



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE



FACULDADE DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

LICENCIATURA EM ENGENHARIA DO AMBIENTE

---

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOETANOL  
PRODUZIDO A PARTIR DE CASCAS DE MANDIOCA**

**Supervisor:**

Engº. Dominic Joaquim, Lic.

Engº. Michaque Dosse, Lic.

**Autor:**

Gabriel Américo Joaquim

Maputo, Agosto de 2025

**UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

**LICENCIATURA EM ENGENHARIA DO AMBIENTE**

---

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOETANOL  
PRODUZIDO A PARTIR DE CASCAS DE MANDIOCA**

Monografia apresentada à  
Faculdade de Engenharia da  
Universidade Eduardo Mondlane  
para obtenção do título de  
Licenciatura em Engenharia do  
Ambiente.

Maputo, Agosto de 2025

## RESUMO

A crescente necessidade de reduzir a dependência de combustíveis fósseis e mitigar os impactos ambientais impulsiona a busca por fontes de energia renováveis, sendo o bioetanol uma alternativa viável e sustentável. Em Moçambique, grande parte da população rural ainda depende de lenha e carvão vegetal para suprir suas necessidades energéticas, contribuindo para o desmatamento e emissões de CO<sub>2</sub>, o que reforça a necessidade de alternativas energéticas limpas e acessíveis. O presente estudo tem como objectivo avaliar o potencial energético do bioetanol produzido a partir de cascas de mandioca, analisando seu rendimento, propriedades físico-químicas e aplicabilidade energética. A metodologia envolveu a colecta da matéria-prima, produção e caracterização do bioetanol. Os resultados demonstraram um rendimento de 0,105 ml/g (105l/ton), um teor alcoólico de 94,92% (v/v), densidade de 815,11 kg/m<sup>3</sup> e um poder calorífico de 19,26 kJ/g; com poder calorífico inferior aos valores de referência (21,2kJ/g) devido a perdas térmicas associadas ao método de calorimetria de copo, sugerindo a necessidade de técnicas mais precisas, como a calorimetria de bomba. Conclui-se que, embora o rendimento obtido tenha sido inferior ao reportado na literatura, o bioetanol produzido apresenta viabilidade para uso energético, especialmente para iluminação e cocção em comunidades rurais sem acesso à electricidade, pelo que a adopção dessa fonte energética pode reduzir a dependência de combustíveis sólidos, mitigar emissões de CO<sub>2</sub> e minimizar os impactos ambientais associados ao desmatamento, reforçando a importância do aproveitamento de resíduos agrícolas para a produção de biocombustíveis como parte da transição energética sustentável em Moçambique.

**Palavras-chave:** bioetanol, cascas de mandioca, potencial energético e sustentabilidade.

## ABSTRACT

The increasing need to reduce dependence on fossil fuels and mitigate environmental impacts drives the search for renewable energy sources, with bioethanol emerging as a viable and sustainable alternative. In Mozambique, a large portion of the rural population still relies on firewood and charcoal to meet their energy needs, contributing to deforestation and CO<sub>2</sub> emissions, thereby reinforcing the need for clean and accessible energy alternatives. This study aims to assess the energy potential of bioethanol produced from cassava peels by analysing its yield, physicochemical properties, and energy applicability. The methodology involved the collection of the raw material, production and characterization of bioethanol. The results showed a yield of 0.105 ml/g (105l/ton), an alcohol content of 94.92% (v/v), a density of 815.11 kg/m<sup>3</sup>, and a calorific value of 19.26 kJ/g; with a lower heating value than the reference values due to thermal losses associated with the cup calorimetry method, suggesting the need for more precise techniques such as bomb calorimetry. It is concluded that, although the yield obtained was lower than that reported in the literature, the bioethanol produced is viable for energy use, particularly for lighting and cooking in rural communities without access to electricity. The adoption of this energy source could reduce dependence on solid fuels, mitigate CO<sub>2</sub> emissions, and minimise the environmental impacts associated with deforestation, highlighting the importance of utilising agricultural waste for biofuel production as part of a sustainable energy transition in Mozambique.

**Keywords:** bioethanol, cassava peels, energy potential, and sustainability.

## Índice

1. Introdução.....	11
1.1. Objectivos .....	12
1.1.1. Geral.....	12
1.1.2. Específicos .....	12
1.2. Problematização .....	12
1.3. Justificativa.....	13
1.4. Metodologia.....	14
1.4.1. Revisão.....	14
1.4.2. Colecta e caracterização da matéria-prima .....	14
1.4.3. Produção do bioetanol.....	15
1.4.4. Caracterização do bioetanol produzido .....	15
2. Revisão de Literatura.....	17
2.1. Produção de Mandioca em Moçambique .....	17
2.1.1. Níveis de produção.....	19
2.1.2. Aplicações da Mandioca em Moçambique .....	20
2.2. Resíduos de processamento de mandioca .....	21
2.3. Biocombustíveis .....	23
2.3.1. Gerações dos biocombustíveis.....	24
2.3.2. Bioetanol.....	27
2.3.3. Matéria-prima para produção de bioetanol .....	28
2.3.4. Propriedades físico-químicas do bioetanol .....	29
2.3.5. Comparação do bioetanol com a gasolina.....	32
2.3.6. Aplicações do bioetanol.....	33
2.4. Necessidades energéticas em comunidades rurais .....	34
2.5. Produção de etanol a partir de biomassa amilácea (cascas de mandioca) .....	35
2.5.1. Etapas de produção de etanol.....	35
2.5.2. Potencial de produção de etanol a partir de cascas de mandioca.	39
3. Materiais e métodos.....	41
3.1. Caracterização da matéria-prima .....	41
3.1.1. Humidade (%H) .....	41
3.1.2. Sólidos totais (ST), Sólidos Voláteis (SV) e Sólidos Fixos (SF)....	41

3.2. Produção de etanol .....	43
3.2.1. Pré-tratamento.....	43
3.2.2. Cozimento ou gelatinização.....	43
3.2.3. Hidrólise ou Sacarificação .....	44
3.2.5. Destilação.....	45
3.3. Caracterização do bioetanol.....	45
3.3.1. Densidade .....	45
3.3.2. Teor alcoólico .....	46
3.3.3. pH.....	47
3.3.4. Aspecto e cor.....	48
3.3.5. Poder calorífico.....	48
4. Resultados e discussão .....	50
4.1. Caracterização da matéria-prima .....	50
4.2. Caracterização do etanol produzido.....	51
5. Conclusões e Recomendações .....	53
5.1. Conclusões .....	53
5.2. Recomendações .....	54
6. Referências bibliográficas.....	55
7. Anexos.....	60

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Principais produtores de mandioca no mundo em 2016 .....	17
Figura 2. Uso de lenha como biocombustível de geração 0 em Moçambique .	25
Figura 3. Biocombustíveis de primeira geração .....	25
Figura 4. Matéria-prima para produção de biocombustíveis de segunda geração: (A) – Bagaço de cana-de-açúcar; (B) – Sabugo de milho; (C) – Gorduras de efluentes domésticos e industriais.....	26
Figura 5. Cultivo de microalgas em reactores tubulares para produção de biocombustíveis de terceira geração .....	27
Figura 6. As matérias-primas e tecnologias aplicadas para a produção de biocombustíveis.....	27
Figura 7. Rotas tecnológicas para a produção de bioetanol .....	29
Figura 8. Etapas de produção de etanol a partir da mandioca .....	36
Figura 9. Pré-tratamento de amostras de cascas de mandioca: (A) Cascas de mandioca in natura; (B) Cascas de mandioca após pr-é-tratamento .....	37
Figura 10. Estrutura de amilopectina.....	37
Figura 11. Estrutura de amilose .....	37
Figura 12. Preparação da amostra para determinação de humidade, sólidos totais, voláteis e fixos .....	43
Figura 13. Pré-tratamento da amostra (secagem na estufa e trituração) .....	43
Figura 14. Gelatinização da amostra.....	44
Figura 15. Hidrólise ácida.....	44
Figura 16. Fermentação: A. Mosto filtrado; B. Leveduras; C. Processo fermentativo.....	45
Figura 17. Processo de destilação alcoólica .....	45
Figura 18. Determinação da densidade através da picnometria .....	46
Figura 19. pHmetro portátil.....	47
Figura 20. Calorimetria de Copo: A. Preparação da amostra; B. Preparação do Calorímetro; C. Determinação do poder calorífico.....	48

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Área total por cultura .....	18
Tabela 2. Valores médios de diversas determinações da fracção “casca”, expressas em matéria seca.....	22
Tabela 3. Propriedades físico-químicas do etanol anidro (EAC) e hidratado (EHC) .....	32
Tabela 4. Propriedades do bioetanol e da gasolina .....	33
Tabela 5. Comparação de rendimento da hidrólise ácida e enzimática .....	39
Tabela 6. Determinação do teor alcoólico através da densidade .....	47
Tabela 7. Matéria húmida.....	50
Tabela 8. Matéria seca.....	50
Tabela 9. Resultados da caracterização do etanol produzido .....	51

## **ÍNDICE DE GRÁFICOS**

Gráfico 1. Produção de mandioca e milho em Moçambique (kg/per capita) ...	19
Gráfico 2. Quantidade de mandioca comercializada a DADTCO na província de Inhambane em toneladas.....	20

## LISTA DE ACRÓNIMOS

DME	Dimetil Éter
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
MtCO <sub>2</sub> eq	Megatoneladas de dióxido de carbono equivalente
GEE	Gases de Efeito Estufa
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
MP	Material particulado
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CdM	Cervejas de Moçambique
ASTM	American Society for Testing and Materials
DADTCO	Dutch Agricultural Development & Trading Company
ton.	Toneladas
Kg	Quilogramas
MJ	Megajoules
l	Litros
ha	Hectare

## FÓRMULAS QUÍMICAS

$\text{CO}_2$	Dióxido de carbono
$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	Álcool etílico (etanol)
$\text{H}_2\text{SO}_4$	Ácido Sulfúrico
$\text{HCl}$	Ácido Clorídrico
$\text{CO}$	Monóxido de Carbono
$\text{SO}_x$	Óxidos de Enxofre
$\text{NO}_x$	Óxidos de Nitrogénio
$\text{NaOH}$	Hidróxido de Sódio

## 1. Introdução

Actualmente, devido à crescente crise ambiental global que se verifica, principalmente pelas mudanças climáticas, associada à emissão de gases de efeito estufa (GEE) por uso de fontes fósseis de energia, a busca por fontes de energia sustentáveis e renováveis tem sido um desafio (ONU Brasil, 2024).

A matriz energética mundial é composta, predominantemente, por combustíveis fósseis, que representam acima de 80% do consumo total de energia, contribuindo de forma significativa para o aquecimento global (IEA, 2022). Por outro lado, as fontes renováveis de energia como a solar, eólica, hidroelétrica e biocombustíveis têm aumentado sua participação, com destaque para o bioetanol, um combustível derivado de biomassa que se apresenta como uma alternativa viável e menos poluente (BNDES, 2008).

Em Moçambique, embora a energia hidroelétrica domine a matriz energética com 80% da capacidade instalada, a maior parte da população rural ainda depende de lenha e carvão vegetal para suas necessidades energéticas básicas (Ministério de Recursos Minerais e Energia, 2021), pelo que, com o desmatamento e degradação de florestas, a emissão de GEE neste sector torna-se preocupante. No sector energético, o sector de transportes foi responsável, em 2016, por emissão de cerca de 2.8 MtCO<sub>2eq</sub> e 0.5 MtCO<sub>2eq</sub> no sector residencial (Moz Climate Data, 2024), o que corresponde, junto, a aproximadamente 26% de emissões no sector energético.

Nasce, portanto, a necessidade de busca por soluções que promovam a diversificação energética, a redução da dependência de fontes tradicionais pouco sustentáveis e, acima de tudo, o uso de fontes renováveis de energia.

Moçambique, em resposta à Estratégia Nacional de Mitigação e Adaptação às Mudanças Climáticas, aprovou o uso de biocombustíveis, em destaque o etanol, na composição da gasolina como uma alternativa de reduzir a emissão de gases de efeito estufa no sector de transportes (Moçambique, Decreto n.º 61/2023, 2023), assim como os outros países o fazem.

Nesse contexto, o bioetanol produzido a partir de resíduos agrícolas, como as cascas de mandioca, surge como uma oportunidade estratégica para atender à demanda energética de forma sustentável (Martinez & Feiden, 2017).

O presente trabalho tem como objectivo avaliar o potencial energético do bioetanol produzido a partir de cascas de mandioca como uma fonte renovável de energia.

## **1.1. Objectivos**

### **1.1.1. Geral**

- Avaliar o potencial energético do bioetanol produzido a partir de cascas de mandioca como uma fonte renovável de energia.

### **1.1.2. Específicos**

- Descrever os processos e realizar a produção do bioetanol a partir das cascas de mandioca;
- Determinar:
  - O rendimento de produção de bioetanol a partir das cascas de mandioca;
  - As propriedades físico-químicas do bioetanol; e
  - O potencial energético;
- Identificar a aplicação do bioetanol em diferentes sectores energéticos em Moçambique.

## **1.2. Problematização**

As mudanças climáticas representam uma ameaça global iminente, que resulta principalmente da emissão de GEE, devido a queima de combustíveis fósseis. O impacto dessas emissões no aquecimento global é alarmante, com previsões indicando que, se não houver uma mudança significativa na forma como a energia é gerada e consumida, os efeitos no clima serão irreversíveis (IPCC, 2018). O Relatório Especial do IPCC (2018) alerta que, para evitar os piores impactos do aquecimento global, é necessário limitar o aumento da temperatura global a 1,5°C até 2050. No entanto, a matriz energética mundial ainda é predominantemente dependente de fontes não renováveis, o que acelera o processo de aquecimento global (IEA, 2021).

Em Moçambique, apesar do alto potencial de energias renováveis, como a hidroelectricidade, grande parte da população rural ainda depende de fontes de energia tradicionais, como lenha e carvão, que não só exacerbam a degradação ambiental, mas também contribuem significativamente para as emissões de GEE (UNDP, 2020).

Em 2019, o país enfrentou fortes impactos das mudanças climáticas, como inundações e secas, resultantes, em parte, da crescente pressão por fontes energéticas não sustentáveis (World Bank, 2021), intensificando a vulnerabilidade das populações mais pobres e fragilizando os sistemas socioeconómicos.

Neste contexto, torna-se urgente investigar, explorar e investir em matrizes energéticas sustentáveis e renováveis como parte fundamental da transição energética.

### **1.3. Justificativa**

A mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) é uma cultura de grande relevância em Moçambique, responsável por cerca de 85% da produção total de raízes e tubérculos no país (Costa, 2019). Durante o seu processamento industrial em farinhas e bebidas, bem como no seu consumo caseiro, gera resíduos como a casca, rica em amido e carboidratos fermentáveis que podem ser matéria-prima de produção de bioetanol.

A produção de etanol a partir de cascas de mandioca reduz os impactos ambientais associados ao descarte de resíduos sólidos por meio da sua valorização energética, promovendo a economia circular (Cereda, 2022). Por sua vez, o bioetanol produzido por este substrato é uma fonte renovável de energia que pode substituir parcial ou totalmente os combustíveis fósseis, contribuindo na redução de emissões de GEE e para o cumprimento das metas globais de mitigação das mudanças climáticas (BNDES, 2008). Além disso, a produção local de bioetanol pode fortalecer a economia nacional, criando oportunidades de emprego, assim como exportando o biocombustível para outros países que adoptaram o seu uso no sector energético.

## **1.4. Metodologia**

O presente estudo foi realizado no Laboratório de Engenharia Ambiental, no Departamento de Engenharia Química da Faculdade de Engenharia – Universidade Eduardo Mondlane, com o objectivo de produzir e caracterizar o bioetanol de cascas de mandioca, através da pesquisa quantitativa, utilizando métodos laboratoriais.

### **1.4.1. Revisão**

A presente investigação recorreu à pesquisa bibliográfica como parte integrante da metodologia, com o objectivo de fundamentar teoricamente os aspectos relacionados a produção do bioetanol a partir de resíduos orgânicos, em destaque às cascas de mandioca, e avaliar o seu potencial energético.

Esta etapa consistiu na consulta sistemática de fontes secundárias tais como manuais técnicos, relatórios de pesquisas, revistas científicas e teses de mestrados, com a finalidade de: levantar dados sobre a composição química das cascas de mandioca, compreender os processos de sua conversão em bioetanol, o rendimento de produção do biocombustível e identificar os métodos mais utilizados para a avaliação do potencial energético do bioetanol.

### **1.4.2. Colecta e caracterização da matéria-prima**

A matéria-prima (cascas de mandioca) foi colectada a partir dos resíduos gerados no processo de confecção da mandioca, comercializada no mercado do bairro Zona Verde, na Matola.

A caracterização da amostra consistiu na determinação da humidade, dos sólidos totais, voláteis e fixos, com o objectivo de quantificar o teor de água presente e a fracção da matéria orgânica disponível para os processos de fermentação e conversão em bioetanol.

A humidade foi determinada por meio do método gravimétrico de secagem na estufa – ASTM D2216 – que especifica a determinação de conteúdo de água em solos e materiais sólidos; e os sólidos totais, voláteis e fixos através dos métodos de calcinação na mufla – ASTM D3174 e D3175 (Métodos para Análise Proximal de Carvão e Outros Materiais Sólidos).

### **1.4.3. Produção do bioetanol**

A produção do etanol segue quatro (4) etapas principais: o pré-tratamento da matéria-prima, o cozimento, a hidrólise e a fermentação.

O pré-tratamento (preparação da amostra para a produção do etanol) consistiu na lavagem das cascas com água destilada, seguida de secagem em estufa a uma temperatura de 105°C por 24 horas. Após a secagem, as cascas foram trituradas para obtenção de uma amostra homogênea e adequada para as etapas subsequentes.

O cozimento foi realizado com a adição de 1330ml de água para 305g de amostra a temperaturas controladas até a formação de uma pasta viscosa. Este processo é responsável por liberar a amilose e amilopectina da estrutura do amido.

A hidrólise foi realizada através do método químico (hidrólise ácida ou química), que visa converter o amido presente nas cascas em açúcares fermentáveis. Nesta etapa, foi adicionado Ácido Acético concentrado na proporção de 3% (p/p) do peso seco do amido e aqueceu-se a mistura no banho-maria a uma temperatura de 100°C por 1 hora e 30 minutos. A solução hidrolisada, depois de filtrada, foi submetida à fermentação alcoólica, utilizando a levedura *Saccharomyces cerevisiae*.

A fermentação ocorreu em condições anaeróbicas, a temperatura ambiente, durante 11 dias. Após o término da fermentação, o mosto obtido foi submetido a destilação fraccionada, para separação do bioetanol.

### **1.4.4. Caracterização do bioetanol produzido**

O bioetanol produzido foi caracterizado por meio de análises físico-químicas. A densidade foi determinada pelo método gravimétrico, utilizando volumes conhecidos de amostra e cálculo da massa correspondente. O teor alcoólico foi estimado com base na norma ABNT NBR 5992, que correlaciona a densidade do etanol com a concentração alcoólica. O pH foi aferido com o uso de um pHmetro digital, enquanto o poder calorífico foi avaliado por calorimetria directa, utilizando calorímetro de copo. Adicionalmente, o aspecto visual e a cor

do bioetanol foram analisados por observação directa, com base em avaliações realizadas por três observadores. E o rendimento foi expresso como a relação entre o volume obtido e a massa inicial de cascas de mandioca processadas.

## 2. Revisão de Literatura

### 2.1. Produção de Mandioca em Moçambique

A mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) é um tubérculo, uma cultura amilácea, que representa uma das fontes mais importantes de calorias nos trópicos húmidos (Costa, 2019). A mandioca é uma cultura primária de segurança alimentar na África devido a sua capacidade de armazenamento por períodos longos, como também devido a sua capacidade de resistir as secas e de se desenvolver facilmente em solos pouco férteis e ácidos (Immanuel, 2025).

Segundo Costa (2019), África é o continente com maior produção de mandioca. Em 2016, a produção mundial de mandioca foi de 277 milhões de toneladas com uma taxa de crescimento anual de 2.7% de 2000 a 2016, sendo África maior produtor representando cerca de 57% do total.

Em comparação com as outras culturas, dados de 2016 mostram que a mandioca foi o alimento básico mais produzido na África, representando 34%, sendo Moçambique, conforme apresentado abaixo, o 5º país com maior produção no continente e 11º a nível mundial.

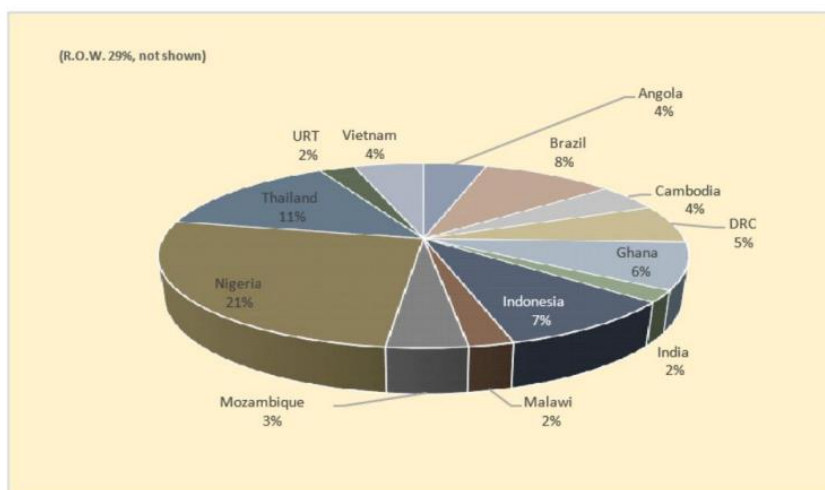


Figura 1. Principais produtores de mandioca no mundo em 2016

Fonte: Costa (2019)

A mandioca, em Moçambique, é a principal cultura no grupo das raízes e tubérculos, com uma área de cerca de 1039 mil hectares equivalentes a 89% da área total cultivada com raízes e tubérculos e cerca de 18% da área total

cultivada no país (Macondzo, 2016), sendo, portanto, a cultura mais importante depois do milho. Mais de 50% da população da região norte produz mandioca como o principal alimento (IIAM,2018).

Devido a sua importância, a mandioca, entre 2008 para 2011, foi a segunda cultura que ocupou a maior área de cultivo em hectares no país.

Fonte: Macondzo (2016)

Tabela 1. Área total por cultura

	2008		2011	
	Área total (Ha)	Rank	Área total (Ha)	Rank
Milho	747,216	1	407,848	1
Mandioca	189,695	2	115,669	2
Mapira	137,247	3	60,865	4
F. Nhemba	79,368	4	38,811	6
F. Bóer	75,464	5	73,583	3
Arroz	75,045	6	56,704	5
Gergelim	55,801	7	21,795	10
F. Manteiga	50,052	8	30,315	8
Amendoim pequeno	47,256	9	31,730	7
Amendoim grande	40,220	10	24,665	9
Algodão	31,304	11	16,982	12
Tabaco	27,972	12	15,503	13
Abóbora	27,919	13	18,862	11
Batata reno	14,112	14	8,424	19
Soja	13,224	15	11,249	17
Batata dpb	12,743	16	11,935	15
F. Jugo	11,616	17	11,263	16
Pepino	10,801	18	6,169	21

Nos últimos anos, a mandioca tem ganhando mais importância no país como alimento básico das comunidades, assim como matéria-prima para a indústria, estando acima das outras culturas, até mesmo do milho, como indicado abaixo.

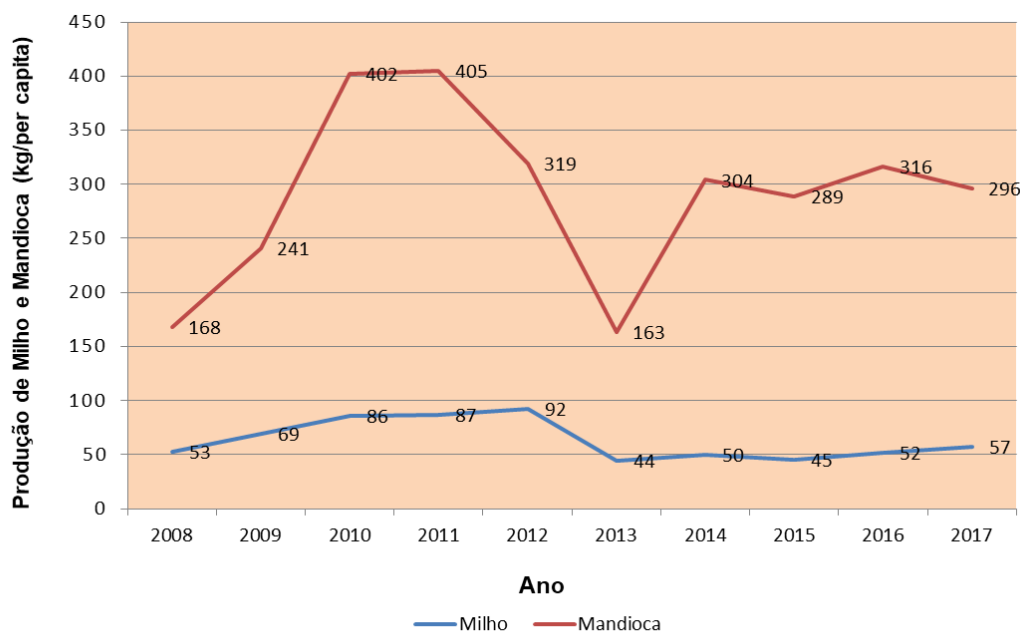


Gráfico 1. Produção de mandioca e milho em Moçambique (kg/per capita)

Fonte: Adaptado de Costa (2019)

A produção de mandioca no país em *kg por pessoa*, tem superado a produção de milho, principalmente com a sua demanda como matéria-prima para as fábricas de processamento de mandioca.

### 2.1.1. Níveis de produção

De acordo com Chirute (2015) o rendimento das variedades de mandioca produzidas no país com a aplicação de insumos, varia de 4 a 15 ton/ha ao nível de pequenos produtores, podendo atingir até 20 a 22 ton/ha em monocultura e 40 ton/ha para as variedades melhoradas.

Entre os anos 2008 a 2018, em Moçambique verificou-se uma tendência de crescimento de produção de mandioca em cerca de 8.67% (Costa, 2019). Segundo o mesmo autor, isto deve-se aos programas desenvolvidos para a potencialização da produção por uso de fertilizantes, uso de tecnologias aprimoradas, introdução de mudas de variedades melhoradas com melhor rendimento, construção de centros de colheitas melhoradas e, acima de tudo, devido a demanda deste recurso como matéria-prima para a indústria.

Em 2012, com a entrada da empresa Dutch Agricultural Development & Trading Company (DADTCO), que se dedica ao fornecimento de mandioca adquirida dos agricultores como matéria-prima para as cervejeiras, a produção virada para o mercado aumentou significativamente. Instalada nas províncias de Nampula e Inhambane, a empresa contava, até o ano 2017, com 8 533 pequenos fornecedores, que fornecem duas variedades de mandioca: variedades locais ou tradicionais, com um rendimento entre 8 a 10 ton/ha; e variedades melhoradas, desenvolvidas pelo Instituto de Investigação Agrária de Moçambique (IIAM), que apresentam um rendimento entre 20 e 35 ton/ha (Ibraimo, 2018).

O gráfico abaixo mostra a quantidade de mandioca comercializada a DADTCO na província de Inhambane entre os anos 2013 e 2016, tendo apresentado um pico no ano 2015 com 5 821 toneladas de mandioca.

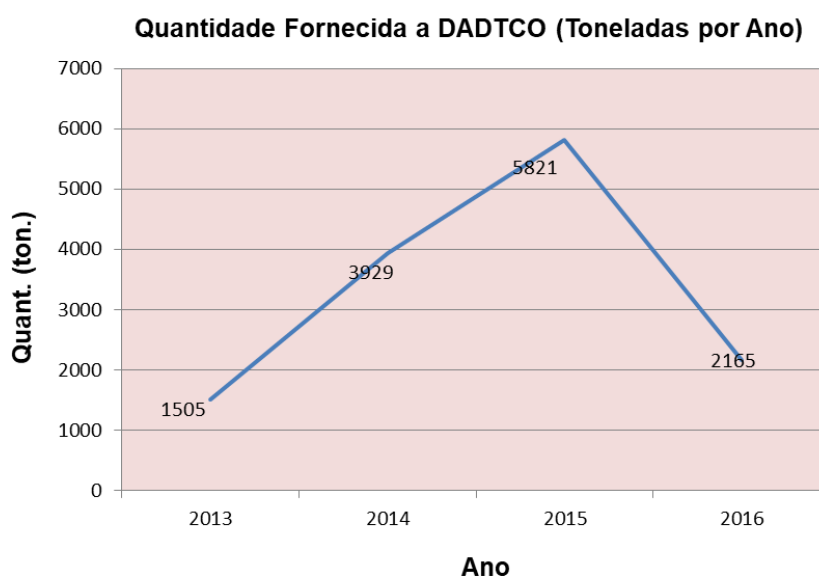


Gráfico 2. Quantidade de mandioca comercializada a DADTCO na província de Inhambane em toneladas

Fonte: Adaptado de Ibraimo (2018)

### **2.1.2. Aplicações da Mandioca em Moçambique**

Em Moçambique a mandioca é usada no consumo como alimento directo, sendo os seus produtos primários: a mandioca fresca (cozida e assada) consumida principalmente na região sul e centro do país; *chiguinha*, um prato

tradicional à base de mandioca ou batata-doce cozida juntamente com cacana ou feijão *nhemba* (Wandschneider & Barca, 2003); *rale* (tapioca), preparada principalmente por raízes amargas; e matapa (folhas) um prato comum na zona sul acompanhado de *chima* e arroz.

Por outro lado, a mandioca tem aplicação na indústria, sendo apresentada em forma de produtos processados industrialmente: na alimentação animal em forma de lascas e folhas de mandioca (Costa, 2018); na produção de cervejas pela Cervejas de Moçambique (CdM); e como etanol, onde a iniciativa para produção de etanol para fogões, ficou inactiva tempos depois do seu início.

## **2.2. Resíduos de processamento de mandioca**

Conforme indicado, a utilização da mandioca é dada de duas formas principais: o consumo culinário doméstico e o uso industrial como matéria-prima para produção de farinhas, etanol e bebidas alcoólicas. A utilização culinária, segundo Cereda (2022), não gera resíduos significativos, visto que a quantidade processada é menor. No entanto, quando o processamento é maior, como o caso do processamento industrial, a quantidade de resíduos gerados é maior, podendo apresentar problemas ao meio ambiente se não for feita a devida gestão dos resíduos, havendo necessidade de se buscar soluções viáveis para o tratamento e/ou deposição adequada dos mesmos.

Os principais resíduos gerados no processamento de mandioca são: folhas, caule (também conhecido como maniva ou rama), cascas, cepa, massa (farelo ou bagaço), água de lavagem das raízes e manipueira (também conhecido como água de extracção do amido da mandioca).

### **Cascas**

A casca marrom que corresponde a epiderme, varia entre 2 e 5% do peso total das raízes de mandioca (Cereda, 2022). Com a casca sai uma certa quantidade da entrecasca, sendo que a composição dos subprodutos da mandioca chamados “cascas” são melhor expressos pela mistura de ambas as fracções. Importa referir, no entanto, que dependendo da tecnologia aplicada no processamento da mandioca e do fim requerido, os resíduos de cascas

podem ser apresentados na forma de casca marrom apenas ou misturada com a entrecasca.

As cascas de mandioca podem ser usadas na adubação, na alimentação de animais, assim como na produção de biocombustíveis (biogás, biodiesel e bioetanol). Segundo Martinez & Feiden (2017), devido aos altos teores de amido e carboidratos transformáveis em açúcares fermentáveis, conforme indicado na Tabela 3, as cascas de mandioca podem ser usadas para produção de etanol de segunda geração.

Tabela 2. Valores médios de diversas determinações da fracção “casca”, expressas em matéria seca

Fonte: Cereda (2022)

<b>Umidade</b>	<b>Marron</b>	<b>Entre-casca</b>	<b>Mistura</b>
Umidade	48,28	65,60	72,32
<b>g/% de matéria seca</b>			
Sólidos Voláteis	-	-	26,23
Cinzas	4,00	3,00	1,45
Carboidratos Solúveis	-	-	7,86
Amido	0,00	58,00	32,00
Lipídeos	3,00	2,00	0,63
Nitrogênio	0,64	1,29	2,10
Fibra	41,00	6,00	-
Lignina mg % de sólidos volateis	-	-	6,46
<b>mg % de matéria seca</b>			
CN Livre	-	-	23,90
CN Total	0,00	320,00	120,00
Fósforo	60,00	-	60,00
Potássio	430,00	-	430,00
Cálcio	280,00	-	280,00
Magnésio	80,00	-	80,00
Ferro	5.538,00	-	26,00
Cobre	9,00	-	9,00
Zinco	21,00	-	21,00
Manganês	104,00	-	103,00
Enxofre	110,00	-	320,00

Em Moçambique, se tomarmos como exemplo a DADTCO que entre os anos 2013-2016 processou uma quantidade média de 3 355 toneladas/ano de mandioca na província de Inhambane, a quantidade média de cascas descartadas seria de 117.4 toneladas/ano, quantidade esta que é suficientemente considerável para valorização energética através da produção de biocombustível.

### 2.3. Biocombustíveis

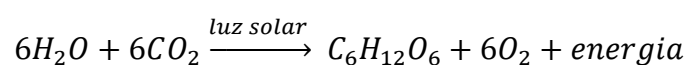
Com a exploração de recursos naturais para o suprimento das necessidades do Homem, verificou-se, ao longo da história, um aumento da temperatura média global, principalmente devido ao crescimento industrial, o que culminou no que hoje é conhecido por *mudanças climáticas*. A revolução industrial foi um período marcado por exploração de combustíveis fósseis como fontes de energia para a indústria, trazendo consequências ao clima devido a emissão de GEE que intensificam o efeito estufa do planeta, elevando, desta forma, a sua temperatura média global.

Em resposta a este fenómeno, convenções e acordos foram realizados a nível de países para se revidar esforços para limitar o aumento da temperatura média global em 1.5°C em relação aos níveis pré-industriais. Estes esforços incluem políticas e estratégias de redução de emissões de GEE em diversos sectores, como também a transição energética através de uso de fontes de energias renováveis em vez de fontes fósseis.

Como fontes renováveis de energia, os biocombustíveis surgem como uma resposta à necessidade de transição energética.

Biocombustíveis são combustíveis líquidos, sólidos ou gasosos derivados da biomassa, quer sejam de organismos vivos, quer através dos seus processos metabólicos (WBCSD, 2007). A biomassa refere-se ao material orgânico proveniente de vegetais e animais.

A biomassa é um recurso natural que dispõe de bioenergia que pode ser transformado para fornecer formas bioenergéticas mais elaboradas e adequadas para o uso final (BNDS, 2008). A produção de biomassa é resultado do processo de fotossíntese, nos vegetais, que ocorre pela absorção de CO<sub>2</sub>, água e energia solar, com formação de açúcar, oxigénio e fixação de energia em forma de energia química.



Segundo BNDS (2008) nesta reacção, a formação de 1kg de açúcar corresponde a fixação de 17.6MJ de energia solar equivalente a cerca de meio litro de gasolina.

A produção de biomassa e biocombustíveis é sustentável ao meio ambiente, visto que há um equilíbrio no ciclo de carbono. As emissões líquidas de CO<sub>2</sub> pela queima da biomassa são nulas, visto que a quantidade de CO<sub>2</sub> emitida à atmosfera pela queima e/ou uso de biocombustíveis, é a mesma necessária para produção de nova biomassa em peso.

Por esta razão, para BNDS (2008), os biocombustíveis apresentam duas vantagens: seu uso permite reduzir a emissão de carbono para a atmosfera e, além disso, a produção de biomassa é potencialmente favorecida, dentro de limites e para algumas espécies, pela crescente disponibilidade de dióxido de carbono na atmosfera.

Existem vários tipos de biocombustíveis, sendo os principais: o biodiesel, o bioetanol, o biogás, a biomassa, o biometanol e o biohidrogénio.

### **2.3.1. Gerações dos biocombustíveis**

#### **➤ Geração 0**

Os biocombustíveis de *geração 0* caracterizam-se pela baixa ou nenhuma tecnologia para sua produção e principalmente por matéria-prima de fonte extractiva. A lenha e o carvão vegetal são exemplos de biocombustíveis de *geração 0*, sendo a principal matriz energética de Moçambique, principalmente nas zonas rurais onde não há acesso à electricidade e outras fontes de energia.



Figura 2. Uso de lenha como biocombustível de geração 0 em Moçambique

Fonte: Alves, M. (2020).

### ➤ Primeira geração

A primeira geração caracteriza-se por biocombustíveis produzidos principalmente de matérias-primas cultivadas e pela baixa complexidade tecnológica para a sua produção. WBCSD (2007) considera, ainda, que os biocombustíveis desta geração são caracterizados por matéria-prima constituída por açúcares, amido e óleo, que podem ser convertidos utilizando tecnologias de hidrólise ou fermentação e de prensagem ou esterificação.

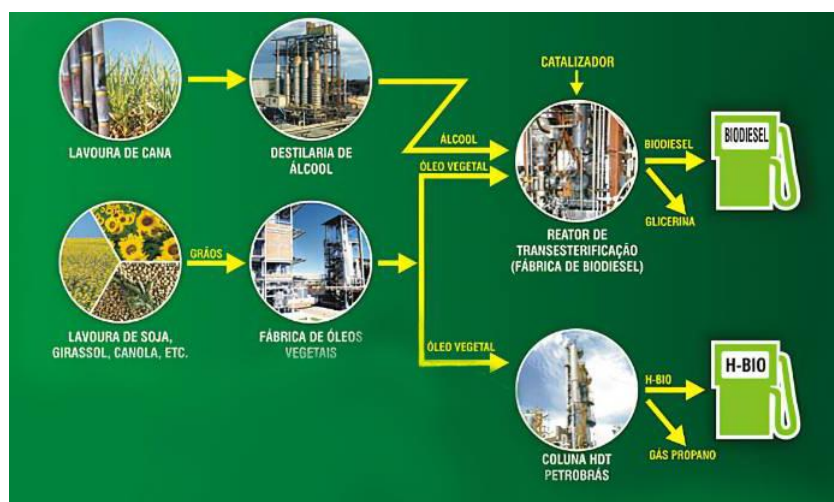


Figura 3. Biocombustíveis de primeira geração

Fonte: Bio-Combustível (2011)

Os principais exemplos de biocombustíveis de primeira geração e suas matérias-primas são: bioetanol (milho, cana-de-açúcar, beterraba, trigo, mandioca, etc.) e biodiesel (soja, girassol e colza).

### ➤ Segunda geração

A segunda geração de biocombustíveis refere-se aos produzidos através de biomassa lenho-celulósica de plantas herbáceas e perenes, através de tecnologias de hidrólise ou fermentação, gaseificação ou pirólise. A matéria-prima não é destinada para a alimentação, e apresenta uma alta complexidade tecnológica para a produção de biocombustíveis.

As principais matérias-primas para a produção de biocombustíveis desta geração são: resíduos de cana-de-açúcar e outras matérias ligno-celulósicas; óleo residual de fritura, gordura animal, gordura de efluentes urbanos e/ou industriais.

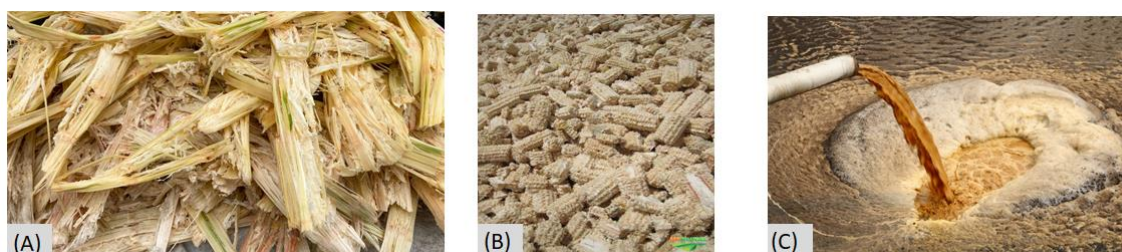


Figura 4. Matéria-prima para produção de biocombustíveis de segunda geração: (A) – Bagaço de cana-de-açúcar; (B) – Sabugo de milho; (C) – Gorduras de efluentes domésticos e industriais.

Fontes: Syngenta Digital. (2016) & Moure, R. M. (2019)

### ➤ Terceira geração

Esta geração caracteriza-se pela alta velocidade de produção, alto teor de óleo e carboidratos, adaptação a um espectro amplo de temperatura e acidez do meio, capacidade para fixar nitrogénio e maior eficiência fotossintética, como é o caso de biocombustíveis produzidos a partir de microalgas.



Figura 5. Cultivo de microalgas em reactores tubulares para produção de biocombustíveis de terceira geração

Fonte: Jessie (2019, actualização em 2022)

De uma forma geral, são apresentadas abaixo as diversas tecnologias aplicadas e as respectivas matérias-primas para produção de biocombustíveis:

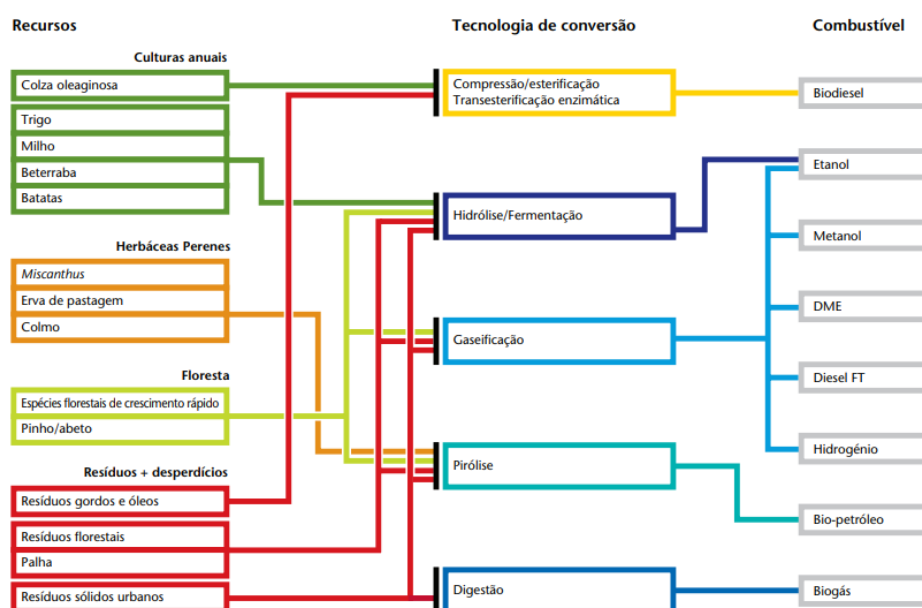


Figura 6. As matérias-primas e tecnologias aplicadas para a produção de biocombustíveis

Fonte: WBCSD (2007)

### 2.3.2. Bioetanol

O etanol, também chamado de álcool etílico, é um composto químico de carbono, hidrogénio e oxigénio, com fórmula  $C_2H_5OH$ . Apresenta-se na fase líquida em temperatura ambiente, é incolor e límpido e possui sabor ardente

(Oliveira, 2009). O bioetanol é produzido através de qualquer biomassa renovável que contenha quantidades suficientes de açúcares ou amido através de processos microbiológicos fermentativos.

### **2.3.3. Matéria-prima para produção de bioetanol**

#### **➤ Açúcares**

A principal matéria-prima para a produção de etanol é a cana-de-açúcar, na forma de um caldo de cana ou melaço. Para além da cana-de-açúcar, o melaço de beterraba é outra fonte de açúcares fermentáveis.

Para a produção de etanol a partir da biomassa açucarada, o açúcar é extraído da matéria-prima por meio de pressão ou difusão após processos de pré-tratamento da amostra, e a solução açucarada é fermentada por meio de microorganismos, principalmente leveduras, e depois destilada para remoção de impurezas.

#### **➤ Matéria-prima amilácea**

O bioetanol pode ser produzido também através de matéria-prima amilácea, sendo necessário a sua hidrólise para posterior fermentação (Chagas, 2012). As culturas amiláceas que podem ser usadas para a produção do bioetanol incluem o milho, o trigo, a mandioca, cevada, sorgo e bananas.

O processo de produção de bioetanol a partir de biomassa amilácea é o mesmo da biomassa açucarada, sendo necessário realizar a hidrólise do amido extraído da matéria-prima, para obtenção de açúcares fermentáveis.

#### **➤ Biomassa lignocelulósica**

Os potenciais materiais lignocelulósicos para produção de etanol combustível podem ser divididos em seis grupos principais: restos vegetais (bagaço de cana, palha de milho, palha de trigo, palha de arroz, casca de arroz, palha de cevada, bagaço de sorgo doce, caroços de azeitona e celulose); madeiras de lei (mogno, álamo, choupo); madeira macia (pinus, pinheiro); resíduos de celulose, papel de jornal, resíduos de papel de escritório, lamas papel reciclado); biomassa herbácea (feno de alfafa, gramíneas, capim-amarelo, bermuda costeira); e resíduos sólidos urbanos (RSU).

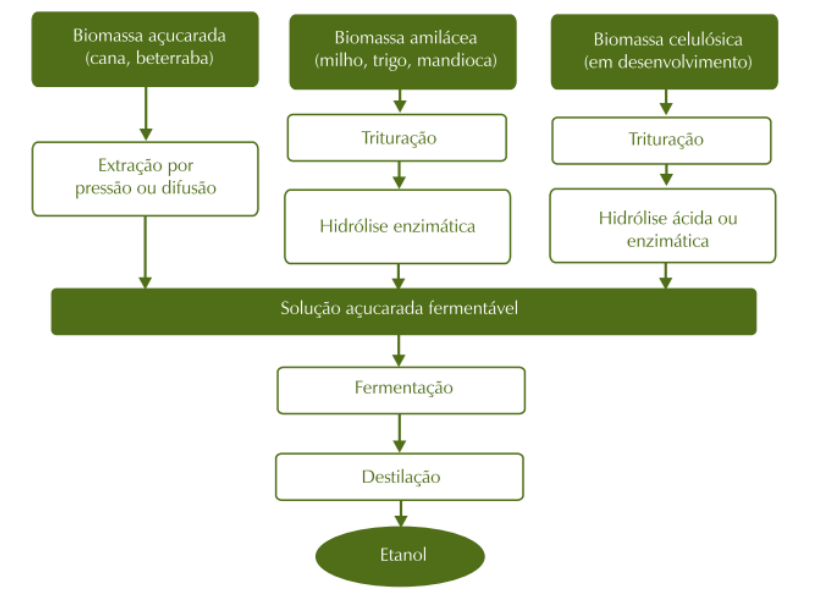


Figura 7. Rotas tecnológicas para a produção de bioetanol

Fonte: BNDES (2008)

Embora a complexidade inerente ao tratamento da matéria-prima lignocelulósica seja um factor limitante, devido ao processo de degradação de seus polímeros em açúcares fermentáveis que é complicado, altamente consumidor de energia e não completamente desenvolvido, Chagas (2012) aponta que estes materiais representam uma opção promissora como matéria-prima para produção de etanol, considerando a sua grande disponibilidade, tanto em países tropicais como temperados, o seu baixo custo (principalmente relacionado com o seu transporte), e seus rendimentos em termos de etanol. Uma das vantagens da utilização de biomassa lignocelulósica é que esta matéria-prima não está directamente relacionada com a produção de alimentos, o que implica a produção de bioetanol, sem a necessidade de empregar grandes extensões de terra cultivável fértil para o cultivo de cana ou de milho exclusivamente dedicada à produção de bioenergia.

#### 2.3.4. Propriedades físico-químicas do bioetanol

##### ➤ Poder calorífico

O poder calorífico é a quantidade de calor (J) liberado na combustão de uma certa quantidade mássica (kg) ou volumétrica (l) de combustível, indicando, desta forma, o potencial energético do combustível. O poder calorífico

apresenta-se de duas formas: Poder Calorífico Inferior (PCI) e Poder Calorífico Superior (PCS).

O PCI consiste na quantidade de energia interna efectivamente disponível em um combustível, não considerando o calor latente de condensação do vapor d'água presente nos gases de combustão; enquanto o PCS consiste na quantidade de energia contida no combustível quando toda a humidade e mais a água que resulta da oxidação do hidrogénio no processo de combustão estão condensadas (Monteiro, 2015). Desta forma, para a maioria dos combustíveis o PCS é sempre maior que o PCI.

O etanol hidratado, Segundo BNDES (2008) apresenta um PCI de 28 225 kJ/kg e, um PCS que varia de 20 200 kJ/kg a 30 000 kJ/kg, de acordo com Vanzella (2015), que relatou um valor de 25 812 kJ/kg em suas análises. Por sua vez, Odongo *et al* (2024) relatou um PCS de 21 890 kJ/kg para bioetanol produzido a partir de cascas de mandioca.

O poder calorífico superior varia de acordo com a quantidade de água presente no etanol hidratado.

#### ➤ **Densidade**

A densidade do etanol é de 0.792 kg/l a 20°C para o etanol anidro, e de 0.807 a 0.811 kg/l para o etanol hidratado, dependendo da quantidade de água presente no etanol (Vanzella, 2015).

#### ➤ **Ponto de fulgor**

O ponto de fulgor ou de inflamação, é a temperatura mínima na qual o combustível libera vapor em quantidades suficientes para formar uma mistura inflamável com o ar, pelo contacto com uma chama.

O ponto de fulgor pode variar, embora muito pouco, dependendo da quantidade de água presente no combustível e do ambiente (recipiente fechado ou aberto em contacto com a atmosfera). Para o etanol anidro, o ponto de fulgor é de 13°C, e para o etanol hidratado, dependendo da quantidade de água presente, pode variar de 15°C a 17°C.

### ➤ **Teor alcoólico**

De acordo com o teor alcoólico, o etanol pode ser hidratado ou anidro, variando, desta forma, a quantidade de água e de álcool presente no mesmo.

Para o etanol anidro, o teor alcoólico mínimo deve ser de 99.6% (v/v), com o teor máximo de água de 0.4% (v/v). Para o etanol hidratado, o teor alcoólico deve estar entre 95.1% (v/v) a 96.0% (v/v) e o teor de água deve ser no máximo de 4.9% (v/v).

Para a determinação da qualidade do etanol, anidro e hidratado, é apresentada a tabela abaixo com os parâmetros mais indicativos de qualidade do mesmo e os respectivos intervalos. É de considerar, ainda, para a determinação da qualidade do etano, as faixas de pH, a cor, acidez total e a condutividade eléctrica.

Tabela 3. Propriedades físico-químicas do etanol anidro (EAC) e hidratado (EHC)

Fonte: Vanzella (2015)

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	EAC (ANIDRO)	EHC (HIDRATADO)
Aspecto	-	Límpido e isento de impurezas	Límpido e isento de impurezas
Cor	-	Laranja, após corante	Sem corantes (ausência total)
Acidez total, máx.	mg L <sup>-1</sup> (de ácido acético)	30	30
Condutividade elétrica, máx.	μS m <sup>-1</sup>	389	389
Massa específica a 20 °C	kg m <sup>-3</sup>	791,5 máx.	807,6 a 811,0
Teor alcoólico	% volume	99,6 mín.	95,1 a 96,0
	% massa	99,3 mín.	92,5 a 93,8
pH a 20 °C	-	-	6,0 a 8,0
Teor de etanol, mín.	% volume	98,0	94,5
Teor de água, máx.	% volume	0,4	4,9
Teor de metanol, máx.	% volume	0,5	0,5

### 2.3.5. Comparação do bioetanol com a gasolina

De acordo com Henriques (2012) o bioetanol apresenta um potencial para reduzir as emissões de partículas nos motores de ignição por compressão.

Com maior octanagem, limites mais amplos de flamabilidade e calor de vaporização superior o da gasolina, o bioetanol apresenta uma maior taxa de compressão e menor tempo de queima do motor, o que leva a uma maior eficiência do bioetanol relativamente à gasolina num motor de combustão interna.

Tabela 4. Propriedades do bioetanol e da gasolina

Fonte: Henriques (2012)

Propriedades dos Combustíveis	Gasolina	Bioetanol
Peso Molecular [kg/kmol]	111	46
Densidade [kg/L] a 15°C	0,75	0,80-0,82
Teor de Oxigénio [% em peso]		34,8
Poder Calorífico Inferior (PCI) [MJ/kg a 15°C]	41,3	26,4
Poder Calorífico Inferior [MJ/L a 15°C]	31	21,2
Índice de Octano (RON)	97	109
Índice de Octano (MON)	86	92
Índice de Cetano	8	11
Relação Estequiométrica do ar/combustível [kg Ar/kg Combustível]	14,7	9
Temperatura de Ebulição [°C]	30-190	78
Pressão de Vaporização [kPa] a 15°C	75	16,5

A presença do oxigénio no conteúdo do bioetanol melhora a combustão, reduzindo a emissão de hidrocarbonetos (HC), de monóxido de carbono (CO) e de material particulado (MP).

O bioetanol é adequado para a mistura de combustível nos motores a gasolina devido ao seu alto índice de octano, baixo valor de cetano e elevado calor de vaporização que impede a auto-ignição do combustível.

### 2.3.6. Aplicações do bioetanol

O etanol hidratado possui diversas aplicações, sendo as mais comuns a fabricação de bebidas, a fabricação de cosméticos, a fabricação de vacinas e antibióticos, a fabricação de detergentes, produtos de limpeza, tinturas, têxteis, pinturas, solventes e, principalmente, sua utilização como combustível (Oliveira, 2009).

Como combustível, o etanol hidratado pode ser usado puro em motores fabricados ou adaptados especificamente para esse fim (motores *flex-fuel*). O Brasil, Estados Unidos, Canadá e Suécia são exemplos de países que já têm motores projectados para funcionarem com etanol hidratado puro (BNDES, 2008).

O etanol hidratado pode, também, ser usado para iluminação e como combustível de cozinha. Moçambique, sendo um país constituído maioritariamente por comunidades rurais, onde grande parte delas não têm

acesso à electricidade e outras fontes de energia como o gás e o carvão vegetal para cozinha, o etanol pode ser usado como combustível na confecção de alimentos, como também em candeeiros para a iluminação.

O etanol anidro, sendo um álcool cuja aplicação não tolera a presença significativa de água (Oliveira, 2009), é utilizado em aplicações industriais como reactivo, solvente e na fabricação de aerossóis (insecticidas, repelentes de insectos, desodorantes de ambientes, fungicidas, etc.).

Como combustível, é usado como aditivo à gasolina, tendo substituído o chumbo, melhorando a combustão, pelo aumento da octanagem e pela presença de oxigénio na molécula do álcool, e reduzindo a liberação de monóxido de carbono. De igual forma, segundo BNDES (2008), em consequência dessa composição, a combustão da gasolina com etanol também resulta em menores emissões de óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>), hidrocarbonetos e outros compostos poluentes.

No Brasil, desde a década de 1980, o teor de etanol anidro em toda a gasolina comercializada nos postos revendedores esteve acima de 20%; nos Estados Unidos, esse teor ficou limitado aos 10%, também conhecido como E10; e a China, Tailândia, Austrália e Colômbia adoptaram o E10 igualmente. Em África, Angola, Quênia e Malawi adoptaram também o E10 (10% de etanol na gasolina).

Em Moçambique, segundo o Decreto n.º 61/2023 de 15 de Novembro que regula sobre os biocombustíveis puros e suas misturas com produtos petrolíferos, estabelece-se que a percentagem de etanol anidro na mistura com a gasolina é de 10% a partir de Agosto de 2024 até 31 de Dezembro de 2027, 15% a partir de Janeiro de 2028 até 31 de Dezembro de 2032 e 20% a partir de Janeiro de 2033.

#### **2.4. Necessidades energéticas em comunidades rurais**

De acordo com o INE (2022) o número de agregados familiares em zonas rurais em Moçambique é de média de 5 pessoas. E Girieshop *et al.* (2011), destaca que estudos internacionais indicaram que fogões melhorados nessas comunidades demandam um valor médio de 2.5 MJ de energia por pessoa por

dia para cozinha (coacção de alimentos) e um adicional de 4MJ por dia por família para iluminação, aquecimento de água e/ou ambiente, podendo variar de acordo com o clima e as práticas das famílias.

Desta forma, a quantidade total estimada de energia para alimentar essas famílias encontra-se em torno de 16.5MJ por família por dia.

## **2.5. Produção de etanol a partir de biomassa amilácea (cascas de mandioca)**

Como já mencionado, Moçambique é um país com elevado potencial de produção de mandioca. Nos últimos anos, a elevada produção de mandioca está associada ao fornecimento de matéria-prima para fábricas de produção de cervejas, como também para a produção de farinhas de amido de mandioca.

Estes processos são responsáveis por geração de resíduos em elevadas quantidades. As fábricas da DADTCO, apenas em Inhambane, são responsáveis pela geração de um pouco mais de 100 toneladas de cascas de mandioca por ano, podendo ser reaproveitadas para a produção de etanol.

### **2.5.1. Etapas de produção de etanol**

As etapas de produção de etanol envolvem o pré-tratamento da amostra (recolha, lavagem, secagem e trituração), o cozimento, a hidrólise ou sacarificação, a fermentação e a destilação. A produção de etanol a partir de cascas de mandioca segue o mesmo procedimento que a produção a partir das raízes da mandioca.



Figura 8. Etapas de produção de etanol a partir da mandioca

Fonte: Oliveira (2009)

### ➤ Pré-tratamento

O pré-tratamento é realizado para remover impurezas da mostra (areia) por meio da lavagem. Após a lavagem, a amostra é colocada a secar para posterior trituração para a redução do tamanho e homogeneização. A trituração ou desintegração das amostras permite facilitar a penetração do calor, a gelificação (formação de gel) e o ataque das enzimas amilolíticas ou do ácido, durante a sacarificação do amido (Oliveira, 2019).

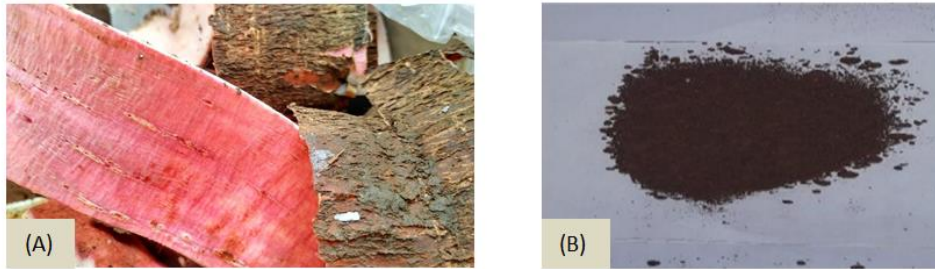


Figura 9. Pré-tratamento de amostras de cascas de mandioca: (A) Cascas de mandioca in natura; (B) Cascas de mandioca após pr-é-tratamento

Fonte: Dahiru *at al* (2019)

### ➤ Cozimento ou gelatinização

O amido, que é o material de interesse na amostra, é um polissacarídeo composto por grânulos compactados insolúveis de amilose e amilopectina, que são moléculas constituídas por unidades D-glicose.

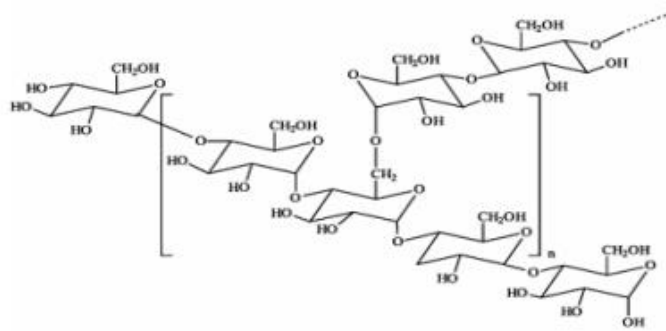


Figura 10. Estrutura de amilopectina

Fonte: Oliveira (2019)

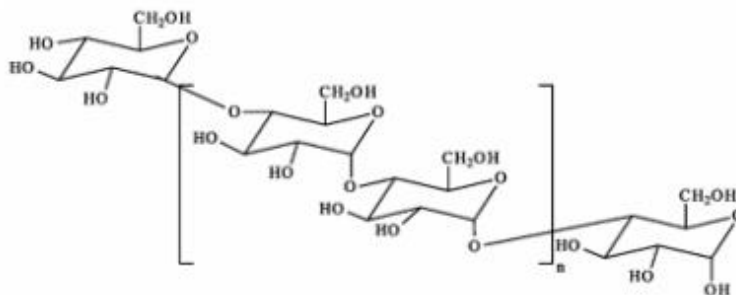


Figura 11. Estrutura de amilose

Fonte: Oliveira (2019)

O processo de cozimento é responsável pela separação da estrutura de amilose e de amilopectina, por meio do inchaço dos grânulos do amido e solubilização das estruturas. O cozimento é realizado com adição de 200 – 300 litros de água para 100kg de graus de amido e, à temperaturas controladas, mantêm-se fervura leve até a formação de uma pasta viscosa.

#### ➤ **Sacarificação ou hidrólise**

O processo de hidrólise ou sacarificação consiste na fragmentação das estruturas que compõem o amido (amilose e amilopectina), para liberação de glicose, que é um açúcar fermentável. A hidrólise pode ser enzimática ou química.

A hidrólise química consiste no uso de um ácido forte para o desdobramento das moléculas de amilose e amilopectina, que se rompem e se transformam em dextrinas cada vez mais simples e finalmente fermentáveis (Vilpoux *et al*, 2003 *apud* Oliveira, 2019).

A acção do ácido para rompimento dessas estruturas pode ser acelerado por processos físicos como a temperatura e a pressão. Para realizar a hidrólise ácida, adiciona-se ácido, geralmente HCl e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentrado na proporção de 0,1 a 0,2% sobre o peso seco de amido, à goma proveniente da etapa de cozimento.

A hidrólise enzimática consiste em uma reacção química mediada por enzimas, em meio aquoso, para a quebra de uma molécula em fracções menores (Martinez, 2016). As enzimas mais usadas são as amilolíticas que actuam sobre o amido transformando-o em açúcares fermentescíveis (Oliveira, 2009).

As principais enzimas são: *α-amilase*, *β-amilase* e amiloglicosidase. A *α-amilase* ataca a amilose e a amilopectina transformando-os em *α*-dextrinas, havendo, ainda, a necessidade de acção da enzima amiloglicosidase para a formação de glicose. A *β-amilase* é considerada uma enzima sacarificante, uma vez que produz açúcares a partir do amido.

A hidrólise enzimática apresenta melhores rendimentos na conversão de amido em glicose em relação a hidrólise química, como indicado na tabela abaixo.

Tabela 5. Comparação de rendimento da hidrólise ácida e enzimática

Fonte: Oliveira 2009

Hidrólise	Ácida (%)	Enzimática (%)		
		Enzimas comerciais	Processo amilo	Malte
<b>Rendimento de hidrólise (*)</b>	43 - 73	95	80 - 85	70 - 74

### ➤ Fermentação

A fermentação alcoólica ocorre no interior de microorganismos capazes de converter açúcares em etanol por meio de reacções bioquímicas (Martinez, 2016). Neste processo, uma molécula de glicose é transformada em duas moléculas de piruvato, através da glicólise, que por sua vez, sob condições anaeróbicas, são convertidas em etanol e CO<sub>2</sub>.

A levedura mais usada para a produção de álcool comum, aguardente, cerveja e outras bebidas, bem como para a panificação, é a *Saccharomyces cerevisiae*. As condições óptimas para fermentação alcoólica situam entre temperaturas de 26 a 35°C e pH entre 4.0 a 5.0.

### ➤ Destilação

O produto final do processo é o mosto constituído por três fases: líquida, sólida e gasosa. Nesta mistura encontra-se o etanol, água, CO<sub>2</sub> e outras impurezas. Para a obtenção do etanol, a mistura é destilada, havendo separação das substâncias por diferença de pontos de ebulição. Misturas hidroalcoólicas apresentam, à pressão atmosférica, uma temperatura de ebulição entre 78,35 e 100 ° C, a temperatura de ebulição de etanol e água, respectivamente.

#### **2.5.2. Potencial de produção de etanol a partir de cascas de mandioca**

As cascas de mandioca, devido a presença de amido em maiores proporções em sua constituição, apresentam um potencial significativo para a produção de etanol, garantindo, desta forma, a sua valorização energética.

O rendimento de etanol a partir das cascas de mandioca depende muito do processo de hidrólise, ou seja, do rendimento na conversão do amido em

açúcares fermentáveis, como também do processo de fermentação (os microorganismos usados e as condições de temperatura e pressão).

Segundo Adetunji *et al.* (2015) as cascas de mandioca atingem cerca de 96% de rendimento de conversão do componente amiláceo em açúcares fermentáveis. Odongo *et al.* (2024) obteve um rendimento de produção de bioetanol de 200l/ton e Simon *et al.* (2019) obteve um rendimento de 274.3l/ton.

### 3. Materiais e métodos

#### 3.1. Caracterização da matéria-prima

##### 3.1.1. Humidade (%*H*)

A metodologia de determinação da humidade é baseada na técnica ASTM (American Society for Testing and Materials) D2216, que é em método gravimétrico de secagem na estufa para a remoção da água livre da amostra por aquecimento a 105 – 110 °C (Das, 2002, pp. 5–6).

Esta técnica especifica a determinação de conteúdo de água em solos e materiais sólidos. Para a sua determinação, a amostra é pesada num recipiente (cadinho) previamente tratado (para remoção de impurezas e humidade) e sua massa registada ( $m_0$ ). De seguida, o cadinho é transferido para uma estufa a uma temperatura de 105 – 110 °C durante 24h. A amostra é resfriada num dessecador e depois pesada ( $m_1$ ). E, por fim, prossegue ao cálculo:

$$\% H = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100$$

Onde:

***H***: humidade;

**$m_0$** : massa da amostra;

**$m_1$** : massa da amostra depois de 24h na estufa.

##### 3.1.2. Sólidos totais (***ST***), Sólidos Voláteis (***SV***) e Sólidos Fixos (***SF***)

Os sólidos totais representam a quantidade de matéria remanescente após a evaporação completa da água. Podem ser determinados pela equação:

$$\%ST = 100\% - \%H$$

Onde:

***ST***: sólidos totais;

***H***: humidade.

O ASTM estabelece também, para além da humidade, normas amplamente utilizadas para a determinação de sólidos voláteis e fixos por meio da calcinação na mufla por meio dos métodos ASTM D3174 e D3175 – Métodos para Análise Proximal de Carvão e Outros Materiais Sólidos (*Speight, 2013, pp. 227–230*).

Após a secagem, a amostra ( $m_1$ ) é transferida para uma mufla a 550°C e mantido nessa temperatura por 2 horas, e depois é resfriado e pesado ( $m_2$ ). De seguida prossegue-se ao cálculo:

$$\%SV = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100$$

$$\%SF = \%ST - \%SV$$

Onde:

$m_1$ : massa da amostra seca na estufa;

$m_2$ : massa da amostra calcinada na mufla;

**SV**: sólidos voláteis;

**SF**: sólidos fixos;

**ST**: sólidos totais.

Os sólidos voláteis representam a fracção orgânica da amostra, composta por carbono orgânico, nitrogénio orgânico, lipídios, carboidratos e outros compostos que podem ser oxidados ou decompostos em gases, sendo essencial para processos biológicos, como a fermentação alcoólica, pois fornece a base energética (açúcares) necessária para o metabolismo das leveduras.

Por sua vez, a percentagem de sólidos fixos representa a fracção inorgânica sem nenhum papel na fermentação alcoólica.



Figura 12. Preparação da amostra para determinação de humidade, sólidos totais, voláteis e fixos

## **3.2. Produção de etanol**

### **3.2.1. Pré-tratamento**

A matéria-prima para a produção do etanol são as cascas de mandioca, obtidos da mandioca adquirida no mercado Zona Verde, na Matola, para alimentação. As cascas, após a recolha, passam por um processo de pré-tratamento, que inclui a lavagem para remoção de impurezas, a secagem na estufa e a trituração.



Figura 13. Pré-tratamento da amostra (secagem na estufa e trituração)

### **3.2.2. Cozimento ou gelatinização**

Após a desintegração das cascas, adicionou-se água para formar uma suspensão com 22.93% de sólidos para o processo de cozimento por meio de fervura em chama aberta por 40min, até a formação de um gel. Este processo separa a amilose da amilopectina para o processo de hidrólise (quebra das estruturas para formação de açúcares fermentáveis).



Figura 14. Gelatinização da amostra

### 3.2.3. Hidrólise ou Sacarificação

Para a quebra de estruturas complexas (amilose e amilopectina) para estruturas simples (glicose) fermentáveis, recorreu-se a hidrólise ácida. Adicionou-se 3% (p/p) de ácido acético concentrado na amostra gelatinizada e aqueceu-se a mistura num banho-maria a 100°C por 1h30min, mantendo-se uma mistura constante. Após a hidrólise, resfriou-se a mistura e, após a filtração, corrigiu-se o pH usando NaOH para aproximadamente 7.



Figura 15. Hidrólise ácida

### 3.2.4. Fermentação

Para a fermentação do mosto, após a filtração, adicionou-se ao mosto 25g de levedura *Saccharomyces cerevisiae* responsável que realiza, em meio anaeróbico, a fermentação alcoólica de açúcares fermentáveis para a produção de etanol. O processo fermentativo decorreu em 11 dias em temperatura ambiente (25-28°C).

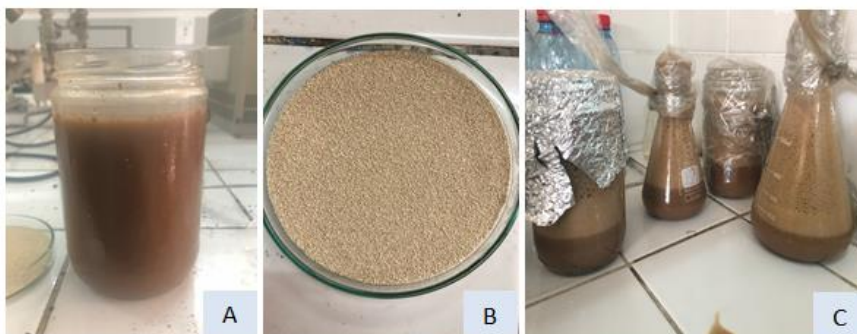


Figura 16. Fermentação: A. Mosto filtrado; B. Leveduras; C. Processo fermentativo

### 3.2.5. Destilação

O resultado final da fermentação alcoólica é uma mistura de substâncias das quais encontramos o etanol e água. A pressão atmosférica, a temperatura de ebulição da água e do etanol é entre 78,35 e 100 ° C, respectivamente, pelo que, para a separação destes componentes ocorre pela diferença de ponto de ebulição.



Figura 17. Processo de destilação alcoólica

## 3.3. Caracterização do bioetanol

### 3.3.1. Densidade

Para a determinação da densidade do etanol produzido foi usado o método gravimétrico ou picnómetro, através da medição do volume e da massa da amostra.



Figura 18. Determinação da densidade através da picnometria

Foram tomadas quatro (4) alíquotas de etanol de 1ml, 2ml, 3ml e 4ml respectivamente. Primeiramente, o recipiente vazio é pesado e a sua massa é registada ( $m_0$ ) e de seguida, por meio de uma pipeta, é recolhida a amostra de um volume conhecido ( $V$ ) e adicionado ao recipiente e, por sua vez, a nova massa é registada ( $m_1$ ). A massa do etanol é determinada pela diferença da massa do recipiente com etanol e da massa do recipiente vazio e, por sim, a densidade do etanol é determinado pela equação (ii).

i.  $m = m_1 - m_0$


ii.  $d = \frac{m}{V}$

### 3.3.2. Teor alcoólico

A Associação Brasileira de Normas Técnica (ABNT) apresenta normas, métodos e tabelas para a determinação do teor alcoólico através da densidade do etanol em função da temperatura. Foi, portanto, recorrido a norma ABNT NBR 5992 – Álcool etílico e suas misturas com água – Determinação da massa específica e do teor alcoólico – para a determinação do teor acólico através da Tabela abaixo:

Tabela 6. Determinação do teor alcoólico através da densidade

Fonte: ABNT


**Tabela Alcoolométrica**

Temperatura °C	Massa específica líquida kg/m³	Grau alcoólico %v/v	Resultado a 20 °C		Fator correção volume 20 °C	Temperatura °C	Massa específica líquida kg/m³	Grau alcoólico %v/v	Resultado a 20 °C		Fator correção volume 20 °C
			Massa específica kg/m³	Grau alcoólico %v/v					Massa específica kg/m³	Grau alcoólico %v/v	
15,5	809,02	94,65	805,13	96,56	1,0047	16,0	809,15	94,45	805,70	96,42	1,0041
15,5	808,87	94,70	804,99	96,59	1,0047	16,0	809,01	94,50	805,56	96,45	1,0041
15,5	808,73	94,75	804,85	96,62	1,0047	16,0	808,87	94,55	805,42	96,49	1,0041
15,5	808,59	94,80	804,71	96,66	1,0047	16,0	808,73	94,60	805,27	96,52	1,0042
15,5	808,45	94,85	804,57	96,69	1,0047	16,0	808,59	94,65	805,13	96,56	1,0042
15,5	808,31	94,90	804,42	96,73	1,0047	16,0	808,44	94,70	804,99	96,59	1,0041
15,5	808,16	94,95	804,28	96,76	1,0047	16,0	808,30	94,75	804,85	96,62	1,0041
15,5	808,02	95,00	804,14	96,79	1,0047	16,0	808,16	94,80	804,71	96,66	1,0041
16,0	815,95	92,00	812,49	94,71	1,0041	16,0	808,02	94,85	804,57	96,69	1,0041
16,0	815,81	92,05	812,35	94,75	1,0041	16,0	807,88	94,90	804,42	96,73	1,0042
16,0	815,68	92,10	812,22	94,78	1,0041	16,0	807,73	94,95	804,28	96,76	1,0041
16,0	815,54	92,15	812,08	94,82	1,0041	16,0	807,59	95,00	804,14	96,79	1,0041
16,0	815,40	92,20	811,94	94,85	1,0041	16,5	815,82	92,00	812,49	94,71	1,0036
16,0	815,27	92,25	811,81	94,89	1,0041	16,5	815,38	92,05	812,35	94,75	1,0036
16,0	815,13	92,30	811,67	94,92	1,0041	16,5	815,24	92,10	812,22	94,78	1,0036
16,0	814,99	92,35	811,53	94,96	1,0041	16,5	815,11	92,15	812,08	94,82	1,0036
16,0	814,85	92,40	811,40	94,99	1,0041	16,5	814,97	92,20	811,94	94,85	1,0036
16,0	814,72	92,45	811,26	95,03	1,0041	16,5	814,83	92,25	811,81	94,89	1,0036
16,0	814,58	92,50	811,12	95,06	1,0041	16,5	814,70	92,30	811,67	94,92	1,0036
16,0	814,44	92,55	810,99	95,10	1,0041	16,5	814,56	92,35	811,53	94,96	1,0036
16,0	814,30	92,60	810,85	95,14	1,0041	16,5	814,42	92,40	811,40	94,99	1,0036
16,0	814,17	92,65	810,71	95,17	1,0041	16,5	814,29	92,45	811,26	95,03	1,0036
16,0	814,03	92,70	810,57	95,21	1,0041	16,5	814,15	92,50	811,12	95,06	1,0036
16,0	813,89	92,75	810,44	95,24	1,0041	16,5	814,01	92,55	810,99	95,10	1,0036
16,0	813,75	92,80	810,30	95,28	1,0041	16,5	813,87	92,60	810,85	95,14	1,0036
16,0	813,62	92,85	810,16	95,31	1,0041	16,5	813,74	92,65	810,71	95,17	1,0036
16,0	813,48	92,90	810,02	95,35	1,0041	16,5	813,60	92,70	810,57	95,21	1,0036
16,0	813,34	92,95	809,88	95,38	1,0041	16,5	813,46	92,75	810,44	95,24	1,0036
16,0	813,20	93,00	809,75	95,42	1,0041	16,5	813,32	92,80	810,30	95,28	1,0036
16,0	813,06	93,05	809,61	95,45	1,0041	16,5	813,19	92,85	810,16	95,31	1,0036
16,0	812,93	93,10	809,47	95,49	1,0041	16,5	813,05	92,90	810,02	95,35	1,0036
16,0	812,79	93,15	809,33	95,52	1,0041	16,5	812,91	92,95	809,88	95,38	1,0036
16,0	812,65	93,20	809,19	95,56	1,0041	16,5	812,77	93,00	809,75	95,42	1,0036
16,0	812,51	93,25	809,05	95,59	1,0041	16,5	812,63	93,05	809,61	95,46	1,0036
16,0	812,37	93,30	808,91	95,63	1,0041	16,5	812,49	93,10	809,47	95,49	1,0036
16,0	812,23	93,35	808,78	95,66	1,0041	16,5	812,36	93,15	809,33	95,52	1,0036
16,0	812,09	93,40	808,64	95,70	1,0041	16,5	812,22	93,20	809,19	95,56	1,0036
16,0	811,95	93,45	808,50	95,73	1,0041	16,5	812,08	93,25	809,05	95,59	1,0036
16,0	811,81	93,50	808,36	95,77	1,0041	16,5	811,94	93,30	808,91	95,63	1,0036
16,0	811,68	93,55	808,22	95,80	1,0041	16,5	811,80	93,35	808,78	95,66	1,0036
16,0	811,54	93,60	808,08	95,83	1,0041	16,5	811,66	93,40	808,64	95,70	1,0036
16,0	811,40	93,65	807,94	95,87	1,0041	16,5	811,52	93,45	808,50	95,73	1,0036

### 3.3.3. pH

Para a determinação do pH foi requerido ao método potenciômetro, utilizando-se, especificamente, o medidor de pH ou pHmetro portátil (Figura A).



Figura 19. pHmetro portátil

O pH pode variar de 0 a 14. Quanto mais próximo de 14, a amostra é mais alcalina, pois há maior presença de íons  $\text{OH}^-$ . Quanto mais próximo do zero o resultado, maior a acidez da solução e maior a concentração de íons de hidrogénio ( $\text{H}^+$ ).

A solução é considerada neutra quando o valor do pH for igual a 7.

### 3.3.4. Aspecto e cor

Para a determinação do aspecto e da cor da amostra, utilizou-se o método de observação visual. Foram seleccionados, de forma aleatória, três observadores, que identificaram visualmente a coloração e o aspecto da amostra.

Como não existe uma escala padronizada para esse tipo de análise, recorreu-se à sensibilidade visual dos observadores para avaliar a transparência ou a presença de coloração. O resultado final foi obtido a partir da média dos valores atribuídos pelos três observadores.

### 3.3.5. Poder calorífico

Para a determinação do poder calorífico da amostra do etanol recorreu-se ao método de calorimetria directa com calorímetro de copo, onde um volume conhecido de água ( $V_{\text{água}}$ ) foi colocado num calorímetro de copo de metal e uma quantidade conhecida de etanol ( $m_{\text{etanol}}$ ) num suporte (cadinho). A temperatura da água foi inicialmente registada ( $T_1$ ) e, de seguida, tendo-se posicionado o suporte com etanol abaixo do calorímetro, iniciou-se a ignição do etanol permitindo que ele queime completamente, liberando calor que foi transferido para a água.

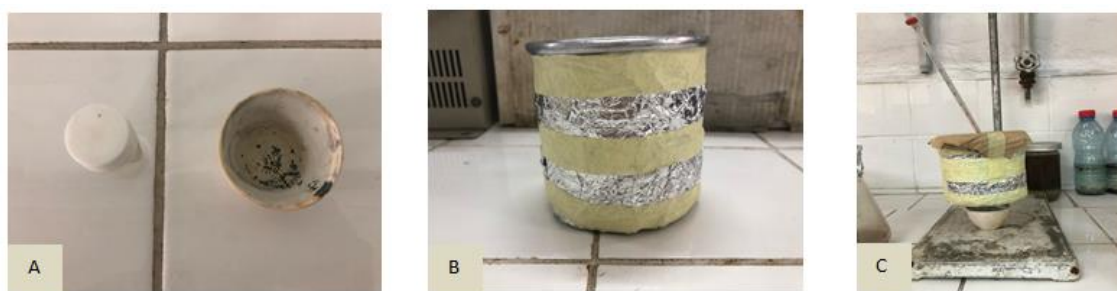


Figura 20. Calorimetria de Copo: A. Preparação da amostra; B. Preparação do Calorímetro; C. Determinação do poder calorífico.

Após a combustão completa, mediu-se a temperatura final da água ( $T_2$ ) no calorímetro e procedeu-se aos cálculos:

$$i) \quad q = m_{\text{água}} \times C_{\text{água}} \times (T_2 - T_1)$$

$$\text{ii)} \quad P = \frac{q}{m_{\text{etanol}}}$$

Onde:

**q**: calor liberado pela combustão (em joules);

**m<sub>água</sub>**: massa da água (em gramas);

**C<sub>água</sub>**: calor específico da água (4,18 J/°C);

**P**: poder calorífico (em J/g).

Embora este método apresente bastante simplicidade, custos baixos e fácil execução em laboratórios escolares, apresenta limitações comparativamente aos métodos normalizados como o ASTM D240. As principais limitações destacam-se a baixa precisão por causa das perdas de calor para o ambiente, o método não distingue PCS (poder calorífico superior) de PCI (poder calorífico inferior) e os resultados são aproximados e não normalizados.

## 4. Resultados e discussão

### 4.1. Caracterização da matéria-prima

Para a análise da matéria-prima, tomou-se três amostras com 3.0989 g, 3.0657g e 3.0317 g respectivamente, para a determinação de humidade (%H), sólidos totais (%ST), sólidos fixos (%SF) e sólidos voláteis (%SV), apresentando valores médios, sendo apresentados abaixo os seus valores médios.

Tabela 7. Matéria húmida

Amostra	Humidade %(p/p)	Sólidos Totais %(p/p)
1	65.37	34.63
2	63.69	36.31
3	63.86	36.14
<b>Valores Médios</b>	<b>64.31</b>	<b>35.69</b>

Os valores apresentados encontram-se próximos dos valores apresentados por Cereda (2022). Tonukari *et al* (2023) afirma que a composição das cascas de mandioca pode variar devido as inúmeras variantes da mandioca, do período de análise após a colheita e de como as cascas são processadas.

A humidade relativamente baixa (64.31%) comparativamente a verificada por Cereda (2022) (72%), embora não muito distante, deve-se ao facto de a matéria-prima ter sido colhida dias depois de sua colheita, tendo sido exposta ao sol no mercado onde a matéria-prima fora colhida.

Tabela 8. Matéria seca

Amostra	Sólidos Voláteis (%SV)	Sólidos Fixos (%SF)
1	50.80	49.20
2	63.64	36.36
3	54.11	45.89
<b>Valores Médios</b>	<b>56.18</b>	<b>43.81</b>

Em relação a matéria seca, as amostras mostraram altos teores de sólidos voláteis em relação as cinzas, que representa a matéria orgânica disponível para o processo de fermentação alcoólica. Estudos realizados por Tonukari *et al* (2023) apontam ainda que as cascas de mandioca produzem muitos açúcares redutores por hidrólise e que, por sua vez, os rendimentos de açúcar obtidos pela hidrólise da biomassa forneceram um hidrolisado com alta concentração de glicose.

#### 4.2. Caracterização do etanol produzido

Tabela 9. Resultados da caracterização do etanol produzido

Resultados						
Rendimento (ml/g)	Aspecto	Cor	Massa específica (20°C) (kg/m <sup>3</sup> )	Teor Alcoólico (%v/v)	pH	Poder Calorífico
0.105	Lípido e isento de impurezas	Sem corantes (ausência total)	815.11	94.92	6.0	19.26KJ/g

As cascas de mandioca apresentaram um potencial para produção de bioetanol – obteve-se 32ml de etanol por 305g de matéria seca processada. No entanto, este rendimento mostrou-se significativamente baixo comparado ao rendimento obtido por Odongo *et al.* (2024) e Simon *et al.* (2019) de 0.2ml/g e 0.274ml/g, respectivamente.

O baixo rendimento verificado deve-se ao processo de fermentação mais longo que o ideal, de 7 dias para 11 dias, afectando negativamente os resultados pelo acúmulo de impurezas, exigindo etapas adicionais de purificação durante a destilação (Rodrigues *et al.*, 2022). Por outro lado, segundo aponta Silva *et al* (2020), a hidrólise com ácido acético, comparativamente com outros ácidos fortes (ácido clorídrico e sulfúrico), resulta em menores taxas de liberação de açúcares fermentáveis, além de gerar compostos inibidores, como furfural e

ácido acético residual, que reduzem o crescimento das leveduras e a eficiência da fermentação.

O aspecto e a cor, o etanol foi, respectivamente, límpido e isento de impurezas e, sem corantes, ausente de cor, conforme já indicado por Vanzella (2015).

A densidade determinada foi ligeiramente superior ao valor padrão, indicando maior teor de água e/ou presença de impurezas, influenciando também no teor alcoólico observado (ligeiramente baixo em comparação aos intervalos estabelecidos). Processos adicionais de purificação, no entanto, como filtração e tratamento com carvão activado, pode auxiliar na remoção de impurezas que afectam a densidade e a qualidade do etanol, garantindo um produto final mais puro e dentro das especificações desejadas (Cabral, 2017), bem como a implementação de etapas de destilação e secagem eficientes para garantir que o teor de água no etanol hidratado esteja dentro dos padrões desejados, assegurando uma densidade adequada (Salata, 2012).

Por fim, o poder calorífico do etanol produzido mostrou-se relativamente baixo comparado ao valor padrão. Este facto deve-se principalmente ao método usado para a sua determinação. A calorimetria de copo apresenta desafios significativos no que diz respeito a perdas de calor, tanto devido ao isolamento térmico do sistema (colorímetro), visto que o calorímetro de copo depende de um bom isolamento térmico para evitar perdas de calor para o ambiente (Jain & Joshi, 2014), como também das perdas de calor por vaporização e condensação da água.

## **5. Conclusões e Recomendações**

### **5.1. Conclusões**

O estudo demonstrou que as cascas de mandioca possuem potencial para a produção de bioetanol, representando uma alternativa sustentável para diversificação da matriz energética. A caracterização da matéria-prima revelou teores adequados de sólidos voláteis para conversão em açúcares fermentáveis. A produção deste biocombustível a partir de matéria-prima amilácea (cascas de mandioca) envolve 5 (cinco) etapas principais que incluem o pré-tratamento, o cozimento, a hidrólise, a fermentação e a destilação alcoólica.

O rendimento obtido, embora inferior ao reportado em estudos anteriores, indicando a necessidade de otimização do processo de hidrólise e fermentação para melhorar a conversão de amido em etanol, as cascas de mandioca apresentaram teores elevados de matéria orgânica fermentável, indicando um potencial de produção de biocombustíveis.

O bioetanol produzido apresentou propriedades físico-químicas dentro dos padrões esperados, com exceção do poder calorífico, que foi inferior, devido a limitações inerentes ao método de calorimetria de copo utilizado, que está sujeito a perdas térmicas para o ambiente, recomendando-se a aplicação da calorimetria de bomba, conforme normas como ASTM D240, a fim de obter valores mais representativos da eficiência energética do bioetanol; para além de ter apresentado, também, valores ligeiramente inferiores de densidade e teor alcoólico, o que indica teores um pouco elevados de água e presença de impurezas, havendo necessidade de se recorrer a etapas de purificação com vista a remover impurezas e reduzir teores de água.

Considerando que a demanda energética das comunidades rurais é de cerca de 16.5MJ/família/dia, o bioetanol produzido, com poder calorífico de 19.26kJ/g e densidade de 815.11 kg/m<sup>3</sup>, mostrou viabilidade para uso energético, com uma demanda diária de 1.05l (0.86kg) de bioetanol por família para as necessidades energéticas, especialmente para iluminação e cocção em regiões

onde o acesso à electricidade é limitado e a dependência de lenha e carvão vegetal contribui para emissões de CO<sub>2</sub> e desmatamento.

Desta forma, o uso do bioetanol contribui na gestão sustentável de resíduos agro-industriais por meio de sua valorização energética e impulsiona a transição e diversificação energética no país.

## **5.2. Recomendações**

Para trabalhos futuros recomenda-se, a fim de obter resultados mais precisos e satisfatórios:

- Optimização da hidrólise por meio de ácidos fortes que demonstram maior eficiência como o HCl e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ou enzimas para aumentar a conversão de amido em açúcares fermentáveis;
- Controlar e criar condições de ajuste da fermentação num período de tempo recomendável de 7 (sete) dias e ajustar os parâmetros pH e temperatura para reduzir impurezas e melhorar o rendimento;
- Implementar técnicas de purificação como filtração e destilação a vácuo para eliminar impurezas e melhorar a densidade e o teor alcoólico do etanol produzido.

## 6. Referências bibliográficas

1. Alves, M. (2020). Lenha é a madeira tipicamente usada como combustível. Agro20. Recuperado em 7 de Julho de 2025, de <https://www.agro20.com.br/lenha/>;
2. Bio-Combustível. (2011). Matérias-primas para obtenção do bioetanol. Blogspot. <https://bio-combustivel.blogspot.com/2011/12/materias-primas-para-obtencao-do.html>;
3. BNDES (2008). Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável / organização BNDES e CGEE. – Rio de Janeiro;
4. Cabral, A. S. et al (2015). Hidrólise da casca de mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) em diferentes tempos de tratamento e concentrações ácidas para obtenção de açúcares fermentáveis;
5. Cabral, A. S. (2017). Tratamentos ácidos de hidrólise e avaliação de parâmetros na produção de etanol a partir de resíduos de mandioca. Universidade Estadual Paulista. Disponível em: [https://repositorio.unesp.br/bitstream/11449/146699/8/cabral\\_as\\_me\\_sjrp\\_int.pdf](https://repositorio.unesp.br/bitstream/11449/146699/8/cabral_as_me_sjrp_int.pdf). Acesso em: 20 mar. 2025;
6. Cereda, M. (2022). Resíduos de mandioca: Potencial energético e aplicações industriais;
7. Cereda, M. P. (1994). Caracterização dos Subprodutos da Industrialização da Mandioca;
8. Costa, A. (2019). Produção de mandioca em Moçambique;
9. Costa, C. (2019). A cadeia de valor da mandioca em Moçambique. Banco Mundial, Edição n.34, 1818 H Street NW, Washington, DC 20433, EUA;
10. Chagas, A. L. S. (2012). Biocombustíveis. EBC. São Paulo;
11. Da Silva, A. C. M. S. (2015). Estudo Prospectivo dos resíduos gerados no processamento da mandioca. Cad. Prospec., Salvador, v. 8, n. 2, p. 265-271, Abr./Jun. 2015;
12. Das, B. M. (2002). Soil mechanics laboratory manual. 6. ed. Pacific Grove: Brooks/Cole – Thomson Learning;

13. GIZ & HERA (2014). Fogões melhorados e soluções de cozinha limpa na Africa Subsariana;
14. Henriques, H. J. C. (2012). Viabilidade do Uso de Bioetanol como Combustível Alternativo. Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro e do Professor Doutor Fernando José Neto da Silva;
15. IEA (International Energy Agency). (2022). World Energy Outlook 2022;
16. Ibraimo, M. (2018). Reflexão sobre a comercialização da mandioca para a produção de cerveja. Destaque Rural n. 34;
17. IIAM (2018). Desenvolvimento de variedades de mandioca com alto teor de proteínas, ricas em vitamina A e com menores índices de cianetos adaptadas a região norte de Moçambique;
18. Immanuel, A. *et al.* (2025). Segurança da mandioca e de produtos à base de mandioca: uma revisão sistemática. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, [S. l.]. Disponível em:  
<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fsufs.2024.1497609/full>.  
Acesso em: 26 Jun. 2025.
19. IPCC. (2018). Relatório Especial sobre o Aquecimento Global de 1,5°C. Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climática;
20. Instituto Nacional de Estatística – INE (2023). Inquérito sobre orçamento familiar;
21. Inquérito sobre Orçamento Familiar – IOF (2022): Relatório final. Maputo: INE. Disponível no relatório oficial do IOF 2022;
22. Jain, K. M., & Joshi, S. V. (2014). Análises de energia e energia de um calorímetro de bomba. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 6(3), 031004.  
<https://doi.org/10.1115/1.4028486>;
23. Jessie, K. (2022). Microalgas podem tratar efluentes e gerar energia. Engenharia360. Recuperado em 7 de Julho de 2025, de <https://engenharia360.com/microalgas-tratamento-energia/>
24. Macondzo, S. G. F. (2016). Combinações de Culturas Alimentares Básicas Praticadas pelos Agregados Familiares nas Regiões Centro e Norte de Moçambique. Dissertação de Mestrado, Departamento de Economia Agraria, universidade Eduardo Mondlane, Maputo;

25. Martinez, D. G. (2016). Produção de etanol de segunda geração a partir de resíduos de processamento de mandioca. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel;
26. Martinez, J. & Feiden, A. (2017). Potencial energético de resíduos agrícolas: Casos práticos;
27. Mendonça, A. R.; Silva, H. J.; LOPES, F. P. (2017) Otimização das condições de fermentação para produção de etanol de mandioca. *Engenharia de Bioprocessos*, v. 22, n. 4, p. 320-330.
28. Ministério de Recursos Minerais e Energia. (2021). Relatório sobre a Matriz Energética Nacional de Moçambique;
29. Monteiro, M. R. S. (2015). Produção de biogás a partir da biodigestão anaeróbia de manipueira e lodo de estação de tratamento de esgoto. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife;
30. Moçambique (2023). Decreto n.º 61/2023, de 15 de Novembro de 2023. Aprova o Regulamento sobre os Biocombustíveis Puros e suas Misturas com Produtos Petrolíferos;
31. Moure, R. M. (2019). Efluentes industriais e domésticos e seus efeitos ao meio ambiente e à saúde da população. BioECO Ambiental. Recuperado em 7 de Julho de 2025, de <https://bioecoambiental.com.br/br/artigo-efluentes-industriais-e-domesticos-e-seus-efeitos-ao-meio-ambiente-e-a-saude-da-populacao>;
32. Moz Climate Data (2024). Plataforma sobre Mudanças Climáticas. Disponível em: [https://www.mozclimatedata.gov.mz/?page\\_id=533#](https://www.mozclimatedata.gov.mz/?page_id=533#). Acesso em: 01 de Fev. de 2025;
33. Mustafa, H. M. (2019). Produção de bioetanol a partir da mandioca (*Manihot esculenta*) cascas de resíduos usando hidrólise ácida e processo de fermentação, *Science World Vol. 14 (No 2)*, n. 1597-6343;
34. Odongo, J. et al. (2024). Produção de bioetanol a partir de cascas de mandioca: Rendimento e potencial energético, *IOSR Journal of Applied Chemistry (IOSR-JAC)* e-ISSN: 2278-5736. Volume 17, Ed. 5

- Ser. 1 (Maio, 2024), PP 07-13.Olayide, R. A. et al (2015). Produção de Bioetanol a partir de Cascas de Mandioca;
35. Oliveira, A. B (2009). Produção de etanol a partir de matéria-prima amilácea: mandioca. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2009;
  36. Salata, C. C. (2012). Sistema de purificação do bioetanol para mini destilarias de mandioca. Tese apresentada para obtenção de Doutorado, BOTUCATU-SP. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/f24302c7-9cba-442b-abce-b01a039ff959/content>. Acesso em: 23 de Marco de 2025;
  37. Silva, R. F.; Santos, L. M.; Oliveira, J. B. (2020). Avaliação do uso de ácidos orgânicos na hidrólise de biomassa lignocelulósica para produção de bioetanol. Revista Brasileira de Biotecnologia, v. 28, n. 1, p. 55-68;
  38. Simon, J., et al. (2019). Produção de bioetanol a partir de cascas de mandioca: Análise do processo e rendimento;
  39. Simon, M. O. et al (2019). Produção de etanol a partir de resíduos de mandioca;
  40. Speight, J. G. (2013). The chemistry and technology of coal (3rd ed.). CRC Press;
  41. Solar Cookers Internacional (SCI). Censo e relatórios globais sobre cozinha solar;
  42. Tonukari, N. J. (2023). Propriedades bioquímicas e aplicações
  43. Biotecnológicas de cascas de mandioca. Biotecnologia e Biologia Molecular. Vol. 14(1), pp. 1-8, Janeiro-Junho de 2023.
  44. UNDP. (2020). Energia e Mudanças Climáticas em Moçambique: Um Caminho para o Desenvolvimento Sustentável. Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento;
  45. USAID (2017). Greenhouse Gas Emissions in Mozambique;
  46. Syngenta Digital. (2016, July 8). Bagaço de cana: saiba como reaproveitar a palha. Blog Syngenta Digital. Retrieved July 7, 2025, from <https://blog.syngentadigital.ag/como-reaproveitar-o-bagaco-da-palha-de-cana/>
  47. Vanzella, E. (2015). Estudo de propriedades físico-químicas etanol hidratado com adição de biodiesel para o uso em motores de

- combustão interna ciclo Otto. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Paraná;
48. Veiga, J. P. S. (2012). Caracterização de resíduos de colheita da mandioca (*Manihot esculenta* CRANTZ) e avaliação do potencial de co-geração de energia no processo de produção de etanol. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas;
  49. Wandschneider, T. & Barca, A. (2003). O processamento e comercialização da mandioca e batata-doce no norte de Inhambane: Oportunidade de intervenção;
  50. WBCSD (2007). Biocombustíveis;
  51. World Bank. (2021). Mozambique: Climate Change and Economic Development. World Bank Group;
  52. ONU BRASIL (2024). O que são mudanças climáticas? Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/175180-o-que-s%C3%A3o-mudan%C3%A7as-clim%C3%A1ticas>. Acesso em: 01 Fev. 2025;
  53. World Bank. (2021). Moçambique: Mudanças Climáticas e Desenvolvimento Económico. Grupo Banco Mundial.

## 7. Anexos

### I. Anexo A – Técnica ASTM D2216

Método de Determinação de Humidade (Das, 2002, pp. 5 – 6).

## 2 Determination of Water Content

### Introduction

Most laboratory tests in soil mechanics require the determination of water content. Water content is defined as

$$w = \frac{\text{weight of water present in a given soil mass}}{\text{weight of dry soil}} \quad (2.1)$$

Water content is usually expressed in percent.

For better results, the *minimum* size of the most soil specimens should be approximately as given in Table 2-1. These values are consistent with ASTM Test Designation D-2216.

**Table 2-1.** Minimum Size of Moist Soil Samples to Determine Water Content

Maximum Particle Size in the Soil (mm)	U.S. Sieve No.	Minimum Mass of Soil Sample (g)
0.425	40	20
2.0	10	50
4.75	4	100
9.5	3/8 in.	500
19.0	3/4 in.	2500

5

### Equipment

1. Moisture can(s).  
Moisture cans are available in various sizes [for example, 2-in. (50.8 mm) diameter and  $\frac{1}{4}$  in. (22.2 mm) high, 3.5-in. (88.9 mm) diameter and 2 in. (50.8 mm) high].
2. Oven with temperature control.  
For drying, the temperature of oven is generally kept between 105°C to 110°C. A higher temperature should be avoided to prevent the burning of organic matter in the soil.
3. Balance.  
The balance should have a readability of 0.01 g for specimens having a mass of 200 g or less. If the specimen has a mass of over 200 g, the readability should be 0.1 g.

### Procedure

1. Determine the mass (g) of the empty moisture can plus its cap ( $W_1$ ), and also record the number.
2. Place a sample of representative moist soil in the can. Close the can with its cap to avoid loss of moisture.
3. Determine the combined mass (g) of the closed can and moist soil ( $W_2$ ).
4. Remove the cap from the top of the can and place it on the bottom (of the can).
5. Put the can (Step 4) in the oven to dry the soil to a constant weight. In most cases, 24 hours of drying is enough.
6. Determine the combined mass (g) of the dry soil sample plus the can and its cap ( $W_3$ ).

### Calculation

1. Calculate the mass of moisture =  $W_2 - W_3$
2. Calculate the mass of dry soil =  $W_3 - W_1$
3. Calculate the water content

$$w (\%) = \frac{W_2 - W_3}{W_3 - W_1} \times 100 \quad (2.2)$$

Report the water content to the nearest 1% or 0.1% as appropriate based on the size of the specimen.

A sample calculation of water content is given in Table 2-2.

## II. Anexo B – Técnica ASTM D3174 Método de Determinação de Cinzas (Speight, 2013, pp. 227–230)

### 8.3.4 ASH

The *ash content* (more correctly, the *ash yield*) of coal is the noncombustible residue (usually metal oxides) left after coal is burned and represents the bulk mineral matter after carbon, oxygen, sulfur, and water (including from clays) has been driven off during combustion (Given and Yarzab, 1978). The mineral portion of coal has been ignored for too many years and it must be considered an integral part of the coal structure and so the ash (and its contents) must also be given consideration when a use is designed for coal.

The analysis is fairly straightforward, with the coal thoroughly burnt and the ash material expressed as a percentage of the original weight.

Ash is quantitatively and qualitatively different from the mineral matter originally present in coal (Chapter 7) because of the various changes that occur, such as loss of water from silicate minerals, loss of carbon dioxide from carbonate minerals, oxidation of iron pyrite to iron oxide, and fixation of oxides of sulfur by bases such as calcium and magnesium. In fact, incineration conditions determine the extent to which the weight changes take place and it is essential that standardized procedures be closely followed to ensure reproducibility.

The chemical composition of coal ash is an important factor in fouling and slagging problems and in the viscosity of coal ash in wet bottom and cyclone furnaces. The potential for the mineral constituents to react with each other (Given and Yarzab, 1978) as well as undergo significant mineralogical changes is high (Helble et al., 1989). In addition, coal with high-iron (20% w/w ferric oxide) ash typically exhibit ash-softening temperatures under 1205°C (2200°F). The use of coal with mineral matter that gives a high alkali oxide ash often results in the occurrence of slagging and fouling problems. As oxides, most ash elements have high melting points, but they tend to form complex compounds (often called eutectic mixtures) which have relatively low melting points. On the other hand, high-calcium low-iron ash coals tend to exhibit a tendency to produce low-melting range slags, especially if the sodium content of the slag exceeds about 4%.

The amount of ash is usually determined by heating (burning) a sample (1–2 g) of the coal in an adequately ventilated muffle furnace at temperatures in the range of 700°C–950°C (1290°F–1740°F). The temperature prescribed by the ASTM is 725°C (1335°F) for coal and up to, but not more than, 950°C (1740°F) for coke (ASTM, 2011n). Other standards (ISO, 2011t) may vary and require somewhat higher temperatures for the determination of the ash in coal. There are also other methods, predominantly thermal, which can be used for the analysis of coal ash (Voina and Todor, 1978).

Significant variations in the amount of ash can arise from the retention of sulfur. Thus, for high-rank coals, if the amount of pyrite and carbonate minerals is low, sulfur retention is not critical and ashing may be carried out rapidly. However, for coals with considerable amounts of pyrite and calcite, the procedure is to burn the coal at low temperatures to decompose the pyrite before the decomposition point of the carbonate minerals is reached. Thus, less sulfur remains in the coal to react with the oxides that are formed at higher temperatures. Another method consists of first ashing the coal, then treating the ash residue with sulfuric acid and igniting to constant weight. The amount of ash is calculated back to the calcium carbonate basis by subtracting three times the equivalent of carbon present as mineral carbonate from the ash as weighed.

Several formulae have been proposed for calculating the amount of mineral matter originally in the coal using the data from ashing techniques as the basis of the calculations. Of these formulae, two have survived and have been used regularly to assess the proportion of mineral matter in coal and these are the Parr formula and the King–Mavies–Crossley formula.

In the Parr formula, the mineral matter content of coal is derived from the expression:

$$\% \text{ Mineral matter} = 1.08A + 0.55S$$

where

A is the percentage of ash in the coal

S is the total sulfur in coal

On the other hand, the King–Mavies–Crossley formula is a little more complex:

$$\% \text{ Mineral matter} = 1.09A + 0.5S_{\text{pyr}} + 0.8\text{CO}_2 - 1.1\text{SO}_{3(\text{in ash})} + \text{SO}_{3(\text{in coal})} + 0.5\text{Cl}$$

### III. Anexo C – Técnica ASTM D3175 Método de Determinação de Sólidos Voláteis (Speight, 2013, pp. 227 – 230)

#### 8.3.3 VOLATILE MATTER

Volatile matter in coal refers to the components of coal, except for moisture, which are liberated at high temperature in the absence of air. The volatile matter obtained during the pyrolysis of coal consists mainly of combustible gases such as hydrogen, carbon monoxide, methane plus other hydrocarbons, tar as well as incombustible gases such as carbon dioxide and steam.

The volatile matter of coal is determined under rigidly controlled standards. In Australian and British laboratories, this involves heating the coal sample to  $900^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  ( $1650^{\circ}\text{F} \pm 10^{\circ}\text{F}$ ) for 7 min in a cylindrical silica crucible in a muffle furnace. The ASTM standard method of analysis involves heating coal to  $950^{\circ}\text{C} \pm 25^{\circ}\text{C}$  ( $1740^{\circ}\text{F} \pm 45^{\circ}\text{F}$ ) in a vertical platinum crucible.