistemas de aproveitamento energético, como as Unidades de Geração de Energia Eléctrica. Esta última poderá ser utilizada localmente ou pode ser integrada à rede, contribuindo então para a diversificação da matriz energética (FAO, 1986 & IntechOpen, 2024).

Além da geração de energia, o biogás pode ser utilizado em sistemas de calefação, como fonte de calor para residências, estufas ou aquecedores industriais, e ainda pode ser utilizado para propulsão veicular, quando passar por uma etapa de purificação (beneficiamento). Este tratamento aumenta o teor de metano e diminui a presença de contaminantes como CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S e vapor de água, sendo o grau de purificação dependente da aplicação. Por exemplo, o biogás utilizado em combustão directa para cocção ou aquecimento requer menor qualidade do que o utilizado como combustível para veículos ou injeção em sistemas de gás natural (Lora *et al.*, 2012).

O biogás é altamente polivalente, podendo ser aplicado em propriedades rurais para aquecer água, movimentar motores, produzir electricidade, entre outros. Dessa forma, contribui para a redução de custos operacionais nas actividades agrícolas e para a prevenção do descarte inadequado de resíduos orgânicos. Sabe-se que 1 m<sup>3</sup> de biogás possui um valor equivalente a aproximadamente 0,66 litros de diesel ou 0,7 litros de gasolina, e um poder calorífico médio situado entre 5.000 a 7.000 kcal/m<sup>3</sup>, dependendo de sua composição (IntechOpen, 2024).

Os possíveis usos do biogás podem ser organizados segundo um grau crescente de exigência de qualidade do gás: combustão directa, aproveitamento térmico, geração eléctrica, injeção na rede de gás natural e uso como combustível automotivo. Cada um desses aplicativos requer equipamentos de diferentes padrões e, em muitos casos, um sistema de purificação eficiente. No sector industrial, o biogás também é utilizado como combustível para caldeiras, na produção de vapor. Nesses casos, cada metro cúbico de biogás consumido pode substituir, em média, 0,8 L de gasolina, 1,3 L de álcool, 1,4 kg de carvão vegetal e 2,7 kg de lenha (FAO, 1986).

Por outro lado, o desempenho do biogás em termos de calor pode ser afectado por impurezas como água e CO<sub>2</sub>, que diminuem o calor do gás, já que consomem parte da energia durante a queima. Além disso, pela presença de H<sub>2</sub>S e NH<sub>3</sub>, pode ocorrer corrosão dos equipamentos metálicos, da mesma forma reduzindo a vida útil de motores e tubulações. Recomenda-se, assim, o uso de sistemas de lavagem e de purificação do biogás antes do seu uso, principalmente nas aplicações de maior exigência técnica (Lora *et al.*, 2012).

#### **2.1.2.8. Matérias-primas utilizados para a produção de biogás**

A partir da biodigestão, a formação do metano é um processo biológico que ocorre naturalmente quando uma matéria orgânica (biomassa) se decompõe em uma atmosfera húmida na ausência de oxigênio, por meio da acção de um grupo de microrganismos metabolicamente activos. Quando se trata de produção de biogás, o substrato é toda biomassa (matéria orgânica de origem vegetal ou animal) usada com a finalidade de produzir combustível gasoso por meio do processo de digestão anaeróbia. Deste modo, toda matéria orgânica é considerada uma matéria-prima para a produção de biogás. A composição do substrato pode ser alterada drasticamente, de um lote para outro, o que pode ocasionar alguns problemas durante o processo de biodigestão, pois para promover uma boa reacção é preciso, por exemplo, manter a relação carbono/nitrogênio em torno de 25 e 35:1 (Resch *et al.*, 2011).

Outro aspecto relevante refere-se à logística e ao acesso constante a esses substratos, pois a produção ininterrupta de biogás requer fornecimento constante e de qualidade adequada. A codigestão - estímulo combinado de diferentes resíduos - tem sido extensivamente investigada como uma abordagem para melhorar a eficiência energética e estabilidade do processo, uma vez que pode atender o balanço de nutrientes e reduzir a formação de inibidores (Khan *et al.*, 2020). Portanto, a escolha e o maneiio dos substratos são etapas fundamentais para o sucesso da biodigestão anaeróbia.

Existe uma grande variedade de matérias-primas para produção de biogás. Além disso, é importante mencionar o aumento da utilização de matérias-primas dedicadas, como milho e gramíneas. A Tabela 3 mostra alguns exemplos para possíveis substratos residuais.

**Tabela 3. Resíduos de atividades industriais, agrícolas e agroindustriais utilizados para a produção de biogás.**

<b>Atividade Produtiva</b>	<b>Resíduos e Efluentes</b>
Agricultura e Pecuária	Cascas, fezes, urina, palha e substratos utilizados no recobrimento de currais
Cervejarias	Bagaço de malte, restos de filtro e efluentes
Curtume	Resíduos das operações de desarme e divisão de tripa, licores de curtimento sem cromo e lodo de tratamento
Indústrias farmacêuticas	Efluentes e resíduos com alto teor de substâncias biodegradáveis
Panificação	Efluentes da produção, resíduos da limpeza e lotes de produtos inadequados ao consumo
Produção de açúcar e etanol	Vinhaça, torta de filtro e bagaço
Produção de amidos e farinhas (cereais, mandioca, batatas)	Efluentes e restos da produção
Produção de café e chás	Efluentes e biomassas geradas na separação e na filtração
Produção de carne e açougues	Efluentes, sangue, intestinos, carne não comercializável e gordura
Produção de celulose, papéis e cartonagens	Lodo da lixívia verde, lodo de branqueamento, rejeitos e lodos de fibras e outros efluentes da produção
Produção de conservas	Efluentes, resíduos e restos da produção
Produção de laticínios	Soro de leite, lotes estragados e resíduos dos separadores de gordura
Produção de leveduras, doces e outros produtos	Efluentes e resíduos da produção
Produção de óleos e margarinas	Efluentes, torta de filtro de gordura e outros resíduos da produção
Produção de refrigerantes	Efluentes e restos da produção
Produção de sucos e vinhos	Efluentes, lotes estragados e biomassas geradas na filtração
Fracção orgânica de resíduos sólidos urbanos (FORSU)	Resíduos orgânicos sem contaminantes, separados na fonte e orgânicos obtidos após triagem

Fonte: Soares *et al.*, (2022), Adaptado de Fundação Estadual do Meio Ambiente (2015).

Embora existam múltiplas matérias-primas disponíveis para a produção de biogás, a sua utilização depende da disponibilidade local. Em Moçambique, os subprodutos da mandioca, como cascas e fibras, destacam-se como opções promissoras. Segundo Mabecua *et al.*, (2021), em estudo na província de Inhambane, esses resíduos apresentaram elevado potencial bioquímico de metano, superando inclusive resíduos lenhosos como a serradura. Esses resultados demonstraram que resíduos vegetais locais podem ser eficazmente utilizados para alimentar sistemas comunitários de geração energética.

### **2.1.2.9. Resíduos hortícolas como substrato para produção de biogás**

As hortícolas são produtos vegetais como legumes, hortaliças e frutos cultivados para o consumo humano e desempenham um papel vital na diversificação alimentar e na segurança nutricional, sobretudo em contextos agrícolas de subsistência e em países de menor renda (FAO, 2021). O seu cultivo está associado não apenas à promoção da saúde, mas também à redução da pobreza e ao fortalecimento das economias rurais.

No cenário global, a horticultura constitui uma actividade de grande valor económico. De acordo com Schreinemachers *et al.*, (2018), entre 2012 e 2013, o valor de mercado da produção de hortícolas foi estimado em aproximadamente 621 mil milhões de dólares, refletindo a sua importância na economia agrícola mundial.

No contexto nacional, a produção de hortícolas tem registado crescimento contínuo, motivado por factores como a crescente procura interna, oportunidades de exportação regional e a adopção de tecnologias agrícolas melhoradas. Segundo dados da FAOSTAT (2022), esse sector contribui significativamente para a segurança alimentar e o rendimento familiar, destacando-se como um vector de desenvolvimento sustentável. Graças à diversidade agroecológica e ao clima favorável, o cultivo ocorre durante todo o ano no país, o que favorece a disponibilidade contínua de alimentos e de resíduos orgânicos (Zidora *et al.*, 2022).

Apesar disso, uma fracção considerável da produção é desperdiçada. Estima-se que cerca de 30% da produção agrícola seja perdida no período pós-colheita, devido principalmente a falhas no armazenamento e transporte (Club of Mozambique, 2022). Essa perda representa não apenas um desafio à segurança alimentar, mas também uma oportunidade para o aproveitamento energético desses resíduos.

De facto, a valorização de resíduos de hortícolas para a produção de biogás tem sido apontada como uma solução sustentável e promissora. Segundo Yeboah *et al.*, 2024, de adequadamente tratados por meio de codigestão anaeróbica, os resíduos alimentares, incluindo as de hortícolas, podem contribuir com até 57% da produção de biogás em zonas urbanas e até 43% em zonas rurais na África Subsaariana. Isso não só reduziria a emissão de gases de efeito estufa, mas também promoveria a economia circular e a independência energética local.

Investigações levadas a cabo no contexto do projecto TSE4ALLM (2023) revelam que os resíduos vegetais e agroindustriais que existem nas zonas periurbanas do país apresentam um grande potencial em termos de fornecimento de energia renovável. No entanto, o baixo rendimento está associado à baixa separação na origem e à escassez de tecnologias ao nível da comunidade.

A valorização energética desses resíduos traz vários benefícios: diminuição do desperdício alimentar, diversificação da matriz energética, geração local de empregos (na instalação e manutenção de biodigestores), melhoria nas condições sanitárias, promoção da justiça ambiental e diminuição da pressão sobre os recursos florestais, substituindo lenha por biogás (Mabecua *et al.*, 2021).

Além disso, 1 tonelada de resíduos hortícolas (conforme a sua composição e teor de humidade), poderia proporcionar entre 70 e 120 m<sup>3</sup> de biogás, com um poder calorífico em torno de 6 kWh/m<sup>3</sup> (Maranon *et al.*, 2012; Nasir *et al.*, 2012). Este volume seria suficiente, por exemplo, para alimentar um fogão com duas bocas por cerca de 4 a 5 dias nas condições domésticas.

### **2.1.3. Distribuição do biogás no mundo**

A distribuição do biogás no mundo reflete as características regionais e políticas energéticas de cada país. Na Europa, países como Alemanha, Dinamarca e Suécia são líderes na produção de biogás devido a políticas favoráveis, incentivos financeiros e uma infraestrutura bem desenvolvida. Na Alemanha, por exemplo, existem mais de 9.000 plantas de biogás operacionais, que contribuem significativamente para o fornecimento de energia renovável (IEA Bioenergy, 2023; EBA, 2022). Na Ásia, a China e a Índia destacam-se como principais produtores de biogás, particularmente em zonas rurais.

Na China, programas governamentais incentivam a construção de pequenos biodigestores em fazendas para uso doméstico, o que resulta na instalação de milhões de unidades (Liu *et al.*, 2023). A Índia também possui um grande número de pequenos biodigestores, promovidos por iniciativas governamentais para reduzir o uso de combustíveis fósseis e promover o desenvolvimento rural (Karekezi, 2002).

Nos Estados Unidos, o desenvolvimento do biogás está focado principalmente em grandes fazendas e aterros sanitários, com projectos de conversão de resíduos em energia se tornando mais comuns devido ao apoio de políticas estaduais e federais (US EPA, 2021).

Na América Latina, o Brasil é o principal produtor, com o uso de resíduos agrícolas e urbanos para a geração de biogás, enquanto outros países da região estão começando a explorar o potencial dessa tecnologia (Irena, 2020).

Em África, o uso de biogás ainda é limitado, mas países como Quênia, Tanzânia e Uganda estão começando a adoptar a tecnologia, principalmente para uso doméstico e em pequenas comunidades rurais, com apoio de ONGs e agências internacionais (IEA Bioenergy, 2023).

#### **2.1.4. Impacto Ambiental do Biogás**

O uso do biogás para geração de energia tem um impacto ambiental consideravelmente menor em comparação com combustíveis fósseis. Quando utilizado como substituto de carvão ou petróleo, o biogás pode reduzir significativamente as emissões de GEE, como o metano e o dióxido de carbono, responsáveis pelo aquecimento global. Estudos indicam que a produção de biogás pode evitar a emissão de metano de resíduos orgânicos que, de outra forma, seriam dispostos em aterros (Lemmer *et al.*, 2023).

Adicionalmente, o uso de biogás contribui para a economia circular, transformando resíduos em energia e reduzindo a dependência de combustíveis fósseis. Esta abordagem ajuda na preservação de recursos naturais e na promoção de práticas sustentáveis (IEA Bioenergy, 2023).

#### **2.1.5. Importância do Biogás**

O biogás desempenha um papel crucial na promoção da sustentabilidade ambiental e na mitigação das mudanças climáticas. Como uma fonte de energia renovável, o biogás é produzido pela decomposição anaeróbica de matéria orgânica, como resíduos agrícolas, esgoto e resíduos urbanos, resultando em uma mistura de metano e dióxido de carbono (Oliver *et al.*, 2008).

A utilização do biogás como fonte de energia reduz a dependência de combustíveis fósseis, diminuindo as emissões de gases de efeito estufa, como metano e dióxido de carbono, que são os principais responsáveis pelo aquecimento global (Lemmer *et al.*, 2023).

Além disso, o biogás oferece uma solução eficiente para a gestão de resíduos orgânicos, convertendo materiais que seriam descartados em aterros sanitários, onde liberariam metano de forma descontrolada, em uma fonte de energia útil e menos poluente (Ferreira & Almeida, 2021). Esta conversão contribui para a economia circular, promovendo o reaproveitamento de resíduos e minimizando o impacto ambiental (IEA Bioenergy, 2023).

O uso de biogás também é economicamente benéfico, especialmente para comunidades rurais e agrícolas, que podem utilizar os biodigestores para gerar energia localmente, reduzindo custos e aumentando a segurança energética (Amaral, 2008).

Adicionalmente, a produção de biogás pode gerar subprodutos valiosos, como biofertilizantes, que ajudam a fechar o ciclo de nutrientes na agricultura, melhorando a fertilidade do solo e diminuindo a necessidade de fertilizantes químicos (Rodriguez *et al.*, 2021).

Portanto, a importância do biogás vai além da geração de energia; ele desempenha um papel integral na sustentabilidade ambiental, na mitigação das mudanças climáticas e no desenvolvimento econômico local (IPCC, 2021).

### **2.1.6. Participação Comunitária na Produção de Biogás**

A adoção de novas tecnologias em comunidades rurais moçambicanas ocorre em contextos diversos, desde a agricultura até soluções energéticas. Conforme Rogers (2003), os membros de uma comunidade adotam inovações em diferentes velocidades, classificadas segundo inovadores, adotantes precoces, maioria inicial, maioria tardia e retardatários. Essa categorização aplica-se a Moçambique, cujas adoções dependem de múltiplos factores contextuais, como orientação comunitária, confiança nos vizinhos, acesso à informação e disponibilidade de recursos (Fang & Richards, 2018).

Em zonas rurais de Moçambique, a participação da comunidade foi promovida por meio de clubes de agricultores e demonstrações em campo. Os estudos mostram que os principais determinantes de adopção no país incluem: posse da terra, nível de escolaridade, acesso a crédito agrícola, regularidade dos contatos com serviços de extensão rural e participação em associações (FAO, 2017). Além disso, factores culturais e sociais também têm um forte impacto, como o papel dos líderes tradicionais e as experiências prévias com tecnologias (Mabecua *et al.*, 2021).

A participação comunitária é um dos elementos críticos para o sucesso e a sustentabilidade dos projectos de biogás, especialmente em situações rurais e agrícolas. A inclusão dos indivíduos da comunidade local na construção, gestão e operações dos biodigestores fortalece não apenas a autonomia energética, mas também os saberes locais e a economia solidária. Os projectos participativos, que são aqueles onde os agricultores e produtores estão presentes desde o diagnóstico até a gestão do sistema, têm maior aceitação e continuidade. Treinamentos técnico, acompanhamento por organizações comunitárias e acesso a informações sobre os benefícios sociais, ambientais e económicos do biogás, de modo claro, são essenciais para o sucesso destas iniciativas (SNV, 2020).

Além disso, o biogás tem potencial para melhorar, significativamente, as condições de vida das comunidades. A substituição da biomassa, lenha ou carvão, pelo biogás reduz o esforço e tempo despendidos na recolha de biomassa, reduz a poluição do ar interior e melhora a saúde das mulheres e crianças. Em Moçambique, por exemplo, iniciativas-piloto nas zonas agrícolas demonstram que o uso de resíduos de vegetais nos biodigestores pode não só produzir energia, mas também levar a uma melhor gestão e valor dos resíduos mais eficazes (UNIDO, 2023).

Portanto, integrar o componente social nos projectos de biogás e criação de espaços participativos que facilitem a educação ambiental, é crucial para garantir não apenas viabilidade técnica e económica, mas também inclusão, empoderamento comunitário e transformação social duradoura.

### III. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. Descrição da área de estudo

A área de estudo localiza-se na cidade de Maputo precisamente da zona baixa do distrito municipal KaMavota, bairro das Mahotas entre a Latitude 25° 53' 19" S e 25° 53' 18" S; Longitude 32° 37' 58" E e 32° 37' 59" E e altitude de 30 m. A Figura 7 ilustra a área de estudo.

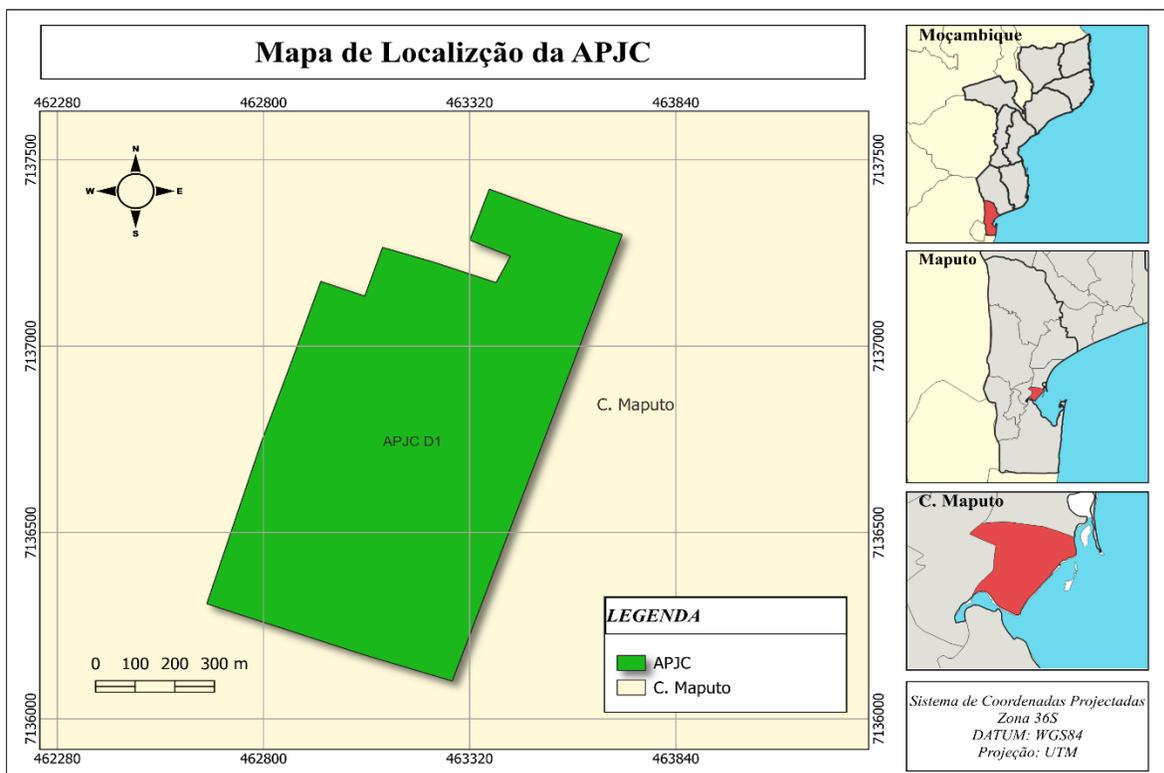


Figura 7: Ilustração da área de estudo, Fonte (autor, 2024)

De acordo com o documento oficial da **Associação Joaquim Chissano** (2024), a associação foi fundada em 1995 por membros associados, actualmente tem **540** membros dos quais **360** são mulheres. Com apoio do Departamento de Agricultura e Pescas da Cidade de Maputo foi possível organizar os produtores individuais em associação e pela Cooperação Espanhola através dos irmãos do Rosário foi possível a legalização da associação com o pagamento de DUAT, porem, este ainda não foi concebido a Associação.

Pelo decreto número 21/91, de três de Outubro do Conselho de Ministro, através do despacho do Presidente do Conselho Municipal Artur Hussene Canana do dia 29 de Abril de 2002, a Associação de Produtores Agrícolas Joaquim Chissano foi reconhecida como pessoa Jurídica.

### 3.1.1.Clima

De acordo com o Sistema de Classificação Climática de Köppen, as Associações Agrícolas do Distrito de Kamavota caracterizam-se pela ocorrência do clima tropical de Savana (Aw), influenciado pela corrente marítima quente do Canal de Moçambique, o que permite a existência de elevada humidade no ar e uma evaporação menor que a precipitação em todas as épocas do ano. Como ilustrado na Figura 8, os padrões de precipitação e evaporação ao longo do ano confirmam o clima tropical de savana (Aw) predominante na região.

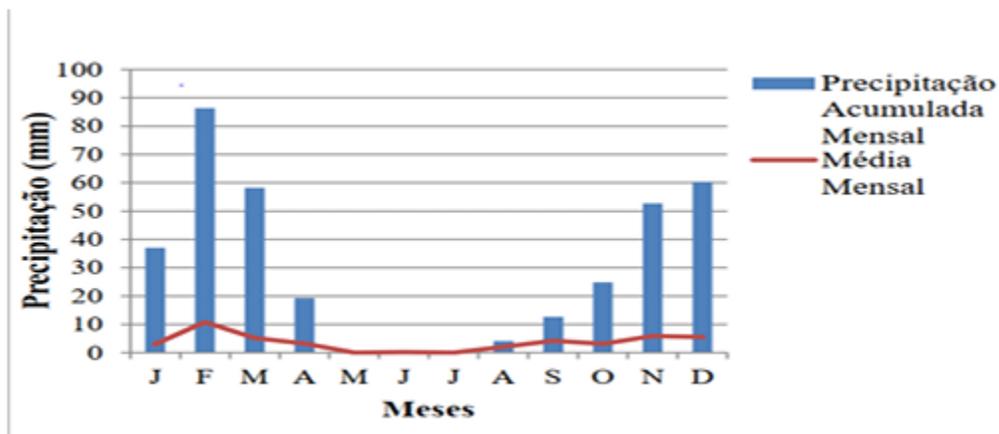


Figura 8: Precipitação Pluviométrica em KaMavota

### 3.1.2.Solos

Os solos das comunidades agrícolas do Distrito de KaMavota têm características diferentes, influenciadas pela localização geográfica e origem dos materiais parentais. Na faixa central existem solos francos, com cor variando de cinzento acastanhado a preto acastanhado, textura franco argilo-arenosa e drenagem moderada a mal. Nas extremidades Noroeste, Oeste e Sudoeste aparecem solos arenosos, com cor entre laranja escura e castanho-escuro, textura arenosa boa e boa drenagem. Nas faixas Nordeste, Este e Sudeste aparecem solos de sedimentos marinhos e estuarinos, com cor cinzenta e textura entre franco argilo-limosa-argilosa, em e argilo-limosa-argilosa, com drenagem má a muito má (IIAM, 1994).

Essas características edáficas encontram-se sistematizadas na Tabela 4, que resume os principais tipos de solos e a sua distribuição nas áreas de cultivo.

**Tabela 4. Características Morfológicas e Físicas dos solos Francos e Arenosos de Kamavota**

Tipo de solo (agrupamento)	Cor (Seca)	Cor (úmida)	Extrutura	Consistência Seca	Consistência Húmida	Consistência Molhada (Plasticidade)	Consistência Molhada (Pegajosidade)	Textura	Drenagem
Solos Francos	10YR 5/1	10YR 3/1	anisoforme angulos-subanguloso e granular	dura-muito dura	friável-firme-muito firme-extremamente firme	pouco plástico-plástico	pouco pegajoso-pegajoso	FAgAr	moderada a má
Solos Arenosos	7.5YR 7/3	7.5YR 5/3	anisoforme angulos-subanguloso e granular	branda	muito Friável	não plástico	não pegajoso	Ar	boa

### 3.1.3. Aspectos Ambientais e Limitantes a prática agrícola

Devido a disposição do relevo e a constituição granulométrica das áreas de estudo, estas são vulneráveis a ocorrência de fenómenos localizados de erosão hídrica ou pluvial, cujos seus reflexos se traduzem em soterramentos dos campos agrícolas. De realçar que a Encosta Barla-Mar é a que apresenta maior vulnerabilidade. O alagamento dos solos tem sido outro factor limitante, fenómeno este, que se verifica ao longo do Nível de Base de Deposição e na Encosta Sota-Mar. A salinização dos solos constitui também obstáculo para a prática agrícola em períodos pluviais, em que a sua manifestação através do ciclo de dessalinização-salinização é dominante na Encosta Sota-Mar.

### 3.1.4. Tipo de agricultura e culturas prioritárias

Pratica-se no Distrito a agricultura familiar e de rendimento e as culturas prioritárias são: Couve, alface, e repolho. Para além das culturas acima descrita são igualmente produzidas outras destacando (pimento, beterraba, cenoura, coentro, amaranthus, folhas de Abóbora, piri piri, aromáticos (hortelã e manjeriço), cebola, feijões, batata-doce, etc.

### **3.1.5. Atividades desenvolvidas**

A assistência técnica é garantida pela rede de extensão Serviço Distrital de Atividades Económicas de KaMavota, com propósito de produzir hortícolas diversas (alface, couve, etc), e fruteiras numa área de **69 ha**, tendo como base alface e couve para geração de salário mensal.

No ano de 2023 produziu-se cerca de **11.273,8ton.** de culturas diversas numa área acumulada **484.9ha** em **8** ciclos de produção

Para o IX mês do ano de 2024 foram produzidas cerca de **9.871,7ton** de diversas culturas numa área acumulada de **372.7ha** do plano de produção anual de **11.439,7ton** de culturas diversas numa área acumulada total de **488.2ha.**

O plano de produção é individual, cada produtor planifica de acordo com as culturas que produz em concordância com área que tem.

Existe um sistema de rega que está na Sombrite e usa bomba, os custos para o funcionamento são de energia apenas, mas, agora não está funcional uma vez que não tem culturas a serem produzidas no interior da Sombrite. Os agricultores da Associação usam sistema de irrigação precário (regadores), a Associação só tem custo de energia quando enche o tanque (custo insignificante). Ao longo dos extremos Oeste, Noroeste e Sudoeste ocorrem algumas nascentes de água doce, em que as fontes são aquíferos, alguns desses cenários são verificados nas associações Djaulane, Joaquim chissano e Samora Machel.

### **3.1.6. Relatos de desperdício de hortícolas na Associação**

Segundo o responsável pela Associação, a produção hortícola enfrenta perdas significativas em diferentes períodos do ano devido a factores de natureza sazonal. Durante o inverno, observa-se um elevado volume de produção que, entretanto, não é plenamente escoado, sobretudo pela reduzida procura por parte dos retalhistas, resultando em excedentes não aproveitados. Esta assimetria entre oferta e demanda compromete a eficiência da cadeia de abastecimento. Por outro lado, no verão, as perdas estão maioritariamente associadas às condições climáticas adversas, como a elevada incidência de calor, que compromete o desenvolvimento das culturas, bem como ao aumento da ocorrência de pragas e doenças fitossanitárias. Estes factores, combinados, impactam negativamente a qualidade e a viabilidade comercial das hortícolas, agravando os níveis de desperdício no sector.

### **3.1.7. Infraestruturas**

- Conta com um aviário não funcional;
- Possui um furo de captação de água com estrutura com um tanque de água e uma obra do escritório da Associação, na fase de construção.
- Possui uma estufa de produção definitiva com sistema de rega gota-a-gota

### **3.1.8. Comercialização**

Os principais mercados são Xiquelene e Zimpeto onde os principais clientes grossistas e retalhistas, associação vem trabalhando com intermediários, vulgos “maguevas”. Costumam ser Realizadas feiras agropecuárias semanalmente em postos fixos como forma de comercializar os produtos agrícolas.

### **3.1.9. Critérios de selecção da associação e do grupo focal**

A escolha da associação como local de implementação do projecto baseou-se em factores estratégicos relacionados ao impacto e à viabilidade da intervenção. A associação reúne produtores locais que constituem a base da cadeia de valor hortícola, sendo responsáveis pela produção primária que abastece os mercados urbanos. Iniciar a disseminação da tecnologia de biodigestores junto a este grupo permite que o conhecimento e as práticas sustentáveis se propaguem de forma orgânica ao longo da cadeia, atingindo gradualmente comerciantes, intermediários e consumidores.

Outro elemento determinante foi o carácter organizado da associação, que facilita processos de capacitação colectiva, acompanhamento técnico e manutenção do sistema após a fase experimental. Diferentemente do ambiente de mercado, onde a rotatividade de vendedores e a informalidade das actividades poderiam dificultar a continuidade do projeto, a associação oferece uma estrutura mais estável para a implementação inicial e para futuras replicações em outros contextos.

A priorização de mulheres como grupo focal foi igualmente estratégica. Estas desempenham papel central tanto na produção hortícola como na gestão doméstica da energia e dos resíduos, estando directamente ligadas às dinâmicas de segurança alimentar e economia familiar. O fortalecimento técnico e social das mulheres promove não apenas a adopção da tecnologia, mas também impactos positivos na equidade de género e na sustentabilidade comunitária.

## **3.2. Metodologia**

### **3.2.1. Tipo de estudo**

O presente estudo adoptou uma metodologia mista, integrando métodos qualitativos e experimentais relatados por Creswell (2007). Na vertente qualitativa, foram recolhidos dados primários por meio de um inquérito aplicado presencialmente aos produtores locais, utilizando questionários impressos. O contacto directo com os inquiridos facilitou a compreensão das suas percepções sobre a utilização de energias renováveis e os custos energéticos nos seus lares. Ainda no âmbito qualitativo, foi promovida uma actividade pratica no campo, na qual os produtores participaram na montagem e alimentação de um biodigestor piloto de baixo custo, com o apoio técnico da pesquisadora. Esta acção teve como objectivo estimular a apropriação comunitária da tecnologia e reforçar a dimensão educativa e participativa do estudo. Por sua vez, a vertente experimental incluiu a caracterização físico-química das amostras de hortícolas, produção do biogás em biodigestores em escala reduzida e, posteriormente, os ensaios laboratoriais para a avaliação do rendimento energético.

### **3.2.2.local e período**

As actividades de pesquisa foram realizadas entre janeiro e julho de 2025, abrangendo três locais principais: (i) o campo, onde foi aplicado um inquérito presencial aos produtores locais; (ii) o Mercado de Xiquelene, onde foram adquiridas amostras frescas de hortícolas, resíduos e materiais para a construção dos biodigestores para a fase experimental; e (iii) os laboratórios da instituição, onde se realizaram as análises físico-químicas, a montagem dos biodigestores e os testes energéticos. A última fase decorreu novamente no campo, com construção e alimentação de um biodigestor de baixo custo.

### 3.2.3. Procedimentos Metodológicos

O desenvolvimento deste estudo seguiu as seguintes etapas principais: pesquisa bibliográfica sobre o tema, autorização institucional e recolha de dados primários, aquisição de matéria-prima, obtenção dos materiais, realização do ensaio laboratorial, execução das actividades no campo, análise e discussão dos resultados obtidos e, por fim, elaboração e finalização do relatório de investigação.

- i) **Pesquisa bibliográfica:** esta etapa constituiu a base teórica do presente estudo, permitindo fundamentar tecnicamente os aspectos científicos e sociais relacionados à produção de biogás, à digestão anaeróbica e à valorização de resíduos orgânicos, com especial enfoque em resíduos de hortícolas. Foram consultadas diversas fontes, como artigos científicos, manuais, dissertações, relatórios técnicos, legislação nacional, políticas energéticas vigentes e documentos de organismos internacionais como (FAO, IEA e PNUD), com o objectivo de sustentar metodologicamente o desenho da investigação e orientar a análise de dados a revisão da literatura possibilitou, ainda, identificar lacunas de conhecimento no contexto moçambicano particularmente no uso de biodigestores de baixo custo e na aceitação comunitária de energias renováveis.
  
- ii) **Autorização institucional e recolha de dados primários:** Foram obtidas credenciais formais junto à Faculdade de Agronomia e Engenharia Florestal (FAEF) da Universidade Eduardo Mondlane (UEM), que posteriormente foram submetidas ao Serviço de Iniciativas de Desenvolvimento Agroecológico (SIDAE) do posto distrital de KaMavota, visando a autorização para a execução da pesquisa na associação. Após a aprovação, realizou-se o levantamento de percepções e conhecimentos locais por meio de um inquérito estruturado, impresso em formato papel e aplicado de presencialmente a 50 produtores associados da Associação, seleccionados de um universo total de 540 membros. Essa amostra representa aproximadamente 9% da população total, valor que, segundo Hair *et al.*, (2014), é adequado para análises exploratórias em pesquisas sociais quando os recursos são limitados e o objectivo é obter uma visão inicial do fenómeno.

A selecção dos participantes foi feita por amostragem intencional, com propósito de garantir diversidade territorial e de género, o que está de acordo com as recomendações de Patton (2002) para amostragem qualitativa quando se busca obter percepções profundas de grupos específicos. O inquérito teve como objectivo compreender a familiaridade dos produtores com fontes alternativas de energia e captar informações relevantes para o desenho participativo da solução proposta.

- iii) **Aquisição de matéria-prima:** inicialmente foram adquiridas amostras frescas de couve e alface livres de agentes patogénicos, para caracterização físico-química. Posteriormente recolheram-se resíduos para alimentação dos biodigestores no Mercado do Xiquelene, após negociação com os vendedores do mercado. A recolha dos resíduos havia sido prevista inicialmente na área de estudo, porém, devido às condições climáticas extremas do verão e a um surto de pragas que comprometeu a produção local, a maior parte dos produtos foi rapidamente escoada para o mercado, que é o principal ponto de comercialização da associação. Por isso, optou-se pela aquisição no mercado, garantindo a representatividade dos substratos. A escolha da couve e da alface justifica-se pelo facto de serem amplamente cultivadas na região e consideradas culturas mensais pela associação, assegurando um salário mínimo mensal aos produtores locais. Além disso, essas hortícolas geram resíduos orgânicos em quantidade significativa e apresentam características favoráveis para digestão anaeróbica, como alto teor de matéria orgânica e facilidade de trituração.
- iv) **Obtenção dos materiais:** Para a realização das etapas laboratoriais e de campo, foram adquiridos diversos materiais e equipamentos específicos. Para os biodigestores experimentais no laboratório, utilizaram-se garrafas plásticas de 10 litros, mangueiras flexíveis, funis, braçadeira metálica, fita adesiva, cola de ferro (praty), tinta preta (pray), sacola plástica, cola super bonder, faca e régua.

No caso do biodigestor de 20 litros construído no campo, foi necessário um galão de 20 litros (bidão), uma torneira, uma mangueira de gás, braçadeira, redutor de pressão, tubo PVC, cap pvc e um adaptador para conexão da mangueira de gás. Todos os

materiais foram adquiridos em estabelecimentos comerciais locais ou reutilizados com base em princípios de baixo custo e sustentabilidade. A escolha por componentes simples e acessíveis visou facilitar a replicação da tecnologia por parte das comunidades envolvidas.

- v) **Realização do ensaio laboratorial:** As actividades laboratoriais foram conduzidas no Departamento de Engenharia Rural, na Faculdade de Agronomia e Engenharia Florestal da Universidade Eduardo Mondlane (UEM). Os procedimentos envolveram dois laboratórios distintos: o Laboratório de Alimentos e o Laboratório de Energia. No Laboratório de Alimentos, procedeu-se à preparação das amostras e à caracterização físico-química dos resíduos hortícolas, especificamente couve e alface. Esta etapa incluiu a análise de parâmetros como humidade, pH, teor de matéria orgânica e teor de cinzas. Em seguida, realizou-se a trituração e homogeneização dos resíduos, assegurando a uniformidade do substrato a ser utilizado. Ainda neste laboratório, foi feita a montagem dos biodigestores experimentais de 10 litros, a alimentação com os resíduos preparados e o subsequente monitoramento do processo de digestão anaeróbica, com registo contínuo da produção de biogás. Por sua vez, no Laboratório de Energia foram realizados os ensaios energéticos comparativos, com destaque para os testes de queima e fervura utilizando biogás, lenha, carvão vegetal e gás de cozinha. Estes testes permitiram avaliar o desempenho energético de cada combustível, a partir da medição do tempo necessário para aquecer volumes padronizados de água, bem como da eficiência térmica e da quantidade de combustível utilizada.

- vi) **Execução das actividades no campo:** Após a conclusão da fase laboratorial, procedeu-se à execução prática em campo, com enfoque na abordagem participativa junto aos produtores locais.

A montagem do biodigestor de 20 litros foi realizada com o envolvimento directo da comunidade, promovendo momentos de partilha de conhecimento e sensibilização sobre o aproveitamento de resíduos hortícolas para produção de biogás. A construção foi feita num espaço cedido por um dos membros da associação agrícola local, tendo-se utilizado os mesmos princípios aplicados nos biodigestores experimentais de laboratório. Durante a montagem, foram explicadas todas as etapas do processo, desde a alimentação do biodigestor com os resíduos previamente triturados até os cuidados com a vedação e o armazenamento do biogás. A participação activa dos produtores permitiu não só validar a viabilidade da tecnologia a nível local, como também reforçar o potencial replicador da experiência.

- vii) **Análise e discussão dos resultados obtidos:** A análise dos dados obtidos ao longo do estudo foi realizada de forma descritiva e comparativa, com o apoio de ferramentas informáticas. Os dados recolhidos durante os ensaios laboratoriais e em campo foram organizados e tratados com recurso ao Microsoft Excel analisados com o apoio do software Stata, onde foram elaboradas tabelas, gráficos e cálculos estatísticos básicos.
- viii) **Elaboração e finalização do relatório de investigação:** O relatório foi elaborado reunindo todas as etapas do trabalho, os resultados obtidos e as informações da revisão bibliográfica e suas respectivas conclusões.

### 3.2.4. Procedimento de preparação e caracterização físico-química das amostras

Antes de alimentar os biodigestores, as amostras devem passar por uma caracterização físico-química detalhada. Essa prática é essencial, pois permite prever o desempenho energético do substrato, dimensionar adequadamente os biodigestores e evitar falhas operacionais relacionadas a desequilíbrios microbiológicos (Goswami *et al.*, 2022).

A caracterização das amostras de couve (*Brassica oleracea*) e alface (*Lactuca sativa*) consistiu na determinação do teor de humidade, pH, teor de cinzas e teor de matéria orgânica. Esses parâmetros influenciam directamente no processo de digestão anaeróbica (Mata-Alvarez, 2003; Bouallagui *et al.*, 2005). As amostras foram transportadas para o laboratório e submetidas a um processo de preparação que incluiu as seguintes etapas:

- 1. Preparação dos materiais e das amostras:** inicialmente, os cadinhos e as placas de petri foram lavados com água destilada, secos e colocados na estufa a 105°C durante uma hora e trinta minutos para eliminação de humidade e esterilização. Após esse período, os materiais foram transferidos para um dessecador por 30 minutos, a fim de evitar reabsorção de humidade do ambiente. Durante o tempo em que os materiais permaneciam na estufa, iniciou-se a preparação das amostras, onde foram cuidadosamente lavadas com água destilada para remoção de impurezas e corpos estranhos. As amostras foram deixadas secar ao ar livre por cerca de 30 minutos e de seguida, as folhas foram trituradas com almofariz até se obter uma granulometria homogénea adequada para testes laboratoriais.
- 2. Determinação do teor de humidade:** para análise de humidade, pesou-se aproximadamente dois a quatro gramas de material fresco triturado em placas de petri previamente limpas, secas e de massa conhecida. As placas contendo as amostras foram levadas a estufa com temperatura regulada de 105°C por três horas. Terminado o tempo na estufa, as placas foram transferidas para o dessecador por 30 minutos para estabilizar a temperatura sem interferência do ambiente, e posteriormente pesadas numa balança analítica de alta precisão. O teor de humidade foi determinado pela diferença de massa antes e depois da secagem, conforme descrita por ISTA (2009) e Ramos (2013).
- 3. Determinação do teor de cinzas e de matéria orgânica:** para a determinação das cinzas e matéria orgânica, foram utilizados seis cadinhos, onde se pesaram entre três a cinco gramas de cada amostra fresca triturada. Os cadinhos foram colocados na estufa juntamente com as placas de petri, como forma alternativa de secagem inicial.

Depois da secagem, todos os cadinhos foram colocados na mufla, onde permaneceram durante 5 horas a uma temperatura de 550°C, promovendo a incineração completa da matéria orgânica e restando apenas cinzas. A massa das cinzas foi determinada pela pesagem final dos cadinhos, e a matéria orgânica foi obtida pela diferença entre o peso inicial seco e o peso residual das cinzas (Silva *et al.*, 2010). Esse método permite uma avaliação eficiente da quantidade de matéria passível de ser degradada anaerobicamente para geração de biogás (Chen *et al.*, 2008).

- 4. Medição do pH:** o pH foi determinado utilizando um pHmetro devidamente calibrado. Cada amostra foi triturada separadamente e, em seguida, preparou-se uma suspensão 1:2,5 em água destilada (1 parte de amostra para 2,5 partes de água), conforme protocolo de análise de resíduos orgânicos. Para cada amostra, foram realizadas três medições consecutivas, obtendo-se assim a média aritmética do mesmo. O pH é um factor crítico para o sucesso da digestão anaeróbica, já que valores extremos podem inibir a actividade dos microrganismos metanogénicos (Khalid *et al.*, 2011; Appels *et al.*, 2008).

As etapas e parâmetros explicados acima foram registadas durante o trabalho no laboratório. As imagens a seguir ilustram de forma resumida o processo que foi realizado.

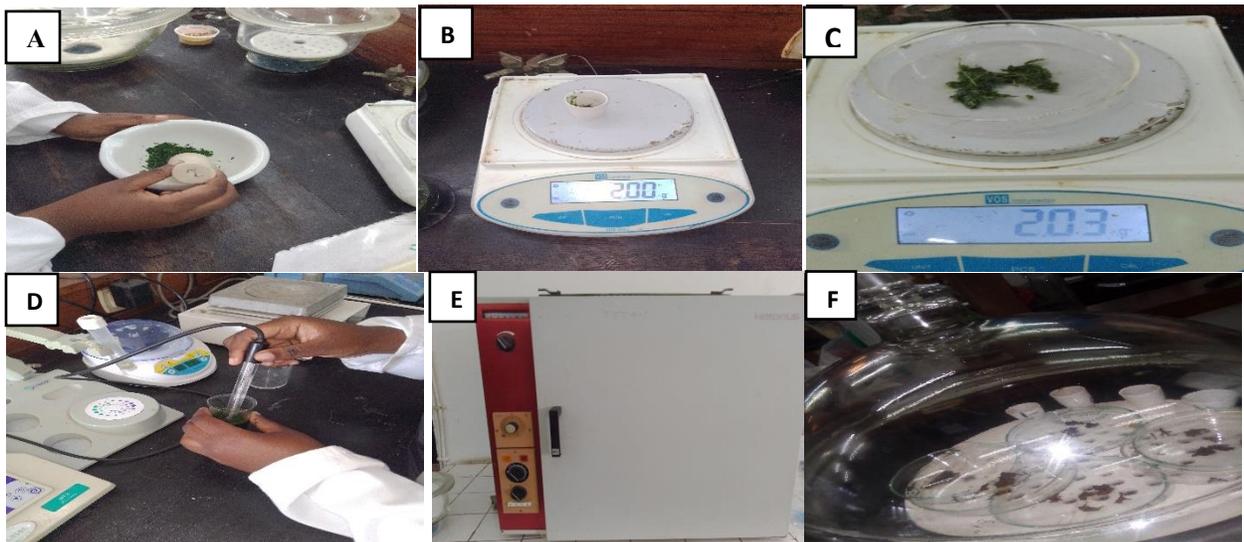


Figura 9. Etapas do processo de caracterização físico-química das amostras de resíduos hortícolas: (A) trituração; (B) pesagem em placa de Petri; (C) pesagem em cadinho; (D) medição do pH; (E) secagem em estufa a 105 °C; e (F) resfriamento em dessecador para estabilização da amostra. Fonte: Autora (2025).

Com as análises concluídas, foram feitos cálculos para determinar os valores de cada parâmetro. A seguir, são apresentadas as fórmulas utilizadas e os resultados obtidos para alface e couve, organizados em tabelas.

### 3.2.4.1. Cálculo da humidade

A determinação da humidade baseou-se na perda de massa após a secagem da amostra em estufa a 105 °C por 3 horas. O teor de humidade foi calculado utilizando a fórmula proposta pela ISTA (2009), amplamente empregada em análises de sementes e resíduos orgânicos.

$$\text{Humidade (\%)} = \frac{(\text{peso húmido} + \text{placa}) - (\text{peso seco} + \text{placa})}{\text{peso da amostra húmida}} \times 100 \quad (1) \quad \text{Onde:}$$

Peso húmido + placa: massa inicial da placa com a amostra antes da secagem.

Peso seco + placa: massa da placa com a amostra após secagem.

Peso da amostra húmida: diferença entre o peso húmido + placa e o peso da placa vazia.

A Tabela 5 apresenta os valores obtidos na determinação da humidade das amostras de alface (A) e couve (C), analisadas em três repetições.

**Tabela 5. Determinação do teor de humidade em resíduos de alface (A) e couve (C)**

<b>Amostra</b>	<b>Peso da placa (g)</b>	<b>Peso inicial da amostra (g)</b>	<b>Peso húmido + placa (g)</b>	<b>Peso seco + placa (g)</b>	<b>Humidade (%)</b>
A1	28,79	2,02	30,81	28,86	96,53
A2	46,53	2,0	48,53	46,57	71,5
A3	51,47	2,0	53,47	51,51	98
C1	49,80	2,04	51,84	49,92	94,12
C2	47,21	2,01	49,22	47,25	98,01
C3	49,22	2,02	51,24	49,34	94,1

### 3.2.4.2. Determinação do pH

A determinação do pH seguiu o método descrito por Khalid *et al.*, (2011) e Appels *et al.*, (2008), frequentemente utilizado para caracterizar substratos destinados à digestão anaeróbica.

$$pH \text{ medio} = \frac{pH_1+pH_2+pH_3}{3} \quad (2)$$

A Tabela 6 apresenta os valores médios de pH obtidos para as amostras de alface (A) e couve (C), calculados a partir das três medições realizadas.

**Tabela 6. Determinação do pH médio em resíduos de alface e couve**

Amostra	pH <sub>1</sub>	pH <sub>2</sub>	pH <sub>3</sub>
Alface	5,89	5,79	5,86
Couve	6,07	6,01	5,92

### 3.2.4.3. Cálculo do teor de cinzas e da matéria orgânica

Para o cálculo do teor de cinzas, utilizou-se a equação proposta pela AOAC (1995), baseada na diferença entre o peso do cadinho com cinzas e o peso da amostra seca. A matéria orgânica foi calculada por diferença, subtraindo-se o teor de cinzas de 100%, conforme procedimento descrito por Silva *et al.*, (2010) em análises de resíduos vegetais.

$$Cinzas (\%) = \frac{(\text{peso do cadinho} + \text{cinzas}) - (\text{peso do cadinho})}{\text{peso da amostra seca}} \times 100 \quad (3)$$

$$Materia \text{ organica}(\%) = 100 - cinzas(\%) \quad (4) \text{ Onde:}$$

Peso do cadinho + cinzas (g): massa final do cadinho após a incineração completa na mufla.

Peso do cadinho (g): massa do cadinho previamente seco antes da inserção da amostra.

Peso da amostra seca (g): massa da amostra após secagem a 105 °C por 3 horas (massa base seca).

Cinzas (%): fração mineral remanescente após combustão, representando componentes inorgânicos da amostra.

A Tabela 7 apresenta os valores de cinzas e de matéria orgânica das amostras, calculados na base seca.

**Tabela 7. Determinação do teor de cinzas e matéria orgânica**

Amostra	Peso cadinho (g)	Peso da amostra fresca (g)	Peso amostra seca (g)	Peso final cadinho + cinzas (g)	Cinzas (%)	Matéria orgânica (%)
A1	9,60	3,50	1,9	9,64	2,10	97,90
A2	6,86	3,60	2,05	6,90	1,95	98,05
A3	12,92	3,45	2,03	12,95	1,48	98,52
C1	13,96	3,55	2,06	12,95	1,94	98,06
C2	12,94	3,58	2,07	13,98	1,93	98,07
C3	12,53	3,52	2,04	12,55	1,47	98,53

A caracterização físico-química das amostras permitiu obter informações essenciais sobre os resíduos de couve e alface, que serão utilizadas nas etapas seguintes do estudo. A seguir, detalha-se a montagem dos biodigestores experimentais e os procedimentos para avaliação da produção de biogás.

### **3.2.5. Procedimento para montagem, alimentação e monitoramento dos biodigestores experimentais**

Após a caracterização das amostras, foram montados dois sistemas experimentais para produção de biogás, ambos descontínuos, ou seja, alimentados apenas uma vez no início do experimento. Essa abordagem foi escolhida devido à ausência de equipamentos especializados para colecta contínua de gás, sendo uma alternativa prática para estimar o volume total de biogás possível de ser produzido pelos resíduos hortícolas durante todo o ciclo de digestão.

A metodologia para montagem dos biodigestores inspirou-se em protocolos adaptados da literatura sobre digestores de pequena escala (Issahaku & Nyarko, 2024; Castillo-León *et al.*, 2024), os quais priorizam o uso de materiais locais, simplicidade construtiva e abordagem de baixo custo, permitindo estimar a produção potencial de biogás sem necessidade de equipamento especializado.

### **Sistema 1 – Monitoramento do volume de biogás**

O primeiro sistema foi composto por três garrafas PET de 10 litros. A primeira garrafa, onde ocorreu a digestão e a segunda, que funcionava como selo hidráulico, foram adaptadas com duas pequenas aberturas na tampa feitas com recurso a uma faca.

Na primeira abertura da primeira garrafa foi introduzido um tubo de 20 cm, posicionado de modo que 5 cm permanecessem dentro da garrafa e 15 cm externos, com a extremidade selada para manter a vedação. Na segunda abertura, foi instalado um tubo de 2 metros, colocado a 5 cm acima do nível da mistura, conduzindo o gás para a segunda garrafa, que continha água. Esta garrafa, destinada a actuar como selo hidráulico, foi posicionada de forma invertida e sustentada por uma terceira garrafa vazia, que serviu de apoio. Esta configuração permitiu que o tubo de 2 metros conduzindo o biogás fosse introduzido pela boca da garrafa invertida, passando pela água e garantindo vedação contra entrada de ar. A garrafa com água não foi completamente preenchida, de modo a manter um espaço livre na parte superior, necessário para que o gás deslocasse a água e prosseguisse para a terceira garrafa graduada, onde o volume produzido era medido. O gás deslocava a água, que era conduzida por um tubo de 60 cm até a terceira garrafa vazia e graduada em milímetros até 5 litros, utilizada para medir o volume de gás produzido. As leituras foram realizadas a cada dois dias durante um mês com base no deslocamento de água, registando-se uma média de 0,66 L a cada dois dias, correspondendo a cerca de 10 L no primeiro mês, equivalente a aproximadamente 0,095 kg de biogás.

### **Sistema 2 – Testes de queima**

O segundo sistema foi formado por uma garrafa PET de 10 litros, adaptada com um único orifício na tampa para inserção a mangueira de gás, devidamente selada. Este sistema foi reservado exclusivamente para a queima do biogás e posterior comparação do seu desempenho energético com outras fontes de combustível doméstico (lenha, carvão e gás de cozinha).

## **Preparação do substrato e alimentação dos biodigestores**

Os resíduos de couve e alface foram inicialmente lavados com água destilada, pesados em balança analítica de alta precisão e posteriormente triturados com o triturador até atingir granulometria homogênea. Ambos sistemas receberam a mesma proporção de resíduos e água, de modo a garantir uniformidade entre o volume de gás produzido e o volume destinado a queima.

Para cada sistema, preparou-se uma mistura de 3,2 kg de resíduos frescos (proporção 1:1 de couve e alface) com 4,8 litros de água. A água foi medida utilizando proveta graduada e a mistura final foi homogeneizada em bacias plásticas limpas. A alimentação das garrafas foi realizada com auxílio de funis, para evitar perdas e garantir a higiene do processo. Após o enchimento, as garrafas principais foram pintadas com tinta preta para limitar a entrada de luz e, assim, inibir a proliferação de algas e outros microrganismos indesejados.

## **Vedação e condições experimentais**

Para garantir a estanqueidade e evitar fugas de gás, foram utilizados um tubo grande de cola instantânea e Massa epóxi bicomponente (Pratly) nas conexões entre tampas e mangueiras. As garrafas foram ainda cobertas com sacolas plásticas para reforçar o isolamento. O sistema permaneceu em temperatura ambiente de aproximadamente 30 °C, monitorada continuamente através de um termómetro de mercúrio. Durante todo o período experimental, as garrafas foram agitadas manualmente a cada dois dias, tanto no sistema de monitoramento quanto no de queima, para estimular a digestão anaeróbica e uniformizar o material. As figuras abaixo ilustram as principais etapas do processo de montagem, alimentação e monitoramento dos biodigestores experimentais, evidenciando tanto a preparação dos resíduos hortícolas quanto a adaptação dos recipientes e o sistema de vedação adoptado.

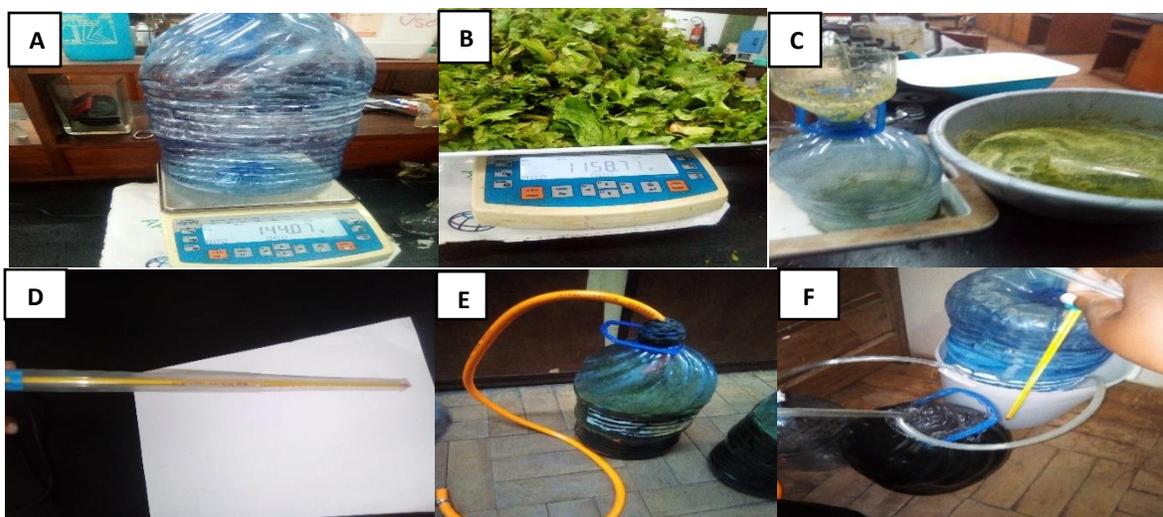


Figura 10. Etapas do processo de preparação e alimentação dos biodigestores experimentais: (A) pesagem da garrafa PET utilizada no sistema; (B) pesagem dos resíduos frescos de couve e alface; (C) transferência da mistura triturada para a garrafa; (D) monitoramento da temperatura; (E) biodigestores durante a fase de vedação; e (F) biodigestores vedados e dispostos para controle experimental da temperatura. Fonte: Autora (2025).

A montagem e monitoramento dos biodigestores experimentais permitiram acompanhar a produção de biogás ao longo do período de digestão, bem como quantificar o volume acumulado disponível para os testes comparativos. Concluída esta fase, procedeu-se à avaliação do desempenho energético do biogás produzido em comparação com outros combustíveis de uso doméstico, nomeadamente lenha, carvão vegetal e gás de cozinha.

### 3.2.6. Testes comparativos de desempenho energético

Após a produção e armazenamento do biogás, foram conduzidos ensaios comparativos para avaliar o seu desempenho energético frente a combustíveis de uso doméstico amplamente utilizados em Moçambique (lenha, carvão vegetal e gás de cozinha).

A avaliação do desempenho energético de diferentes combustíveis utilizados em contextos domésticos é fundamental para compreender sua eficiência, custo-benefício e impacto ambiental. Entre os métodos mais amplamente utilizados, destaca-se o Teste de Fervura de Água (Water Boiling Test – WBT), que mede a quantidade de combustível e o tempo necessários para aquecer e ferver um volume padrão de água. Este ensaio fornece uma estimativa directa da eficiência térmica de fogões e combustíveis, permitindo comparações padronizadas entre diferentes tecnologias e matérias-primas (VITA, 1985; MacCarty, Still & Ogle, 2010).

Diversos estudos, especialmente em países em desenvolvimento, utilizam o WBT para otimizar fogões melhorados e avaliar alternativas energéticas renováveis como o biogás (Kumar *et al.*, 2016).

A metodologia baseou-se no Teste de Fervura de Água (Water Boiling Test 4.2.3 – WBT) e em protocolos de avaliação de combustão descritos por VITA (1985) e MacCarty *et al.*, (2010), com adaptações para combustíveis gasosos de acordo com Kumar *et al.* (2016).

### **Local e materiais**

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Energia do Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Agronomia e Engenharia Florestal da Universidade Eduardo Mondlane. Os equipamentos utilizados incluíram dois tipos de fogões a biomassa (convencional e melhorado), fogão a gás, botija de gás, panelas metálicas padronizadas, balança analítica, termopar digital para monitoramento da temperatura da água e do ambiente, fósforos, luvas de proteção, espátula metálica para carvão e recipiente metálico para recolha de cinzas. A medição da água foi feita com recipiente plástico graduado de 5 L, enquanto a dosagem do petróleo usado para ignição da biomassa foi realizada com proveta de 25 mL.

### **Testes de fervura da biomassa**

O teste de fervura consiste na simulação do procedimento padrão de cozedura de alimentos e pode ser usado na comparação rápida do desempenho de combustíveis. Este teste usa água numa quantidade padrão de 2/3 da capacidade total da panela, incluindo duas fases distintas: Alta Potência a Frio (A.PF), Alta Potência a Quente (A.PQ) e Baixa Potência (B.P).

Para os combustíveis sólidos (lenha e carvão vegetal), o teste consistiu em aquecer 2,5 L de água desde a temperatura ambiente até a ebulição em panela metálica padronizada. Foi usada lenha comercial, previamente picotada e o carvão quebrado em fracções mais pequenas para uniformizar o tamanho das partículas. Cada combustível foi testado em seis repetições, onde três foram no fogão convencional e três no fogão melhorado. Em todos os ensaios, 40 mL de petróleo foram adicionados como acelerante para padronizar o acendimento. Durante cada teste, foram registados o tempo até fervura e a variação de massa do combustível antes e depois do ensaio.

Para o registo da variação de temperatura no teste de fervura, adoptou-se um intervalo de leitura de 5 em 5 minutos co recurso a um termopar que foi fixado a um tripé de laboratório, conforme recomendado em protocolos internacionais de avaliação de desempenho de fogões (MacCarty *et al.*, 2010; VITA, 1985).

Nos ensaios com biomassa (lenha e carvão), foram registados para cada repetição:

- Peso inicial do fogão vazio;
- Peso da panela com tampa;
- Peso do combustível padronizado (0,6 kg);
- Temperatura ambiente e temperatura inicial da água;
- Peso da panela com água (2,5 L) e do fogão com o combustível no tempo inicial (0 min).

As medições seguintes foram realizadas em três momentos: no ponto de fervura (alta potência a frio), após 15 minutos de fervura contínua (alta potência a quente) e após 45 minutos (baixa potência). Em cada etapa, pesavam-se novamente a panela com água e o fogão com o combustível remanescente para cálculo do consumo e eficiência térmica conforme ilustra a figura 10.

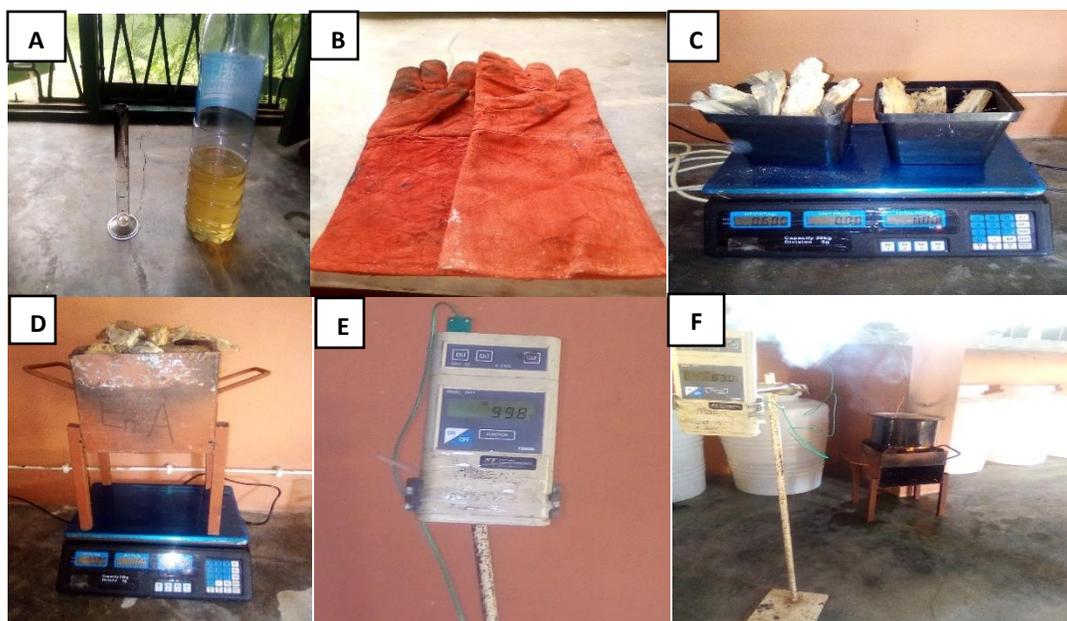


Figura 11. Materiais utilizados durante os ensaios de fervura de biomassas: (A) recipiente com petróleo e proveta de 25 mL utilizada na dosagem para ignição; (B) luvas de proteção térmica; (C) pesagem do combustível na balança analítica; (D) pesagem do fogão com combustível acoplado; (E) termopar digital para monitoramento de temperatura; (F) visão geral do termopar em operação durante o teste de fervura com panela metálica. *Fonte:* Autora (2025).

## Testes de fervura de combustíveis gasosos

Os testes com gás de cozinha e biogás seguiram o mesmo princípio de avaliação de fervura e combustão, com adaptações metodológicas necessárias devido às características dos combustíveis gasosos. A medição do consumo foi baseada na variação de massa da botija antes e após cada ensaio (MacCarty *et al.*, 2010).

- Peso inicial da botija para o gás de cozinha e da garrafa para biogás;
- Peso da panela com água e tampa;
- Temperatura ambiente e temperatura inicial da água;
- Peso da botija com redutor e gás (para gás de cozinha) e peso do biodigestor com biogás (para o biogás) após cada fase do ensaio.

No caso do gás de cozinha, testaram-se duas aberturas de válvula para simular diferentes potências: aproximadamente 15 cm para alta potência e 5 cm para baixa potência. Para o biogás, o teste de fervura foi interrompido aos 85 minutos na primeira repetição, uma vez que o aquecimento estava a decorrer de forma lenta devido à baixa potência do biogás produzido. Deste modo, para prosseguir com outro teste energético optou-se por interromper o sistema. Esta decisão metodológica visou otimizar o tempo experimental sem comprometer a análise comparativa subsequente. A Figura 12 ilustra os materiais usados para teste de fervura da água.

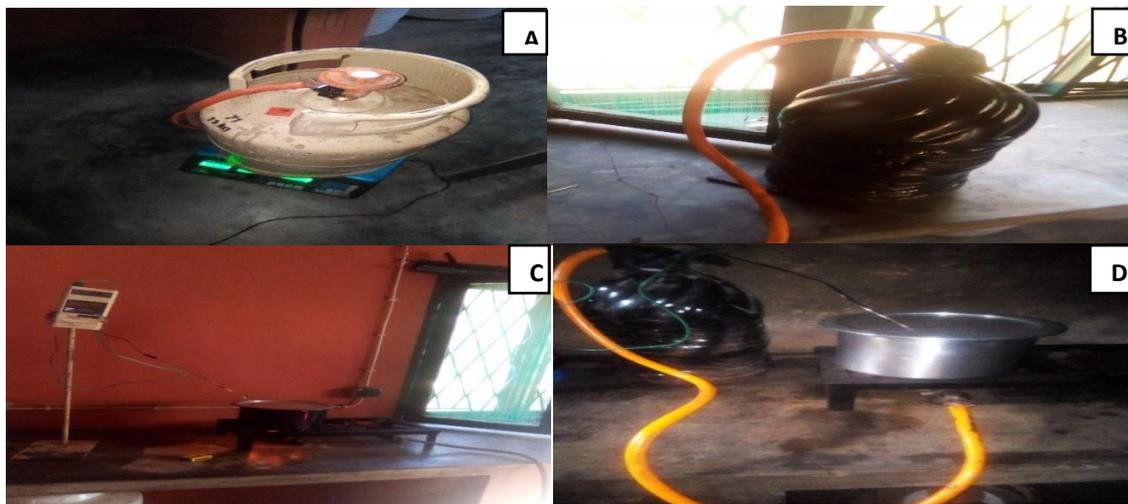


Figura 12. Materiais utilizados durante os ensaios de fervura de combustíveis gasosos: (A) pesagem da botija de gás na balança; (B) biodigestor experimental utilizado para armazenamento do biogás; (C) visão geral do termopar, fogão a gás e panela metálica durante o teste de fervura; (D) disposição conjunta do biodigestor, panela, fogão a gás e termopar durante o ensaio. Fonte: Autora (2025).

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

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

$$Q_{lib} = PCI \times m_{cc} \quad (5) \quad \text{Onde:}$$

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

$m_{cc}$  – massa de combustível consumido [kg].

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

$$Q_{ab} = m_{ic} \times c_a \times (T_{fa} - T_{ia}) \quad (6) \quad \text{Onde:}$$

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

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

$T_{fa}$  – temperatura final da água [K];

$T_{ia}$  – 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.

$$Q_{vap} = \Delta m_a \times L \quad (7) \quad \text{Onde:}$$

$\Delta m_a$  – massa de água evaporada [kg];

$L$  – calor latente de vaporização da água;  $L=2,26.10^6 \text{ J.kg}^{-1}$

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

$$\eta = \frac{Q_{ab} + Q_{vap}}{Q_{lib}} \times 100\% \quad (8) \quad \text{Onde:}$$

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

$$P = \frac{Q_{lib}}{t} \quad (9) \quad \text{Onde:}$$

$Q_{lib}$  – calor libertado durante a combustão [kJ];

t – duração do teste [s].

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

$$Cc = \frac{m_{cc}}{\Delta m_a} \quad (10)$$

### **Testes de combustão da biomassa**

O teste de combustão é um procedimento experimental amplamente utilizado para avaliar o comportamento energético de diferentes combustíveis, consistindo essencialmente na queima controlada do material para analisar parâmetros como poder calorífico, estabilidade e cor da chama, tempo de queima e formação de resíduos. De acordo com Kutz (2019), esse tipo de ensaio permite determinar a eficiência térmica e verificar se a combustão ocorre de forma completa ou incompleta, o que se reflete na produção de cinzas, fumaça ou na tonalidade da chama.

Avaliou-se a taxa de perda de massa dos combustíveis sólidos ao longo de 120 minutos de combustão contínua, correlacionando-a com a variação de temperatura. O procedimento foi repetido seis vezes para cada tipo de combustível, mantendo a mesma distribuição entre fogão convencional e melhorado. No caso da lenha, a combustão encerrou-se antes dos 120 minutos devido ao esgotamento total do material, sendo o tempo efetivo de queima registado e utilizado nos cálculos subsequentes. A Figura 13 ilustra o processo de combustão de biomassa.

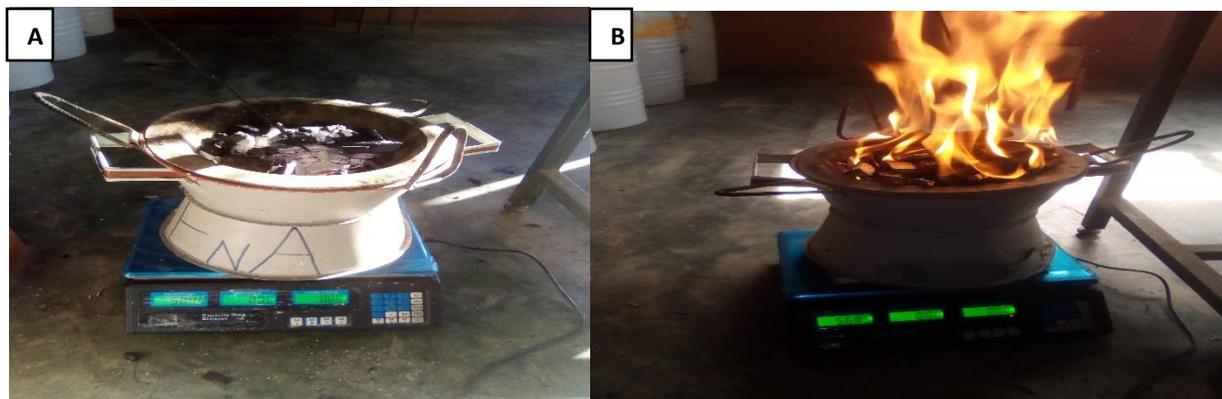


Figura 13. Processo de combustão de biomassas. A – Fase final do ensaio, com fogão sobre a balança e monitoramento da perda de massa; B – Fase inicial da queima do combustível. Fonte: Autora (2025)

### Testes de combustão de combustíveis gasosos

Os combustíveis gasosos foram submetidos a testes de combustão, procedimento experimental amplamente utilizado para avaliar seu comportamento energético. A queima controlada do gás permite analisar parâmetros como estabilidade e cor da chama, tempo de combustão e eficiência térmica. De acordo com Mata *et al.*, (2021), a observação da cor da chama é um indicador essencial de qualidade: tons azulados sugerem maior teor de metano e combustão mais completa, enquanto tons amarelados ou presença de fuligem apontam para impurezas ou combustão parcial.

Para o gás de cozinha, foram realizadas três repetições do teste de combustão contínua, com a válvula aberta a 31 cm e duração total de 120 minutos por ensaio. Esse procedimento permitiu avaliar a estabilidade de queima e o rendimento energético ao longo do tempo.

No caso do biogás, a limitação no volume produzido pelos biodigestores experimentais impossibilitou múltiplas repetições. Foi, portanto, realizado um único teste de combustão, com duração de 15 minutos, suficiente para obter uma estimativa inicial do seu potencial energético.

Estudos de Mata-Alvarez (2003) e Bouallagui *et al.*, (2005) reforçam que ensaios dessa natureza são fundamentais para validar a qualidade do biogás produzido, sobretudo em condições experimentais de pequena escala. A Figura 14 ilustra o processo de combustão de combustíveis gasosos, evidenciando as diferenças de comportamento entre o gás de cozinha e o biogás.

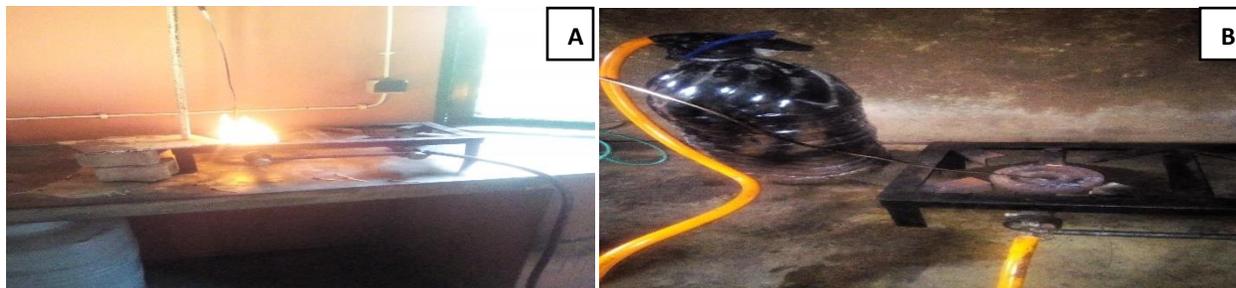


Figura 14. Processo de combustão de combustíveis gasosos: A – Combustão de gás de doméstico; B – Combustão de biogás proveniente de biodigestor experimental. Fonte: Autora (2025)

A partir destes dados, conheceu-se a temperatura máxima de combustão, o tempo necessário para atingir a temperatura máxima durante a queima, o consumo de massa do combustível e pôde-se determinar o ICOM. O índice de combustão que, é um número adimensional, e foi calculado pela fórmula:

$$ICOM = \frac{AXB}{CX100} \quad (11) \quad \text{Onde:}$$

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

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

### **3.2.7. Construção participativa do biodigestor no campo**

A etapa prática no campo consistiu em duas sessões de capacitação comunitária destinadas à montagem e alimentação de um biodigestor de baixo custo, construído com materiais simples e de fácil acesso local. O objectivo desta fase foi transmitir aos produtores da associação conhecimentos práticos sobre a tecnologia de biodigestão, incentivando a autonomia dos produtores para replicar e operar sistemas semelhantes em pequena escala. Na primeira sessão, os produtores acompanharam todo o processo de montagem do biodigestor e a explicação sobre cada componente do sistema. Na segunda sessão, realizou-se a preparação do substrato e alimentação inicial, permitindo que os participantes observassem o funcionamento completo do sistema e recebessem orientações sobre cuidados básicos, como:

- Manuseamento seguro da válvula de gás,
- Higienização durante o preparo dos resíduos,
- Periodicidade das alimentações e controle do volume de carga,
- Importância da vedação para evitar fugas de gás.

Essa abordagem facilitou a compreensão do processo de biodigestão pela comunidade, despertando interesse para seu uso em pequena escala e fortalecendo a participação local no desenvolvimento de soluções energéticas sustentáveis.

O biodigestor construído foi do tipo contínuo, com capacidade de 20 litros. Esse tipo de sistema permite alimentações periódicas de pequenas quantidades de resíduos, garantindo a produção contínua de biogás e biofertilizante líquido sem esvaziamento total do reator.

#### **Estrutura e materiais utilizados**

Foi utilizado um bidão de plástico de 20 litros como reator principal, no qual se instalou, na parte inferior uma torneira destinada à drenagem do biofertilizante.

A entrada de substrato foi feita por meio de um tubo PVC de 50mm de diâmetro e 1 metro de altura, acoplado na parte superior do bidão e selado com um bujão de PVC do mesmo diâmetro, que será reaberto apenas para novas cargas.

A saída do biogás foi assegurada por uma mangueira de gás de 2 metros, conectada à tampa do bidão por um adaptador rosqueado com anel de vedação e fixado internamente com parafuso metálico. Na extremidade livre da mangueira foi acoplado um redutor para permitir o controlo manual do fluxo do biogás durante a utilização e foi devidamente conectado a mangueira por meio de uma braçadeira. As ferramentas utilizadas na construção incluíram faca para perfurações e ajustes, almofariz para trituração dos resíduos, bacia para lavagem dos materiais orgânicos e água potável para a diluição do substrato.



Figura 15. Materiais utilizados para a construção participativa do biodigestor no campo. Fonte: Autora (2025)

### **Preparação e alimentação do biodigestor no campo**

Para a carga inicial do sistema, utilizou-se uma mistura de resíduos hortícolas (couve e alface) lavados e triturados, na proporção de 60% resíduos frescos para 40% água. Essa relação foi definida para garantir concentração adequada de sólidos e, ao mesmo tempo, manter fluidez suficiente para a mistura dentro do reator. A quantidade foi ajustada de modo a não ultrapassar o volume útil do biodigestor.

Após o arranque inicial, o biodigestor passou a ser operado em regime contínuo, com alimentações semanais de menor volume (aproximadamente 3 à 4 kg de resíduos frescos diluídos em 40% de água). Esse maneiio permite reposição gradual de substrato sem exceder a capacidade do reator, assegurando estabilidade do processo e fornecimento regular de biogás e biofertilizante.

As etapas descritas foram acompanhadas e registradas fotograficamente, de modo a documentar o processo de capacitação comunitária, desde a preparação do substrato até a montagem e alimentação do biodigestor em campo. A Figura 16 ilustra os principais momentos dessas atividades práticas.



Figura 15. Momentos do processo de capacitação comunitária para montagem e alimentação do biodigestor. Fonte: Autora (2025).

### 3.2.8. Limitações metodológicas

Durante a realização deste estudo, foram identificadas algumas dificuldades que, embora não tenham comprometido a execução e os resultados obtidos, representam aspectos importantes a serem considerados para futuras pesquisas.

A dificuldade no acesso a equipamentos laboratoriais especializados dificultou a realização de algumas análises complementares, como a determinação do teor de gorduras, um parâmetro relevante para a caracterização completa dos resíduos orgânicos. Além disso, a obtenção de materiais específicos para montagem dos biodigestores e para os ensaios apresentou desafios logísticos, o que pode ser um factor limitante para a replicabilidade do experimento em outros contextos.

Durante os testes com biomassa, a elevada produção de fumaça gerada pela queima da lenha no laboratório expôs a pesquisadora a desconforto e possíveis riscos respiratórios. Outro ponto importante foi a dificuldade na pesagem da botija de gás durante os ensaios com combustíveis gasosos, que exigiu pesagens manuais por minuto para obter leituras precisas. Esse procedimento demandou atenção extra.

Por fim, em função da produção limitada de biogás nos biodigestores experimentais, foi possível realizar apenas uma repetição dos testes com essa fonte energética. Essa limitação é comum em ensaios de pequena escala e, ainda assim, fornece dados indicativos valiosos para comparação qualitativa (Mata-Alvarez, 2003; Bouallagui *et al.*, 2005).

### **3.2.9. Cuidados a ter no laboratório**

O manuseamento de combustíveis em ambiente laboratorial demanda rigorosos cuidados de segurança, dado o risco elevado de incêndio, explosão e toxicidade dos vapores emitidos. Substâncias como etanol, metanol e hexanos apresentam baixos pontos de fulgor, o que facilita a formação de atmosferas inflamáveis em condições de ventilação inadequada. A implementação de medidas preventivas, como uso de capelas de exaustão, armazenamento em armários certificados e aterramento de recipientes metálicos durante a transferência, é fundamental para reduzir a probabilidade de acidentes e proteger tanto os operadores quanto as instalações Smith *et al.*, 2016).

Para futuros trabalhos que pretendam replicar ou ampliar este estudo, recomenda-se atenção especial a diversos aspectos de segurança, organização e precisão experimental, de modo a reduzir riscos e melhorar a qualidade dos resultados obtidos.

Durante os testes de combustão e fervura de água com lenha e carvão, verificou-se a geração intensa de fumaça, que pode causar desconforto respiratório e irritação ocular. É essencial realizar os ensaios em ambiente bem ventilado ou equipado com sistema de exaustão e garantir o uso de equipamentos de proteção individual (EPI), como máscaras, luvas térmicas e óculos de proteção.

Estudos como o de MacCarty *et al.*, (2010) destacam que a exposição contínua à fumaça de biomassa pode afetar a saúde respiratória dos operadores.

O uso de pequenas quantidades de petróleo para facilitar a ignição deve ser controlado e manipulado com cuidado, evitando excesso que possa gerar chamas inesperadas. A medição precisa (40 mL por ensaio) ajuda a padronizar a combustão e a reduzir riscos de acidentes.

Nos ensaios com gás de cozinha e biogás, a pesagem da botija exigiu manuseamento constante. Para maior segurança, aconselha-se o uso de suportes estáveis e balanças sensíveis, além de manter a botija afastada da fonte de calor. Se possível, utilizar balanças com leitura contínua para evitar deslocamentos repetidos.

### **3.3. Análises estatísticas**

Os parâmetros físico-químicos e energéticos (humidade, teor de cinzas, matéria orgânica, poder calorífico, índice de combustão e teste de fervura) foram inicialmente processados no Microsoft Excel 2013. Este software foi utilizado para elaboração dos gráficos descritivos e fluxogramas apresentados na seção de resultados, permitindo a visualização da evolução temporal da produção de biogás, das variações de temperatura e das comparações energéticas entre combustíveis. Posteriormente, os dados foram exportados para o software STATA 17 onde foram realizadas análises de variância (ANOVA) para comparar médias entre os combustíveis testados (biogás, gás de cozinha, lenha e carvão). Em casos de diferença estatisticamente significativa ( $\alpha = 0,05$ ), aplicou-se o teste de Tukey para identificar quais grupos apresentaram diferenças. Os inquéritos estruturados aplicados aos produtores foram analisados por meio de gráficos, permitindo explorar padrões de respostas sobre a aceitação do biogás. Esse tipo de análise é recomendado em estudos exploratórios de base comunitária por permitir identificar tendências sem necessidade de amostragem probabilística (Patton, 2002). A integração das análises quantitativas e qualitativas permitiu correlacionar a percepção comunitária com o desempenho técnico do biogás, oferecendo uma visão holística do potencial de adoção da tecnologia.

## IV.RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos durante a execução do estudo. O tratamento e interpretação dos dados tiveram como foco avaliar o potencial dos resíduos hortícolas (couve e alface) para produção de biogás, comparando suas características físico-químicas, rendimento energético e percepção comunitária. A discussão baseia-se na literatura científica recente, de modo a relacionar os achados deste estudo com o conhecimento existente sobre digestão anaeróbica de resíduos vegetais e sua aplicabilidade no contexto moçambicano.

### 4.1. Caracterização físico-química dos resíduos hortícolas

Nesta secção apresentam-se os resultados obtidos na caracterização físico-química dos resíduos hortícolas utilizados no estudo. As análises abrangeram parâmetros como humidade, pH, cinzas e matéria orgânica, cujas médias estão sintetizadas na Tabela 8.

**Tabela 8. Caracterização físico-química dos resíduos hortícolas utilizados.**

Parâmetro	Alface	Couve
Humidade (%)	88,70	95,41
pH	5,85	6,00
Cinzas (%)	1,84	1,78
Matéria orgânica (%)	98,16	98,22

Os valores de humidade indicam elevado teor de água em ambos os resíduos, com a couve apresentando maior valor (95,41 %) do que a alface (88,70 %). De acordo com estudos sobre resíduos folhosos, valores de humidade acima de 90 % são comuns e favorecem a biodigestão anaeróbica, embora possam exigir maior gestão do substrato devido à baixa concentração de sólidos voláteis (Ferdes *et al.*, 2022; Yan *et al.*, 2017).

O pH observado (5,85 a 6,00) está dentro da faixa ideal para digestão anaeróbica, o que favorece a actividade das bactérias metanogénicas (Mata-Álvarez *et al.*, 2003).

Quanto ao teor de cinzas (< 2 %), ambos os resíduos mostram baixa presença de minerais inorgânicos, indicando excelente qualidade energética. Isso se reflete na alta proporção de matéria orgânica (> 98 %), o que está associada a maior potencial de produção de metano (Kalia & Singh, 2020; Yan *et al.*, 2017).

A combinação dos resíduos de couve e alface cria um substrato com características balanceadas para a digestão anaeróbica, aproveitando as propriedades complementares de ambos. A mistura contribui para um melhor equilíbrio do teor de sólidos e nutrientes, favorecendo a estabilidade do processo biológico e a produção consistente do biogás. Essas características estão alinhadas com a literatura sobre digestão anaeróbica de resíduos hortícolas, que destaca valores de sólidos voláteis/ sólidos totais (VS/TS) superiores a 85 % como desejáveis para maximizar a produção de biogás (Yan *et al.*, 2017)

Vários estudos sobre digestão anaeróbica de resíduos hortícolas confirmam que misturas de vegetais geram resultados mais estáveis e eficientes do que substratos individuais. Por exemplo, Maomao *et al.*, (2016) observaram que misturas vegetais em diferentes taxas de carga ofereceram boa estabilidade de processo e produção consistente de gás.

Além disso, a co-digestão de diversos resíduos vegetais frequentemente melhora o balanço C/N, reduz inibidores como ácidos voláteis e aumenta o teor de metano comparada à digestão individual (Vongvisith *et al.*, 2020; Masebinu *et al.*, 2018). Esses benefícios refletem sobre o potencial do substrato misto utilizado no presente estudo, mesmo com escala reduzida do biodigestor experimental.

#### **4.2. Produção de Biogás e Comparações Energéticas**

Nesta seção, apresenta-se a produção de biogás obtida a partir da mistura de resíduos hortícolas utilizados no biodigestor experimental, seguida da comparação do desempenho energético entre o biogás e outras fontes de combustível tradicionais através dos testes de fervura e combustão.

Durante o período de monitoramento, foi produzida uma média de 10 litros de biogás, equivalente a aproximadamente 0,095 kg, volume este utilizado nas avaliações experimentais de rendimento energético. A produção foi monitorada em condições controladas, refletindo a eficiência do substrato e do sistema. Para a análise comparativa, foram realizados dois testes principais: o teste de fervura da água e o teste de combustão. A seguir, apresentam-se os resultados detalhados do teste de fervura, seguidos pelos dados do teste de combustão, com a respectiva análise e discussão.

### **4.2.1. Teste de Fervura**

O teste de fervura da água é um método prático e amplamente utilizado para avaliar o desempenho energético de diferentes fontes de combustível, permitindo medir o tempo necessário para aquecer uma quantidade padrão de água até o ponto de ebulição sob condições controladas. Esse procedimento fornece informações importantes sobre a eficiência térmica e o potencial energético dos combustíveis utilizados, bem como o comportamento dos fogões empregados.

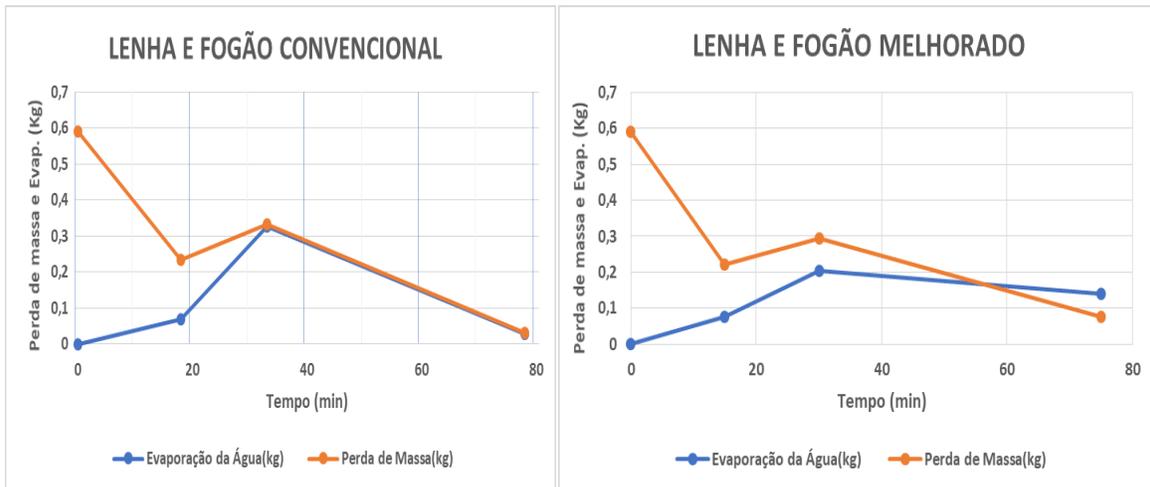
Neste estudo, os ensaios de fervura foram realizados com dois fogões (convencional e melhorado) para energias provenientes de biomassa (lenha e carvão) e um fogão a gás para os combustíveis gasosos (gás de cozinha e biogás). Essa comparação foi fundamental para evidenciar as diferenças de desempenho entre as fontes de energia disponíveis para uso doméstico em Moçambique.

#### **4.2.1.1. Perda de Massa e Evaporação da Água**

A perda de massa durante o processo de fervura está diretamente associada à queima do combustível e à consequente evaporação da água submetida ao aquecimento. Esse parâmetro é relevante porque permite avaliar a eficiência da conversão de energia térmica em calor útil para a ebulição, bem como estimar o consumo real do combustível (MacCarty *et al.*, 2010). De acordo com o protocolo Water Boiling Test (WBT), amplamente utilizado para comparar desempenhos energéticos de fogões e combustíveis, a medição da massa evaporada é essencial para o cálculo do rendimento térmico e do consumo específico (Bailis *et al.*, 2004).

Estudos apontam que a taxa de evaporação da água pode variar em função do tipo de combustível, do design do fogão e do fluxo de ar durante a combustão (Jetter *et al.*, 2012). Combustíveis gasosos, por exemplo, tendem a apresentar taxas de evaporação mais uniformes devido à queima mais completa e controlada, enquanto biomassa sólida, como carvão e lenha, frequentemente mostra variação maior por conta da heterogeneidade do material e da formação de brasas (Pachauri *et al.*, 2018).

A análise conjunta da perda de massa e da evaporação da água, portanto, fornece subsídios para compreender tanto a eficiência energética como a estabilidade térmica dos sistemas testados, sendo um indicador complementar aos parâmetros de potência e consumo específico. A seguir são apresentados os gráficos comparativos de perda de massa dos combustíveis avaliados ao longo do teste de fervura.



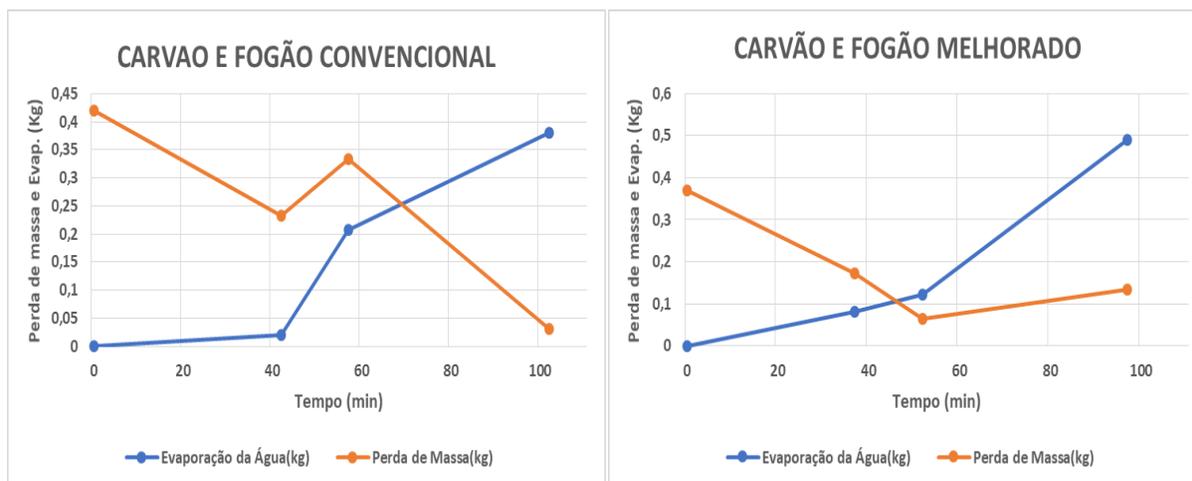
**Gráfico 1. Perda de massa e evaporação da água em função do tempo para a lenha no fogão convencional**  
**Gráfico 2. Perda de massa e evaporação da água em função do tempo para a lenha no fogão melhorado**

Os resultados demonstram que, no fogão convencional, a lenha apresentou elevada perda de massa logo no início do ensaio, com redução acentuada ao longo do tempo. A taxa de evaporação da água iniciou-se baixa e aumentou progressivamente até atingir aproximadamente 0,35 kg em cerca de 30 minutos, momento em que se estabilizou e declinou gradualmente. Este comportamento indica consumo elevado de combustível para alcançar a ebulição, revelando eficiência térmica moderada.

No fogão melhorado, o padrão de variação manteve-se semelhante, porém com perda de massa visivelmente menor ao longo do ensaio. A evaporação de água foi comparável à do fogão convencional, mas alcançada com menor quantidade de lenha, evidenciando maior aproveitamento energético do combustível. A eficiência superior do fogão melhorado está associada ao seu design, que melhora o fluxo de ar e reduz perdas de calor por convecção e radiação.

Estes resultados vão de acordo com estudos que mostram que fogões melhorados consomem entre 30% e 50% menos lenha para atingir o mesmo desempenho térmico, devido a câmaras de combustão mais eficientes e melhor transferência de calor para a panela (MacCarty *et al.*, 2010; Jetter *et al.*, 2012). Bailis *et al.*, (2004) reforçam que a eficiência depende não apenas do combustível, mas também do design do fogão e do controle da combustão, fatores críticos para reduzir consumo e emissões.

Após a análise da lenha, os gráficos seguintes representam o comportamento do carvão nos mesmos ensaios de perda de massa e evaporação da água, também avaliados nos fogões convencional e melhorado. A comparação permite verificar se o padrão observado para a lenha se repete ou se o carvão apresenta particularidades no seu desempenho térmico.



**Gráfico 3. Perda de massa e evaporação da água em função do tempo para o carvão no fogão convencional.**

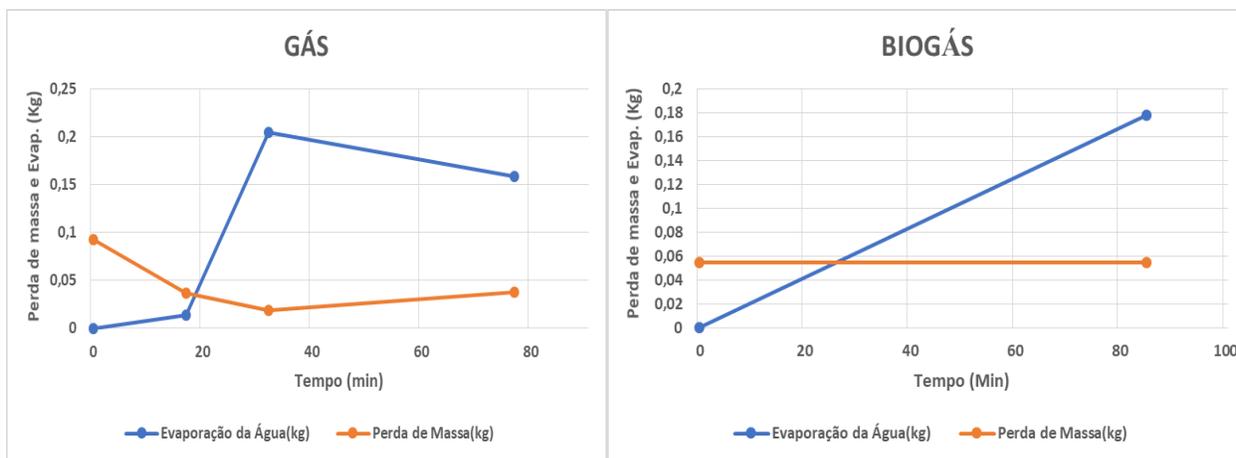
**Gráfico 4. Perda de massa e evaporação da água em função do tempo para o carvão no fogão melhorado**

Nos gráficos referentes ao carvão, observa-se que o fogão convencional apresenta uma perda inicial de massa elevada, em torno de 0,4 kg, que diminui gradualmente ao longo do tempo. Paralelamente, a taxa de evaporação inicia em valores baixos, aumentando de forma progressiva até estabilizar, o que indica que a energia liberada é suficiente para manter a ebulição após o aquecimento inicial. Este comportamento, embora funcional, demonstra elevado consumo de combustível e menor eficiência energética, uma vez que maiores quantidades de carvão são requeridas para realizar a mesma tarefa.

Já no fogão melhorado, a perda de massa do carvão é significativamente menor, com pico aproximado de 0,25 kg, e o padrão de evaporação da água segue tendência semelhante ao observado no convencional, mas com maior estabilidade e aproveitamento energético. A redução do consumo pode ser atribuída às melhorias estruturais do fogão melhorado, como melhor isolamento térmico e otimização da entrada de ar, factores amplamente documentados por MacCarty *et al.*, (2010) e Jetter *et al.*, (2012), que demonstram que fogões melhorados reduzem entre 30–50 % o consumo de combustível e a emissão de poluentes em comparação com modelos tradicionais.

Estudos prévios sobre combustão de carvão em fogões tradicionais relatam padrões semelhantes, com elevada perda de massa inicial associada à fase de ignição e combustão incompleta (Bailis *et al.*, 2004). A eficiência superior do fogão melhorado confirma achados de estudos de campo realizados em contextos rurais africanos, que destacam reduções de consumo superiores a 40% quando se utiliza carvão em sistemas otimizados para maior retenção de calor (Pachauri *et al.*, 2018).

Após a apresentação e análise dos resultados referentes às biomassas (lenha e carvão), são demonstrados a seguir os gráficos correspondentes aos combustíveis gasosos (gás de cozinha e biogás).



**Gráfico 5. Perda de massa e evaporação da água em função do tempo para o gás de cozinha.  
Gráfico 6. Perda de massa e evaporação da água em função do tempo do biogás**

Nos gráficos relativos aos combustíveis gasosos, observa-se um comportamento distinto em relação às biomassas. Para o gás de cozinha, a perda de massa é praticamente nula durante todo o ensaio, evidenciando a natureza pressurizada e controlada da liberação do combustível, característica intrínseca dos gases canalizados. A evaporação da água ocorre de forma rápida e consistente, atingindo pico em torno de 0,2 kg em menos de 30 minutos. Este desempenho indica alta eficiência no aproveitamento energético, uma vez que a combustão do gás de cozinha é estável, com chama limpa e temperatura uniforme, atributos amplamente reconhecidos em análises comparativas entre combustíveis sólidos e gasosos (Jetter *et al.*, 2012).

No caso do biogás experimental, verifica-se comportamento semelhante no que tange à perda de massa, praticamente constante e de baixa magnitude (aproximadamente 0,1 kg), reflexo do fornecimento contínuo e do controle sobre a taxa de fluxo. A evaporação da água apresenta crescimento quase linear ao longo do tempo, sem quedas acentuadas, o que sugere estabilidade na combustão, apesar da menor potência em relação ao gás de cozinha. Estudos como o de Mata-Álvarez *et al.*, (2014) destacam que o biogás, mesmo com menor teor de metano (50–65%), mantém padrão de combustão relativamente estável, sobretudo quando utilizado em aparelhos adaptados para sua baixa pressão. A estabilidade e a baixa perda de massa observadas nos combustíveis gasosos confirmam evidências de que gases, pela combustão mais completa e controle do fluxo, reduzem drasticamente perdas e variabilidade no processo de aquecimento (Pachauri *et al.*, 2018; MacCarty *et al.*, 2010).

De modo geral, os combustíveis gasosos (gás de cozinha e biogás) demonstraram o melhor desempenho em termos de eficiência energética, evidenciado pela menor perda de massa e perfil de evaporação mais estável e rápido. Além disso, a evaporação rápida e consistente da água indica que a energia é transferida de forma eficiente para o meio aquoso, o que é corroborado por estudos que destacam a elevada eficiência dos combustíveis gasosos em comparação às biomassas (Jetter *et al.*, 2012; Pachauri *et al.*, 2018).

No caso das biomassas (lenha e carvão), observou-se maior perda de massa ao longo do ensaio, especialmente no fogão convencional, e uma evaporação mais lenta e irregular da água. Essa tendência é explicada pela menor uniformidade da combustão dos sólidos e pela maior influência de factores como humidade e densidade do combustível, que impactam a liberação de energia (Bailis *et al.*, 2004; MacCarty *et al.*, 2010). A introdução do fogão melhorado reduziu significativamente o consumo específico e as perdas, confirmando resultados de literatura que apontam ganhos de 30 à 50% na eficiência térmica de fogões aprimorados devido a melhorias no isolamento e na circulação de ar (MacCarty *et al.*, 2010; Jetter *et al.*, 2012).

#### 4.2.1.2. Potência e consumo específico

A potência térmica e o consumo específico são parâmetros fundamentais para avaliar o desempenho energético de combustíveis e fogões durante o teste de fervura da água (Water Boiling Test – WBT). A potência térmica expressa a taxa de transferência de energia para o meio aquoso durante a combustão, permitindo estimar a rapidez do processo de aquecimento. Já o consumo específico indica a quantidade de combustível necessária para atingir o ponto de ebulição, representando um indicador directo de eficiência (Bailis *et al.*, 2004). Os gráficos a seguir mostram os resultados de potência e consumo específico obtidos nos testes de fervura para cada combustível e tipo de fogão.

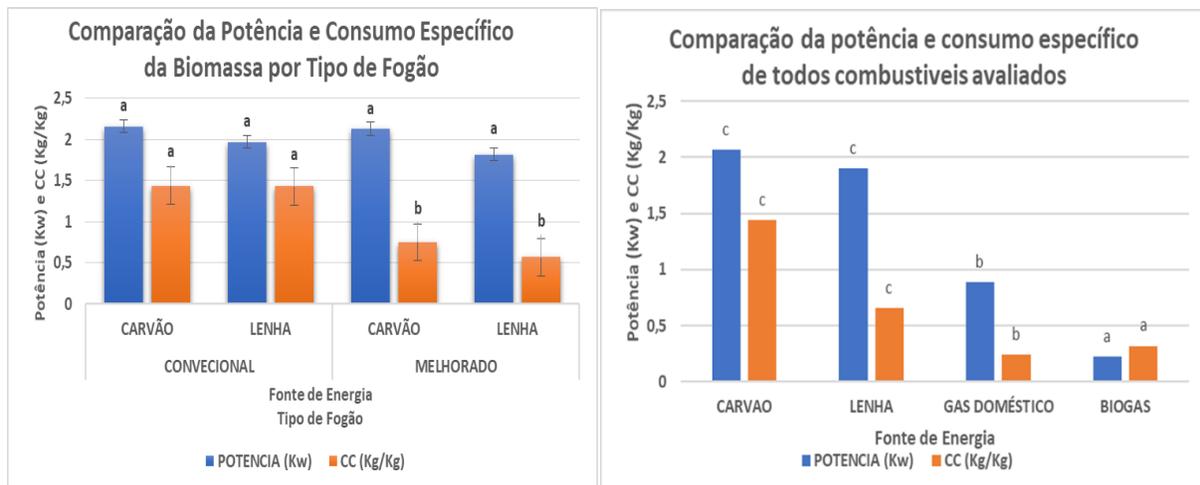


Gráfico 7. Comparação da potência e consumo específico lenha e do carvão entre fogão convencional e melhorado

Gráfico 8. Comparação da potência e consumo específico geral entre todos os combustíveis (biomassa e gasosos)

Os resultados do gráfico 7 indicam que lenha e carvão não apresentaram diferenças estatisticamente significativas de potência térmica tanto entre os dois combustíveis quanto entre os tipos de fogão testados. No fogão convencional, a potência do carvão foi de 2,16 kW e no melhorado de 2,13 kW; para a lenha, os valores foram 1,97 kW e 1,82 kW, respectivamente. Estes resultados demonstram que, no contexto da geração instantânea de calor, a taxa de combustão tem maior influência que o tipo de combustível ou o design do fogão. Resultados semelhantes foram reportados por Jetter *et al.* (2012), que, ao testarem 22 fogões e seis combustíveis com o protocolo Water Boiling Test (WBT), observaram variação mínima de potência entre diferentes combustíveis sob condições controladas.

Por outro lado, o consumo específico ( $C_c$ ), indicador que expressa a massa de combustível necessária para aquecer uma quantidade padrão de água, apresentou diferenças significativas entre os fogões, mas não entre os combustíveis. O carvão apresentou valores de 1,44 kg/kg no fogão convencional e 0,75 kg/kg no melhorado, enquanto a lenha apresentou 1,43 kg/kg e 0,57 kg/kg, respectivamente. Estes resultados indicam que a eficiência energética foi influenciada principalmente pelo tipo de fogão, e não pelo tipo de biomassa utilizada. Estudos anteriores corroboram esta tendência, destacando que o aperfeiçoamento no fluxo de ar e no isolamento térmico em fogões melhorados reduz perdas de calor e, conseqüentemente, a massa de combustível necessária para atingir o ponto de ebulição (MacCarty *et al.*, 2010).

O gráfico 8 apresenta a comparação da potência entre todos os combustíveis avaliados. Observa-se que o carvão apresentou a maior potência média (2,07 kW), seguido da lenha (1,90 kW), do gás de cozinha (0,89 kW) e, por último, do biogás (0,22 kW). Os combustíveis sólidos, portanto, exibiram valores superiores aos gasosos. Este resultado é consistente com o facto de que combustíveis sólidos possuem maior poder calorífico em base seca e apresentam combustão mais prolongada, o que favorece a liberação contínua de energia (Masebinu *et al.*, 2018). O desempenho inferior do biogás pode ser explicado por dois fatores principais: **(i)** a menor pressão de saída observada no sistema experimental e **(ii)** o teor reduzido de metano do biogás produzido, que normalmente varia entre 50 à 65%, valor inferior ao do gás de cozinha, predominantemente composto por propano e butano (Mata-Álvarez *et al.*, 2014).

Ao analisar o consumo específico entre todos os combustíveis, verifica-se que o gás de cozinha apresentou o menor valor (0,24 kg/kg), seguido pelo biogás (0,32 kg/kg), pela lenha (0,66 kg/kg) e, por último, pelo carvão (1,44 kg/kg), que apresentou o maior consumo específico. Este padrão está de acordo com estudos de eficiência energética que indicam que combustíveis gasosos, apesar de possuírem menor potência, tendem a ser mais eficientes no uso devido à queima mais completa e menores perdas por radiação e convecção (Pachauri *et al.*, 2018; Jetter *et al.*, 2012).

A diferença significativa no consumo específico entre os combustíveis demonstra que a escolha do combustível influencia diretamente a eficiência global do processo de cocção. Este resultado reforça o potencial do biogás como alternativa energética viável, mesmo apresentando menor potência, mostrou consumo específico inferior ao da lenha e do carvão, indicando aproveitamento energético mais favorável em comparação com as biomassas sólidas.

#### **4.2.1.3. Rendimento Térmico**

O rendimento térmico representa a fracção da energia liberada pelo combustível que é efetivamente transferida para a água durante o teste de fervura, constituindo um indicador directo da eficiência do processo de cocção. Este parâmetro é fundamental para compreender não apenas o desempenho energético absoluto dos combustíveis, mas também sua adequação prática no contexto doméstico. Ensaio realizados sob o protocolo Water Boiling Test (WBT) apontam que rendimentos superiores a 30 % são considerados aceitáveis para fogões melhorados, enquanto valores inferiores são frequentes em fogões convencionais (Bailis *et al.*, 2004; Jetter *et al.*, 2012).

Os gráficos seguintes apresentam os resultados dos rendimentos, permitindo identificar padrões de eficiência e discutir implicações para o uso doméstico de biogás e outras fontes energéticas.

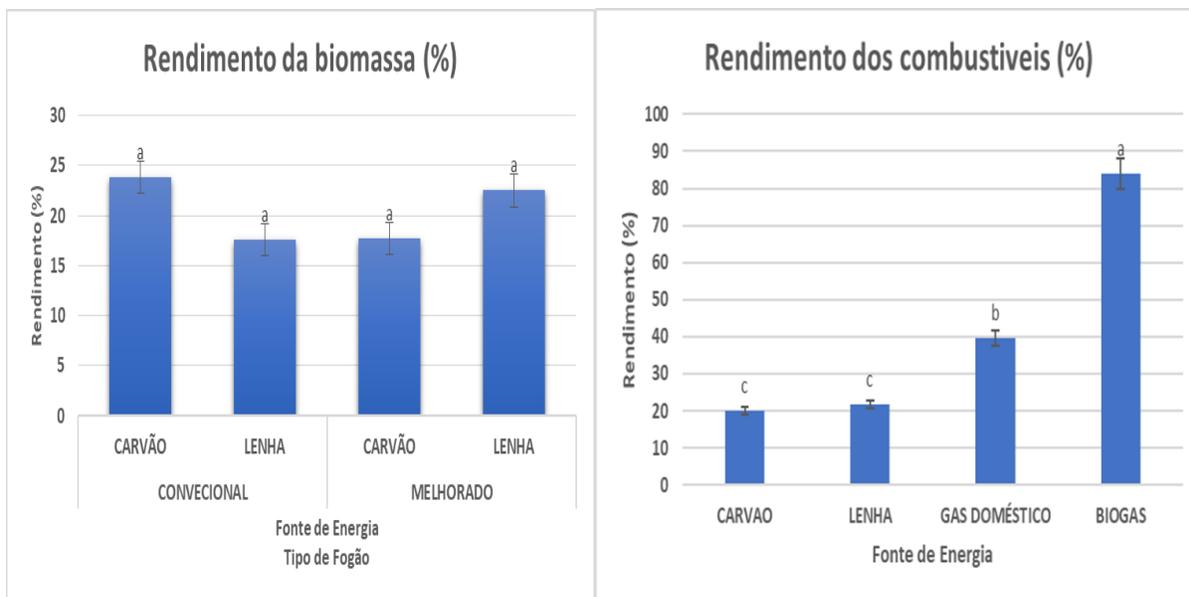


Gráfico 9. Rendimento térmico das biomassas (lenha e carvão) em função do tipo de fogão utilizado (convencional e melhorado)

Gráfico 10. Rendimento térmico comparativo entre todos os combustíveis avaliados

Os resultados obtidos no gráfico 9 demonstram que não houve diferenças estatisticamente significativas de rendimento térmico entre os fogões convencionais e melhorados, nem entre as biomassas. Os valores registados foram 23,05 % para carvão no fogão convencional e 17,70 % no melhorado, e para lenha 17,60 % e 22,50 % respectivamente. Esses resultados estão dentro da faixa típica de rendimento para fogões a biomassa descrita na literatura científica.

Suresh *et al.*, (2016) relatam que a eficiência térmica de fogões tradicionais varia entre 15 % e 17 %, enquanto fogões melhorados podem alcançar 30 % à 35 %, dependendo do tipo de combustível utilizado. Baldwin *et al.*, (2021) complementam que eficiências térmicas para fogões convencionais variam entre 11 % e 26 %, enquanto modelos melhorados podem alcançar até 36 %, embora com grande dependência das condições de uso e do tipo de biomassa. Essa sobreposição de intervalos explica por que, no presente estudo, não ocorreram diferenças estatísticas claras entre os fogões: os rendimentos dos dois modelos situaram-se em faixas que se sobrepõem, confirmando resultados prévios observados em avaliações padronizadas de desempenho energético.

De acordo com os critérios do protocolo Water Boiling Test (WBT) e outras normas internacionais, rendimentos acima de 30 % são considerados indicativos de alta eficiência, enquanto valores entre 15 % e 25 % são comuns em fogões sem melhorias significativas (MacCarty *et al.*, 2010; Jetter *et al.*, 2012). A convergência dos resultados obtidos com as faixas reportadas na literatura sugere que as melhorias do fogão utilizado neste estudo não foram suficientes para superar significativamente o desempenho do modelo convencional, reforçando a importância de considerar não apenas o design, mas também o tipo e o preparo do combustível na análise do rendimento térmico.

Os resultados obtidos no gráfico 10 indicam que não houve diferença estatisticamente significativa no rendimento térmico entre o carvão (20,05 %) e a lenha (21,76 %), confirmando comportamento semelhante entre esses combustíveis sólidos. Em contraste, o biogás apresentou rendimento significativamente superior, chegando a 83,9 %, seguido pelo gás de cozinha com 39,56 %. Esse padrão evidencia que os combustíveis gasosos (gás de cozinha e biogás) oferecem eficiência térmica muito superior aos combustíveis sólidos.

O rendimento térmico de biogás observado encontra respaldo em estudos sobre fogões a gás, que apontam rendimentos entre 70 % e 90 %, sobretudo em condições bem controladas e com boa estanqueidade no sistema de combustão (Bond & Templeton, 2011; Glatzel & Berge, 2013). Esses valores são significativamente maiores que os 15 à 25 % típicos de fogões a biomassas relatados em estudos de WBT (Jetter & Kariher, 2012; MacCarty *et al.*, 2010).

Adicionalmente, estudos com fogões domésticos a gás de cozinha confirmam rendimentos na ordem de 30 % à 40 % em testes padronizados, embora valores mais elevados (acima de 50 %) possam ocorrer em modelos com maior eficiência de combustão e controle de fluxo de combustível (Smith *et al.*, 2015).

A diferença expressiva no rendimento entre combustíveis sólidos e gasosos, mesmo considerando que a potência dos gasosos foi menor, reforça que a eficiência energética do sistema depende mais da completude da queima e da transferência de calor eficiente do que da potência instantânea. Nesse contexto, o biogás se destaca como proposta promissora, pois maximiza o rendimento com menor consumo de energia, mesmo em sistemas de pequena escala.

#### 4.2.2. Índice de Combustão

O índice de combustão é um parâmetro utilizado para avaliar o comportamento térmico e a eficiência de combustíveis durante o processo de queima, relacionando a taxa de liberação de energia com o consumo de massa do material. Este índice permite comparar diferentes combustíveis e tecnologias de combustão sob condições controladas, auxiliando na identificação de alternativas mais eficientes e ambientalmente adequadas (Basu, 2013; Demirbas, 2004).

Em estudos com biomassa sólida, como lenha e carvão vegetal, o índice de combustão é frequentemente aplicado para caracterizar a rapidez e a completude da queima, o que influencia diretamente a eficiência energética e a emissão de poluentes (Gil et al., 2010). A literatura aponta que fogões melhorados tendem a otimizar o índice de combustão, devido ao melhor controle do fluxo de ar e do isolamento térmico, reduzindo perdas energéticas e emissões em comparação com fogões convencionais (MacCarty *et al.*, 2010; Jetter *et al.*, 2012).

Este parâmetro é especialmente relevante em contextos de transição energética, como o de comunidades rurais e urbanas moçambicanas, onde a substituição de tecnologias convencionais por sistemas mais eficientes pode contribuir para a mitigação de impactos ambientais e melhoria da saúde pública (Pachauri *et al.*, 2018).

A seguir, são ilustrados os gráficos de índice de combustão para combustíveis de biomassa (lenha e carvão), comparando o desempenho entre fogões convencionais e melhorados utilizados nos ensaios e de todos os combustíveis no geral.

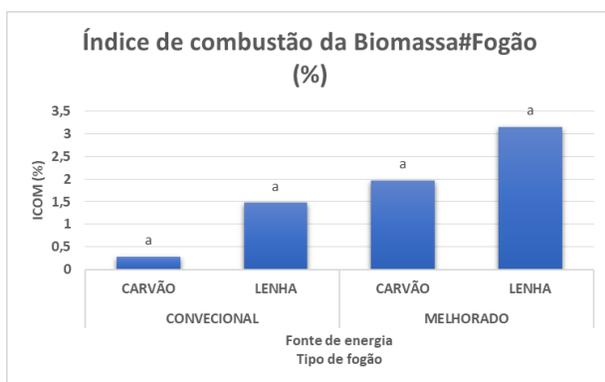


Gráfico 11. Índice de combustão da lenha e do carvão em função do tipo de fogão

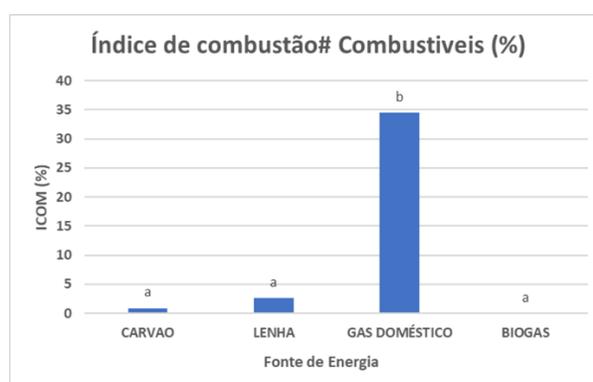


Gráfico 12. Índice de combustão médio comparativo entre todos os combustíveis testados

O gráfico 11 ilustra a comparação do índice de combustão entre carvão e lenha nos dois tipos de fogão avaliados. Observou-se que, no fogão convencional, o carvão apresentou índice de 0,284% e a lenha 1,485%, enquanto no fogão melhorado esses valores foram de 1,972% e 3,16%, respectivamente. Apesar dessas variações percentuais, a análise estatística não indicou diferenças significativas entre os combustíveis ou entre os fogões, evidenciando que o desempenho térmico medido por este parâmetro se manteve estatisticamente semelhante. Resultados análogos foram encontrados por Bailis *et al.*, (2007), que relataram que variações no índice de combustão estão mais relacionadas a propriedades físicas dos combustíveis e ao padrão de utilização do fogão do que ao design em si. Estudos posteriores, como os de Jetter *et al.*, (2012) e MacCarty *et al.*, (2010), corroboram que o índice de combustão é frequentemente menos sensível a melhorias no fogão, refletindo principalmente as características intrínsecas do combustível e as condições operacionais.

O comportamento observado está de acordo com MacCarty *et al.*, (2010), que apontam que o índice de combustão é fortemente influenciado pela interação entre fluxo de ar, distribuição de calor e densidade do combustível, factores que, mesmo em tecnologias mais eficientes como fogões melhorados, podem não gerar diferenças estatisticamente expressivas quando comparados a fogões convencionais. Adicionalmente, Jetter *et al.*, (2012) destacam que parâmetros como humidade e compactação da biomassa impactam de forma decisiva a estabilidade da combustão, podendo explicar a variabilidade encontrada entre lenha e carvão.

O gráfico 12 ilustra a comparação do índice de combustão entre todos os combustíveis avaliados. Os resultados evidenciam que apenas o gás de cozinha apresentou diferença estatisticamente significativa em relação aos demais, registrando índice de combustão de 34,47%, valor substancialmente superior aos obtidos para carvão (0,88%), lenha (2,56%) e biogás (0,01%). Essa superioridade pode ser explicada pela elevada pureza e composição uniforme do gás liquefeito de petróleo (GLP), que proporciona combustão mais completa e rápida, conforme descrito por Jetter *et al.*, (2012), em ensaios comparativos de fogões e combustíveis conduzidos segundo o protocolo Water Boiling Test (WBT).

O baixo desempenho do carvão e da lenha, que não apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre si, está relacionada às características intrínsecas desses combustíveis sólidos, incluindo variação no teor de humidade, densidade aparente e heterogeneidade estrutural, factores que influenciam negativamente a taxa de combustão (MacCarty *et al.*, 2010; Bailis *et al.*, 2007). Além disso, resíduos de cinzas formados durante a queima podem dificultar a transferência de calor e reduzir a intensidade da chama, como reportado por Kshirsagar & Kalamkar (2014).

O biogás apresentou o menor índice de combustão (0,01 %), também sem diferença estatística significativa em relação aos combustíveis sólidos. Tal resultado pode estar associado ao baixo teor de metano do biogás experimental, que reduz o poder calorífico e, por consequência, a intensidade da chama (Mata-Álvarez *et al.*, 2014). Apesar disso, estudos apontam que, quando produzido e purificado em escala adequada, o biogás pode atingir desempenho próximo ao do gás natural, reforçando seu potencial como alternativa renovável (Pachauri *et al.*, 2018).

A análise dos ensaios energéticos possibilitou uma compreensão abrangente do desempenho térmico e da eficiência dos combustíveis testados, evidenciando o potencial do biogás como alternativa relevante às fontes tradicionais utilizadas em cozinhas domésticas. Embora o gás de cozinha tenha se destacado em termos de índice de combustão e menor consumo específico, o biogás apresentou desempenho consistente e competitivo quando comparado à biomassa sólida, reforçando a sua pertinência em contextos onde o acesso a combustíveis comerciais é limitado.

Estes resultados constituem uma base sólida para a etapa subsequente da investigação, dedicada à avaliação da percepção e do nível de aceitação da tecnologia por parte dos produtores locais, bem como à análise do impacto da experiência prática de construção e alimentação do biodigestor na apropriação comunitária do processo.

### 4.3. Percepção e aceitação dos produtores sobre o uso do biogás

A percepção e o nível de aceitação de novas tecnologias energéticas, como o biogás, são determinantes para o sucesso da sua implementação em comunidades rurais. A adoção depende não apenas do desempenho técnico do sistema, mas também de factores socioeconómicos, culturais e ambientais que influenciam as decisões individuais e coletivas (Rogers, 1962; Alemu *et al.*, 2021). No contexto moçambicano, onde o acesso a energias modernas é limitado e o uso de biomassa tradicional permanece predominante, compreender como os produtores percebem o biogás torna-se essencial para avaliar a viabilidade e a sustentabilidade da sua utilização.

Estudos anteriores indicam que a aceitação de biodigestores está fortemente ligada à percepção dos benefícios imediatos, como redução do custo de combustível, melhoria das condições de saúde pelo menor contato com fumaça e aproveitamento do biofertilizante para a produção agrícola (Fitwi *et al.*, 2022; Tariq *et al.*, 2022). Além disso, factores como nível de escolaridade, participação em associações comunitárias e apoio institucional influenciam significativamente a disposição para adoção da tecnologia (Mwirigi *et al.*, 2009).

Na sequência, apresentam-se os gráficos resultantes do inquérito aplicado aos produtores, os quais sintetizam as respostas obtidas acerca do consumo energético mensal e da percepção e nível de aceitação do biogás como fonte alternativa de energia.

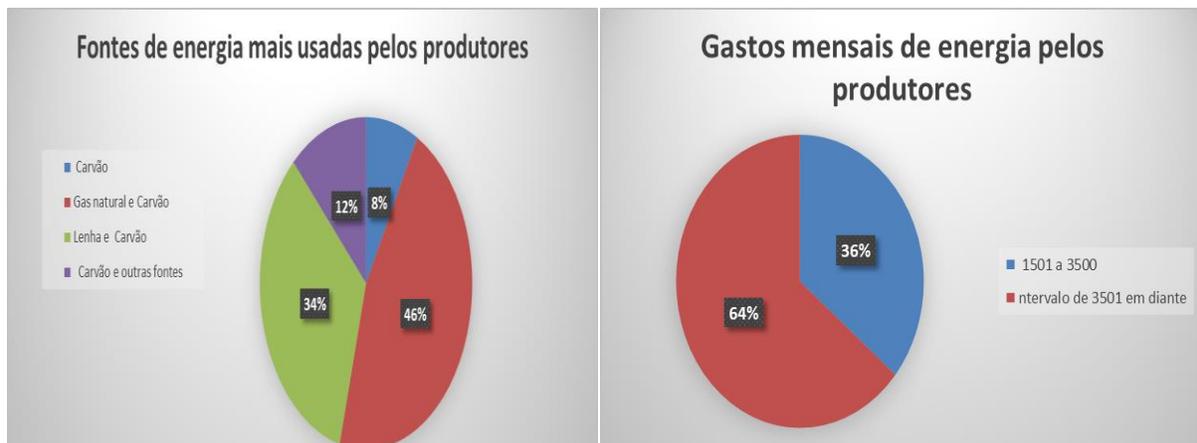


Gráfico 13. Distribuição percentual das combinações de fontes de energia utilizadas pelos produtores locais

Gráfico 14. Distribuição percentual dos custos mensais com energia reportados pelos produtores locais

Os resultados apresentados no primeiro gráfico revelam que a principal combinação de fontes energéticas utilizadas pelos produtores é o gás de cozinha associado ao carvão (46%), seguida pela combinação lenha e carvão (34%). Outras combinações menos representativas incluem carvão e outras fontes (12%) e o uso exclusivo de carvão (8%). Estes dados indicam uma forte presença do carvão no padrão energético local, frequentemente associado a outras fontes mais limpas ou de maior conveniência, como o gás de cozinha.

Este perfil de consumo é coerente com estudos realizados em contextos rurais e periurbanos africanos, que apontam a persistência do carvão e da lenha como combustíveis dominantes, mesmo em locais com crescente acesso a combustíveis modernos como o GLP (Zulu 2013). Tal cenário reflete a hipótese da escada energética, segundo a qual as famílias não substituem completamente as fontes tradicionais quando adoptam alternativas modernas, mas passam a combiná-las conforme a disponibilidade e o custo relativo (Matera *et al.*, 2000).

No caso específico deste estudo, o elevado uso combinado de gás de cozinha e carvão sugere uma estratégia de transição energética parcial, em que o gás é preferido para tarefas que exigem rapidez e limpeza (como ferver água), enquanto o carvão permanece como opção para preparações mais longas ou economicamente mais viáveis. A presença residual de uso exclusivo de carvão (8%) indica que ainda existem barreiras econômicas ou de acesso ao gás, reforçando a importância do biogás como alternativa local e potencialmente mais acessível para diversificar a matriz energética das comunidades estudadas.

O segundo gráfico apresenta a distribuição dos custos mensais de energia declarados pelos produtores. Observa-se que a maioria (64%) reportou gastos superiores a 3.501 MZN mensais, enquanto 36% situam-se na faixa entre 1.501 e 3.500 MZN. Nenhum produtor indicou valores inferiores a 1.500 MZN, sugerindo que o custo energético representa uma parcela considerável do orçamento familiar, especialmente em contextos rurais onde a renda média é limitada.

Este resultado é consistente com estudos sobre a economia doméstica energética em países da África Subsaariana, que evidenciam que o custo dos combustíveis representa uma das maiores despesas recorrentes das famílias, superando frequentemente outras necessidades básicas (Pachauri., 2013).

O predomínio da faixa mais alta de custos pode estar associado à combinação de fontes energéticas, particularmente o uso do gás de cozinha, que, embora mais limpo e eficiente, possui preço elevado e sofre com variações de mercado e limitações de infraestrutura de distribuição (Zulu., 2013).

A implicação destes dados para o estudo reside na potencial relevância do biogás como alternativa de baixo custo e produção local, capaz de reduzir a dependência do gás de cozinha e do carvão adquiridos no mercado. Experiências anteriores em comunidades rurais de Moçambique e outros países africanos demonstram que a adoção do biogás pode reduzir significativamente as despesas com energia, ao mesmo tempo em que melhora as condições de saúde e reduz a pressão sobre recursos florestais (Arthur *et al.*, 2011).

Os gráficos seguintes apresentam informações complementares sobre a produção hortícola e o manejo dos resíduos orgânicos pelos produtores inquiridos. Estas variáveis são fundamentais para compreender a disponibilidade de substratos para biodigestão e a forma como os resíduos são tradicionalmente geridos nas unidades de produção.

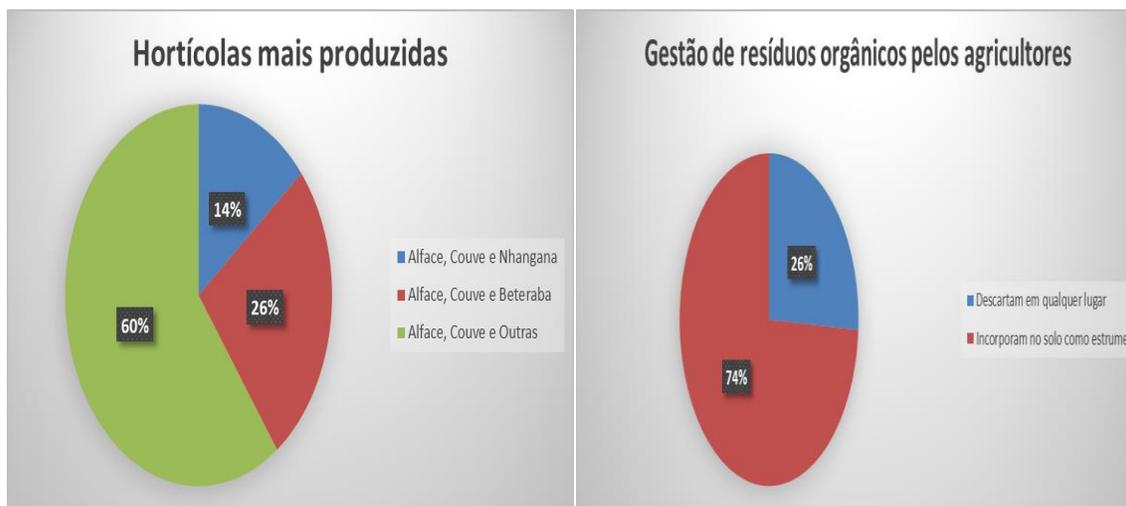


Gráfico 15 – Fontes hortícolas mais produzidas pelos agricultores inquiridos  
Gráfico 16 – Formas de descarte e aproveitamento de resíduos hortícolas pelos agricultores inquiridos

O primeiro gráfico demonstra que a combinação de alface, couve e outras hortícolas predomina entre os produtores (60%), seguida da combinação alface, couve e beterraba (26%) e, por último, alface, couve e nhangana (14%). A predominância da alface e couve confirma o padrão produtivo típico de hortas urbanas e periurbanas em Moçambique, onde estas culturas apresentam ciclo curto, alta produtividade e grande aceitação no mercado local (FAO, 2017; Bila *et al.*, 2020).

A presença de “nhangana” – planta utilizada como hortícola de folha em algumas regiões moçambicanas – embora menos frequente, reforça a diversidade das culturas produzidas e a potencialidade para aproveitamento conjunto dos seus resíduos.

O segundo gráfico evidencia que a maioria dos produtores (74%) incorpora os resíduos diretamente no solo, utilizando-os como estrume, enquanto 26% realizam descarte em locais aleatórios. O aproveitamento dos resíduos para adubação orgânica está alinhado a práticas tradicionais de reciclagem de nutrientes, mas pode limitar a disponibilidade de biomassa para outras finalidades, como a produção de biogás (Kemausuor *et al.*, 2014). A fracção de produtores que descarta os resíduos em locais impróprios revela um potencial de mitigação de impactos ambientais caso tecnologias como biodigestores sejam introduzidas, oferecendo alternativa de valorização energética e sanitária.

Os gráficos seguintes apresentam os resultados referentes ao conhecimento prévio dos produtores sobre energias renováveis e à aceitação da tecnologia do biogás. Esses indicadores são fundamentais para avaliar o grau de sensibilização da comunidade e o potencial de adopção de soluções energéticas alternativas no contexto rural analisado.

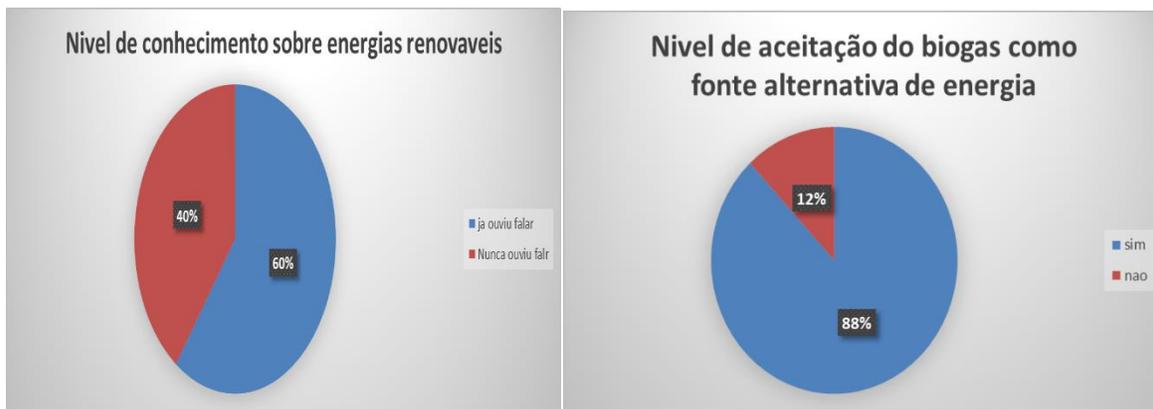


Gráfico 17 – Nível de conhecimento dos produtores sobre energias renováveis  
Gráfico 18 – Nível de Aceitação do biogás como fonte alternativa de energia

Os resultados do gráfico 17 evidenciam que 60% dos produtores entrevistados já haviam ouvido falar sobre energias renováveis, enquanto 40% nunca tiveram contato com o tema. Esse cenário indica um nível intermediário de sensibilização, coerente com estudos realizados em contextos rurais africanos, onde a informação sobre tecnologias sustentáveis ainda é limitada e frequentemente transmitida por organizações de desenvolvimento ou redes comunitárias (Amigun *et al.*, 2012). A literatura aponta que a falta de conhecimento prévio constitui uma barreira inicial para a adoção de tecnologias limpas, sendo essencial a promoção de programas de educação e demonstrações práticas para aumentar a confiança e reduzir percepções de risco (Mwirigi *et al.*, 2014).

Quanto à aceitação do biogás como fonte alternativa de energia, 88% dos produtores manifestaram-se favoráveis à tecnologia, contra apenas 12% que a rejeitaram. Essa elevada taxa de aceitação é consistente com investigações em comunidades rurais do Quênia e Uganda, onde factores como benefícios percebidos (redução de custos energéticos e fertilizante orgânico produzido) e demonstrações práticas aumentaram significativamente a predisposição para adoção (Katuwal., 2009). Além disso, a aceitação elevada observada neste estudo pode estar associada à experiência directa proporcionada pelo processo participativo de construção e alimentação do biodigestor, o que, segundo Mwirigi *et al.* (2014), é determinante para transformar conhecimento teórico em apropriação tecnológica.

Apesar da elevada aceitação, o desafio permanece na viabilização económica e técnica da tecnologia, pois, conforme apontam Surendra *et al.*, (2014), a sustentabilidade do biogás em comunidades depende não apenas da aceitação inicial, mas também da capacidade de manutenção, disponibilidade contínua de substrato e apoio institucional para capacitação.

#### **4.4. Experiência Participativa de Construção do Biodigestor**

A experiência prática de construção e alimentação do biodigestor de 20 L, realizada com os produtores locais, teve carácter participativo e visou não apenas a transferência de tecnologia, mas também a promoção da apropriação comunitária do processo. Durante as actividades de campo, observou-se elevada motivação e engajamento dos participantes, refletida na disposição para replicar a tecnologia em escalas superiores (50–100 L) em futuras iniciativas comunitárias.

Do ponto de vista da aceitação, verificou-se que a maioria dos produtores mostrou-se aberta a novas tecnologias e disposta a assumir riscos para obter benefícios percebidos, enquadrando-se no perfil de adoptantes precoces e inovadores. Este padrão é consistente com investigações anteriores sobre tecnologias de bioenergia em contextos rurais africanos, que destacam a influência positiva do envolvimento direto e do aprendizado prático na adoção sustentável (Batinge *et al.*, 2019).

Além do impacto imediato na compreensão técnica do funcionamento do biodigestor, a actividade permitiu o intercâmbio de saberes locais e científicos, reforçando a noção de coprodução do conhecimento. Estudos apontam que abordagens participativas aumentam a eficácia de programas de energias renováveis, uma vez que os produtores tendem a valorizar mais as tecnologias que ajudam a construir e adaptar à sua realidade (Mwirigi *et al.*, 2014).

Os produtores destacaram benefícios adicionais percebidos, como a possibilidade de utilização do biofertilizante no enriquecimento dos solos agrícolas, reduzindo custos com insumos e aumentando a produtividade. Uma evidência confirmada por estudos prévios demonstra que o digestato proveniente de resíduos hortícolas contém nutrientes essenciais como nitrogénio e fósforo (Mata-Alvarez *et al.*, 2014).

## V. CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos no presente estudo sobre a avaliação do potencial de produção de biogás a partir de resíduos hortícolas, constatou-se que:

Os resíduos de couve e alface possuem elevado teor de humidade (95,41% e 88,70%, respetivamente) e baixa fração mineral (cinzas < 2%), resultando em matéria orgânica superior a 98%. O pH próximo da neutralidade (5,85–6,00) favorece a actividade das bactérias metanogénicas.

O uso de fogões melhorados aumentou a eficiência da biomassa, reduzindo perdas de massa e o consumo específico. No entanto, esta melhoria não é suficiente para atingir a eficiência dos combustíveis gasosos, evidenciando que tanto o design do fogão como a qualidade do combustível são determinantes para o desempenho energético.

O biogás apresenta menor potência térmica (0,22 kW) em comparação à lenha e carvão (1,9–2,07 kW), mas com consumo específico inferior, evidenciando maior aproveitamento energético relativo. Os fogões melhorados para biomassa reduziram o consumo específico em até 50% em relação aos convencionais.

O rendimento dos combustíveis gasosos foi superior ao dos combustíveis sólidos: o gás de cozinha ultrapassou 80%, o biogás aproximou-se de 40% e a biomassa ficou abaixo de 25%. O índice de combustão evidenciou o desempenho superior do GLP e a estabilidade do biogás em comparação à biomassa.

As combinações de energia utilizadas pelos produtores são gás de cozinha e carvão (46%) e lenha e carvão (34%), refletindo a dependência de combustíveis fósseis e biomassa sólida. A maioria (60%) já tinha ouvido falar de energias renováveis e 88% demonstrou aceitação imediata do biogás, sugerindo predisposição positiva para adopção da tecnologia.

A prática de utilização de resíduos orgânicos como estrume por 74% dos inquiridos pode facilitar a integração do biofertilizante do biodigestor às rotinas agrícolas locais.

A construção e alimentação do biodigestor de 20 L revelou-se eficaz para a transferência de tecnologia e apropriação comunitária. Os produtores mostraram elevado interesse e motivação, sugerindo que poderão replicar a tecnologia em unidades maiores. A experiência permitiu também o intercâmbio de saberes locais e científicos e evidenciou benefícios adicionais, como a utilização do biofertilizante, que pode reduzir custos agrícolas e aumentar a produtividade.

## **VI. RECOMENDAÇÕES**

### **Para a academia e pesquisadores**

- Investir em ensaios laboratoriais complementares para aprofundar o conhecimento sobre o comportamento dos resíduos hortícolas, o tipo e a proporção de inóculos mais adequados para maximizar a produção de biogás;
- Desenvolver programas de formação prática sobre energias renováveis e operação/manutenção de biodigestores, especialmente para produtores com menor conhecimento prévio, garantindo sustentabilidade do uso da tecnologia
- Dar continuidade ao presente projecto, oferecendo apoio técnico e acompanhamento à associação participante, bem como replicando a experiência em outras comunidades com condições semelhantes.

### **Para os produtores**

- Recomenda-se o uso de fogões melhorados para reduzir perdas de energia durante a combustão, aumentando a eficiência do biogás e das biomassas sólidas.
- Avaliar a possibilidade de escalonamento da tecnologia para biodigestores domésticos de maior volume, reduzindo descarte inadequado e promovendo a fertilização orgânica dos solos com o biofertilizante obtido considerando custos e benefícios locais.

### **Para a sociedade em geral**

- Incentivar a abertura para a adopção de tecnologias sustentáveis e inovadoras, promovendo maior interesse por soluções energéticas de baixo impacto ambiental.

## VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abbasi, T., Abbasi, S. A., & Abbasi, T. (2012). *A brief history of anaerobic digestion and biogas*. SpringerBriefs in Environmental Science.

AEQ – Associação de Educação Química. (2015). *Manual técnico de biodigestores rurais*. Brasília: AEQ.

Alemu, B. G., et al. (2021). Determinants of willingness to adopt domestic biogas among rural households in Malawi. *Renewable Energy*, 171, 1350–1363.

Altieri, M. A., & Toledo, V. M. (2011). The agroecological revolution in Latin America: Rescuing nature, ensuring food sovereignty and empowering peasants. *Journal of Peasant Studies*, 38(3), 587–612.

Amaral, A. (2008). *Biogás e energias renováveis: Um guia prático*. Editora Sustentável.

Amigun, B., Parawira, W., Musango, J. K., Aboyade, A. O., & Badmos, A. S. (2012). Anaerobic biogas generation for rural area energy provision in Africa. *Biomass and Bioenergy*, 47, 79–82.

AOAC – Association of Official Analytical Chemists. (1995). *Official methods of analysis* (16<sup>a</sup> ed.). AOAC International.

Appels, L., Baeyens, J., Degreève, J., & Dewil, R. (2008). Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34(6), 755–781.

Araújo, M. B., Thuiller, W., & Pearson, R. G. (2010). Climate change impacts on European biodiversity: A review. *Global Change Biology*, 16(5), 1423–1439.

Arthur, R., Baidoo, M. F., & Antwi, E. (2011). Biogas as a potential renewable energy source: A Ghanaian case study. *Renewable Energy*, 36(5), 1510–1516.

Alves M., 1998. Estudo e caracterização de digestores anaeróbios de leito fixo. Tese de doutoramento em Engenharia Biológica e Química. Departamento de Engenharia Biológica – Universidade do Minho, Minho, Portugal.

Bailis, R., Ogle, D., Still, D., Smith, K. R., & Edwards, R. (2004). *The water boiling test (WBT) version 3.0*. Aprovecho Research Center.

Bailis, R., et al. (2007). Performance testing for household energy and health interventions: Biomass stove standards and protocols. *Energy for Sustainable Development*, 11(2), 57–70. [https://doi.org/10.1016/S0973-0826\(08\)60455-6](https://doi.org/10.1016/S0973-0826(08)60455-6)

Baldwin, S. F., Still, D., & MacCarty, N. (2021). Improved biomass cookstove performance: Thermal efficiency and fuel use under standardized testing. *Energy for Sustainable Development*, 65, 88–96. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2021.01.004>

Basu, P. (2013). *Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: Practical design and theory* (2nd ed.). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2011-0-07003-2>

Batinge, B., Musango, J. K., & Brent, A. C. (2019). Bio-digester adoption in rural Africa: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 108, 49–60.

Bezerra, M., & Machado, T. (2016). Fundamentals of biogas production from biomass. *Renewable Energy Research*, 22(3), 123–134.

Bhattacharyya, J., Kumar, S., & Devotta, S. (2008). Studies on acidification in two-phase biomethanation process of municipal solid waste. *Waste Management*, 28, 164–169.

Bila, A., et al. (2020). Caracterização da horticultura urbana em Maputo: desafios e oportunidades para a segurança alimentar. *Revista Moçambicana de Estudos Rurais*, 4(2), 45–59.

Birnie, P., Boyle, A., & Redgwell, C. (2009). *International Law and the Environment* (3rd ed.). Oxford University Press.

Bond, T., & Templeton, M. R. (2011). History and future of domestic biogas plants in the developing world. *Energy for Sustainable Development*, 15(4), 347–354.

Bouallagui, H., Ben Cheikh, R., Marouani, L., & Hamdi, M. (2005). Mesophilic biogas production from fruit and vegetable waste in a tubular digester. *Bioresource Technology*, 86(1), 85–89.

Chen, Y., Cheng, J. J., & Creamer, K. S. (2008). Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *Bioresource Technology*, 99(10), 4044–4064.

Club of Mozambique. (2022). Post-harvest losses cost Mozambique 30% of crop production.

Creswell, J. W., & Plano Clark, V. L. (2017). *Designing and conducting mixed methods research* (3<sup>a</sup> ed.). SAGE Publications.

Demirbas, A. (2004). Combustion characteristics of different biomass fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30(2), 219-230. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2003.10.004>

Deublein, D., & Steinhäuser, A. (2008). *Biogas from waste and renewable resources: An introduction*. Wiley-VCH.

Deganutti, R, et al. Biodigestores rurais: *modelo indiano, chinês e batelada*. In: *40 encontro de energia meio rura, Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação*. UNESP, São Paulo, 2002.

European Biogas Association (EBA). (2022). *EBA Statistical Report 2022*. EBA.

Estrela, C. C., & Pott, C. M. (2017). Histórico ambiental: Desastres ambientais e o despertar de um novo pensamento. *Estudos Avançados*, 31, 271–283.

FAO. (1986). *Biogas: Technology and implementation*. FAO Corporate Document Repository.

FAO. (2017). *Small-scale bioenergy initiatives: Brief description and preliminary lessons on livelihood impacts from case studies in Asia, Latin America and Africa*. FAO.

FAO. (2021). *Fruit and vegetables – Your dietary essentials*. FAO.

FAOSTAT. (2022). *Food and agriculture data*. FAOSTAT.

Fang, D., & Richards, T. J. (2018). New maize variety adoption in Mozambique: A spatial approach. *Canadian Journal of Agricultural Economics*, 66(3), 423–449.

- Ferdes, M., Zăbavă, B. S., Paraschiv, G., Ionescu, M., Dincă, M. N., & Moiceanu, G. (2022). *Food Waste Management for Biogas Production in the Context of Sustainable Development*. *Energies*, 15(15), 6268. Disponível em <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/6/1217>
- Ferreira, M., & Almeida, A. (2021). Environmental impact of organic waste in urban areas. *Waste Management*, 35(4), 210-225.
- Ferreira, V. (2010). *Contribuição para o estudo da modelação da digestão anaeróbia de resíduos sólidos: Estudo da influência da geometria do reator na cinética do processo*. Edições Colibri.
- Fitwi, B. A., et al. (2022). Uptake and user perspectives of household biogas technology: Evidence from rural Ethiopia. *Environmental Research Communications*, 4(7).
- Fröner-Lacerda, L. R. R., Sganzerla, W. G., Lacerda, V. F., Solera, R., Sillero, L., Pérez, M., & Forster-Carneiro, T. (2024). *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*.
- Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM). (2015). *Manual de aproveitamento energético de resíduos orgânicos e produção de biogás*. Belo Horizonte: FEAM.
- Gil, M. V., Oulego, P., Casal, D., Pevida, C., Pis, J. J., & Rubiera, F. (2010). Thermal behaviour and kinetics of coal/biomass blends during co-combustion. *Bioresource Technology*, 101(14), 5601-5608. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.02.008>
- Glatzel, S., & Berge, N. (2013). Review of biogas utilisation, co-generation and crop responses in tropical agriculture. *Biosystems Engineering*, 68(1), 27–34.
- GNPW Group. (2024). *O papel do biogás na gestão de resíduos e redução de emissões*. Retrieved August 6, 2025, from <https://www.gnpw.com.br/blog>
- Goldemberg, J., & Paletta, F. C. (2012). *Energias renováveis: Série energia e sustentabilidade*. Blucher.
- Grobicki, A. (1997). *Design manual for anaerobic treatment of industrial effluent*. WRc.

Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., & Anderson, R. E. (2014). *Multivariate data analysis* (7<sup>a</sup> ed.). Pearson Education.

International Energy Agency (IEA). (2022). *CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion*. Retrieved August 6, 2025, from <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-from-fuel-combustion-2022>

IEA Bioenergy. (2023). *Biogas production and utilization: A global perspective*. IEA.

Instituto de Investigação Agrária de Moçambique (IIAM). (1994). *Estudos de classificação e mapeamento de solos do Distrito de Kamavota*. Maputo: IIAM.

INE – Instituto Nacional de Estatística. (2020). *Estatísticas de energia em Moçambique: 2020*. INE.

IntechOpen. (2024). Thermodynamic properties of biogas. In *Biogas as a sustainable fuel and feedstock*. IntechOpen.

IPCC. (2014). *Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability*. Intergovernmental Panel on Climate Change.

IPCC. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of working group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.

IPCC. (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report. Cambridge University Press.

IPEA. *Mudança do Clima no Brasil: aspectos econômicos, sociais e regulatórios*. Brasília, 2011. Disponível em: . Acesso em: 15 dez. 2014.

United States Environmental Protection Agency (US EPA). (2021). *AgSTAR: Biogas recovery in the United States*. Retrieved August 6, 2025, from <https://www.epa.gov/agstar>

ISTA – International Seed Testing Association. (2009). *International rules for seed testing*. ISTA.

Jetter, J. J., & Kariher, P. (2012). Solid-fuel household cookstoves: Characterization of performance and emissions. *Biomass & Bioenergy*, *41*, 125–136.

Junqueira, S. L. C. D. (2014). *Geração de energia através de biogás proveniente de esterco bovino: Estudo de caso na fazenda Aterrado* [Dissertação de mestrado]. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica DEM/POLI/UFRJ.

Kalia, A., & Singh, J. (2020). Valorization of vegetable waste for biogas production: A compositional and kinetic approach. *Applied Energy Journal*.

Karekezi, S. (2002). Poverty and energy in Africa: A brief review. *Energy Policy*, *30*(11–12), 915–919.

Karlsson, A., Truong, X. B., Gustavsson, J., Svensson, B. H., Nilsson, F., & Ejlertsson, J. (2014). Anaerobic treatment of municipal solid waste and food waste – Influence of co-digestion and operational parameters. *Waste Management*, *34*(11), 1730–1737. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.05.006>

Khalid, A., Arshad, M., Anjum, M., Mahmood, T., & Dawson, L. (2011). The anaerobic digestion of solid organic waste: An overview. *Waste Management*, *31*(8), 1737–1744.

Khan, I. U., Othman, M. Z., & Jamil, T. S. (2020). Anaerobic digestion process: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *117*, 109486.

Keohane, R. O., & Victor, D. G. (2010). The regime complex for climate change. *Perspectives on Politics*, *9*(1), 7–23. <https://doi.org/10.1017/S1537592709992890>

Kelleher, C., Leahy, J., & Tucker, J. (2002). Anaerobic digestion and biogas production. *Bioresource Technology*, *15*(2), 89–105.

Kemausuor, F., et al. (2014). Agricultural residue-based bioenergy potential in Ghana: A spatially explicit estimation approach. *Renewable Energy*, *62*, 19–27.

- Kshirsagar, M. P., & Kalamkar, V. R. (2014). A comprehensive review on biomass cookstoves and a systematic approach for modern cookstove design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 580–603.
- Kumar, A., et al. (2016). Performance evaluation of biogas and LPG under domestic cooking conditions. *Energy for Sustainable Development*, 33, 14–22.
- Kutz, M. (2019). *Handbook of combustion technologies*. Springer.
- Katuwal, H., & Bohara, A. K. (2009). Biogas: A promising renewable technology and its impact on rural households in Nepal. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2668–2674.
- Lapa. (2012). *Apontamentos das aulas de Mestrado de Energia e Bioenergia*.
- Lemmer, A., Neumann, P., & Bischof, F. (2023). Environmental impact of biogas production: A review. *Environmental Research*, 76(1), 85–97.
- Lora, E. E. S., & Andrade, R. (2012). *Gaseificação e pirólise para conversão de biomassa em eletricidade e biocombustíveis*. Brasil.
- Lora, E. E. S., & Venturini, O. J., et al. (2012). *Biomassa para energia*. Interciência.
- MacCarty, N., Still, D., & Ogle, D. (2010). Fuel use and emissions performance of fifty cooking stoves in the laboratory and related benchmarks of performance. *Energy for Sustainable Development*, 14(3), 161–171.
- Magalhães, F. (1986). *Biodigestores e gestão de resíduos*. Editora Tecnológica.
- Mabecua, F., Schwede, S., Lucas, C., & Klintenberg, P. (2021). Agro-waste, a solution for rural electrification? Assessing biomethane potential of agro-waste in Inhambane Province, Southern Mozambique. *Water*, 13(7), 939.
- Mabecua, J., Casimiro, A., & Bila, F. (2021). Avaliação de resíduos agrícolas para produção de energia renovável em Moçambique. *Revista Moçambicana de Ciências Agrárias*, 13(2), 45–56.

Mabecua, J. D., Nhantumbo, A. N., & Wasswa, J. (2021). Agro-waste, a solution for rural electrification? Assessing biomethane potential from organic residues in Inhambane, Mozambique. *Water*, 13(7), 939.

Mabecua, J., Nhantumbo, N., & Chabane, J. (2021). Potencial de resíduos agrícolas para produção de biogás na Província de Inhambane. *UEM – Faculdade de Agronomia*.

Maomao, Y., Yanping, L., Xue, C., Xiujin, L., Hairong, Y., & Dexun, Z. (2016). Anaerobic digestion performance analysis of mixed vegetable wastes under gradient organic loading rate. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 32(18), 213–218.

Maranon, E., et al. (2012). Anaerobic digestion of food waste: A comparison of the performance of mesophilic and thermophilic processes. *Bioresource Technology*, 124, 258–263.

Masera, O. R., Saatkamp, B. D., & Kammen, D. M. (2000). From linear fuel switching to multiple cooking strategies: A critique and alternative to the energy ladder model. *World Development*, 28(12), 2083–2103.

Mata, T., Martins, A., & Oliveira, O. (2021). Biogas and bioenergy: Combustion characteristics and energy potential. *Renewable Energy Journal*, 45(3), 220–234.

Mata-Alvarez, J. (2003). *Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes*. IWA Publishing.

Mata-Alvarez, J., Dosta, J., Macé, S., & Astals, S. (2014). Codigestion of solid wastes: A review of its uses and perspectives including modeling. *Critical Reviews in Biotechnology*, 34(1), 46–63.

Ministério da Terra, Ambiente e Desenvolvimento Rural. (2021). *Plano de desenvolvimento urbano e rural de Moçambique*. MITADER.

Ministério da Terra, Ambiente e Desenvolvimento Rural. (s.d.). *Estratégia Nacional de Adaptação e Mitigação às Mudanças Climáticas (ENAMMC)*. MITADER.

- Morales-Polo, C., Cledera-Cuesta, E., & Moratilla Soria, B. Y. (2021). Enhancing energy recovery in form of biogas, from vegetable and fruit wholesale markets by-products and wastes, with pretreatments. *Plants*, *10*(7), 1298. <https://doi.org/10.3390/plants10071298>
- Mwirigi, J., Balana, B., Mugisha, J., Walekhwa, P., Melamu, R., Nakami, S., & Makenzi, P. (2014). Socio-economic hurdles to widespread adoption of small-scale biogas digesters in Sub-Saharan Africa: A review. *Biomass and Bioenergy*, *70*, 17–25.
- Mwirigi, J., Balana, B. B., Mugisha, J., Walekhwa, P., Melamu, R., Nakami, S., & Makenzi, P. (2009). Socio-economic hurdles to widespread adoption of small-scale biogas digesters in Sub-Saharan Africa: A review. *Biomass and Bioenergy*, *33*(8), 1135-1143. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.05.002>
- Nasir, I. M., Ghazi, T. I. M., & Omar, R. (2012). Anaerobic digestion technology in livestock manure treatment for biogas production: A review. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, *5*(2), 66–71.
- Nogueira, L. A. H. (1986). *Biomassa para energia*. São Paulo: Edusp.
- Oliveira, P. A. V., & Higarashi, M. M. (2006). *Geração e utilização de biogás em unidades de produção de suínos*. Embrapa Suínos e Aves.
- Oliver, G., Johnson, R., & Brown, H. (2008). Bioenergy: Production and uses. *Energy Policy Journal*, *25*(6), 345–359.
- Patton, M. Q. (2002). *Qualitative research & evaluation methods* (3<sup>a</sup> ed.). SAGE Publications.
- Pachauri, S., & Rao, N. D. (2013). Gender impacts and determinants of energy poverty: Are we asking the right questions? *Current Opinion in Environmental Sustainability*, *5*(2), 205–215.
- Pachauri, S., van Ruijven, B. J., Nagai, Y., Riahi, K., van Vuuren, D. P., Brew-Hammond, A., & Nakicenovic, N. (2018). Pathways to achieve universal household access to modern energy by 2030. *Environmental Research Letters*, *8*(2).

Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). (2023). *Mudança climática 2023: Relatório de síntese. Resumo para policymakers.*

PDNA – Avaliação de Necessidades Pós-Desastre. (2019). ***Moçambique: Avaliação de necessidades pós-desastre do Ciclone Idai.*** Governo de Moçambique, Banco Mundial, União Europeia e Nações Unidas.

Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD). (2023, 24 de novembro). Moçambique – Climate Promise. Acessado em: <https://climatepromise.undp.org/what-we-do/where-we-work/mozambique>

Prati, L. (2010). Bioenergy and waste management: A sustainable approach. *Renewable Energy Journal*, 28(2), 89–102.

Ramos, A. R. (2013). *Manual de técnicas laboratoriais em solos.* Universidade Federal de Lavras.

Ramesh, S., Balakrishnan, M., & Kumar, V. (2018). Impact of vegetable waste on climate change and potential solutions. *Journal of Environmental Science*, 45(3), 145–157.

Resch, C., Braun, R., & Kirchmayr, R. (2011). The influence of substrate composition on biogas production and process stability. *Bioresource Technology*, 102(6), 3270-3277. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.11.110>

Ribeiro, W. C. (2002). *Mudanças climáticas: realismo e multilateralismo.* Terra Livre, 18(1), 75-84.

Rodriguez, C., Otero, M., & Gómez, X. (2021). Digestate as biofertilizer: Soil amendment and nutrient recovery. *Journal of Environmental Management*, 279, 111822. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111822>

Rogers, E. M. (1962). *Diffusion of innovations.* Free Press.

Rogers, E. M. (2003). *Diffusion of innovations* (5th ed.). Free Press.

Roitman, T. (2023). *Diálogos da energia – Onze temas da transição energética: Biogás e biometano na nova economia* (p. 41).

Schreinemachers, P., Simmons, E. B., & Wopereis, M. C. S. (2018). Tapping the economic and nutritional power of vegetables. *Global Food Security*, 16, 36–45.

Suresh, R., Singh, V. K., Malik, J. K., Datta, A., & Pal, R. C. (2016). Evaluation of the performance of improved biomass cooking stoves with different solid biomass fuel types. *Biomass and Bioenergy*, 95, 27–34

Smith, K. R., et al. (2015). *Evaluating cookstove performance in field settings: Implications for health and environmental impacts*. *Environmental Health Perspectives*, 123(6), 490–498. Disponível: [https://ehp.niehs.nih.gov/doi/full/10.1289/ehp.1408640?utm\\_source=chatgpt.com](https://ehp.niehs.nih.gov/doi/full/10.1289/ehp.1408640?utm_source=chatgpt.com)

Smith, A.; Watson, K.; Brown, L. Risk assessment and flammable liquid management in chemical laboratories. *Journal of Chemical Health and Safety*, v. 23, n. 4, p. 25-33, 2016.

Silva, C. A., Mendonça, E. S., & Alleoni, L. R. F. (2010). Atributos químicos e acidez potencial de resíduos orgânicos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 34(6), 1743–1752.

SNV Netherlands Development Organisation. (2020). *Biogas support programme: Community participation and sustainability*. Retrieved August 6, 2025, from <https://snv.org/publications>

Ssahaku, M., & Nyarko, S. (2024). *A systematic review of the design considerations for the operation and maintenance of small-scale biogas digesters*. *Heliyon*, 10(1), e24019.

SOARES, Itânia Pinheiro; SCHULTZ, Emerson Léo; GAMBETTA, Rossano; GONÇALVES, Silvia Belém. *Biogás e suas contribuições para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável*. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2022. (Documentos / Embrapa Agroenergia, ISSN 2177-4439; n. 49).

Solera, R., Romero, L. I., & Sales, D. (2008). Anaerobic treatment of wastewater with high sulfate content. *Process Biochemistry*, 43(4), 447–453. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2008.01.018>

SOUSA, A. L.; RIZZATO, M. L. Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos: uma revisão. *Scientific Eletronic Archives*, v. 15, n. 2, 2022.

Suharyat, M., Maulana, M., & Huda, N. (2021). Empowering the community in the use of livestock waste biogas as a sustainable energy source. *Sustainability*, 14(21), 14121. <https://doi.org/10.3390/su142114121>

Surendra, K. C., Takara, D., Hashimoto, A. G., & Khanal, S. K. (2014). Biogas as a sustainable energy source for developing countries: Opportunities and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 846–859. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.015>

Tariq, A., et al. (2022). Socio-economic factors influencing household-level biogas adoption: evidence from Pakistan. *Energy Policy*, 158, 112–123. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112382>

TSE4ALLM. (2023). *Oportunidades e desafios para a implementação de projectos de biogás em Moçambique*. TSE4ALLM.

UNDP – United Nations Development Programme. (2023). *Mozambique – Climate promise*. UNDP.

United Nations Environment Programme (UNEP). (2022). *Emissions Gap Report 2022: The Closing Window – Climate crisis calls for rapid transformation of societies*. Nairobi: UNEP. Retrieved from <https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2022>

UNFCCC. (1992). *United Nations Framework Convention on Climate Change*. United Nations.

UNFCCC. (2015). *Adoption of the Paris Agreement: Report of the Conference of the Parties to the UNFCCC on its twenty-first session (FCCC/CP/2015/10/Add.1)*. UNFCCC.

UNFCCC. (2021). *Mozambique First Nationally Determined Contribution – Updated submission*. UNFCCC.

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). (2024). *The Kyoto Protocol*. Retrieved August 6, 2025, from [https://unfccc.int/kyoto\\_protocol](https://unfccc.int/kyoto_protocol)

United States Environmental Protection Agency (US EPA). (2021). *AgSTAR: Biogas recovery in the United States*. Retrieved August 6, 2025, from <https://www.epa.gov/agstar>

United Nations Human Settlements Programme. (2021). *Waste management strategies in urban areas*. UN-Habitat.

United Nations Industrial Development Organization (UNIDO). (2023). *Biogas for sustainable rural development in Mozambique: Pilot initiatives and lessons learned*. Vienna: UNIDO. Retrieved from <https://www.unido.org/publications>

VITA – Volunteers in Technical Assistance. (1985). *Testing the efficiency of wood-burning cookstoves: Provisional international standards*. VITA.

Vongvisith, B., Chanthaboun, K., Changmei, W., Fang, Y., Kai, W., Xingling, Z., et al. (2020). Study potential and characteristics of mixture leafy vegetable wastes for biogas production in anaerobic batch digestion. *Energy Sources, Part A*, 46(1), 168–178.

Yan, H., Zhao, C., Zhang, J., Zhang, R., Xue, C., Liu, G., & Chen, C. (2017). Study on biomethane production and biodegradability of different leafy vegetables in anaerobic digestion. *AMB Express*, 7, 27. <https://doi.org/10.1186/s13568-017-0325-1>

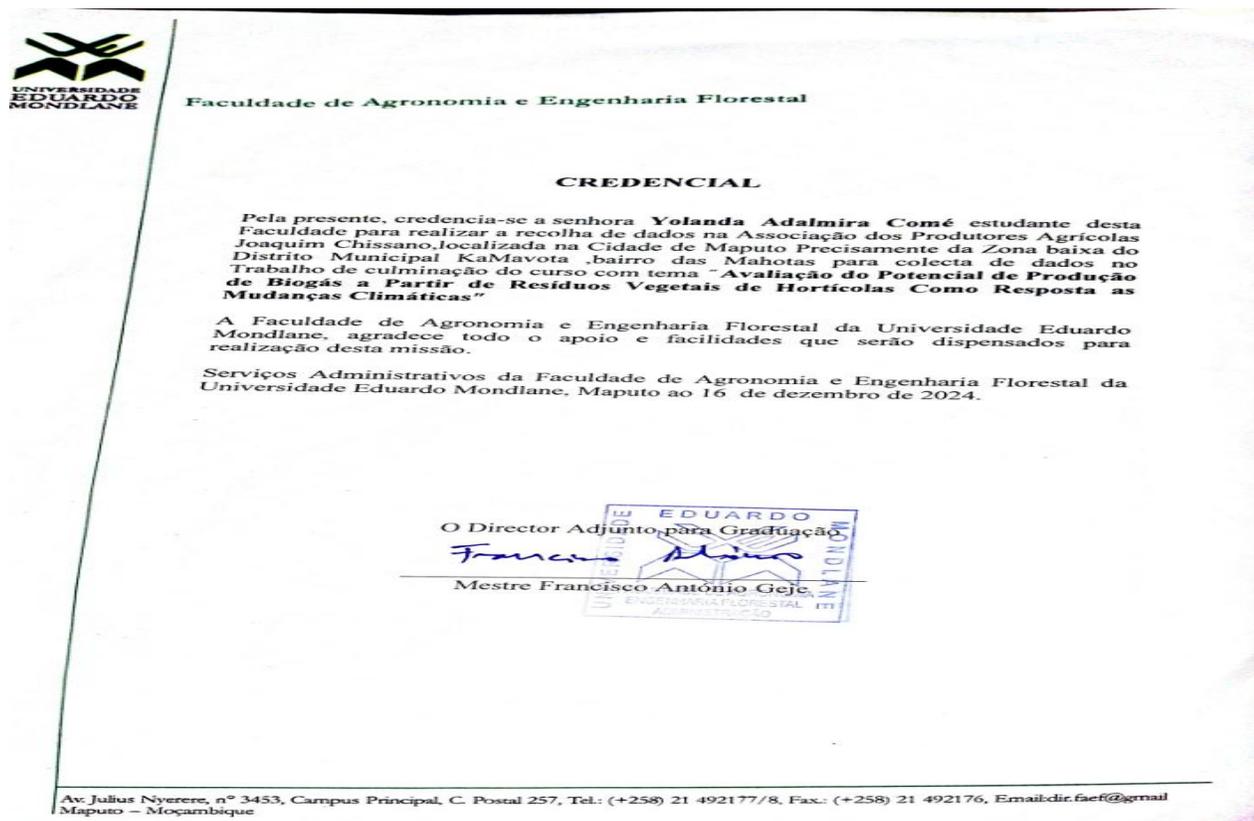
Yeboah, F., Boateng, D. O., & Mensah, A. (2024). Food waste valorisation for sustainable energy generation in Sub-Saharan Africa: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 172, 113073.

Zidora, A. R., et al. (2022). *Agricultural Value Chain in Mozambique: Potential and Constraints*. Maputo: UEM.

Zulu, L. C., & Richardson, R. B. (2013). Charcoal, livelihoods, and poverty. *Energy for Sustainable Development*, 17(2), 127–137.

# 6. ANEXOS

## Anexo 1. Credencial para realização de actividades no campo



## Anexo 2. Tabelas resultantes do teste de fervura

TESTE DE FERVURA DA LENHA FOGAO CONVENCIONAL			
Tempo	I Ensaio(°C)	II Ensaio(°C)	III Ensaio(°C)
0	21	21	21,5
5	58,1	46,7	55,5
10	75,3	70,9	92,5
15	98,6	93,4	100,5
20	100	99,7	100,5
25	100,1	100	100,7
30	100,1	100,3	100,7
35	100,1	100,3	100,8
40	100,4	96,9	100,8
45	100,4	96,4	100,6
50	100,2	95,4	100
55	100,1	94,6	98,7
60	101,2	93,2	97
65	99,4		95,2
70	99,6		93,7
75	98,2		
80	96		
85			
90			
95		98	
100			
105			
110			

I Ensaio				
Intes	Estado Inicial(0 mim)	Alta potencia a frio	Alta potencia a quente(T=15 mim)	Baixa Potencia (T=45 mim)
Peso do Fogão(Kg)	4,12			
Peso da panela + Tampa(Kg)	0,4			
Peso da Lenha(Kg)	0,6			
Temperatura Ambiente(°C)	23,6			
Peso da água(L)	2,5			
Peso da panela + Tampa+água (Kg)	2,77	2,755	2,332	2,317
Peso do Fogão + Lenha(Kg)	4,72	4,42	4,145	4,12
Temperatura Água(°C)	21			
Tempo em que água ferve(mim)			21	
Tempo total de ensaio(mim)			80	
Evaporização da Água(kg)	2,77	0,015	0,423	0,015
Evaporização da Água Total(kg)			0,453	
Perda de Massa(kg)	4,72	0,3	0,275	0,025
Perda de Massa Total(kg)			0,6	

TESTE DE	FERVURA	DA LENHA	FOGAO	CONVENCIONAL
Parameteo	I Ensaio(°C)	II Ensaio(°C)	III Ensaio(°C)	Medias
Qlib (kJ)	9000	9000	8925	8975
Qab (kJ)	829,5	829,5	829,5	829,5
Qvap (kJ)	1023,78	1023,78	802,3	23,83%
Rendimento	26,60%	26,60%	18,30%	23,83%
Potência (kW)	1,875	2,5	2,125	2,166666667
Consumo específico	1,325	1,325	1,676	1,442

### TESTE DE FERVURA DA LENHA FOGAO MELHORADO

Parâmetro	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	MEDIAS
Qlib (kJ)	8925	8775	8850	8850
Qab (kJ)	793,8	805,35	779,1	792,75
Qvap (kJ)	836,2	1141,3	870,1	949,2
Rendimento (%)	18,3	22,2	18,6	19,7
Potência (kW)	1,859375	2,089285714	1,966666667	1,971775794
Cc (kg/kg)	1,608108108	1,158415842	1,532467532	1,433663827

TESTE DE	FERVURA	DE CARVÃO	FOGÃO	CONVENCIONAL
Parâmetro	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média
Qlib (kJ)	10875	13630	12760	12421,66667
Qab (kJ)	791,7	855,75	814,8	820,75
Qvap (kJ)	881,4	1389,9	1853,2	1374,833333
Rendimento (%)	15,4	16,5	20,9	17,6
Potência (kW)	1,394230769	2,163492063	2,835555556	2,131092796
Cc (kg/kg)	0,961538462	0,764227642	0,536585366	0,754117157

TESTE DE	FERVURA	DE CARVÃO	FOGÃO	MELHORADO
Parâmetro	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média
Qlib (kJ)	11310	11020	9860	10730
Qab (kJ)	796,95	826,35	809,55	810,95
Qvap (kJ)	1197,8	1389,9	2124,4	1570,7
Rendimento (%)	17,6	20,1	29,8	22,5
Potência (kW)	1,7952381	1,749206349	1,933333333	1,825925926
Cc (kg/kg)	0,73584906	0,617886179	0,361702128	0,571812455

#### II Ensaio

Intes	Estado Inicial(0 mim)	Alta potencia a frio	Alta potencia a quente(T=15 mim)	baixa Potencia (T=45 mim)
Peso do Botija(Kg)	14			
Peso da panela + Tampa(Kg)	0,4			
Temperatura Ambiente(°C)	21,8			
Peso da água(L)	2,5			
Peso da panela + Tampa+água (Kg)	2,77	2,755	2,56	2,43
Peso da Botija+ Redutor + Gas(Kg)	24,895	24,875	24,85	24,82
Temperatura Água(°C)	25,6			
Tempo em que água ferve(mim)			18	
Tempo total de ensaio(mim)			80	
Evaporização da Água(kg)	2,77	0,015	0,195	0,13
Evaporização da Água Total(kg)			0,34	
Perda de Massa(kg)	24,895	0,02	0,025	0,03
Perda de Massa Total(kg)			0,075	

TESTE DE	FERVURA	DE GAS	DE COZINHA	
Parâmetro	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média
	4554	3450	4830	4278
Qab (kJ)	824,25	814,8	808,5	815,85
Qvap (kJ)	824,9	768,4	960,5	851,2666667
Rendimento (%)	36,2	45,9	36,6	39,56666667
Potência (kW)	0,89294118	0,71875	1,073333333	0,89500817
Cc (kg/kg)	0,27123288	0,220588235	0,247058824	0,246293312

#### I Ensaio

Intes	Estado Inicial(0 mim)	Alta potencia a frio	Alta potencia a quente(T=15 mim)	baixa Potencia (T=45 mim)
Peso da Garrafa Vazia(Kg)	0,14403			
Peso da panela + Tampa(Kg)	0,4			
Temperatura Ambiente(°C)	24,5			
Peso da água(L)	2,5			
Peso da panela + Tampa+água (Kg)	2,77	2,592		
Peso do Biodigestor + Mangueira+Biogas(Kg)	7,59	7,535		
Temperatura Água(°C)	20,4			
Tempo em que água ferve(mim)			0	
Tempo total de ensaio(mim)			85	
Evaporização da Água(kg)	2,77	0,178		
Evaporização da Água Total(kg)			0,178	
Perda de Massa(kg)	7,59	0,055		
Perda de Massa Total(kg)			0,055	

TESTE DE	FERVURA	BIOGAS
Parâmetro	Ensaio 1	MEDIA
Qlib (kJ)	1100	1100
Qab (kJ)	402,28	402,28
Qvap (kJ)	402,28	402,28
Rendimento (%)	83,9	83,9
Potência (kW)	0,215686275	0,215686275
Cc (kg/kg)	0,308988764	0,308988764

### Anexo 3. Tabelas resultantes do teste de combustão

CARVAO I ENSAIO- TESTE DE INDICE DE COMBUSTAO- FOGAO CONVENCIONAL			
Tempo(min)	Massa (Kg)	Temperatura(°C)	
0	4,72	27,1	
1	4,72	111,4	
2	4,72	165,6	
3	4,72	180,2	
4	4,72	171,6	
5	4,72	287,1	
6	4,72	221,2	
7	4,72	0,1	
8	4,72	500,2	
9	4,715	471,3	
10	4,715	523,6	
11	4,715	530,5	
12	4,71	501,6	
13	4,71	519,1	
14	4,71	533,6	
15	4,71	499,8	
16	4,71	488,7	
17	4,71	467	
18	4,705	465,7	
19	4,705	462,4	
20	4,705	454,6	
21	4,7	599,9	
22	4,7	570,1	
23	4,7	500,2	
24	4,695	471,3	
25	4,695	523,6	
26	4,685	530,5	
27	4,68	501,6	
28	4,68	519,1	
29	4,68	533,6	
30	4,68	534,1	101
31	4,68	538,2	

32	4,68	461,3
33	4,665	464,3
34	4,665	471,3
35	4,66	472,1
36	4,66	498,6
37	4,65	499,2
38	4,65	503,3
39	4,645	528,9
40	4,64	525,6
41	4,635	479,3
42	4,63	462,4
43	4,625	486,3
44	4,62	625,7
45	4,615	642,7
46	4,615	637,6
47	4,615	652
48	4,61	659,2
49	4,61	657,5
50	4,61	627,2
51	4,61	605,6
52	4,605	632,6
53	4,605	630,1
54	4,605	606,8
55	4,605	620,8
56	4,605	621,9
57	4,605	608,9
58	4,605	601,2
59	4,6	599,6
60	4,6	500,9
61	4,6	430,6
62	4,6	425,4
63	4,6	495,1
64	4,6	486,4
65	4,6	465,2
66	4,595	424,1
67	4,595	426,9
68	4,595	420
69	4,59	420,5
70	4,59	421
71	4,59	416,8
72	4,59	413
73	4,59	414,5
74	4,585	631,6
75	4,58	639,7
76	4,58	633
77	4,58	625,9
78	4,58	609,2
79	4,575	601,2
80	4,575	581,3
81	4,575	573,4
82	4,575	581,3
83	4,57	572,6
84	4,57	581,7
85	4,57	569,1
86	4,57	568,7
87	4,56	567
88	4,56	556,4
89	4,56	546,7
90	4,56	554,9
91	4,555	518,5
92	4,555	527,4
93	4,55	521,6
94	4,55	517,6
95	4,55	516,7
96	4,55	523,8
97	4,55	526,9
98	4,55	525,3
99	4,545	518,1
100	4,545	541,6
101	4,545	543,5
102	4,545	546,1
103	4,54	539,9
104	4,54	545,2
105	4,54	526,7
106	4,535	537,8
107	4,535	525,6
108	4,535	524,9
109	4,535	526,4
110	4,53	526,7
111	4,53	514,6
112	4,53	501,9
113	4,525	527,3
114	4,525	552,6
115	4,525	562,9
116	4,52	560,1
117	4,52	554,6
118	4,515	526,1
119	4,515	548,9
120	4,51	551,6

N de Ensaio	A (%)	B (%)	C (%)	ICOM (%)	MEDIAS
I	26,67	78,5898	85	0,246587055	
II	30	80,2632	78,3333	0,30739111	0,284794614
III	35,83	80,3485	95,8333	0,300405679	
I	26,7	80,3304	79,1666	0,270925072	
II	15	84,4484	77,5	0,163448516	1,485705695
III	33,3	80,5346	6,6666	4,022743497	
I	100	77,2451	35	2,207002857	
II	100	80,5926	45,8333	1,758385279	1,972620212
III	100	78,0989	40	1,9524725	
I	100	77,5818	23,3333	3,324939036	
II	100	78,5775	22,5	3,492333333	3,160778567
III	100	799519	30	2,665063333	
I	100	76,4853	1,45	52,74848276	
II	100	74,3106	2,7871	26,6623372	12,1864268
III	100	74,9122	3,1219	23,99570774	
I	1,25	43,0524	100	0,00538155	0,00538155

#### Anexo 4. Tabelas obtidas a partir de análises estatísticas comparativas

anova cckgkg fontedeenergia fogaousado fogaousado# fontedeenergia ensaio

Number of obs = 12 R-squared = 0.8725  
 Root MSE = .217198 Adj R-squared = 0.7662

Source	Partial SS	df	MS	F	Prob>F
Model	1.9361166	5	.38722333	8.21	0.0117
fontedeen~a	1.8096333	1	1.8096333	38.36	0.0008
fogaousado	.02803334	1	.02803334	0.59	0.4700
fogaousado#fontedeen~a	.02083332	1	.02083332	0.44	0.5310
ensaio	.07761668	2	.03880834	0.82	0.4834
Residual	.28304994	6	.04717499		
Total	2.2191666	11	.20174242		

anova PotênciakW fontedeenergia fogaousado fogaousado# fontedeenergia ensaio

Number of obs = 12 R-squared = 0.4984  
 Root MSE = .356016 Adj R-squared = 0.0804

Source	Partial SS	df	MS	F	Prob>F
Model	.75560844	5	.15112169	1.19	0.4117
fontedeen~a	.02520835	1	.02520835	0.20	0.6713
fogaousado	.18500839	1	.18500839	1.46	0.2724
fogaousado#fontedeen~a	.009075	1	.009075	0.07	0.7980
ensaio	.53631669	2	.26815835	2.12	0.2017
Residual	.76048317	6	.12674719		
Total	1.5160916	11	.13782651		

**anova rendimento fontedeenergia fogaousado fogaousado# fontedeenergia ensaio**

Number of obs = 12 R-squared = 0.3694  
 Root MSE = 4.87194 Adj R-squared = -0.1562

Source	Partial SS	df	MS	F	Prob>F
Model	83.41417	5	16.682834	0.70	0.6421
fontedeen~a	8.8408353	1	8.8408353	0.37	0.5640
fogaousado	.44083377	1	.44083377	0.02	0.8961
fogaousado#fontedeen~a	61.200835	1	61.200835	2.58	0.1595
ensaio	12.931666	2	6.465833	0.27	0.7705
Residual	142.415	6	23.735833		
Total	225.82917	11	20.529925		

**anova PotênciakW fontedeenergia ensaio**

Number of obs = 12 R-squared = 0.9608  
 Root MSE = .222854 Adj R-squared = 0.9281

Source	Partial SS	df	MS	F	Prob>F
Model	7.2995085	5	1.4599017	29.40	0.0004
fontedeen~a	7.1308918	3	2.3769639	47.86	0.0001
ensaio	.16861669	2	.08430835	1.70	0.2605
Residual	.29798336	6	.04966389		
Total	7.5974918	11	.69068107		

**anova icom fontedeenergia fogaousado fontedeenergia# fogaousado ensaio**

Number of obs = 12 R-squared = 0.6256  
 Root MSE = 1.19566 Adj R-squared = 0.3136

Source	Partial SS	df	MS	F	Prob>F
Model	14.331802	5	2.8663605	2.01	0.2109
fontedeen~a	8.4818144	1	8.4818144	5.93	0.0508
fogaousado	4.28074	1	4.28074	2.99	0.1343
fontedeen~a#fogaousado	.00012197	1	.00012197	0.00	0.9929
ensaio	1.5691259	2	.78456297	0.55	0.6041
Residual	8.5775546	6	1.4295924		
Total	22.909357	11	2.0826688		

**anova rendimento fontedeenergia ensaio**

Number of obs = 12 R-squared = 0.9877  
 Root MSE = 4.07079 Adj R-squared = 0.9774

Source	Partial SS	df	MS	F	Prob>F
Model	7975.6047	5	1595.1209	96.26	0.0000
fontedeena	7952.6293	3	2650.8764	159.97	0.0000
ensaio	22.975413	2	11.487707	0.69	0.5360
Residual	99.427944	6	16.571324		
Total	8075.0327	11	734.09388		

**anova icom fontedeenergia ensaio**

Number of obs = 12 R-squared = 0.8714  
 Root MSE = 8.03899 Adj R-squared = 0.7642

Source	Partial SS	df	MS	F	Prob>F
Model	2627.4895	5	525.4979	8.13	0.0120
fontedeena	2507.9102	3	835.97007	12.94	0.0050
ensaio	119.57927	2	59.789634	0.93	0.4465
Residual	387.7522	6	64.625367		
Total	3015.2417	11	274.11288		

**anova cckgkg fontedeenergia ensaio**

Number of obs = 12 R-squared = 0.9564  
 Root MSE = .143633 Adj R-squared = 0.9200

Source	Partial SS	df	MS	F	Prob>F
Model	2.7145084	5	.54290168	26.32	0.0005
fontedeena	2.6894917	3	.89649725	43.45	0.0002
ensaio	.02501667	2	.01250834	0.61	0.5757
Residual	.12378335	6	.02063056		
Total	2.8382918	11	.25802652		

## Anexo 5. Tabelas resultantes do inquérito

NAGI	GAGI	NPCAG	HPPD	GRDC	AFDRV	VRD	FEUPA	VGPE	NCSE	TERC	UATERC	AMFEB
1	2	2	2	1	1	2	1	1	2	3	2	1
2	2	2	2	1	2	2	3	1	2	3	2	1
3	2	2	2	1	2	2	3	1	2	3	2	1
4	2	2	3	1	2	2	3	1	2	3	2	1
5	2	2	3	1	1	2	4	1	2	3	2	1
6	2	2	3	1	2	2	4	2	1	1	2	2
7	2	2	3	1	2	2	4	2	1	1	2	2
8	2	2	3	1	2	2	4	2	1	1	2	1
9	1	2	3	1	1	2	4	2	2	3	2	1
10	1	2	3	1	1	2	3	2	2	3	2	1
11	2	2	3	1	1	2	3	1	2	3	2	1
12	2	2	4	1	1	2	3	1	2	3	2	1
13	2	2	4	1	2	2	3	1	2	3	2	1
14	2	1	4	2	2	2	3	1	2	3	2	2
15	2	1	4	2	2	2	3	1	2	3	2	1
16	1	1	4	2	2	2	4	1	2	3	2	2
17	2	1	4	2	2	2	3	1	2	3	2	1
18	2	1	4	2	2	2	3	1	2	3	2	1
19	2	1	4	1	2	2	3	1	2	3	2	1
20	2	1	4	1	2	2	3	1	2	3	2	1
21	2	2	4	1	2	2	3	2	2	3	2	1
22	1	2	4	1	2	2	3	2	2	3	2	2
23	2	2	4	1	2	2	3	2	2	3	2	2
24	2	2	4	1	2	2	3	2	2	3	2	1
25	2	2	4	1	2	2	2	2	2	3	2	1
26	2	2	4	1	2	2	2	2	2	3	2	1
27	2	2	4	1	2	2	2	2	2	3	2	1
28	2	2	2	1	1	2	2	2	2	3	2	2
29	1	2	2	1	1	2	2	2	2	3	2	1
30	1	2	2	1	1	2	2	2	2	3	2	2
31	2	2	2	1	2	2	2	2	2	3	2	1
32	2	2	4	1	2	2	1	2	2	3	2	1
33	2	2	4	1	2	2	1	1	2	3	2	1
34	2	2	4	2	2	2	1	1	2	3	2	1
35	2	2	4	2	2	2	2	1	2	3	2	2
36	2	2	4	2	2	2	2	2	2	3	2	1
37	2	2	3	2	2	2	2	2	2	3	2	1
38	2	2	3	1	2	2	2	2	2	3	2	2
39	2	2	3	1	2	2	2	2	2	3	2	1
40	2	2	3	1	2	2	2	2	2	3	2	1
41	1	2	3	1	2	2	2	2	1	3	2	1
42	1	2	4	1	2	2	2	2	1	1	2	1
43	2	2	4	1	2	2	2	2	2	3	2	2
44	2	2	4	1	2	2	2	2	2	3	2	2
45	2	1	4	1	2	2	2	2	2	3	2	1
46	2	1	4	1	2	2	2	2	2	3	2	1
47	2	1	4	1	1	2	2	2	2	3	2	1
48	2	2	4	1	1	2	2	2	2	3	2	1
49	2	2	4	1	1	2	2	2	2	3	2	1
50	2	2	4	1	1	2	2	2	2	3	2	1

		IDENTIFICAÇÃO							
1	NAGI	<b>Numero de Agricultores Inqueridos</b>							
2	GAGI	<b>Genero do Agricultor Inquerido</b> <b>1] Homem 2] Mulher</b>							
		QUESTÕES GERAIS							
3	NPCAG	<b>Numero de Parcelas por Agricultor</b> <b>1] Duas Parcelas 2] Tres ou mais Parcelas</b>							
4	HPPD	<b>Horticolas Produzidas por cada Agricultor</b> <b>1] Alface e Couve 2] Alface, Couve e Nhangana</b> <b>3] Alface, Couve e Beterraba 4]Alface, Couve e Outras</b>							
5	GRDC	<b>Quem gere os Residuos vegetais depois da colheita?</b> <b>1] Proprios Produtores 2] Proprios produtores e seus Trabalhadores</b>							
6	AFDRV	<b>Onde e como fazem a gestao dos residuos vegetais?</b> <b>1] Descartam em qualquer lugar 2] Incorporam no solo como estrume</b>							
7	VRD	<b>Existe conhecimento sobre o valor dos residuos descartados?</b> <b>1] Sim 2] Nao</b>							
8	FEUPAG	<b>Quais sao as fontes de energia mais usadas pelos produtores?</b> <b>1] Carvao 2] Gas natural e Carvao 3] Lenha e carvao 4] Carvao e outras fontes</b>							
9	VGPE	<b>Quanto e que o produtor gasta por mes para aquisicao da energia usada?</b> <b>1] Intervalo de 1501a 3500 2] Intervalo de 3501 em diante</b>							
10	NCSER	<b>Qual e o nivel de conhecimento sobre energias renovaveis?</b> <b>1] Ja ouviu falar 2] Nunca ouviu falar</b>							
11	TERC	<b>Quantos tipos de energia renovavel conhece?</b> <b>1] Um 2] Dois ou mais 3] Nenhum</b>							
12	UATERC	<b>Utiliza algum tipo de energia renovavel em sua casa?</b> <b>1] Sim 2] Nao</b>							
13	AMFEB	<b>Aceitaria mudar a fonte energetica que usa actualmente para biogas?</b> <b>1] Sim 2] Nao</b>							