



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIAS E SAÚDE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA E SUSTENTABILIDADE**

**ANDRÉ LUCIANO DE SOUZA LAMPERT**

**RESÍDUOS GERADOS NO PROCESSO PRODUTIVO DE POLVILHO DE MANDIOCA  
COMO POTENCIAL BIOMASSA PARA A PRODUÇÃO DE BIOETANOL.**

Araranguá

2026

ANDRÉ LUCIANO DE SOUZA LAMPERT

**RESÍDUOS GERADOS NO PROCESSO PRODUTIVO DE POLVILHO DE MANDIOCA  
COMO POTENCIAL BIOMASSA PARA A PRODUÇÃO DE BIOETANOL.**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Energia e Sustentabilidade

Orientador: Prof. Reginaldo Geremias, Dr.  
Coorientadora: Profa. Fabiana Teresinha Sartori Zatiti, Dra.  
Colaborador: Prof. Bruno Pansera Espíndola, Dr.

Araranguá

2026

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC. Dados inseridos pelo próprio autor.

LAMPERT, André Luciano de Souza  
RESÍDUOS GERADOS NO PROCESSO PRODUTIVO DE  
POLVILHO DE MANDIOCA COMO POTENCIAL BIOMASSA PARA A  
PRODUÇÃO DE  
BIOETANOL. / André Luciano de Souza LAMPERT ; orientador,  
Reginaldo Geremias, coorientador, Fabiana Terezinha Sartori Zatiti,  
2026.  
77 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina,  
Campus Araranguá, Programa de Pós-Graduação em Energia e  
Sustentabilidade, Araranguá, 2026.

Inclui referências.

1. Energia e Sustentabilidade. 2. Mandioca, Resíduos Fibrosos,  
Bioetanol. I. Geremias, Reginaldo. II. Zatiti, Fabiana Terezinha Sartori.  
III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-  
Graduação em Energia e Sustentabilidade. IV. Título.

**ANDRÉ LUCIANO DE SOUZA LAMPERT**

**RESÍDUOS GERADOS NO PROCESSO PRODUTIVO DE POLVILHO DE MANDIOCA  
COMO POTENCIAL BIOMASSA PARA A PRODUÇÃO DE BIOETANOL.**

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 19 de fevereiro de 2026,  
pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Profa. Elaine Virmond, Dra.

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Afonso Henrique Da Silva Júnior, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

Carolina Cinto de Moraes, Dra.

Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado  
adequado para obtenção do título de Mestre em Energia e Sustentabilidade.

Coordenação do Programa de Pós-graduação

Prof. Reginaldo Geremias, Dr.

Orientador

Araranguá, 2026

“Estamos aprendendo a aproveitar a biologia para fazer as coisas que atualmente fazemos com combustíveis fósseis, mas de forma mais limpa, eficiente e sustentável.” Frances H. Arnold

Nobel de Química, 2018

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, fonte de toda sabedoria e força, e ao nosso Mestre e Governador Jesus Cristo, cuja presença iluminou cada etapa desta jornada, sustentando-me nos momentos de incerteza e inspirando-me na busca por conhecimento com propósito.

À memória de meu pai, cuja coragem e integridade permanecem como faróis em minha vida, e à minha mãe, pelo amor incondicional, pelos ensinamentos sobre ética, perseverança e pela convicção de que nenhuma barreira é intransponível para quem caminha com determinação em busca da evolução.

À Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), instituição que, com compromisso inabalável com o ensino público, gratuito e de excelência, me proporcionou o espaço, os recursos e a formação necessários para concretizar este sonho acadêmico. A gratidão pela oportunidade de estudar em uma universidade que valoriza o conhecimento como bem comum e instrumento de transformação social é imensa — e reforça meu compromisso com a ciência, a ética e o serviço à sociedade.

Ao meu colega Leandro Lunardi, expressei minha mais profunda gratidão. Sua generosidade intelectual, sabedoria prática e postura ética foram pilares fundamentais ao longo desta jornada. Mais do que um orientador informal, Leandro foi um verdadeiro mestre: ensinou com clareza, inspirou com exemplo e transmitiu segurança em cada etapa do projeto. Seus ensinamentos, experiências compartilhadas e apoio constante foram decisivos para superar desafios e consolidar não apenas este trabalho, mas também minha própria trajetória como pesquisador e profissional.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Reginaldo Geremias, pela orientação segura, paciência, rigor científico e incentivo constante. Sua capacidade de enxergar potencial onde outros veem desafios foi fundamental para a concretização deste trabalho.

À Prof<sup>ª</sup>. Dra. Fabiana Zatiti, pelo olhar crítico, generosidade intelectual e contribuições essenciais que enriqueceram não apenas esta pesquisa, mas também minha formação acadêmica.

Ao Prof. Dr. Bruno Espíndola, pela colaboração técnica e apoio inestimável, que fortaleceram a base experimental deste projeto.

Ao Instituto Federal Catarinense (IFC), pela disponibilização dos laboratórios e infraestrutura, espaço onde boa parte das etapas práticas foi desenvolvida com dedicação e rigor.

Ao Instituto Federal de Santa Catarina – Campus Criciúma (IFSC), pelo apoio logístico e institucional que viabilizou a execução de etapas fundamentais desta pesquisa.

À Central de Análises da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) – Florianópolis, pela disponibilidade, competência técnica e agilidade nas análises laboratoriais, cujos resultados foram pilares para a validação científica deste estudo.

Por fim, a todos os colegas, amigos, familiares e companheiros de caminhada que, direta ou indiretamente, contribuíram com palavras, gestos ou silêncios compreensivos — este trabalho também é fruto de suas presenças.

Que este conhecimento gerado sirva não apenas ao avanço acadêmico, mas também à construção de um futuro mais justo, sustentável e humano.

## RESUMO

A busca por combustíveis sustentáveis e renováveis tem se intensificado em nível global. Dentre os mesmos, está o bioetanol, o qual pode ser produzido a partir de diferentes biomassas. O cultivo e processamento de mandioca é uma importante atividade econômica na região que compõe a Associação dos Municípios do Extremo Sul Catarinense (AMESC). Entretanto, esta atividade é capaz de gerar contaminantes ao meio ambiente e, dentre os mesmos, estão os resíduos fibrosos oriundos da produção de polvilho. Neste contexto, esta pesquisa teve como objetivo geral realizar estudos preliminares de caracterização de resíduos fibrosos gerados no processo de produção de polvilho de mandioca e seu potencial de conversão fermentativa em bioetanol. Amostras de resíduos foram coletadas em uma empresa de produção de polvilho e determinado o teor de umidade, fibras e análise qualitativa de amido. Posteriormente, os resíduos foram submetidos ao processo de fermentação, sendo monitorado a temperatura e o teor de açúcares fermentáveis (°Brix). A presença de álcool no fermentado foi avaliada por meio da determinação de grupos funcionais por Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) e do Grau Gay-Lussac (°GL) por Densimetria. Os resultados de caracterização dos resíduos indicaram elevado teor de umidade ( $88,40 \pm 0,18\%$ ) e de fibras ( $43,22 \pm 0,14\%$ ), além da presença de amido. As análises do fermentado destilado revelaram um grau de açúcares de  $1,85 \pm 0,65$  °Brix. No teste FTIR, foram observadas regiões características de grupo OH ( $3400-3300$  e  $900-850\text{ cm}^{-1}$ ) e da ligação C-O ( $1050-1000\text{ cm}^{-1}$ ), sugerindo a presença de bioetanol no fermentado destilado. O rendimento de bioetanol foi de  $2,5 \pm 0,1$  °GL, correspondendo a uma produção anual estimada de 150.000 L. Concluiu-se que a pesquisa pode contribuir para o fomento ao uso de combustíveis limpos e renováveis e exploração econômica dos resíduos, promovendo a sustentabilidade e o crescimento econômico da região em estudo.

Palavras-chave: Polvilho de mandioca; resíduos fibrosos; bioetanol; sustentabilidade.

## ABSTRACT

The search for sustainable and renewable fuels has intensified globally. Among these is bioethanol, which can be produced from different biomasses. The cultivation and processing of cassava is an important economic activity in the region that comprises the Association of Municipalities of the Extreme South of Santa Catarina (AMESC). However, this activity is capable of generating contaminants to the environment, and among them are the fibrous residues from the production of cassava starch. In this context, this research had the general objective of carrying out preliminary studies to characterize fibrous residues generated in the cassava starch production process and their potential for fermentative conversion into bioethanol. Samples of residues were collected from a cassava starch production company, and the moisture content, fiber content, and qualitative starch analysis were determined. Subsequently, the residues were subjected to a fermentation process, and the temperature and fermentable sugar content ( $^{\circ}\text{Brix}$ ) were monitored. The presence of alcohol in the fermented product was evaluated by determining functional groups using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) and Gay-Lussac degree ( $^{\circ}\text{GL}$ ) by densitometry. Characterization results of the residues indicated high moisture content ( $88.40 \pm 0.18\%$ ) and fiber content ( $43.22 \pm 0.14\%$ ), in addition to the presence of starch. Analysis of the fermented product revealed a sugar content of  $1.85 \pm 0.65$   $^{\circ}\text{Brix}$ . In the FTIR test, characteristic regions of the OH group ( $3400\text{-}3300$  and  $900\text{-}850$   $\text{cm}^{-1}$ ) and the C-O bond ( $1050\text{-}1000$   $\text{cm}^{-1}$ ) were observed, suggesting the presence of bioethanol in the fermented product. The bioethanol yield was  $2.5 \pm 0.1$   $^{\circ}\text{GL}$ , corresponding to an estimated annual production of 150,000 L. It was concluded that the research can contribute to promoting the use of clean and renewable fuels and the economic exploitation of waste, fostering sustainability and economic growth in the region under study.

Keywords: Cassava starch; fibrous residues; bioethanol; sustainability.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Proposta da pesquisa.....	17
Figura 2	(a) Primeiro carro movido a álcool no Brasil (b) Postos de gasolina anunciando a comercialização do álcool.....	20
Figura 3	Principais características das diferentes gerações de bioetanol.....	25
Figura 4	Principais estratégia de bioconversão de biomassa em bioetanol.....	28
Figura 5	Associação dos Municípios do Extremo Sul Catarinense- AMESC.....	29
Figura 6	Produção de mandioca indústria na AMESC (safra 2024-2025).....	31
Figura 7	Produção de mandioca <i>in natura</i> (“mandioca mesa”) na AMESC (safra 2024-2025).....	31
Figura 8	Principais etapas da produção de polvilho na empresa em estudo.....	42
Figura 9	Principais etapas do teste de umidade no resíduo.....	44
Figura 10	Principais etapas da análise de fibras no resíduo.....	45
Figura 11	Principais etapas da produção de bioetanol.....	47
Figura 12	Análise da presença de álcool no fermentado destilado por FTIR.....	48
Figura 13	Registro fotográfico determinação de (°GL) por Densimetria.....	49
Figura 14	Análise preliminar da presença de amido no resíduo (A) Resíduo sem Lugol; (B) Amido P.A com lugol (controle positivo); (C) Resíduo com Lugol.....	53
Figura 15	Perfil do infravermelho por FTIR. (a) Fermentado destilado; (b) Etanol P.A.....	57

## LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1	Composição química de alguns resíduos do processamento da mandioca.....	33
Tabela 2	Umidade e teor de fibras nas amostras de resíduos.....	51
Tabela 3	Temperatura e Grau BRIX.....	55
Tabela 4	Percentagem de bioetanol no fermentado destilado e produção estimada.....	59
Quadro 1	Estudos de produção de bioetanol a partir da mandioca e seus resíduos.....	37

## LISTA DE ABREVIACÕES E SÍMBOLOS

1G – Primeira Geração de Etanol

°GL – Graus Gay-Lussac

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACV – Análise do Ciclo de Vida

AMESC – Associação dos Municípios do Extremo Sul Catarinense

ANP – Agência Nacional de Petróleo

BEN – Balanço Energético Nacional

B.O.D. – Equipamento laboratorial com temperatura, ventilação e luz controlada

CBP – Bioprocessamento consolidado

Cfa – Clima subtropical úmido com verões quentes, segundo Köppen-Geiger

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

EAC – Etanol Anidro Combustível

EPAGRI – Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina

EUA – Estados Unidos da América

FDN – Fibra Detergente Neutro

FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo

FTIR – Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IDH – Índice de Desenvolvimento Humano

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

ISO – *International Organization for Standardization*

NBR – Norma Técnica Brasileira

ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

ONU – Organização das Nações Unidas

PPGES – Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade

SHF – Hidrólise e fermentação separadas

SHF – *Separate Hydrolysis and Fermentation*

SSF – Processo de sacarificação e fermentação simultâneas

SSCF – Sacarificação e cofermentação simultâneas

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	16
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	19
2.1	OBJETIVO GERAL.....	19
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	19
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	20
3.1	BIOETANOL NO BRASIL: BREVE HISTÓRICO E PRODUÇÃO ATUAL.....	20
3.2	MATÉRIAS-PRIMAS E ESTRATÉGIAS DE CONVERSÃO EM BIOETANOL .....	22
3.3	AMESC E CULTIVO DA MANDIOCA.....	29
3.4	RESÍDUOS DO PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DA MANDIOCA.....	32
3.5	PRODUÇÃO DE ETANOL A PARTIR DE MANDIOCA E SEUS RESÍDUOS: ALGUNS ESTUDOS DA LITERATURA .....	37
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	41
4.1	COLETA DOS RESÍDUOS DA MANDIOCA.....	41
4.2	CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS .....	42
4.2.1	Determinação da umidade .....	43
4.2.2	Determinação da percentagem de fibras.....	44
4.2.3	Determinação da presença de amido no resíduo.....	45
4.3	PRODUÇÃO DE BIOETANOL A PARTIR DOS RESÍDUOS.....	46
4.4	ANÁLISE QUALITATIVA DO BIOETANOL POR INFRAVERMELHO.....	48
4.5	DETERMINAÇÃO DO GRAUS GAY-LUSSAC (°GL) DO BIOETANOL POR DENSIOMETRIA .....	49

4.6	ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO ANUAL DE BIOETANOL.....	49
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>51</b>
5.1	CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO.....	51
5.2	TEMPERATURA E GRAU BRIX.....	55
5.3	ANÁLISE QUALITATIVA DO BIOETANOL POR INFRAVERMELHO.....	56
5.4	PERCENTAGEM DE BIOETANOL E ESTIMATIVA ANUAL DE PRODUÇÃO.....	59
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>61</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>63</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As Nações Unidas (ONU), no ano de 2000, propôs o Pacto Global, o qual se configurou como iniciativa destinada a minimizar os impactos ambientais causados pelo setor produtivo (United Union, 2000). Em 2015, foi lançada pela ONU, a Agenda 2030 onde foram estabelecidos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), com vistas a acabar com a pobreza, proteger o meio ambiente e o clima e garantir que as pessoas possam desfrutar de paz e prosperidade em todos os lugares. Entre os objetivos, o ODS 7- Energia Acessível e Limpa- visa garantir o acesso à energia confiável, sustentável, moderna e acessível para todos, com esses indicadores incorporados ao conceito de segurança energética (United Nation, 2015).

Essas iniciativas foram extremamente importantes para o fomento ao uso de combustíveis limpos e renováveis. Dentre os combustíveis, está o bioetanol, que pode ser produzido a partir de diferentes matérias-primas, tais como as biomassas alimentares (ex: sacarose, cana-de-açúcar, milho e sorgo), lignocelulósicas (ex: resíduos florestais e da agricultura, gramíneas) e algal (ex: macroalgas e microalgas). A abordagem mais comum de produção é a conversão bioquímica, que é realizada em fases sequenciais, que incluem o pré-tratamento, hidrólise enzimática e fermentação (Fagundes et.al., 2024; Ghazali e Mustafa, 2025).

No Brasil, a produção de bioetanol é derivada, predominantemente, da cana-de-açúcar, e se consolida como relevante componente da matriz energética nacional, conforme estudos feitos pela Empresa de Pesquisa Energética-EPE (EPE, 2025). Neste contexto, é de grande relevância a pesquisa de novas biomassas a serem empregadas na produção desse combustível, dentre as quais, está a mandioca, seus produtos e resíduos, cuja literatura tem reportado (Alzate et. al., 2024).

A produção de mandioca na região da Associação dos Municípios do Extremo Sul Catarinense (AMESC) é estratégica para a economia agrícola local, abastecendo tanto o consumo *in natura* quanto a indústria de derivados, como polvilho, farinha e tapioca (Cabral, 2012; AMESC, 2025). A expressiva produção dessa cultura na região abastece unidades de processamento que transformam a raiz em produtos com alto valor agregado, impulsionando a geração de emprego e renda para agricultores e agroindústrias. Além disso, a mandioca possui grande relevância na segurança alimentar e na diversificação da produção agrícola, fortalecendo a economia rural e contribuindo para o desenvolvimento sustentável da região. O cultivo, aliado

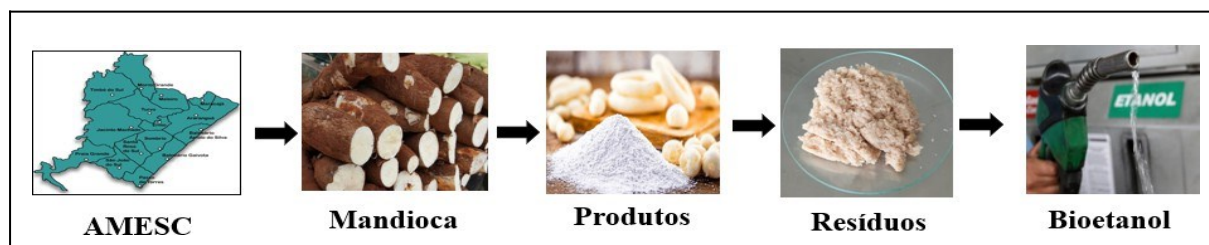
a técnicas de manejo adequadas, favorece a competitividade do setor e garante a continuidade da cadeia produtiva, consolidando a AMESC como um polo estratégico na produção e industrialização da mandioca em Santa Catarina (EPAGRI, 2024).

Entretanto, no processo de beneficiamento da mandioca para a produção alimentícia na região são gerados diferentes resíduos. Dentre eles, se destacam os resíduos fibrosos oriundos da produção de polvilho. Atualmente, os mesmos ainda não têm sido explorados economicamente, sendo muitas vezes depositados de forma inadequada no meio ambiente, onde são capazes de provocar inúmeros danos, incluindo a contaminação dos recursos hídricos e do solo (Martinez e Feiden, 2017; Del Bianchi, 1998). Diante deste cenário, uma estratégia que pode ser adotada para a valoração desses resíduos e mitigação de seus impactos é empregá-los como matéria-prima para a produção de bioetanol.

Partindo desses pressupostos, esta investigação propôs realizar testes preliminares de caracterização de resíduos fibrosos gerados no processo de produção de polvilho de mandioca e avaliar o seu potencial uso como biomassa para a produção de bioetanol por processo fermentativo.

Os principais motivos da pesquisa estão, sucintamente, representados na Figura 1, sendo eles: i) a mandioca é uma importante cultura agrícola na região; ii) o processo produtivo de polvilho gera elevada quantidade de resíduos potencialmente contaminantes; iii) estudos de produção de bioetanol a partir desses resíduos são incipientes; iv) a valoração desses resíduos contribui para a preservação do meio ambiente e para o fomento do uso de combustíveis renováveis.

Figura 1- Proposta da pesquisa



Fonte: Autor

O presente trabalho se enquadra na linha de pesquisa “Conversão, Transporte e Uso de Energia”, que está inserida na área de concentração em “Sistemas de Energia” do Programa de

Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade (PPGES) da UFSC. Tal linha de pesquisa contempla as investigações relacionadas a propriedades da biomassa, conversão biotecnológica de biomassa em combustíveis, produção de biocombustíveis e eventuais aplicações dos produtos, subprodutos e resíduos da conversão.

A expectativa é que essa investigação tenha relevante contribuição para o estado da arte da temática, bem como para o fomento ao uso de resíduos gerados no processamento da mandioca como biomassa para a produção de biocombustíveis de fontes limpas e renováveis, e consequente desenvolvimento socioeconômico da região em estudo.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

A presente pesquisa teve como objetivo geral realizar estudos preliminares de utilização de resíduos fibrosos gerados no processo produtivo de polvilho de mandioca como potencial biomassa para a produção de bioetanol.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- . Coletar amostras de resíduos em uma empresa produtora de polvilho de mandioca situada na AMESC e caracterizá-los por meio da determinação do percentual de umidade e de fibras, bem como da presença de amido;
- . Executar ensaios de produção de bioetanol por fermentação, utilizando o resíduo em estudo como biomassa e monitorar a presença de amido e açúcares fermentáveis (°Brix) durante o processo;
- . Avaliar a eficácia da produção do bioetanol, por meio da determinação da presença de grupos funcionais característicos de álcool e percentual alcoólico (°GL) no fermentado;
- . Estimar a potencial produção anual de bioetanol na empresa em estudo, a partir da quantidade de resíduos fibrosos gerados em seu processo produtivo de polvilho.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

Essa seção descreve os pressupostos teóricos básicos das principais temáticas que nortearam a investigação.

#### 3.1 BIOETANOL NO BRASIL: BREVE HISTÓRICO E PRODUÇÃO ATUAL

No país, a produção e uso de bioetanol como biocombustível a partir de cana-de-açúcar é um *case* de sucesso. Em termos históricos, o seu uso teve início no ano de 1925, quando a Estação Experimental de Combustíveis e Minérios (órgão do governo federal) adaptou um motor a combustão, usando o etanol em um veículo automotivo para deslocamento no percurso Rio-São Paulo, totalizando 100 km percorridos com o gasto de 20 litros (Figura 2a) (Cabral, 2012).

Após esse primeiro projeto nacional, o etanol só foi, de fato, utilizado como alternativa à gasolina, no ano de 1975, quando foi criado o Programa PROALCOOL (Figura 2b). Este programa foi uma solução ao grave problema causado pela baixa oferta de petróleo por parte dos países árabes produtores, o qual provocou expressiva elevação dos preços, com impacto significativo sobre a economia brasileira (Cabral, 2012).

Figura 2- (a) Primeiro carro movido a álcool no Brasil (b) Postos de gasolina anunciando a comercialização do álcool



Fonte: FAPESP (2024)

No início do referido Programa, a indústria automotiva brasileira projetou diversos carros à combustão, usando somente o etanol como combustível. No ano de 1975 foram produzidos no Brasil 555 milhões de litros de etanol. Entretanto, nos estados brasileiros com temperaturas mais frias, houve muitas reclamações dos proprietários desses veículos, em função de problemas no processo de ignição e combustão do etanol hidratado.

Diante deste cenário, ao longo do tempo, a indústria automotiva passou a melhorar os motores, bem como a usar um percentual de etanol na composição da gasolina (Marjotta-Maistro, 2002; FAPESP, 2024). A Lei nº 14.993, de 8 de outubro de 2024, autorizou a mistura de etanol anidro à gasolina entre 22% e até 35%. Atualmente, a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) fixou em 30% (trinta por cento) o percentual obrigatório de adição de álcool etílico anidro combustível, em volume, à gasolina em todo o território nacional (BRASIL, 2024).

Cabe também destacar as categorias de etanol que estão expressas na Resolução nº 907, de 18/11/2022 da Agência Nacional de Petróleo (ANP) em seu Artigo 3º e incisos, como se segue (ANP, 2022):

Art. 3º Para efeito desta Resolução definem-se:

IX - etanol anidro combustível (EAC): etanol combustível destinado para mistura com gasolina A na formulação da gasolina C;

X - etanol combustível: biocombustível proveniente do processo fermentativo de biomassa renovável, destinado ao uso em motores a combustão interna, e possui como principal componente o etanol, o qual é especificado sob as formas de etanol anidro combustível e etanol hidratado combustível;

XI - etanol hidratado combustível (EHC): etanol combustível destinado à utilização direta em motores a combustão interna;

XII - etanol hidratado combustível premium (EHCP): etanol hidratado combustível, com massa específica a 20°C variando de 799,7 a 802,8kg/m<sup>3</sup>;

De acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN) 2025, ano-base 2024, elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a produção de caldo de cana-de-açúcar destinado à fabricação de etanol no Brasil atingiu  $212.993 \times 10^3$  toneladas em 2024, volume que foi integralmente convertido em etanol e consumido (EPE, 2025). No mesmo ano, a produção total

de etanol no país alcançou 38,15 milhões de m<sup>3</sup>, representando um aumento de 2,8% em relação a 2023. Desse total, 30,6 milhões de m<sup>3</sup> foram originados da cana-de-açúcar, o que corresponde a uma redução de 2,0% frente ao ano anterior. Deste volume, 66,9% (equivalente a 20,5 milhões de m<sup>3</sup>) referem-se ao etanol hidratado, cuja produção apresentou crescimento de 9,6% em comparação com 2023. Por outro lado, a produção de etanol anidro — utilizado na mistura com a gasolina A para formar a gasolina C, registrou queda de 19,4%, totalizando 10,1 milhões de m<sup>3</sup> em 2024. Adicionalmente, a produção de etanol proveniente de milho e outras biomassas atingiram 7,55 milhões de m<sup>3</sup>, dos quais 4,98 milhões de m<sup>3</sup> correspondem a etanol hidratado e 2,56 milhões de m<sup>3</sup> a etanol anidro, representando 19,8% da produção nacional total de etanol. O milho, utilizado como matéria-prima para a produção de etanol, foi responsável por cerca de 20% de participação na produção deste biocombustível em 2024. A soja e outras biomassas contribuíram com menos de 0,1% da produção de etanol hidratado (EPE, 2025).

Porém, o país ainda tem uma forte dependência de combustíveis fósseis como fonte interna de energia (50%), com destaque para o petróleo e derivados (34%), gás natural (9,6%) e carvão mineral e coque (4,5%). Além disso, o BEN aponta que o total de emissões antrópicas associadas à matriz energética brasileira atingiu 431,3 milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente (Mt CO<sub>2</sub> eq), sendo a maior parte (214,3 Mt CO<sub>2</sub> eq) foi gerada no setor de transportes (EPE, 2025).

### 3.2 MATÉRIAS-PRIMAS E ESTRATÉGIAS DE CONVERSÃO EM BIOETANOL

A literatura tem dividido a produção de bioetanol em primeira, segunda, terceira, quarta e quinta geração, bem como apontado diversas estratégias de conversão de diferentes matérias-primas neste combustível. Nesta seção, serão dissertadas sobre esta temática, tendo como base trabalhos de revisão da temática presentes na literatura.

O bioetanol de primeira geração (1G) refere-se à aquele produzido, principalmente, a partir da fermentação de matérias-primas ricas em açúcares ou amido, como cana-de-açúcar, beterraba, milho e trigo. O processo tem sido consolidado como alternativa energética viável nos Estados Unidos e no Brasil, responsáveis por cerca de 53% e 31% da produção global, respectivamente. Apesar da sua contribuição para a redução das emissões de gases de efeito estufa e ganhos em eficiência energética, a expansão do etanol 1G gerou controvérsias

socioeconômicas ao competir diretamente com a produção de alimentos pelo uso de terras aráveis, água e insumos agrícolas, configurando o dilema “alimentos versus combustível”. Nos EUA, mais de 200 usinas à base de milho produzem, aproximadamente, 15 bilhões de galões anuais, enquanto apenas cerca de 10 usinas de segunda geração, utilizando biomassa lignocelulósica, alcançam meio bilhão de galões, evidenciando a dependência ainda predominante de culturas alimentares. Essa pressão sobre os recursos produtivos impulsionou a busca por alternativas sustentáveis, como o etanol de segunda geração (2G), capaz de utilizar resíduos agrícolas e não comprometer a segurança alimentar (ABREU *et al*, 2024).

Diante das preocupações com a segurança alimentar e os impactos ambientais associados ao uso de terras aráveis para cultivo de matérias-primas energéticas, o bioetanol de segunda geração (2G) emergiu como alternativa sustentável, sendo produzido a partir de biomassa lignocelulósica, como resíduos agrícolas (bagaço de cana, palha de milho, arroz e trigo), florestais e industriais, que não competem com a cadeia alimentar e aproveitam recursos subutilizados. Essa biomassa, composta na maior parte por celulose (40–60%), hemicelulose (20–40%) e lignina (10–25%), permite, mediante pré-tratamento e separação dessas frações, a fermentação dos açúcares em etanol, com vantagens ambientais como baixa toxicidade, volatilidade reduzida e combustão mais limpa. Contudo, a produção de etanol 2G enfrenta desafios técnicos e econômicos significativos, incluindo altos custos operacionais, necessidade de etapas intensivas de pré-tratamento e baixas concentrações finais de etanol (geralmente inferiores a 40 g/L, contra 80–115 g/L do etanol de primeira geração), limitando sua viabilidade comercial e impulsionando o desenvolvimento de biocombustíveis de terceira geração (MOLAVERDI *et al.*, 2021).

A terceira geração de bioetanol (3G) baseia-se no uso de microalgas (ex: cianobactérias, diatomáceas e espécies dos gêneros *Chlorella*, e macroalgas, destacando-se por seu rápido crescimento, elevada capacidade de fixação de CO<sub>2</sub>, baixa demanda por terras aráveis e potencial para produção de biomassa rica em carboidratos e lipídios. Entre essas, as cianobactérias e certas microalgas verdes mostram eficiência promissora na conversão enzimática de amido em etanol, com rendimentos experimentais de até 11 g/L, enquanto macroalgas demonstram maior eficiência de conversão por massa de substrato (0,43 g/g) e ciclos produtivos mais curtos. Apesar do potencial ambiental e produtivo, o processo apresenta desafios técnicos, como a necessidade

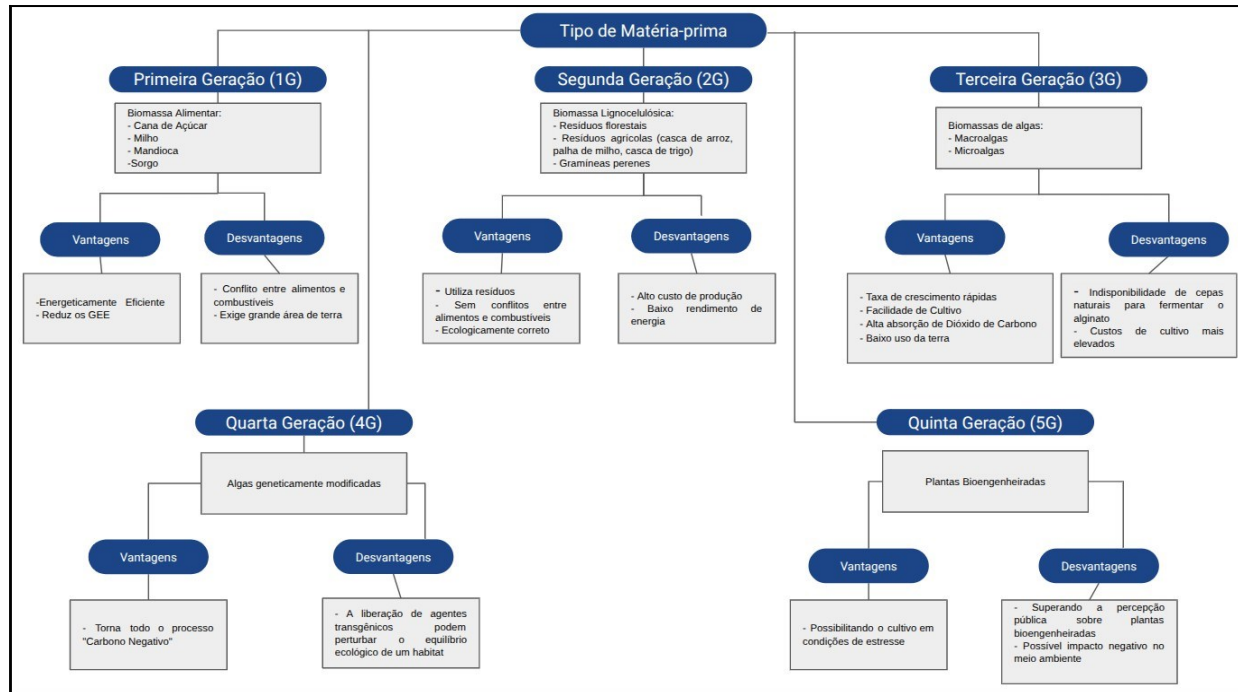
de pré-tratamentos, custos de esterilização em larga escala, baixas concentrações finais de etanol e complexidade nos processos integrados de sacarificação e fermentação (LIN *et al.*, 2021).

A quarta geração de bioetanol (4G) inclui um campo emergente, no qual a conversão direta da energia solar em biocombustível por meio de microrganismos projetados com base em novas técnicas sintéticas. A produção ocorre a partir de algas (ex: *Bacillariophyceae*, *Eustigmatophyta*, *Chlorophyceae* e *Chrysophyceae*) com a capacidade de capturar carbono em suas folhas e ramos como matéria-prima para a produção de biocombustíveis. Por meio da bioengenharia, se faz modificações genéticas nesses organismos com o intuito de aprimorar certas características e otimizar propriedades para melhorar a produção de bioetanol. Dentre os processos otimizados estão a fotossíntese e fixação de carbono, aumento da síntese de lipídios e capacidade de utilizar diversos açúcares, especialmente pentoses e hexoses. Porém, o desenvolvimento do bioetanol 4G tem um impacto negativo no meio ambiente, uma vez que é capaz de liberar transgênicos, os quais podem perturbar o equilíbrio ecológico de um habitat (JAIN, 2024).

O bioetanol de quinta geração (5G) se fundamenta no uso de plantas bioengenhairadas com poucas modificações, como a destruição de enzimas da lignina, o aumento do nível de polissacarídeos ou o crescimento da biomassa vegetal e a remoção de polissacarídeos da parede celular da planta. Estas estratégias têm o potencial de reduzir o custo dos processos de pré-tratamento e hidrólise e acelerar o processo geral de biomassa. As técnicas de engenharia metabólica e edição genômica podem auxiliar no desenvolvimento de culturas projetadas especificamente para produzir biocombustíveis de alta qualidade, ricos em alcenos e cetonas, além de melhorar o rendimento de açúcares, aprimorando as características da biomassa e permitindo o cultivo em condições de estresse. Contudo, tem-se o desafio de superar a percepção pública sobre plantas bioengenhairadas, especialmente em termos de segurança alimentar e aos impactos ambientais (Padder *et al.*, 2024).

A Figura 3 apresenta, de forma sucinta, as principais características das diferentes gerações de bioetanol.

Figura 3- Principais características das diferentes gerações de bioetanol



Fonte: Adaptado de Ghazali e Musafa (2025)

Dentre as principais estratégias de matérias-primas para bioetanol estão: Hidrólise e fermentação separadas (SHF); Processo de sacarificação e fermentação simultâneas (SSF); Sacarificação e cofermentação simultâneas (SSCF) e Bioprocessamento consolidado (CBP).

O processo de hidrólise e fermentação separadas (SHF, do inglês Separate Hydrolysis and Fermentation), consiste na sacarificação do substrato em reator específico, seguida pela fermentação da glicose em etanol em unidade distinta, permitindo condições otimizadas para cada etapa, temperaturas mais elevadas para a ação enzimática e moderadas para a atividade dos microrganismos fermentadores. Embora essa configuração ofereça flexibilidade operacional e em alguns casos, rendimentos superiores de etanol (como 48,72 g/L com *S. cerevisiae*, frente a 29,59 g/L no SSF), apresenta limitações significativas, incluindo inibição enzimática por acúmulo de açúcares, risco elevado de contaminação microbiana devido ao tempo prolongado de operação, custos aumentados pelo uso de dois reatores e desafios relacionados à esterilização em

escala industrial. Estudos demonstram que, mesmo com eficiência parcial, como a obtenção de 9,45 g/L de etanol a partir de palha de arroz pré-tratada, o SHF tende a ser menos competitivo frente a estratégias integradas, principalmente quando considerados o tempo total do processo e os custos operacionais (Wu *et al.*, 2026).

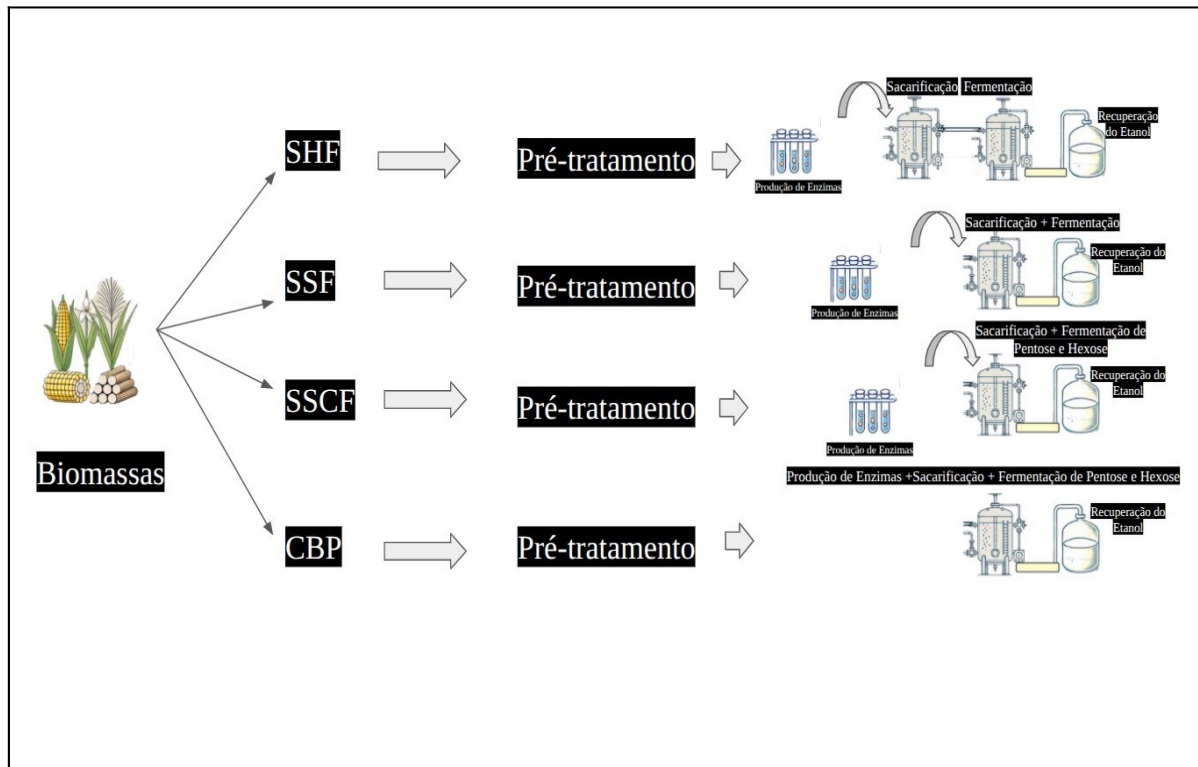
A sacarificação e fermentação simultâneas (SSF, do inglês Simultaneous Saccharification and Fermentation) constituem uma estratégia biotecnológica que integra hidrólise enzimática e fermentação em um único reator, reduzindo custos operacionais, minimizando o tempo de residência e atenuando a inibição enzimática pelo acúmulo de açúcares redutores. Apesar dessas vantagens, o processo enfrenta desafios técnicos significativos, como a dificuldade em conciliar as temperaturas ótimas distintas para sacarificação (cerca de 50 °C) e fermentação (28–37 °C), além da complexidade no monitoramento simultâneo de múltiplos parâmetros do bioprocessamento. Adicionalmente, a taxa de hidrólise tende a ser mais lenta que na configuração SHF, resultando em menores concentrações de açúcares disponíveis, enquanto a maioria dos microrganismos fermentadores, notadamente *Saccharomyces cerevisiae*, apresenta baixa eficiência na conversão de xilose, devido à preferência metabólica por glicose, exigindo estratégias adicionais para equilibrar a utilização dos diferentes açúcares presentes na biomassa lignocelulósica (Wang *et al.*, 2026).

A sacarificação e cofermentação simultâneas (SSCF) representam uma evolução do processo SSF, integrando em um único reator a hidrólise da celulose e hemicelulose com a fermentação conjunta de hexoses e pentoses notadamente glicose e xilose, o que potencializa a eficiência global do sistema ao reduzir tempo, custos operacionais e carga enzimática. Uma das principais vantagens da SSCF reside no rápido consumo de glicose pelos microrganismos, o que minimiza a inibição competitiva sobre a xilose e favorece seu aproveitamento, aumentando o rendimento etanólico total. Contudo, o processo enfrenta desafios semelhantes aos da SSF, como a dificuldade em estabelecer condições ótimas compartilhadas para enzimas (ativas em torno de 50 °C) e microrganismos fermentadores (ativos entre 28–37 °C), além da inibição por etanol acumulado e do aumento de sólidos insolúveis em água. Para contornar essas limitações, propõe-se uma estratégia de SSCF em dois estágios, com pré-hidrólise a temperaturas mais elevadas seguidas de fermentação em condições mais amenas, buscando equilibrar eficiência enzimática e viabilidade microbiana (Khan *et al.*, 2022).

O bioprocessamento consolidado (CBP, do inglês Consolidated Bioprocessing) surge como uma abordagem integrada e potencialmente mais sustentável para a produção de bioetanol a partir de biomassa lignocelulósica, ao combinar em um único reator a produção de enzimas, a sacarificação e a fermentação, utilizando microrganismos geneticamente modificados ou consórcios microbianos. O microrganismo ideal para CBP deve ser capaz de secretar enzimas lignocelulolíticas, hidrolisar eficientemente a biomassa e fermentar os açúcares liberados em etanol; contudo, até o momento, nenhum organismo natural preenche plenamente esses requisitos. Fungos filamentosos, como *Trichoderma reesei*, *Aspergillus* spp. e *Fusarium* spp., apresentam potencial devido à sua capacidade de colonizar substratos sólidos, mas carecem de capacidade de produzir etanol de forma natural, enquanto cepas recombinantes de *Saccharomyces cerevisiae*, como a ER T12.7, que demonstrou aumento de 36% no rendimento etanólico, têm sido desenvolvidas para superar essa limitação. Adicionalmente, basidiomicetos com capacidade de biodelignificação, como *Trametes versicolor* e *Phlebia* MG-60, mostram promessa na conversão direta de biomassa não pré-tratada em etanol, embora os rendimentos ainda sejam baixos (ex.: 0,94 g/L com *T. asperellum* B1581). Apesar dos avanços, o CBP permanece em fase experimental, enfrentando desafios relacionados à viabilidade metabólica sob condições anaeróbicas, baixa produtividade e complexidade genética, mas representa uma via estratégica para reduzir custos e aumentar a eficiência frente aos processos convencionais como o SHF (Li *et al.*, 2026).

A Figura 4 apresenta, de forma sucinta, as principais estratégias de bioconversão de biomassa em bioetanol.

Figura 4- Principais estratégia de bioconversão de biomassa em bioetanol



Fonte: Adaptado de Ghazali e Musafa (2025)

A busca pela estratégia ideal de bioconversão para produção de etanol a partir de biomassa lignocelulósica envolve a comparação entre diferentes configurações, SHF, SSF, SSCF e CBP, cada uma com vantagens e limitações específicas. Enquanto o SSF supera o SHF em rendimento ao integrar sacarificação e fermentação em um único reator, ainda é limitado pela incompatibilidade térmica entre as etapas e pela incapacidade de fermentar pentoses. O SSCF avança ao permitir a cofermentação simultânea de hexoses e pentoses, melhorando a eficiência global. Contudo, o bioprocessamento consolidado (CBP) emerge como a abordagem mais promissora, pois integra produção enzimática, hidrólise e fermentação em um único sistema, eliminando a necessidade de enzimas exógenas e reduzindo custos operacionais. Cepas geneticamente modificadas de *Saccharomyces cerevisiae*, como ER T12, M2n T1 e AC14,



fazendo divisa com o estado do Rio Grande do Sul ao sul e com o Oceano Atlântico a leste (EPAGRI, 2023).

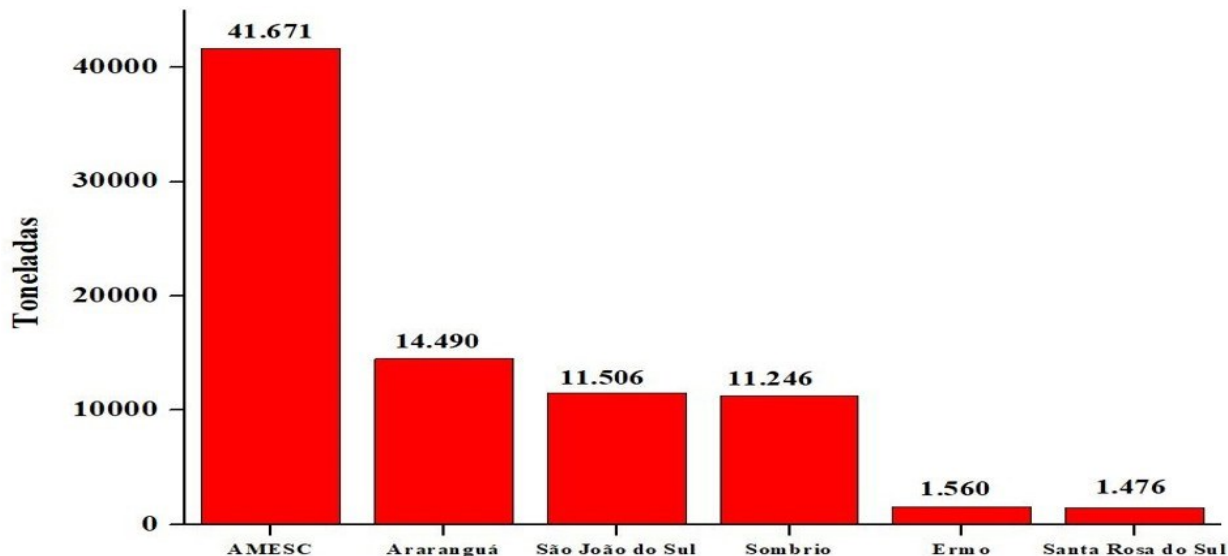
O relevo é predominantemente composto por planícies litorâneas e colinas suaves no interior, com altitudes variando de 0 a 600 metros acima do nível do mar. A rede hidrográfica é formada por importantes rios como o Araranguá, Tubarão e Capivari. O clima da região é classificado como Cfa segundo a classificação de Köppen-Geiger, apresentando temperado úmido com verões quentes e sem estação seca definida e invernos amenos, com raras geadas. A temperatura média anual está entre 17°C e 20°C e a precipitação média anual é de 1.200 a 1.600 mm, com chuvas bem distribuídas ao longo do ano (EPAGRI, 2023; INMET, 2024).

Segundo estimativas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE (2024), a população total da AMESC é de aproximadamente 204.000 habitantes. O município mais populoso é Araranguá (cerca de 70.322 habitantes), e o menos populoso é Ermo (aproximadamente 2.115 mil habitantes). A região apresenta taxas de urbanização acima da média estadual, com mais de 85% da população vivendo em áreas urbanas (IBGE, 2025).

A economia da AMESC é diversificada, com destaque para Mineração (carvão, argila e calcário, especialmente em Criciúma e Urussanga), Indústria cerâmica e calçadista, agronegócio (destaque para avicultura, suinocultura, produção leiteira e culturas temporárias), turismo de veraneio (destino de balneários como Balneário Arroio do Silva, Passo de Torres e Praia Grande), serviços e comércio, impulsionados pela centralidade de Araranguá como polo regional. O maior PIB *per capita* da região é do município de Araranguá, sendo de cerca de R\$ 34.314,67 (IBGE, 2022). A região também apresenta bons índices de desenvolvimento humano, sendo o maior IDH de 0,772 – considerado alto, no município de Araranguá, com destaque para educação e longevidade (ATLAS DO DESENVOLVIMENTO HUMANO, 2023).

A mandioca se destaca na região, sendo cultivada, predominantemente, por pequenos agricultores familiares, muitos vinculados a agroindústrias locais de farinha e polvilho (SAR, 2024; EPAGRI, 2023). Os dados de produção desse tubérculo para fins industriais referentes à safra 2024/2025 (Figura 6) apontam uma área plantada de 1.496 hectares e uma produção total de 41.671 toneladas, o que corresponde a uma produtividade média de 27.855 kg/ha. Os municípios que apresentaram maiores produções foram Araranguá, São João do Sul, Sombrio, Ermo e Santa Rosa do Sul (OBSERVATÓRIO AGRO CATARINENSE, 2025).

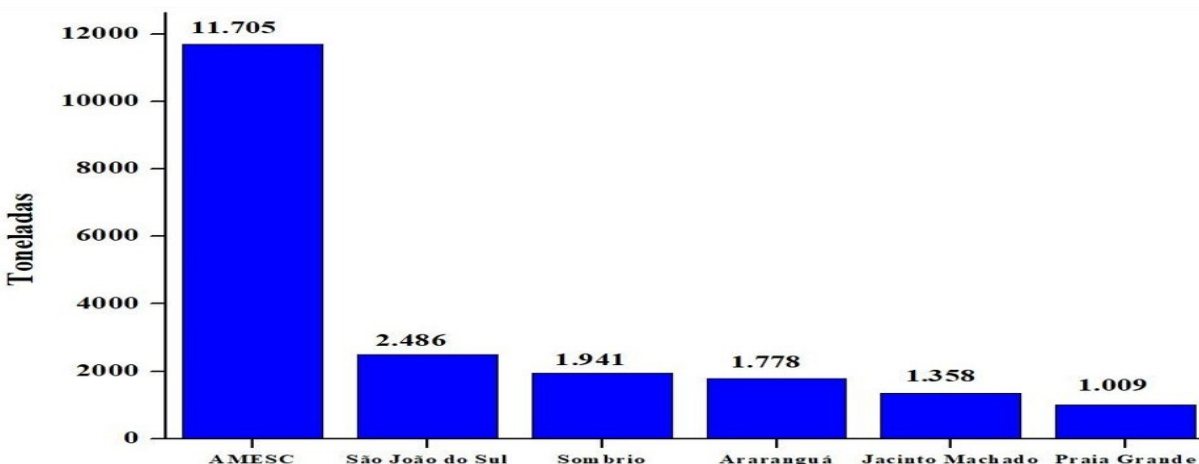
Figura 6- Produção de mandioca indústria na AMESC (safra 2024-2025)



Fonte: do Autor, com base no Observatório Agro Catarinense (2025).

A produção para fins de consumo *in natura* (“mandioca mesa”) na safra 2024/2025 (Figura 7) descreve uma área plantada de 513 hectares e uma produção total de 11.705 toneladas, cuja produtividade média foi de 22.816 kg/ha. Os maiores produtores foram os municípios de São João do Sul, Sombrio, Araranguá, Jacinto Machado e Praia Grande (OBSERVATÓRIO AGRO CATARINENSE, 2025).

Figura 7- Produção de mandioca *in natura* (“mandioca mesa”) na AMESC (safra 2024-2025)



Fonte: do Autor, com base no Observatório Agro Catarinense (2025).

A expressiva produção dessa cultura na região abastece unidades de processamento que transformam a raiz em produtos com alto valor agregado, impulsionando a geração de emprego e renda para agricultores e agroindústrias. Além disso, a mandioca possui grande relevância na segurança alimentar e na diversificação da produção agrícola, fortalecendo a economia rural e contribuindo para o desenvolvimento sustentável da região. O cultivo, aliado a técnicas de manejo adequadas, favorece a competitividade do setor e garante a continuidade da cadeia produtiva, consolidando a AMESC como um polo estratégico na produção e industrialização da mandioca em Santa Catarina (EPAGRI, 2024).

### 3.4 RESÍDUOS DO PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DA MANDIOCA

No processo de beneficiamento da mandioca são geradas diversas categorias de resíduo, dentre os quais se destacam: casca marrom e entrecasca; bagaço ou resíduo de prensagem; manipueira ou líquido de prensagem; crueira; material de varredura; águas residuais (vegetal, de prensa, extração de fécula) e óleo fúsel. A composição química desses resíduos é bastante variável, podendo estar presentes fibras dietéticas, celulose, hemicelulose, lignina, amido, glicose, sacarose, proteína bruta, lipídios, minerais (cinzas) e compostos cianogênicos. Quando não submetidos ao manejo adequado, os mesmos são capazes de provocar impactos ambientais negativos no solo, água e biota exposta (Veiga *et al.*, 2016). A Tabela 1 apresenta a composição química de alguns destes resíduos.

Tabela 1- Composição química de alguns resíduos do processamento da mandioca

Composição química	Categoria de resíduos e teor de constituintes químicos		
	Casca marrom e entrecasca	Bagaço	Manipueira
Fibras dietéticas	50-70 %	20-35%	-
Celulose	25-40 %	15-25%	-
Hemicelulose	15-25%	10-20%	-
Lignina	8-15 %	2-5%	-
Amido	15-30%	50-60	-
Proteína bruta	2-5%	1-3%	-
Lípidos	1-3%	0,5-2%	-
Minerais	3-6%	1,5-4%	-
Compostos cianogênicos	Menor presença		
Umidade	-	50-70%	~90%
Cianeto de Hidrogênio (HCN)	-	-	100-400 mg/L
Carboidratos solúveis (glicose, sacarose e outros)	-	-	-
Minerais	-	-	-
Proteínas e aminoácidos	-	-	-

Fonte: Veiga e colaboradores (2016).

As fibras dietéticas provenientes do processamento da mandioca constituem uma fração lignocelulósica rica em componentes estruturais vegetais, com elevado teor de celulose e hemicelulose. Embora biodegradáveis, seu descarte inadequado pode acarretar impactos ambientais significativos, especialmente quando acumulados em corpos hídricos, onde promovem aumento da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e alterações na qualidade da água. Sendo assim, sua baixa solubilidade e alta resistência à degradação microbiana em condições anaeróbias podem contribuir para a formação de sedimentos persistentes em

ambientes aquáticos, comprometendo ecossistemas locais e serviços ambientais associados (Veiga *et al.*, 2016; Hierro-Iglesias *et al.*, 2024).

A celulose, principal polissacarídeo estrutural presente nos resíduos da mandioca, apresenta elevada estabilidade química e resistência à degradação natural em curto prazo. Quando não destinada a aplicações industriais ou energéticas, sua disposição em meio ambiente pode levar ao acúmulo de matéria orgânica fibrosa em solos e cursos d'água. Embora não seja tóxica, sua decomposição lenta sob condições aeróbias ou anaeróbias pode gerar metano, gás do efeito estufa, em aterros sanitários, além de interferir na dinâmica sedimentar e na permeabilidade de solos próximos às áreas de descarte (Veiga *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2025).

A hemicelulose, polímero heterogêneo composto por pentoses e hexoses, é mais suscetível à degradação microbiana do que a celulose, mas ainda assim representa um potencial poluente quando liberada em grandes quantidades nos efluentes do processamento da mandioca. Sua rápida fermentação em ambientes aquáticos pode elevar significativamente os níveis de DBO e demanda química de oxigênio (DQO), resultando em baixa oxigenação e prejuízos à biota aquática. A ausência de tratamento adequado desses efluentes pode, portanto, comprometer a integridade ecológica de rios, lagos e corpos de água receptores (Veiga *et al.*, 2016; Xiong *et al.*, 2024).

A lignina, macromolécula aromática complexa e altamente recalcitrante, confere rigidez aos resíduos lignocelulósicos da mandioca e dificulta sua biodegradação. Sua persistência no ambiente, especialmente em solos e sedimentos, pode inibir a atividade microbiana benéfica e alterar o ciclo de nutrientes. Em ambientes aquáticos, sua deposição pode reduzir a transparência da água, limitando a penetração da luz solar e, conseqüentemente, inibindo a fotossíntese de macrófitas aquáticas e fitoplâncton, base da cadeia trófica aquática. Essa alteração na produtividade primária pode provocar desequilíbrios ecológicos, afetando desde organismos microscópicos até peixes e outras espécies dependentes desses recursos (Veiga *et al.*, 2016; Cai *et al.*, 2023).

Além disso, a lignina pode se ligar a metais pesados ou outros poluentes presentes no ambiente, formando complexos estáveis que aumentam a persistência e a toxicidade dessas substâncias no ecossistema. Em solos, o acúmulo de lignina não degradada pode alterar a porosidade, aeração e atividade microbiana, prejudicando o desenvolvimento radicular de plantas nativas e culturas vizinhas. A inibição da microbiota benéfica do solo, como bactérias fixadoras

de nitrogênio e fungos micorrízicos, compromete ciclos biogeoquímicos essenciais, como os de carbono e nitrogênio, com reflexos negativos na biodiversidade do solo e na regeneração da vegetação (Veiga *et al.*, 2016; Silva *et al.*, 2025).

O amido residual, frequentemente presente em águas de lavagem e efluentes do beneficiamento da raiz, é altamente biodegradável e representa uma fonte concentrada de carbono orgânico. Embora não tóxico, seu descarte sem tratamento prévio pode causar picos agudos de DBO em corpos receptores, levando à redução rápida de oxigênio dissolvido e à morte de organismos aeróbios. Em sistemas de tratamento inadequados, essa fração também favorece a proliferação de microrganismos indesejados, podendo gerar maus odores e instabilidade operacional nas estações de tratamento de efluentes (Veiga *et al.*, 2016; Akmeemana *et al.*, 2025)

A glicose, monossacarídeo resultante da hidrólise parcial do amido ou da celulose durante o processamento da mandioca, é rapidamente metabolizada por microrganismos presentes em ambientes naturais. Sua presença em efluentes industriais, mesmo em concentrações moderadas, pode provocar impactos ambientais imediatos, como a redução drástica do oxigênio dissolvido em rios e córregos. Essa condição favorece a predominância de processos anaeróbios, com consequente liberação de gases malcheirosos e potencial eutrofização local, afetando a qualidade da água e a biodiversidade aquática (Veiga *et al.*, 2016; Mendes *et al.*, 2024).

Embora presente em menor proporção nos resíduos da mandioca em comparação com outras culturas, a sacarose pode ser detectada em sucos celulares e águas de processamento. Trata-se de um dissacarídeo facilmente fermentável, cuja liberação não controlada em ambientes aquáticos contribui para o aumento da carga orgânica e da atividade microbiana. Esse cenário pode desencadear desequilíbrios ecológicos, incluindo a supressão de espécies sensíveis à variação de oxigênio e o favorecimento de biofilmes microbianos que alteram a transparência e a composição química da água (Veiga *et al.*, 2016; Santos *et al.*, 2024).

A fração denominada proteína bruta engloba não apenas proteínas verdadeiras, mas também compostos nitrogenados não proteicos presentes nos resíduos da mandioca. Sua degradação microbiana libera amônia e outros compostos nitrogenados, que, em excesso, podem contribuir para a eutrofização de corpos d'água e toxicidade para organismos aquáticos. Além disso, o nitrogênio orgânico proveniente dessa fração pode exigir tratamentos específicos, como

nitrificação-desnitrificação, em estações de tratamento de efluentes, caso não seja previamente recuperado para fins de produção de bioprodutos (Veiga *et al.*, 2016; Zhou *et al.*, 2025).

Os lipídios presentes nos resíduos da mandioca, embora em teores geralmente baixos, podem formar películas superficiais em corpos d'água, reduzindo a troca gasosa entre a atmosfera e o meio aquático. Essa barreira física limita a oxigenação natural da água, agravando os efeitos da decomposição de matéria orgânica. Além disso, lipídios não tratados podem sofrer hidrólise e oxidação, gerando ácidos graxos livres e gases, especialmente em condições anaeróbias, o que compromete tanto a qualidade ambiental quanto a percepção social das áreas próximas às unidades de processamento (Veiga *et al.*, 2016; Okpozu *et al.*, 2019).

Os minerais, quantificados como cinzas após incineração da biomassa residual, representam a fração inorgânica dos resíduos da mandioca, composta principalmente por potássio, cálcio, magnésio e fósforo. Embora essenciais à fertilidade do solo, seu descarte desordenado, especialmente em grandes volumes, pode alterar o pH e a salinidade de ecossistemas terrestres e aquáticos. Em contextos de aplicação agrícola sem critérios técnicos, há risco de lixiviação de nutrientes, com potencial para contaminar aquíferos ou contribuir para carga excessiva de compostos químicos em corpos hídricos receptores (Veiga *et al.*, 2016; Santhanam *et al.*, 2025).

Os compostos cianogênicos, notadamente a linamarina e a lotaustralina, são metabólitos secundários naturais da mandioca que, sob condições inadequadas de processamento, podem estar presentes nos resíduos sólidos e líquidos. A hidrólise desses compostos libera cianeto de hidrogênio (HCN), substância altamente tóxica mesmo em baixas concentrações. O descarte de efluentes contendo cianeto não degradado representa sério risco à saúde ambiental, podendo causar mortalidade em organismos aquáticos e contaminação de recursos hídricos. A mitigação desse risco exige estratégias de detoxificação, como fermentação controlada, secagem ou tratamento biológico específico antes da disposição final (Veiga *et al.*, 2016; Niyogi *et al.*, 2025).

Na presente investigação, utilizou-se resíduos fibrosos oriundos na produção de polvilho de mandioca, o qual constitui-se como uma biomassa complexa composta predominantemente por amido residual, celulose, hemicelulose e lignina. Embora a fração lignocelulósica (celulose, hemicelulose e lignina) confira resistência estrutural à raiz, é o amido não extraído durante o processamento industrial que representa a principal fonte de carboidratos fermentescíveis neste

processo. A utilização desse resíduo como substrato para produção de bioetanol insere-se na lógica da economia circular, ao transformar um passivo ambiental, frequentemente descartado em leitos de rios ou acumulado em áreas agrícolas, em recurso energético renovável. Apesar da presença significativa de polímeros estruturais, o presente estudo concentrou-se na via amilolítica, dada a maior acessibilidade enzimática e eficiência tecnológica já consolidada para conversão de amido em etanol. Por fim ressalta-se o uso desse resíduo específico como biomassa para a produção de bioetanol é inédito na região e desta forma, também apresenta relevância acadêmica (Strack, 2021).

### 3.5 PRODUÇÃO DE ETANOL A PARTIR DE MANDIOCA E SEUS RESÍDUOS: ALGUNS ESTUDOS DA LITERATURA

A literatura tem descrito que a produção de etanol também pode ser feita a partir da mandioca e de seus resíduos, empregando-se diferentes processos tecnológicos. O Quadro 1 apresenta alguns desses estudos.

Quadro 1- Estudos de produção de bioetanol a partir da mandioca e seus resíduos

Título	Objetivo	Metodologia	Resultados	Referência
Análise de incerteza na avaliação do ciclo de vida do etanol de mandioca na China.	O objetivo da pesquisa foi avaliar a viabilidade energética e ambiental do etanol de mandioca como combustível alternativo à gasolina na China, utilizando análise do ciclo de vida e simulação de incertezas.	A pesquisa utilizou a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para analisar a eficiência energética e os impactos ambientais do etanol de mandioca em comparação à gasolina. Para lidar com incertezas nos dados, aplicou-se a simulação de Monte Carlo, identificando variáveis críticas que afetam o desempenho do biocombustível.	O etanol de mandioca apresentou melhor eficiência energética e menor impacto climático que a gasolina, embora tenha desempenho inferior em acidificação e poluentes respiratórios, mantendo-se viável mesmo sob incertezas nas variáveis do processo.	Jianling e colaboradores (2018).
Caracterização físico-química de amidos especiais de mandioca e sua aplicação na produção de bioetanol por meio da tecnologia no-cook em altíssima gravidade.	O objetivo do estudo foi avaliar as propriedades físico-químicas de amidos especiais de mandioca e seu potencial para a produção de etanol usando o processo SLSF-VHG sem cozimento.	A metodologia consistiu na caracterização físico-química de diferentes amidos de mandioca, seguida da avaliação de seu desempenho na produção de etanol pelo processo de liquefação, sacarificação e fermentação simultâneas (SLSF-VHG) sob condições sem cozimento.	O genótipo GM4694-1 apresentou alto rendimento de etanol (17% v/v) em apenas 90 horas, destacando-se pela rápida conversão e menor teor de amido resistente entre os amidos avaliados.	Alzate e colaboradores (2024).
Melhorando a produção sustentável de etanol combustível a partir da mandioca no Vietnã.	desenvolver um modelo para analisar a viabilidade técnico-econômica e calcular as emissões de gases de efeito estufa e o balanço energético líquido da produção de etanol de mandioca no Vietnã.	Coleta de dados sobre a conversão do etanol de mandioca, a modelagem de uma planta de produção, o cálculo das emissões de gases de efeito estufa e do balanço energético líquido, e a avaliação da viabilidade econômica.	A produção de etanol de mandioca no Vietnã apresenta um custo de produção de 0,4 \$/l, com consumo de energia fóssil de 12,4 MJ/l, uma relação energética líquida de 1,70 e emissões de GEE 63% menores que as da gasolina.	Do e colaboradores (2024).

Evolução adaptativa laboratorial de <i>Thermoanaerobacterium</i> um aotearoense para produção aprimorada de etanol a partir de amido de mandioca crua.	O objetivo do estudo foi realizar evolução adaptativa em laboratório (ALE) na cepa PRH-B3 de <i>Thermoanaerobacterium</i> aotearoense para desenvolver linhagens tolerantes a altos títulos de etanol.	Foi realizada evolução adaptativa em laboratório (ALE) com aumento progressivo da concentração de etanol, seguida pela análise das mutações no domínio da álcool desidrogenase (ADH) e seus efeitos nas atividades enzimáticas in vivo.	As linhagens mutantes tolerantes ao etanol apresentaram um aumento de 26% na produção de etanol (~39 g/L) e demonstraram uma preferência pelo uso de NADPH para a síntese de etanol, revelando um mecanismo regulatório potencial para a tolerância ao etanol.	Dai e colaboradores (2024).
Impactos das mudanças climáticas no rendimento da mandioca e no desempenho energético do ciclo de vida e dos gases de efeito estufa dos sistemas de etanol de mandioca: um exemplo da província de Guangxi, China.	Avaliar o impacto das mudanças climáticas na produtividade da mandioca e nas emissões de gases de efeito estufa no sistema de conversão de mandioca em etanol, usando análise de ciclo de vida e modelos climáticos.	Utilizou um modelo de floresta aleatória (RF) acoplado a 10 saídas de modelos climáticos globais (MCGs) para prever a produtividade futura da mandioca, e avaliou o valor energético líquido (VEL) e as emissões de GEE em diferentes topografias.	O modelo indicou que o aumento da temperatura diminuirá a produtividade da mandioca, especialmente em áreas montanhosas, com uma redução de 28% no VEL e um aumento de 3,4% nas emissões de GEE no cenário climático RCP8.5 até 2100.	Zhu e colaboradores (2023).
Produção de etanol em etapa única a partir de amido de mandioca cru usando uma combinação de hidrólise e fermentação de amido cru, ampliando a escala de um laboratório de 5 L e uma planta piloto de 200 L para fermentadores industriais de 3.000 L.	Investigar as condições ideais e os procedimentos técnicos para a produção de etanol a partir de amido de mandioca cru em uma única etapa, visando altos rendimentos e produtividades.	A pesquisa combinou hidrólise do amido de mandioca cru com fermentação em uma única etapa, utilizando a enzima StargenTM002 para a hidrólise e <i>Saccharomyces cerevisiae</i> para a fermentação, em escalas laboratoriais, piloto e industriais.	O processo de produção de etanol em uma única etapa gerou altos rendimentos de etanol (até 81,86 g/L), com baixo nível de subprodutos, e foi bem-sucedido em escalas de 5 L a 3.000 L, mostrando viabilidade para a produção industrial.	Krajang e colaboradores (2021).
Produção de bioetanol a partir da fermentação da mandioca em biorreator de membrana de pervaporação alimentado com alta concentração de açúcar.	Avaliar a eficiência de um biorreator de membrana de pervaporação na produção e recuperação de bioetanol a partir da fermentação da mandioca.	A fermentação de hidrolisado de mandioca com alta concentração de açúcar foi acoplada à separação por membrana de PDMS e seguida de condensação fracionada do etanol permeado.	O sistema alcançou alta produtividade de etanol (1,47 g/L/h), com 96,6% de recuperação e fator de separação elevado (9,8–14,9) após condensação fracionada.	Haoji e colaboradores (2024).
Produção de bioetanol a partir de mandioca e bagaço por processo de hidrólise térmica e fermentação de levedura local.	Avaliar a produção de bioetanol ecologicamente correto a partir da mandioca e do bagaço de cana-de-açúcar.	As biomassas foram submetidas à hidrólise térmica em diferentes temperaturas e proporções, seguidas por fermentação com levedura local e destilação.	s melhores condições produziram um rendimento de etanol de 12,40% e teor de 42,85%, com influência significativa das variáveis do processo.	Djuned e colaboradores (2022).
Otimização multiobjetivo da cadeia de suprimentos de etanol de primeira e segunda geração no Brasil usando a abordagem do nexo água-energia-alimento-terra.	Avaliar a eficiência e sustentabilidade da cadeia de suprimentos de etanol no Brasil sob a abordagem Nexus água-energia-alimento-terra (WEFL).	Foi aplicado um modelo matemático multiobjetivo aliado à análise multicritério (AHP) para comparar cenários com e sem Nexus, incluindo etanol de primeira e segunda gerações.	O cenário Nexus aumentou a produção de etanol em 35,63%, reduziu os custos totais em 2,94% e teve preferência de 63% dos stakeholders por atender melhor aos ODS.	Machado e colaboradores (2023).
Potencial de leveduras tolerantes a múltiplos estresses, <i>Saccharomyces</i>	Avaliar o potencial da polpa e cascas de mandioca industrial como substratos para a produção	Isolamento de leveduras tolerantes a múltiplos estresses ( <i>S. cerevisiae</i> LC269108 e <i>P. kudriavzevii</i> LC375240), seguidas de avaliação de	As leveduras isoladas foram capazes de fermentar eficientemente os resíduos de mandioca, e	Murata e colaboradores (2021).

cerevisiae e <i>Pichia kudriavzevii</i> para produção de etanol combustível a partir de resíduos industriais de mandioca.	de etanol, considerando os desafios de substâncias inibitórias presentes nos resíduos.	suas capacidades fermentativas sob condições de alta temperatura e presença de inibidores como cianeto e detergentes.	as substâncias inibitórias presentes, como cianeto e detergentes, foram identificadas como causas de inibição, com a cocultura de leveduras melhorando a produção de etanol.	
Aproveitamento de resíduos celulósicos de mandioca para produção de bioetanol.	O objetivo deste estudo é utilizar resíduos celulósicos de mandioca para a produção de bioetanol de segunda geração por meio de hidrólise ácida e enzimática.	A pesquisa envolveu a preparação de resíduos celulósicos de mandioca, seguida de hidrólise ácida e enzimática, utilizando amiloglucosidase para sacarificação e fermentação com <i>Saccharomyces cerevisiae</i> sob condições controladas de pH e temperatura.	A hidrólise ácida com HCl produziu dissacarídeos, enquanto a sacarificação subsequente com amiloglucosidase gerou glicose, resultando em uma produção eficiente de bioetanol a partir dos resíduos celulósicos de mandioca.	Elemike e colaboradores (2015).
Graus de amido de mandioca (farinhas) como substratos sustentáveis para uso na produção de álcool neutro e biocombustíveis – Abordagem da indústria.	Estudar o potencial de diferentes tipos de amido de mandioca, incluindo amido de mandioca decomposto, como matéria-prima renovável para a produção de bioetanol, considerando a mitigação das mudanças climáticas e a segurança alimentar.	A pesquisa comparou o rendimento alcoólico (RA) obtido a partir de diferentes tipos de amido de mandioca, incluindo amido de grau alimentício e amido de mandioca decomposto, com diferentes tempos de fervura e decomposição.	O amido de mandioca de grau alimentício produziu o maior rendimento alcoólico, enquanto o amido levemente decomposto obteve um bom rendimento, contribuindo para a segurança alimentar, pois a mandioca deteriorada não competiria com a alimentação humana.	Agu e colaboradores (2023).
Obtenção de etanol a partir de resíduos de mandioca ( <i>manihotesculenta crantz</i> ).	Avaliar a viabilidade do uso de cascas de mandioca, resíduos da produção de fécula, como biomassa alternativa para a obtenção de etanol combustível.	Foram realizados tratamentos de otimização do processo de hidrólises ácidas com diferentes concentrações de ácido sulfúrico (1%, 3%, 5%), granulometrias de peneira (16, 24, 32 mesh) e tempos de autoclavagem (10, 35, 60 minutos), visando obter um caldo com alto teor de açúcares fermentescíveis.	A melhor condição para obtenção de etanol foi com 5% de ácido sulfúrico, peneira de 32 mesh e autoclavagem por 22,5 minutos, demonstrando o potencial das cascas de mandioca como fonte promissora para a produção de biocombustíveis.	Cuchi e colaboradores (2022).
O Brasil e o mercado mundial no desenvolvimento de tecnologias para produção de etanol de segunda geração.	Investigar a participação do Brasil no desenvolvimento tecnológico para a produção de etanol de segunda geração, por meio do uso de biomassa, com base em patentes depositadas mundialmente.	Foram analisados documentos de patentes relacionadas ao etanol de segunda geração, depositadas entre 2006 e 2015, para entender as tendências tecnológicas e os principais players envolvidos.	Observou-se um aumento no número de patentes entre 2006 e 2015, mas o setor ainda não atingiu a maturidade tecnológica necessária para enfrentar os desafios em escala comercial. Apesar de o Brasil ser o segundo maior produtor global de etanol, o país apresenta baixo desenvolvimento tecnológico nacional, com destaque para o impacto dos investimentos públicos e a predominância de organizações públicas chinesas e empresas norte-americanas no setor.	Santos e colaboradores (2023).
Produção de bioetanol a partir de casca de mandioca tratada com hidrólise catalisada por carbono sulfonado.	Estudar o potencial da casca de mandioca como matéria-prima para a produção de bioetanol, utilizando os processos de hidrólise ácida e fermentação.	A hidrólise ácida foi realizada a 100°C por 60 minutos, utilizando um catalisador de carbono sulfonado de óleo de palma. O hidrolisado obtido foi fermentado a 30°C utilizando <i>Saccharomyces cerevisiae</i> . Foram avaliados os efeitos do pH, tempo de fermentação e taxa de agitação.	O melhor resultado de produção de bioetanol foi alcançado com pH 4,5, 50 rpm e 24 horas de fermentação, resultando em uma concentração de 3,75 g/L de bioetanol. A casca de mandioca mostrou-se uma matéria-	Mardina e colaboradores (2021).

			prima promissora para a produção de biocombustíveis.	
Produção de bioetanol a partir de mandioca e bagaço por processo de hidrólise térmica e fermentação de levedura local.	Produzir bioetanol como combustível alternativo ecologicamente correto utilizando bagaço de mandioca e cana-de-açúcar.	As matérias-primas foram degradadas por hidrólise térmica em diferentes temperaturas (145°C, 165°C e 185°C) e proporções de mandioca para bagaço (1:2 e 1:3). O material degradado foi fermentado com levedura local por 72 horas e o bioetanol foi destilado a 85°C.	As melhores condições de processo foram encontradas com a proporção de 1:3 (mandioca:bagaço), hidrólise por 120 minutos a 185°C e fermentação por 72 horas, resultando em rendimento de 12,40% e teor de etanol de 42,85%.	Djuned e colaboradores (2023).

Conforme já descrito, a presente investigação utilizou resíduos fibrosos gerados no processo produtivo de polvilho de mandioca como potencial biomassa para a produção de bioetanol. Considera-se que a pesquisa é inédita, pois não foram encontrados trabalhos específicos na literatura empregando esses resíduos para esse fim.

## 4 METODOLOGIA

Nessa seção, são descritas as etapas realizadas na pesquisa, as quais compreendem a coleta e caracterização dos resíduos, produção e análise do bioetanol, bem como os cálculos de rendimento obtido do biocombustível.

### 4.1 COLETA DOS RESÍDUOS DA MANDIOCA

Na presente investigação, foram utilizados resíduos fibrosos oriundos de uma empresa de produção de polvilho situada na região da AMESC, sendo resguardado em sigilo a sua razão social e localização. Na referida empresa, o processo produtivo do polvilho compreende as seguintes etapas: 1) recepção da mandioca; 2) pesagem e precificação; 3) descasque, fracionamento e lavagem; 4) moagem; 5) mistura do material moído em água; 6) separação do “leite de mandioca” (contendo amido) dos resíduos fibrosos, por centrifugação; 7) secagem do “leite de mandioca” em temperatura ambiente e consequente obtenção do polvilho; 8) obtenção do resíduo fibroso usado nos testes. A Figura 8 apresenta registros fotográficos das principais etapas da produção de polvilho.

Figura 8- Principais etapas da produção de polvilho na empresa em estudo



Fonte: Autor

Os resíduos fibrosos da mandioca utilizados nesta investigação são os gerados na etapa da separação do "leite da mandioca", onde os mesmos ficam retidos na peneira de separação. Segundo dados fornecidos pela empresa, anualmente, são utilizadas cerca de 9.000 toneladas de mandioca no processo produtivo do polvilho, sendo gerados, aproximadamente, 6.000 toneladas desses resíduos, os quais não são aproveitados economicamente e depositados no meio ambiente.

Para a execução dos testes previstos nesse trabalho, foram coletados 5 kg de resíduos, os quais estavam depositados ao ar livre, no pátio da empresa em estudo, e sujeitos ao intemperismo. Os resíduos foram acondicionados em embalagens de polietileno e mantidas sob refrigeração (-18°C), até a execução dos testes laboratoriais.

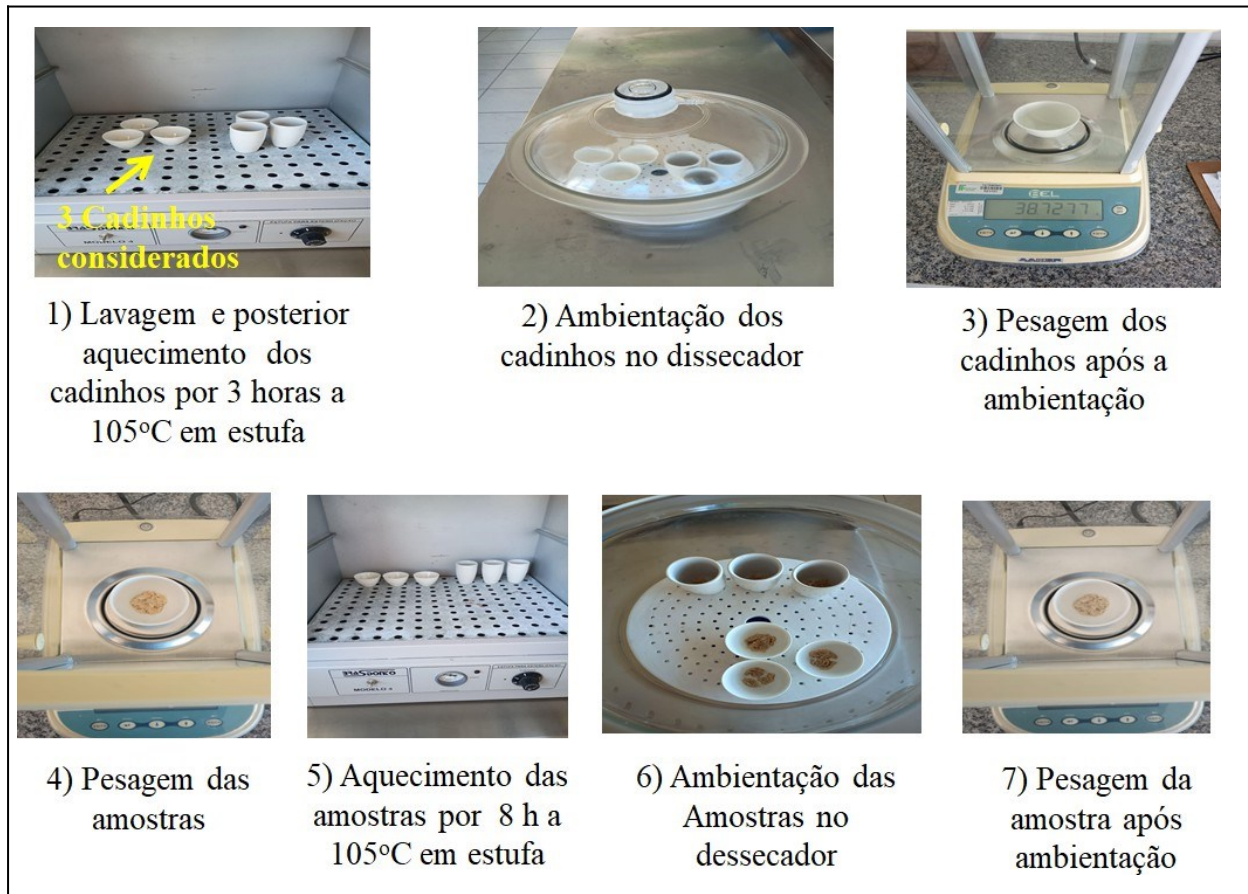
#### 4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS

A caracterização preliminar da amostra foi feita por meio da determinação da umidade, teor de fibras e presença de amido, conforme subseções que se seguem.

#### 4.2.1 Determinação da umidade

A análise de umidade na amostra de resíduos fibrosos foi efetuada em triplicata, de acordo com o Instituto Adolfo Lutz (2005), com ajustes. Para tanto, 3 cápsulas de porcelana foram, previamente, aquecidas em uma estufa (BRASDONTO-Modelo 4), à 105°C, por 3 horas, para remoção de umidade e, posteriormente, resfriadas em dessecador com sílica até a temperatura ambiente. Após o resfriamento, as mesmas foram pesadas em balança analítica (BEL-Modelo 210A), onde os pesos foram anotados. Na sequência, aproximadamente, 5 g de amostras foram colocadas em cada cápsula de porcelana, sendo o peso anotado. Posteriormente, as cápsulas contendo as amostras foram aquecidas em estufa, à 105°C, durante 8 h e esfriadas em dessecador até a temperatura ambiente e os pesos anotados. A determinação da umidade foi calculada pela diferença dos pesos das amostras antes e após o aquecimento. O parâmetro da umidade foi importante para fins de cálculos de rendimento de produção de bioetanol, a partir da quantidade de resíduo a ser utilizada. A Figura 9 apresenta os registros fotográficos das principais etapas da determinação da umidade nos resíduos.

Figura 9- Principais etapas do teste de umidade no resíduo



Fonte: Autor

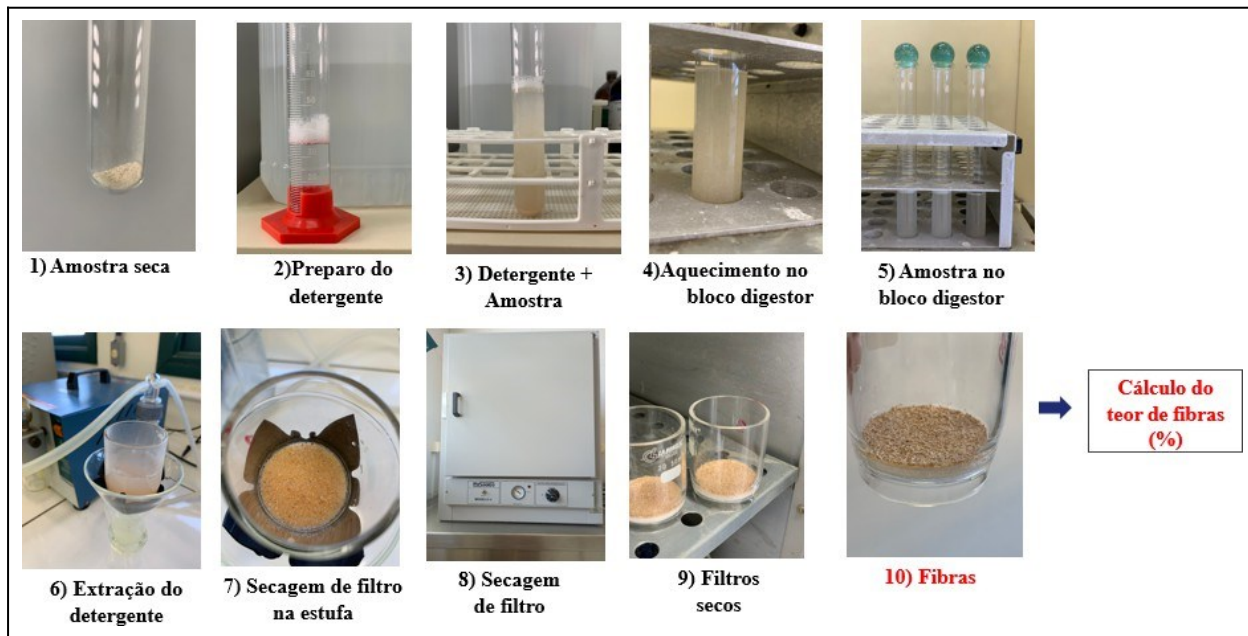
#### 4.2.2 Determinação da percentagem de fibras

Na análise de fibras, foi adotado teste de Fibra em Detergente Neutro (FDN), proposto por Senger e colaboradores (2008), com ajustes. O método baseia-se na capacidade de um detergente neutro solubilizar e remover os componentes celulares mais facilmente digeríveis da parede vegetal, como proteínas, amido, açúcares solúveis e lipídios, mantendo intactos os constituintes estruturais da fibra, os quais incluem a celulose, a hemicelulose e a lignina, que juntos formam a fração fibrosa indigerível ou pouco digeríveis dos alimentos. Para tanto, foi pesado, aproximadamente, 1,0 g de amostra, em triplicata, e as mesmas transferidas para tubos de ensaio. Adicionou-se aos tubos 100 mL de solução de detergente neutro (Dinâmica), constituída por Lauril sulfato de sódio: 30 g/L; Fosfato monobásico de sódio-  $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ : 18,6 g/L; Fosfato dibásico de sódio-  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ : 21,0 g/L; Tetraborato de sódio -

$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ : 2,7 g/L; Etilenodiaminotetracetato de sódio- EDTA): 1,2 g/L; Água destilada até completar o volume necessário). Em seguida, adicionou-se aos tubos 0,5 mL da enzima alfa-amilase (Sigma-Aldrich). Os tubos foram colocados no bloco digestor (NEW LAB-Modelo NL 2306) à 150°C, acoplados ao condensador de refluxo. Após atingir ebulição, foi reduzida a temperatura para 100°C, mantendo-se a digestão por 1 hora. Na sequência, as amostras foram filtradas sob vácuo em cadinhos de placa porosa. Lavou-se o filtrado com água destilada e Acetona P.A (Neon). As amostras foram secas em estufa, por 6 horas a 105°C, resfriadas em um dessecador e, após, pesadas na balança analítica para fins de cálculos da percentagem de fibras. Este parâmetro também é relevante na avaliação do rendimento de produção de bioetanol.

A Figura 10 apresenta os registros fotográficos das principais etapas da determinação da percentagem de fibras nos resíduos.

Figura 10- Principais etapas da análise de fibras no resíduo



Fonte: Autor

#### 4.2.3 Determinação da presença de amido no resíduo

A análise preliminar da presença de amido na amostra foi realizada, conforme proposto por Loureiro e colaboradores (2019) e Instituto Adolfo Lutz (2005), com ajustes. O teste baseia-se na formação de coloração característica (azul-escuro a preto), decorrente da formação de um

complexo do polissacarídeo em presença de iodo. Para esse propósito, aproximadamente 2,5 g de amostra de resíduos foram colocadas em tubo de ensaio contendo 30 ml de água destilada, previamente aquecida a 60°C, por até 10 minutos. Posteriormente, foram adicionadas 4 gotas de solução de lugol (New Prov), a 2% (iodo e iodeto de potássio), sendo observada a formação de coloração característica da presença de amido. Para fins de controle positivo, foi utilizada amostra de Amido P.A. (Alphatec), adquirida comercialmente, sendo a mesma submetida às mesmas condições do ensaio. A presença de amido é um indicativo de que a amostra tem um material potencial de partida para a produção do álcool.

#### 4.3 PRODUÇÃO DE BIOETANOL A PARTIR DOS RESÍDUOS

O processo de produção de bioetanol foi efetuado por fermentação anaeróbia, conforme descrito por Valeriano e colaboradores (2018), com ajustes. Ressalta-se que foram efetuados testes preliminares para se obter as melhores condições de proporções de resíduo/água, presença e ausência de esterilização e resolução de problemas de armazenamento de amostras de resíduos e de enzimas. A seguir estão descritas as etapas de produção de bioetanol nas melhores condições encontradas. Inicialmente, foram misturados 1000g de amostra de resíduo da mandioca em 1000ml de água destilada, em frascos Becker, em triplicata. A mistura foi colocada em frascos Erlenmeyer, em triplicata, e aquecidos em banho-maria (MARTE - modelo 103040t-00), à 40 °C, por 2 horas, para liberar o amido na solução. Durante o aquecimento, foram monitorados a temperatura, a presença de amido e o grau Brix (°Brix) (METTLER TOLEDO-modelo Quick Brix 60). O grau Brix é uma unidade de medida utilizada para expressar a concentração de sólidos solúveis em uma solução aquosa, principalmente açúcares. Após esse procedimento, as amostras foram filtradas em tecido voal, por gravidade, para remover amido não solúvel e outros materiais fibrosos insolúveis. O material filtrado foi esterilizado em autoclave (PRISMATEC-modelo Autoclave Vertical CS), por 15 minutos, a uma pressão de 1 kgf/cm<sup>2</sup>. Após a esterilização, foram coletadas alíquotas (1mL) das amostras e acrescentadas gotas de solução de lugol para detecção de amido. O grau Brix também foi determinado. Obteve-se resultado positivo da presença de amido e negativo para o Grau Brix. A presença de amido detectada indica que a solução pode servir de material de partida para a geração de açúcares fermentáveis. Posteriormente, as amostras foram submetidas ao processo de quebra do amido da

solução em presença da enzima Alfa-Amilase (Prodooze) (0,6 ml de enzima/L de amostra) e mantida a 95 °C, por 2 h, em banho-maria. A seguir, as amostras foram aclimatadas a 60 °C, em banho-maria, ajustado o pH com HCl (Neon) (1M), e acrescentada a enzima Amiloglucosidase (Prodooze) (1,2 ml de enzima/ L de amostra) por 2 h para a completa conversão do amido em açúcares fermentáveis. A conversão do amido em açúcares fermentáveis foi constatada pela sua ausência no teste de lugol e presença dos açúcares por meio do teste Brix. Após esta etapa, foi efetuado o experimento de produção de bioetanol por fermentação. Para esta etapa, utilizou-se frascos Erlenmeyer, hermeticamente fechados, em triplicata, contendo as amostras e extrato de levedura *Saccharomyces cerevisiae* (1%), obtida comercialmente. Os frascos foram colocados no equipamento B.O.D (TECH, modelo 02 LF), a 28 °C e pH a 5,5 por 10 dias. Após, o fermentado foi submetido a uma destilação simples para se obter uma solução com maior teor alcoólico, com vistas a tornar mais efetiva a etapa da análise qualitativa da presença de bioetanol no destilado por Infravermelho e determinação do Grau Gay-Lussac (°GL).

A Figura 11 apresenta registros fotográficos das principais etapas de produção de bioetanol a partir dos resíduos.

Figura 11 - Principais etapas da produção de bioetanol

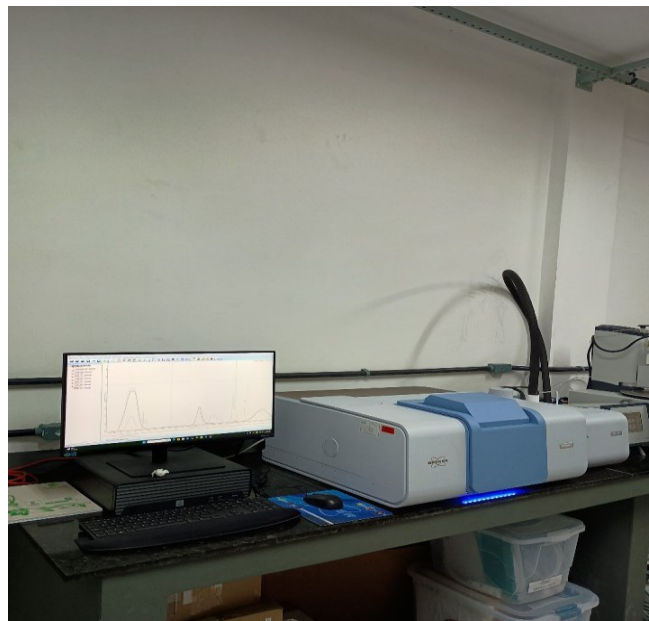


Fonte: Autor

#### 4.4 ANÁLISE QUALITATIVA DO BIOETANOL POR INFRAVERMELHO

A avaliação qualitativa da presença de bioetanol na amostra do fermentado foi executada por Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR). A análise por FTIR permite indicar a presença de ligações e grupos funcionais característicos de funções orgânicas. Amostras, em triplicata, foram inseridas, diretamente, no porta-amostra do espectrofotômetro (BRUKER- modelo Invenio S). Os espectros foram lidos entre 400 a 4000  $\text{cm}^{-1}$  com resolução de 4  $\text{cm}^{-1}$  e em 25 varreduras. O equipamento gerou gráficos, os quais foram analisados para determinação dos grupos funcionais específicos (Silverstein *et al.*, 1991). Para fins comparativos e de evidência de da presença de bioetanol, também foi utilizada amostra de Etanol P.A., obtida comercialmente, o qual serviu como controle positivo. A Figura 12 apresenta registro fotográfico do teste da presença de bioetanol por FTIR.

Figura 12-Análise da presença de álcool no fermentado destilado por FTIR



Fonte: Autor

#### 4.5 DETERMINAÇÃO DO GRAU GAY-LUSSAC (°GL) DO BIOETANOL POR DENSIOMETRIA

A porcentagem de bioetanol no fermentado destilado foi determinada por Densimetria, de acordo com o protocolo da NBR 5992:2016, sendo expressos em Graus Gay-Lussac (°GL) (ABNT, 2016). O método se fundamenta na utilização da densidade como propriedade física sensível à composição química de um líquido, permitindo avaliações qualitativas e quantitativas de forma simples, rápida e não destrutiva. A escala determina quantos mililitros (mL) de álcool puro existem em cada 100 mL de solução. Amostras do fermentado destilado (50 mL), em triplicata, foram colocadas em proveta e anotada a temperatura, a qual atingiu valor de 26,5 °C. A seguir, foi inserido o alcoolômetro (marca Gay-Lussac e Cartier) na proveta e determinado o teor alcoólico (°GL), com um auxílio de tabela de correção da temperatura padrão (20°C). A Figura 13 apresenta registros fotográficos do teste de percentagem de álcool por Densimetria.

Figura 13- Registro fotográfico determinação de (°GL) por Densimetria



Fonte: Autor

#### 4.6 ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO ANUAL DE BIOETANOL

A produção anual de bioetanol a partir dos resíduos grados na empresa em estudo foi estimada, tendo como base os resultados obtidos do Grau Gay-Lussac (°GL) e sua conversão em mL de bioetanol produzido/kg de resíduo. De acordo com dados fornecidos pela empresa, no processo produtivo do polvilho são gerados, anualmente, uma quantidade de, aproximadamente, 6000 toneladas de resíduos fibrosos. Esses valores, portanto, serviram de referência para os cálculos de estimativa de produção, cujos resultados foram expressos em termos de L/ano.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas seções que se seguem serão apresentados os resultados obtidos nos testes de caracterização dos resíduos, análise da presença de álcool no fermentado destilado, quantidade de bioetanol produzido e estimativa anual de produção.

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO

Os resultados de umidade e teor de fibras em triplicata presentes nos resíduos de mandioca estão apresentados na Tabela 2. Pode-se constatar que houve um valor considerável em ambos os parâmetros avaliados

Tabela 2 - Umidade e teor de fibras nas amostras de resíduos

<b>Amostra</b>	<b>Umidade (%)</b>	<b>Teor de fibras (%)</b>
1	88,55	43,38
2	88,44	43,12
3	88,20	43,15
Média ± Desvio Padrão	88,40 ± 0,18	43,22 ± 0,14

Fonte: Autor

Os valores de umidade encontrados nesta investigação permitem sugerir que este parâmetro pode exercer uma grande influência no rendimento de produção de bioetanol. Além disso, deve-se dar atenção ao tempo de armazenamento que, uma vez prolongado, pode favorecer a degradação microbiológica e a perda de qualidade do material em função da presença excessiva de água.

Os teores de umidade reportados na literatura evidenciam a grande variabilidade higroscópica das biomassas utilizadas em processos de conversão energética, com implicações diretas para o armazenamento, pré-tratamento e eficiência da fermentação. Rooyen e

colaboradores (2024), ao trabalharem com resíduos alimentares *in natura*, encontraram um teor elevado de 77% de umidade, característico de resíduos frescos e não processados, o que demanda etapas adicionais de secagem ou concentração antes da hidrólise e fermentação, sob pena de diluição excessiva dos açúcares e inibição microbiana. Em contraste, estudos com mandioca processada ou seca demonstram teores drasticamente reduzidos. Alzate e colaboradores (2024) registraram uma faixa de 10,5% a 11,5% de umidade em amostras de mandioca submetidas a secagem controlada, enquanto Soares e colaboradores (2024) obtiveram valores ainda mais baixos, 7,81% e 8,60%, em biomassa de mandioca previamente desidratada. Essa diferença acentuada reflete não apenas a natureza intrínseca do material vegetal, mas, sobretudo, o grau de processamento e as condições de armazenamento a que a biomassa foi submetida. Do ponto de vista tecnológico, teores de umidade inferiores a 12% são desejáveis para garantir estabilidade microbiológica, facilitar a moagem e otimizar a relação sólido-líquido nos processos enzimáticos. Assim, os dados reforçam que a padronização do teor de umidade é etapa crítica no pré-processamento de resíduos amiláceos, especialmente quando se busca maximizar a eficiência da conversão de amido e fibras em bioetanol, evitando perdas energéticas e custos operacionais associados à manipulação de matrizes excessivamente úmidas.

O teor de fibras observado neste estudo permite indicar uma expressiva presença de componentes estruturais, as quais podem incluir a celulose e a hemicelulose. Esses polissacarídeos, quando submetidos a processos de hidrólise enzimática ou ácida, podem ser convertidos em açúcares fermentescíveis (ex: glicose), o que ressalta o potencial do material como fonte lignocelulósica para a produção do biocombustível, conforme proposto por Garcia-Ochoa e colaboradores (2021). Contudo, tal aproveitamento está condicionado à superação de barreiras tecnológicas associadas à eficiência da sacarificação, etapa crítica para a quebra adequada da matriz fibrosa e subsequente liberação dos monossacarídeos. Assim, embora o resíduo apresente características promissoras do ponto de vista da composição química, sua viabilização industrial depende do desenvolvimento ou otimização de estratégias de pré-tratamento capazes de contornar a recalcitrância estrutural típica dos materiais lignocelulósicos.

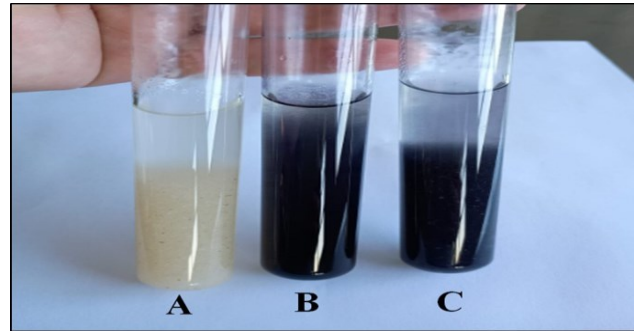
Trabalhos na literatura têm avaliado o teor de fibras em resíduos da mandioca. Pattarapanawan e colaboradores (2025), ao avaliarem amido residual da polpa de mandioca, encontraram uma faixa de 26 a 33% de fibra alimentar total, indicando que mesmo frações parcialmente degradadas ou processadas retêm elevado conteúdo fibroso. De forma semelhante,

Okrathok e colaboradores (2022) quantificaram 23,60% de fibra alimentar total na polpa integral de mandioca, valor coerente com a composição típica desse subproduto após extração parcial do amido. Por sua vez, Somera e colaboradores (2025), analisando o bagaço de mandioca, resíduo sólido pós-prensagem, obtiveram  $20,48 \pm 0,28\%$  de fibra alimentar total, ligeiramente inferior aos demais, possivelmente devido à remoção parcial de constituintes solúveis durante o processo industrial. Apesar das variações, todos os valores situam-se em uma faixa expressiva (20–33%), evidenciando que os resíduos do beneficiamento de mandioca são ricos em fibras dietéticas, compostas predominantemente por celulose, hemicelulose e, em menor grau, lignina. Essa fração fibrosa, embora não diretamente fermentescíveis por leveduras convencionais, representa um substrato valioso para produção de bioetanol de segunda geração, desde que submetida a pré-tratamentos adequados (hidrotérmicos, enzimáticos ou químicos) capazes de viabilizar a sacarificação da celulose e hemicelulose. Assim, o aproveitamento integrado desses resíduos, explorando tanto a fração amilácea quanto a fibrosa, configura-se como estratégia técnica e ambientalmente sustentável, alinhada aos princípios da biorrefinaria e da valorização integral da biomassa.

Portanto, os resultados aqui obtidos reforçam o potencial dessas matrizes como fontes significativas de componentes lignocelulósicos, com implicações na produção de biocombustíveis.

A Figura 14 apresenta o registro fotográfico do resultado da análise preliminar da presença de amido nos resíduos, efetuado por meio do ensaio com solução de iodo (Lugol). Foram empregados três tubos de ensaio: o primeiro contém apenas o resíduo, sem a adição do lugol; o segundo contém Amido P.A. (controle positivo) e o terceiro resíduo de mandioca, ambos com adição de Lugol.

Figura 14-Análise preliminar da presença de amido no resíduo; (A) Resíduo sem Lugol; (B) Amido P.A com lugol (controle positivo); (C) Resíduo com Lugol



Fonte: Autor

A coloração característica observada no terceiro tubo — semelhante à reação positiva exibida pelo amido comercial no segundo tubo — confirmou a presença residual de amido no resíduo, conforme também observado por Jin e colaboradores (2026). Esse achado sugere que, mesmo após os processos industriais de extração, uma fração desse polissacarídeo permanece associada à matriz fibrosa do resíduo. Desta forma, o resíduo se mostra como um potencial biomassa em rotas biotecnológicas, especialmente aquelas voltadas à produção de açúcares fermentescíveis capazes de dar origem a biocombustíveis, com destaque para o etanol.

Os teores de amido descritos na literatura evidenciam a diversidade da composição das biomassas amiláceas e seu potencial variável para conversão em bioetanol. Rooyen e colaboradores (2024), ao analisarem resíduos alimentares diversos, encontraram um teor médio de  $58,71 \pm 1,4\%$  de amido, valor elevado que reflete a contribuição significativa de fontes ricas em carboidratos, como pães, massas e tubérculos descartados. Em substratos mais específicos, Thangavelu e colaboradores (2026) identificaram no resíduo da medula do sagu (RMS) uma faixa de 45 a 60% de amido, reforçando seu alto potencial como matéria-prima para biocombustíveis. Por outro lado, Aruwajoye e colaboradores (2025), trabalhando com resíduos agrícolas mistos à base de amido, registraram um teor substancialmente menor (15,89%), provavelmente devido à diluição por componentes não amiláceos presentes na mistura. Já em cultivos inteiros, Mugamposa et al. (2026) quantificaram teores de amido de 50,83% no milho e 29,17% na mandioca cultivados em Uganda, valores condizentes com as características agrônômicas dessas espécies em condições tropicais. Alzate e colaboradores (2024), por sua vez, reportaram  $36,1 \pm 1,4\%$  de amido em raízes de mandioca, alinhado à literatura para essa variedade. Destaca-se, contudo, o achado de SOARES e colaboradores. (2024), que identificaram um teor notavelmente elevado de  $75,21 \pm 7,42\%$  de amido no tronco (caule) da

mandioca, sugerindo que partes normalmente descartadas no beneficiamento, como hastes e caules, podem constituir reservatórios subutilizados de carboidratos fermentescíveis.

Conjuntamente, esses dados reforçam que os resíduos gerados no processamento da mandioca, especialmente aqueles ricos em amido residual (como cascas, entrecasas e partes fibrosas do caule), representam matrizes promissoras para a produção sustentável de bioetanol, desde que submetidos a pré-tratamentos adequados para liberação eficiente dos açúcares. Assim, o aproveitamento integral da biomassa de mandioca emerge como estratégia alinhada aos princípios da economia circular e da bioeconomia.

## 5.2 TEMPERATURA E GRAU BRUX

Conforme já descrito, durante os procedimentos metodológicos de produção de bioetanol a partir dos resíduos (Seção 4.3), foi monitorado a temperatura e grau Brix (°Brix) antes e após o processo fermentativo, com o intuito de avaliar a conversão do amido em açúcares fermentáveis. Os resultados obtidos destes parâmetros estão apresentados na Tabela 3. Constatou-se que os valores médios obtidos do Grau Brix ( $1,85 \pm 0,65^\circ$  Brix) indicam o potencial de conversão do resíduo em açúcares fermentáveis.

Tabela 3 - Temperatura e Grau Brix

Amostra	Temperatura (°C)		Grau Brix (°Brix)	
	Pré-fermentação	Pós-fermentação	Pré-fermentação	Pós-fermentação
1	33	28	1,0	2,2
2	33	28	1,1	1,7
3	33	28	1,0	2,5
Média ± Desvio Padrão	33 ± 0	28 ± 0	1,033 ± 0,058	2,13 ± 0,40

Fonte: Autor

Os teores de sólidos solúveis e açúcares fermentescíveis reportados na literatura evidenciam a grande variabilidade do potencial sacarífero das diferentes biomassas, especialmente quando comparadas às matrizes amiláceas e lignocelulósicas utilizadas na produção de bioetanol. Rooyen e colaboradores (2024), ao empregarem resíduos alimentares,

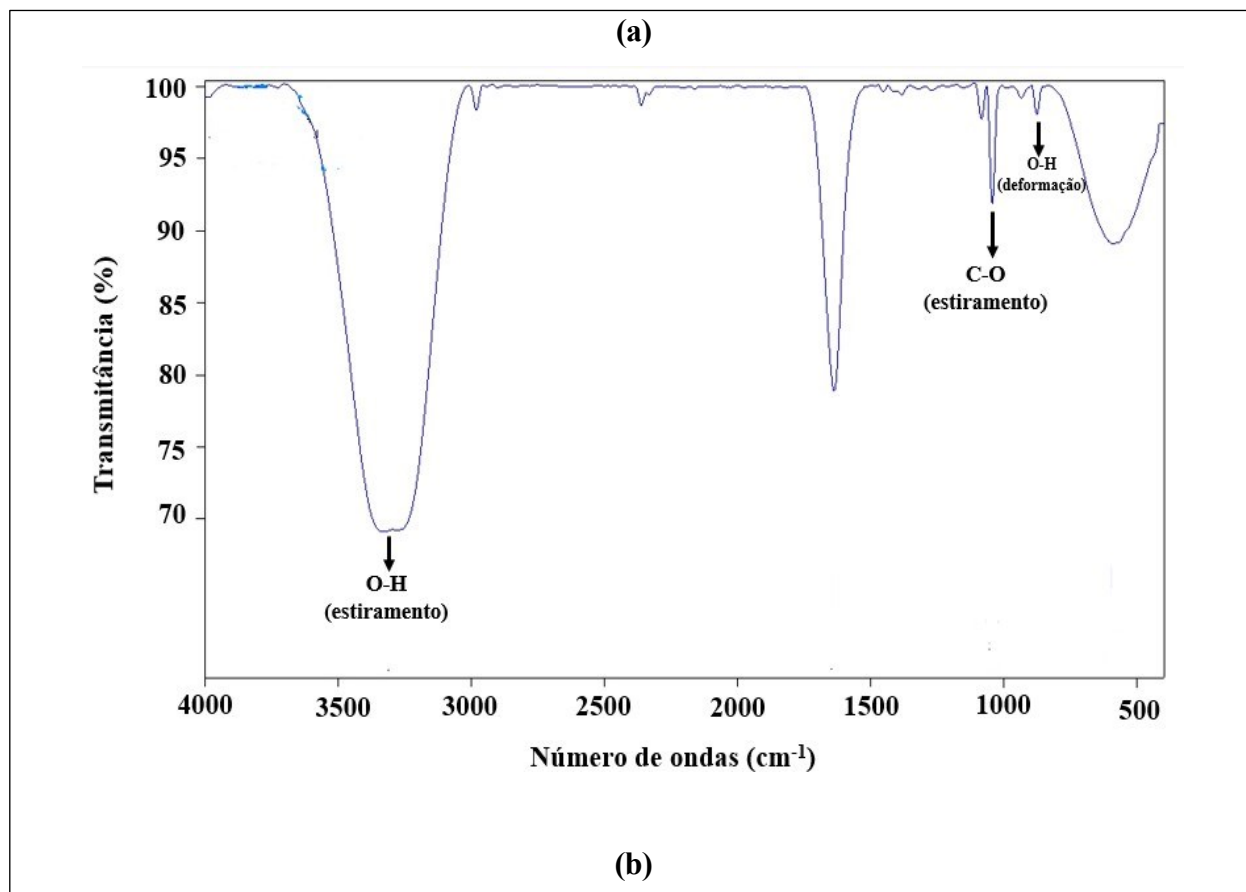
obtiveram uma concentração de sólidos solúveis equivalente a  $6,63 \pm 1,0$  g/L, valor modesto que reflete a heterogeneidade desse tipo de substrato. Em contraste, Thangavelu e colaboradores (2026) demonstraram o alto potencial do resíduo da medula do sagu (RMS), com 71,2 g de açúcares por 100 g de biomassa seca — um dos mais elevados já registrados para resíduos tropicais ricos em amido. Aruwajoye e colaboradores (2025) reportaram 11,86 g/L de açúcares fermentáveis em resíduos agrícolas mistos à base de amido, enquanto Mitra e colaboradores (2025), utilizando biomassa microalgal, alcançaram apenas  $4,74 \pm 0,46$  g/L, reforçando os desafios técnicos associados a essa rota alternativa. Já em sistemas baseados em cultivos inteiros, Mugampoza e colaboradores (2026) encontraram teores muito elevados de sólidos solúveis em mandioca e milho (23,4 e 23,3 °Brix, respectivamente), indicando excelente aptidão para fermentação. Alzate e colaboradores (2024), trabalhando com mandioca *in natura*, registraram 19,6 g/L de sólidos solúveis (equivalente a  $\sim 1,96$  °Brix), valor compatível com mostos diluídos, possivelmente após hidrólise parcial. Por fim, Soares e colaboradores (2024) quantificaram diretamente a sacarose em amostras de mandioca, obtendo  $12,50 \pm 0,80$  µg/g, valor baixo, o que corrobora a literatura ao indicar que a mandioca armazena carboidratos predominantemente na forma de amido, não de sacarose.

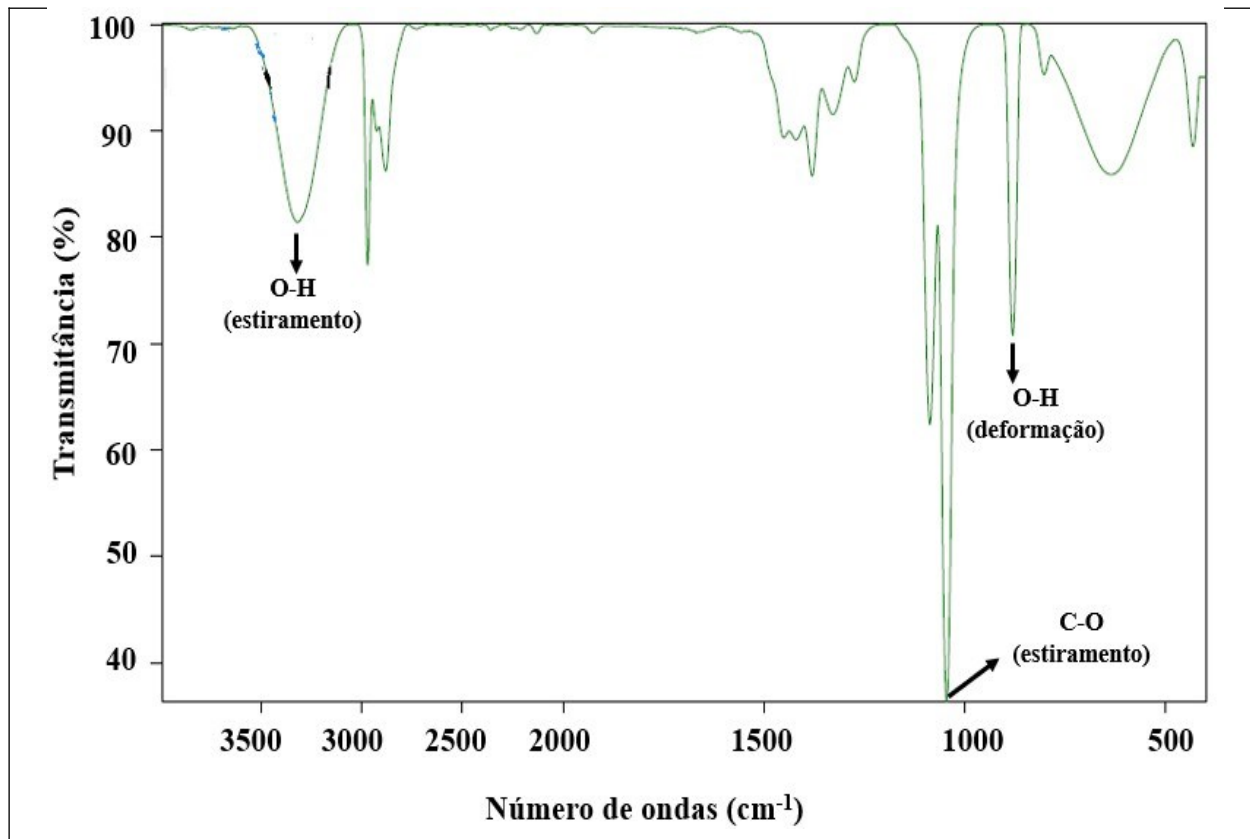
Portanto, os dados reforçam que o rendimento em açúcares fermentáveis depende criticamente da natureza química da biomassa e do pré-tratamento aplicado, sendo os resíduos amiláceos, como os gerados no processamento de polvilho de mandioca, particularmente promissores quando submetidos a hidrólise eficiente, capaz de converter seu amido residual em glicose disponível para fermentação.

### 5.3 ANÁLISE QUALITATIVA DO BIOETANOL POR INFRAVERMELHO

O perfil espectroscópico do infravermelho por *FTIR* da amostra do fermentado destilado e do Etanol P.A. estão apresentados na Figura 15a e 15b, respectivamente.

Figura 15 - Perfil do infravermelho por *FTIR*. (a) Fermentado destilado; (b) Etanol P.A.





Fonte: Autor

Constata-se uma banda alargada característica na região entre  $3400\text{-}3300\text{ cm}^{-1}$ , tanto na amostra do fermentado, quanto do Etanol P.A utilizado como referência. Esta banda pode ser atribuída à vibração de estiramento da ligação O-H presente no grupo hidroxila, frequentemente associada a deformações angulares envolvendo essa mesma ligação. A vibração de deformação O-H também foi evidenciada na região entre  $900\text{-}850\text{ cm}^{-1}$  em ambas as amostras. Outro achado foi entre  $1050\text{-}1000\text{ cm}^{-1}$  nas duas amostras, podendo ser atribuída à vibração de estiramento do ligação C-O. Tais sinais constituem marcadores espectroscópicos qualitativos amplamente reconhecidos na identificação de álcoois (Silverstein *et. al.*, 1991).

A presença dessas bandas no espectro da amostra do fermentado destilado, bem como no controle positivo (Etanol P.A) permite fornecer a evidência de que a conversão fermentativa dos açúcares foi efetivada com sucesso, culminando na produção do composto-alvo. Assim, os dados espectroscópicos corroboram a ocorrência do metabolismo alcoólico pelas leveduras, reforçando a viabilidade do substrato utilizado como fonte de carbono para a biossíntese de bioetanol.

#### 5.4 PERCENTAGEM DE BIOETANOL E ESTIMATIVA ANUAL DE PRODUÇÃO

As percentagens de bioetanol (°GL) em triplicata encontradas nas amostras de resíduos fermentados, bem como as estimativas de sua produção anual estão presentes na Tabela 4. Com base nos valores obtidos, obteve-se um rendimento médio de 25 mL de bioetanol/kg resíduo, o que corresponderia a uma estimativa média de produção anual calculada em 150.000 L deste biocombustível.

Tabela 4- Percentagem de bioetanol no fermentado destilado e produção estimada

<b>Amostra</b>	<b>Percentagem de bioetanol (°GL)</b>	<b>Produção estimada de bioetanol (L/ano)</b>
1	2,6	156.000
2	2,5	150.000
2	2,4	144.000
Média ± Desvio Padrão	2,5 ± 0,1	150.000 ± 6000

Fonte: Autor

Os resultados encontrados são relevantes, uma vez que a detecção de bioetanol em concentração mensurável confirma o sucesso da fermentação alcoólica sob as condições empregadas. Isso evidencia a viabilidade do substrato, enriquecido em açúcares provenientes do resíduo de mandioca, como fonte energética para microrganismos fermentativos. Os valores médios obtidos do Grau Brix corroboram o potencial de conversão do resíduo em açúcares fermentáveis. Além disso, os cálculos de produção anual estimada revelam o potencial aproveitamento econômico da biomassa residual oriunda do processamento da mandioca em polvilho, o que pode contribuir para o desenvolvimento da região em estudo.

Os resultados obtidos podem ser contextualizados à luz de estudos que avaliaram a produção de bioetanol a partir de distintas matrizes lignocelulósicas e amiláceas. Rooyen e colaboradores (2024), trabalhando com resíduos alimentares, reportaram um rendimento elevado de 86,18 g/L de etanol, com produtividade de 1,197 g/L·h, demonstrando o potencial de substratos ricos em açúcares facilmente fermentescíveis. Em contrapartida, Thangavelu e colaboradores (2026), utilizando resíduo da medula do sagu (RMS), obtiveram 31,2 g/L de etanol após conversão eficiente de 71,2 g de açúcares por 100 g de biomassa, evidenciando a

viabilidade de resíduos amiláceos tropicais. Aruwajoye e colaboradores (2025) alcançaram 23,52 g/L com resíduos agrícolas mistos à base de amido, enquanto Mitra e colaboradores (2025) registraram valores significativamente mais baixos ( $2,10 \pm 0,25$  g/L) ao empregar biomassa microalgal — reflexo das barreiras tecnológicas ainda presentes nessa rota. Por outro lado, estudos com cultivos inteiros destacam teores alcoólicos expressivos, como os de Mugampoza e colaboradores (2026), que relataram 40,95% (v/v) de etanol a partir de mandioca e milho em Uganda, e de Alzate e colaboradores (2024), que obtiveram 17% (v/v) após 90 horas de fermentação exclusivamente com mandioca.

Portanto, os dados reforçam que a composição da biomassa, especialmente seu teor e acessibilidade de amido ou açúcares redutores, é fator determinante no rendimento final. Nesse cenário, o aproveitamento de resíduos agroindustriais de mandioca, como proposto nesta pesquisa, posiciona-se como estratégia intermediária promissora: combina a riqueza amilácea da matéria-prima com os princípios da economia circular, evitando competição com a cadeia alimentar, ao mesmo tempo em que se beneficia de altos potenciais de conversão já demonstrados em substratos similares.

Por fim, os achados da pesquisa podem fornecer subsídios para o fomento ao uso de combustíveis limpos e renováveis, promovendo a sustentabilidade e contribuindo para a efetivação do ODS 7 em termos de energia acessível e limpa.

## 6 CONCLUSÃO

Esse trabalho realizou estudos preliminares de caracterização de resíduos fibrosos oriundos do processo produtivo de polvilho de mandioca de uma empresa situada na AMESC, bem como avaliou o seu potencial uso como biomassa para a produção de bioetanol.

Com base nos resultados obtidos, se pode chegar às seguintes conclusões principais:

- i) Nos testes de caracterização do resíduo, foi constatado elevado valor de umidade, o que pode comprometer o rendimento de produção de bioetanol.
- ii) A percentagem de fibra no resíduo se também se mostrou expressiva, conferindo ao mesmo uma fonte potencial de açúcares fermentáveis passíveis de conversão em biocombustíveis, sendo que presença de amido observada no resíduo amplia esse potencial.
- iii) As análises do fermentado por *FTIR*, demonstraram a presença de bandas no espectro características de ligações químicas e grupos funcionais do etanol. Além disso, foram detectados açúcares fermentáveis (*O Brix*) e bioetanol (*O GL*) em concentração mensurável no fermentado. Esses resultados sugerem que o processo de produção do biocombustível foi efetivado com sucesso.
- iv) Os cálculos de produção anual estimada revelam o potencial aproveitamento econômico do resíduo, o que pode contribuir para a mitigação de seus impactos ambientais e para o desenvolvimento da região em estudo.

Para trabalhos futuros, com vistas à complementariedade dos estudos de caracterização química dos resíduos e do processo fermentativo, se pode sugerir:

- i) pesquisa da quantidade de indústria de polvilho na região;
- ii) coleta de resíduos das demais indústrias de polvilho de mandioca da região da AMESC;
- iii) testes complementares de caracterização química dos resíduos e do fermentado;

- iv) execução do processo fermentativo em diferentes proporções de resíduos e de condições de temperatura, pH e tempo, conversão bioquímica da biomassa lignocelulósica residual entre outros;
- v) testes de purificação do fermentado destilado;
- vi) cálculos de viabilidade econômica;
- vii) pré-tratamentos enzimáticos ou físicos sustentáveis para desagregação da lignocelulose do resíduo;
- viii) testes alternativos ao pré-tratamento ácido/álcalino convencional, como pré-tratamento com micro-ondas ou ultrassom, uso de enzimas celulolíticas recombinantes, líquidos iônicos verdes ou autoclave a vapor;
- ix) análise do ciclo de vida (ACV) e pegada de carbono do bioetanol de resíduos de mandioca;
- x) avaliação ambiental quantitativa seguindo normas ISO 14040/14044, comparando o bioetanol de resíduos de polvilho com bioetanol de cana-de-açúcar de 1ª geração e Gasolina fóssil;
- xi) exploração de coprodutos de alto valor agregado, a partir da fração lignina do resíduo; xii) estudo de escalonamento (*scale-up*) em biorreator contínuo ou batelada alimentada (*fed-batch*).

Por fim, considera-se que os estudos preliminares conduzidos nesta investigação podem fornecer importantes elementos para novas pesquisas envolvendo o aproveitamento energético e valorização de resíduos gerados no processamento de mandioca e outras biomassas residuais.

## REFERÊNCIAS

ABNT-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5992:2016. 2016. **Determinação da massa específica e do teor alcoólico do etanol combustível por densímetro de vidro.** Rio de Janeiro: ABNT

ABREU, M.R.; *et al.* **Multi-objective optimization of the first and second-generation ethanol supply chain in Brazil using the water-energy-food-land nexus approach**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 193, 2024, 114299, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114299>.  
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032124000224>) , acessado em 26 de fevereiro de 2026.

AGU, R.; *et al.* **Grades of cassava starch (flours) as sustainable substrates for use in neutral spirit and biofuel production—Industry approach.** Food Chemistry Advances, v. 4, 100726. ISSN 2772-753X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772753X24001229>.  
<https://doi.org/10.1016/j.focha.2024.100726>. Acesso em: 22 de out. 2024.

AKMEEMANA, Chalani; *et al.* **Valorization of cassava starch waste for multifunctional packaging: Optimizing antimicrobial, thermal, mechanical, and functional performance through nutmeg essential oil integration**, Chemosphere, Volume 392, 2025, 144739, ISSN 0045-6535, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2025.144739>.  
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653525006873>), acessado em 24 de fevereiro de 2026.

ALZATE, J. L. M.; *et al.* **Physicochemical characterization of special cassava starches and their application for bio-ethanol production through no-cook technology at very high gravity.** Industrial Crops and Products, v. 219, 119095. ISSN 0926-6690. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669024010720>.

DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119095>. Acesso em: 21 out. 2024.

ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS. Resolução ANP Nº 907, de 18 de Novembro de 2022. **Dispõe sobre as especificações do etanol combustível e suas regras de comercialização em todo o território nacional.** Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-907-2022>. Acesso em: 15 jan.2026.

AMESC-ASSOCIAÇÃO DOS MUNICÍPIOS DO EXTREMO SUL CATARINENSE – AMESC, 2025. Disponível em: <https://amesc.com.br/>. Acesso em: 02 jun. 2024.

ARUWAJOYE, Gabriel S.; *et al.* **Mixture design and machine learning-based optimization of fermentable sugar recovery from mixed agricultural waste for bioethanol production**, Industrial Crops and Products, Volume 237, 2025, 122163, ISSN 0926-6690, <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.122163>.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669025017091>), Acessado em 26 de fevereiro de 2026.

ATLAS DO DESENVOLVIMENTO HUMANO. IDH Municipal, 2023. Brasília: PNUD/IBGE/IPEA, 2023. Disponível em: <https://atlasbrasil.org.br>. Acesso em: 01 dez. 2025.

BRASIL. Lei nº 14.993, de 8 de outubro de 2024. **Dispõe sobre a promoção da mobilidade sustentável de baixo carbono e a captura e a estocagem geológica de dióxido de carbono; institui o Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV), o Programa Nacional de Diesel Verde (PNDV) e o Programa Nacional de Descarbonização do Produtor e Importador de Gás Natural e de Incentivo ao Biometano; altera as Leis nºs 9.478, de 6 de agosto de 1997, 9.847, de 26 de outubro de 1999, 8.723, de 28 de outubro de 1993, e 13.033, de 24 de setembro de 2014; e revoga dispositivo da Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002.** Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2023-2026/2024/lei/114993.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/114993.htm). Acesso em: 26 abr. 2025.

CABRAL, J. M., 2012. Agroenergia em Revista, n. 5: **O uso do etanol como combustível no Brasil. *Embrapa Agroenergia***. Disponível em: [ainfo.cnptia.embrapa.br](http://ainfo.cnptia.embrapa.br). Acesso em: 03 jul. 2024.

CAI, Zheng; *et al.* **Impact of lignin on the starch accumulation, composition, and pasting properties of cassava**, LWT, Volume 184, 2023, 115073, ISSN 0023-6438, <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115073>.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643823006527>), acessado em 24 de fevereiro de 2026.

CUCHI, M. M.C.; *et al.* **Obtaining ethanol from cassava waste (*Manihot esculenta Crantz*)**. Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas, v. 43, n. 1, p. 85–94. Disponível em: <https://doi.org/10.5433/1679-0375.2022v43n1p85>. Acesso em: 03 nov. 2024.

DAI, Kaiqun; *et al.* **Adaptive laboratory evolution of *Thermoanaerobacterium aotearoense* for enhanced ethanol production from raw cassava starch**, Renewable Energy, Volume 233, 2024, 121179, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121179>.  
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148124012473>)

DEL BIANCHI, V. L. **Balço de massa e de energia do processamento de farinha de mandioca em uma empresa de médio porte do Estado de São Paulo**. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1998.

DJUNED, F. M.; *et al.* **Bioethanol production from cassava and bagasse by thermal hydrolysis process and local yeast fermentation**. Rasayan Journal of Chemistry, v. 15, n. 2. Disponível em: <https://doi.org/10.31788/rjc.2022.1526658>. Acesso em: 14 out. 2024.

DO, Truong Xuan; *et al.* **Enhancing sustainable ethanol fuel production from cassava in Vietnam**. Energy and Climate Change, v. 5, 100136, 2024. ISSN 2666-2787. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666278724000126>. Acesso em: 12 setembro

2024. <https://doi.org/10.1016/j.egycc.2024.100136>.

ELEMIKE, E. E.; *et al.* **Utilization of cellulosic cassava waste for bio-ethanol production.** Journal of Environmental Chemical Engineering, v. 3, n. 4, part A, p. 2797–2800. ISSN 2213-3437. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221334371530021X>. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.10.021>. Acesso em: 05 nov 2024. \_

EPAGRI-EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA E EXTENSÃO RURAL DE SANTA CATARINA-EPAGRI, 2024. **Zoneamento e potencial produtivo das culturas em Santa Catarina.** Florianópolis. Disponível em: <https://www.epagri.sc.gov.br/solucoes/tecnologias/mapeamentozoneamento/> . Acesso em: 05 mar. 2025.

EPAGRI-EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA E EXTENSÃO RURAL DE SANTA CATARINA-EPAGRI, 2023. **Produção sustentável de mandioca ganha terreno em Santa Catarina.** Disponível em: <https://www.epagri.sc.gov.br/index.php/2024/08/23/producao-sustentavel-de-mandioca-ganha-terreno-em-santa-catarina/> . Acesso em: 02 abri. 2025.

EPE-EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA-EPE, 2025. **Balanco Energético Nacional 2025: ano base 2024.** Rio de Janeiro: EPE. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Balanco-Energetico-Nacional>. Acesso em: 22 dez. 2025.

FAPESP. **Proálcool: a experiência brasileira com o etanol.** Disponível em: <https://agencia.fapesp.br/proalcool-uma-das-maiores-realizacoes-do-brasil-baseadas-em-ciencia-e-tecnologia/24432>. Acesso em: 31 out. 2024.

FAPESP. **Era quase aguardente.** São Paulo, 2004. Disponível em: <https://agencia.fapesp.br/era-quase-aguardente/8575>. Acesso em: 30 jan. 2026.

FAGUNDES, V.D.; *et al.* **Enzymatic hydrolysis of food waste for bioethanol production.** Brazilian Journal of Environmental Sciences, v.59, ISSN 2176-9478. Disponível em: [https://www.rbciamb.com.br/Publicacoes\\_RBCIAMB/article/view/1978/983](https://www.rbciamb.com.br/Publicacoes_RBCIAMB/article/view/1978/983). Acesso em: 15 jan. 2026.

GARCIA-OCHOA, F.; *et al.* **Multi-feedstock lignocellulosic biorefineries based on biological processes: An overview,** Industrial Crops and Products, vol 172. 114062, ISSN 0926-6690, Disponível em : <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114062>. Acesso em: 18 jan. 2026.

GHAZALI, M.F.S.M.; *et al.* **Bioethanol as an alternative fuels: A review on production strategies and technique for analysis,** Energy Conversion and Management: X, vol. 26. 100933, ISSN 2590-1745. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590174525000650>. Acesso em: 07 jan. 2026.

HIERRO-IGLESIAS, Carmen; *et al.* **Process integration for efficient conversion of cassava peel waste into polyhydroxyalkanoates,** Journal of Environmental Chemical Engineering, Volume 12, Issue 1, 2024, 111815, ISSN 2213-3437, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111815>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221334372302554X>), acessado em 24 de fevereiro de 2026.

IBGE-INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2022. **Estimativas populacionais 2022.** Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 02 dez. 2025.

IBGE-INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2025. **Estimativas populacionais 2025.** Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 8 dez. 2025.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ, 2005. **Normas Analíticas do Instituto Adolfo Lutz. Métodos físico-químicos para análises de alimentos.** 4ª ed. São Paulo: IMESP, p. 267

INMET- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, 2024. **Clima do estado de Santa Catarina**. Brasília. Disponível em: <https://www.inmet.gov.br>. Acesso em: 01 dez. 2025.

JIANG, H.; *et al.*, 2024. Bioethanol production from cassava fermentation in pervaporation membrane bioreactor fed with high concentration sugar. *Fuel*, vol. 362, 130744, ISSN 0016-2361. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130744>. Acesso em: 05 set. 2024.

JAIN, Sanyam; *et al.* **A comprehensive review of bioethanol production from diverse feedstocks: Current advancements and economic perspectives**, *Energy*, Volume 296, 2024, 131130, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131130>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544224009034>) , acessado em 26 de fevereiro de 2026.

JIANG, Haoji; *et al.* **Bioethanol production from cassava fermentation in pervaporation membrane bioreactor fed with high concentration sugar**, *Fuel*, Volume 362, 2024, 130744, ISSN 0016-2361, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130744>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236123033586>)

JIAO, Jianling; *et al.* **Uncertainty analysis in the life cycle assessment of cassava ethanol in China**. *Journal of Cleaner Production*, v. 206, p. 438–451, 2019. ISSN 0959-6526. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618329329>. Acesso em: 12 Novembro 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.199>.

JIN, P; *et al.* **In situ starch gelatinization-retrogradation could efficiently enhance the bioaccessibility of the bioactive components in plant-based food materials: a novel strategy for functional food engineering**, *Journal of Agriculture and Food Research*, vol. 25, 102609, ISSN 2666-1543, <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.102609>. Acesso em: 08 out. 2025.

KHAN, Muhammad Usman; *et al.* **A review of recent advancements in pretreatment techniques of lignocellulosic materials for biogas production: Opportunities and Limitations**, *Chemical Engineering Journal Advances*, Volume 10, 2022, 100263, ISSN 2666-8211, <https://doi.org/10.1016/j.ceja.2022.100263>.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666821122000242>) , acessado em 26 de fevereiro de 2026.

KRAJANG, M.; *et al.* **Single-step ethanol production from raw cassava starch using a combination of raw starch hydrolysis and fermentation, scale-up from 5-L laboratory and 200-L pilot plant to 3000-L industrial fermenters** *Biotechnology Biofuels*, vol. 14, 68. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/S13068-021-01903-3>. Acesso em: 11 set. 2024.

LI, Chengyu; *et al.* **Regulation mechanism for fast pyrolysis of starch and cellulose-rich cassava residue over niobium phosphate and modified zeolites**, *Renewable Energy*, Volume 247, 2025, 123006, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.123006>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148125006688>), acessado em 24 de fevereiro de 2026.

LI, Yanjun; *et al.* **Novel  $\alpha$ -glucan phosphorylase coupled with thermotolerant yeast facilitated a high conversion rate from corn stover to artificial starch and microbial protein**, *Chemical Engineering Journal*, Volume 527, 2026, 172048, ISSN 1385-8947, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.172048>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894725128970>), acessado em 26 de fevereiro de 2026.

LIN, Cherg-Yuan; *et al.* **Development perspectives of promising lignocellulose feedstocks for production of advanced generation biofuels: A review**, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 136, 2021, 110445, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110445>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032120307322>), acessado em 26 de fevereiro de 2026.

LOUREIRO, A.C.; *et al.* **Estudo em alimentos cotidianos: Pesquisa de polissacarídeos através da reação com iodo.** *Braz. J. of Develop.*, Curitiba, v. 5, n. 11, p. 24243-24253.

<https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/4485>

DOI:10.34117/bjdv5n11-111 . Acesso em: 05 jan. 2026.

MACHADO, R. *et al.* **Multi-objective optimization of the first and second-generation ethanol supply chain in Brazil using the water-energy-food-land nexus approach.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 193, 114299, 2024. ISSN 1364-0321. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032124000224>. Acesso em: 11 novembro 2024. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114299>.

MARDINA, P.; *et al.* **Bioethanol production from cassava peel treated with sulfonated carbon catalyzed hydrolysis.** Jurnal Kimia Sains Dan Aplikasi, v. 24, n. 1, p. 1–8. Disponível em: <https://doi.org/10.14710/JKSA.24.1.1-8>. Acesso em: 15 out. 2024.

MARJOTTA-MAISTRO, M. C. **Ajustes nos mercados de álcool e gasolina no processo de desregulamentação.** Piracicaba: Esalq, 2002.

MARTINEZ, D.G; FEIDEN,A. 2017. **Potencial de resíduo de processamento de mandioca para produção de etanol de segunda geração.** Revista Brasileira de Energias Renováveis, 6:141-148

MENDES, Hérick Claudino; *et al.* **Exploring sustainable pathways for cyanide biodegradation in cassava waste: Insights into methodologies, microbial degradation, and emerging technologies,** Journal of Water Process Engineering, Volume 64, 2024, 105594, ISSN 2214-7144, <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105594>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214714424008262>), acessado em 26 de fevereiro de 2026.

MITRA, Romit; *et al.* **Strategic conversion of algal and lignocellulosic biomass wastes as mixed feedstock for enhanced and environment-friendly production of bioethanol,** Energy Conversion and Management, Volume 342, 2025, 120157, ISSN 0196-8904, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.120157>.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890425006818>), Acessado em 26 de fevereiro de 2026.

MOLAVERDI, Maryam; *et al.* **High efficient ethanol production from corn stover by modified mild alkaline pretreatment**, *Renewable Energy*, Volume 170, 2021, Pages 714-723, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.002>.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096014812100166X>), acessado em 26 de fevereiro de 2026.

MURATA, Yoshinori *et al.* **Potentials of multi-stress tolerant yeasts, *Saccharomyces cerevisiae* and *Pichia kudriavzevii*, for fuel ethanol production from industrial cassava wastes**. *Process Biochemistry*, v. 111, parte 2, p. 305–314, 2021. ISSN 1359-5113. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359511321003391>. Acesso em: 01 Novembro 2024. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2021.11.014>.

MUGAMPOZA, Ediriisa; *et al.* **Physicochemical characterization of sugar syrup and ethanol from starch of selected Ugandan-grown cassava and maize varieties**, *Food and Humanity*, Volume 6, 2026, 101023, ISSN 2949-8244, <https://doi.org/10.1016/j.foohum.2026.101023>.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2949824426000315>), Acessado em 26 de fevereiro de 2026.

NIYOGI, Arindam; *et al.* **A comprehensive overview of cyanogenic glycosides: Toxicology and innovative sensing approaches**, *Food Control*, Volume 177, 2025, 111431, ISSN 0956-7135, <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2025.111431>.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956713525003007>), acessado em 26 de fevereiro de 2026.

OBSERVATÓRIO AGRO CATARINENSE: **Produção Agropecuária**. Florianópolis: SAR, [2025?]. Disponível em: <https://www.observatorioagro.sc.gov.br/areas-tematicas/producao-agropecuaria/paineis/#nav-800>. Acesso em: 12 março 2025.

OKRATOK, Supattra; *et al.* **Extraction of dietary fibers from cassava pulp and cassava distiller's dried grains and assessment of their components using Fourier transform infrared spectroscopy to determine their further use as a functional feed in animal diets.** School of Animal Technology and Innovation, Institute of Agricultural Technology, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand. <https://doi.org/10.5713/ab.21.0430> .  
<https://www.animbiosci.org/journal/view.php?doi=10.5713/ab.21.0430>. Acessado em 26 de fevereiro de 2026.

OKPOZU, Otsai Otsima; *et al.* **Phycoremediation of cassava wastewater by *Desmodesmus armatus* and the concomitant accumulation of lipids for biodiesel production,** Bioresource Technology Reports, Volume 7, 2019, 100255, ISSN 2589-014X, <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100255>.  
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589014X19301458>), acessado em 26 de fevereiro de 2026.

PADDER, Shahid Ahmad; *et al.* **Biofuel generations: New insights into challenges and opportunities in their microbe-derived industrial production,** Biomass and Bioenergy, Volume 185, 2024, 107220, ISSN 0961-9534, <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107220>.  
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953424001739>) , acessado em 26 de fevereiro de 2026.

PATTARAPANAWAN, Montri; *et al.* **Partial enhancement of soluble fiber through pyrodextrinization of the residual starch in cassava pulp: Developing a novel dietary fiber with modified functional and improved prebiotic properties,** Food Research International, Volume 217, 2025, 116747, ISSN 0963-9969, <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.116747>.  
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0963996925010853>). Acessado em 26 de fevereiro de 2026.

ROOYEN, Jaybe Van; *et al.* **Enhancing bioethanol yield from food waste: Integrating decontamination strategies and enzyme dosage optimization for sustainable biofuel production,** Fuel, Volume 378, 2024, 133026, ISSN 0016-2361,

<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.133026>.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236124021756>), Acessado em 26 de fevereiro de 2026.

SAR - SECRETARIA DE ESTADO DA AGRICULTURA, DA PESCA E DO DESENVOLVIMENTO RURAL., 2025. **Observatório Agro Catarinense: Produção Agropecuária.** Florianópolis: SAR. Disponível em:

<https://www.observatorioagro.sc.gov.br/areas-tematicas/producao-agropecuaria/paineis/#nav-800>. Acesso em: 12 mar. 2025.

SANTHANAM, Kotteeswaran; *et al.* **Exploring the potential of alkali-activated cassava peel ash for early-age geopolymer concrete strength development**, Construction and Building Materials, Volume 498, 2025, 144062, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.144062>.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061825042138>), acessado em 26 de fevereiro de 2026.

SANTOS, Daniel de C. L. *et al.* **Brazil and the world market in the development of technologies for the production of second-generation ethanol**, Alexandria Engineering Journal, Volume 67, 2023, Pages 153-170, ISSN 1110-0168, <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.09.004>.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016822005919>)

SANTOS, Thaís de Souza; *et al.* **Characterization of xanthan gum–metal complexes biosynthesized using a medium containing produced water and cassava processing residues**, International Journal of Biological Macromolecules, Volume 282, Part 4, 2024, 137229, ISSN 0141-8130, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.137229>.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141813024080383>), acessado em 26 de fevereiro de 2026.

SENGER, C. C. D.; *et al.* **Evaluation of autoclave procedures for fibre analysis in forage and concentrate feedstuffs.** *Animal Feed Science and Technology*, Amsterdam, v. 146, p. 169–174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0377840107005445>. Acesso em: 03 nov. 2025.

SILVA, Isabelly P.; *et al.* **Operational assessment of downdraft gasification of agricultural residues from cassava cultivation,** *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 114, 2025, Pages 326-336, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.02.427>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319925010158>), acessado em 24 de fevereiro de 2026.

SILVERSTEIN, R. M.; *et al.* **Infrared Spectrometry. In: *Spectrometric Identification of Organic Compounds.*** John Wiley & Sons, Singapura, p. 91. 1991.

SOARES, Isabela Simões; *et al.* **Cassava waste (stem and leaf) analysis for reuse,** *Food Chemistry Advances*, Volume 4, 2024, 100675, ISSN 2772-753X, <https://doi.org/10.1016/j.focha.2024.100675>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772753X24000716>). Acessado em 26 de fevereiro de 2026.

SOMERA, Tânia; *et al.* **Cassava (*Manihot esculenta*) bagasse as a fiber- and oligosaccharide-rich yeast protectant for enhancing chemical, functional, and sensory properties of cashew nut milk,** *Food Chemistry*, Volume 496, Part 3, 2025, 146925, ISSN 0308-8146, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.146925>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814625041779>). Acessado em 26 de fevereiro de 2026.

STRACK, K.N.; *et al.* **Effect of thermal and ultrasonic treatments on technological and physicochemical characteristics of fibrous residues from ahipa and cassava starch extraction,** *Future Foods*, Volume 4, 2021, 100057, ISSN 2666-8335, <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2021.100057>.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666833521000472>), acessado em 26 de fevereiro de 2026.

THANGAVELU, Saravana Kannan; *et al.* **An integrated RSM–NSGA-II approach for optimizing bioethanol production from sago pith waste via supercritical water hydrolysis: An energy, economic, and environmental perspective**, Chemical Engineering and Processing - Process Intensification, Volume 220, 2026, 110660, ISSN 0255-2701, <https://doi.org/10.1016/j.cep.2025.110660>.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0255270125005057>), Acessado em 26 de fevereiro de 2026.

UNITED NATIONS. **Global Compact. 2000**. Disponível em: <https://unglobalcompact.org/about>  
Acesso em: 05 dez. 2025.

UNITED NATIONS. 2015. **Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development**. Seventieth session General Assembly, 2015. Available online: <https://documents-dds.ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/N15/291/89/PDF/N1529189.pdf?OpenElement>. Acesso em: 16 jan. 2026.

VALERIANO, I. H.; *et al.* **Cassava pulp enzymatic hydrolysate as a promising feedstock for ethanol production**. Brazilian Archives of Biology and Technology, v. 61, e18161214. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/babt/a/8ZzNz3YrQTyhVhbZMpCCdkb/>. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-4324-2018161214>. Acesso em: 12 mai. 2025.

VEIGA, J. P. S.; *et al.* **Characterization and productivity of cassava waste and its use as an energy source**. Renewable Energy, Oxford, v. 93, p. 691–699, 2016. ISSN 0960-1481. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.078>. Acesso em: 27 out. 2025.

WANG, Shuang; *et al.* **Synergistic phenolic acid-ethylene glycol pretreatment for enhanced saccharification and ethanol fermentation of reed through suppressed lignin**

**repolymerization**, International Journal of Biological Macromolecules, Volume 351, 2026, 151027, ISSN 0141-8130, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2026.151027>.  
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141813026009530>) , acessado em 26 de fevereiro de 2026.

WU, Shinan; *et al.* **Enzyme-free re-hydrolysis of wheat straw residues upgrades the overall cellulose hydrolysis yield and intracellular products fermentations**, Biomass and Bioenergy, Volume 205, 2026, 108514, ISSN 0961-9534, <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.108514>.  
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953425009250>) , acessado em 26 de fevereiro de 2026.

XIONG, Yujia; *et al.* **A green extraction technology of lignocellulose from cassava residue by mechanical activation-assisted ternary deep eutectic solvent**, International Journal of Biological Macromolecules, Volume 281, Part 3, 2024, 136339, ISSN 0141-8130, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.136339>.  
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141813024071484>), acessado em 24 de fevereiro de 2026.

ZAMBELLO, Isabela U.; *et al.* **Techno-economic analysis of sugarcane bagasse and straw conversion into cellulosic ethanol via consolidated bioprocessing**, Renewable Energy, Volume 259, 2026, 125094, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.125094>.  
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148125027582>) , acessado em 26 de fevereiro de 2026.

ZHOU, Si-Jie; *et al.* **Direct utilization of cassava flour in biodegradable films: The compatibilizing effect of cassava protein on poly (butylene adipate-co-terephthalate) and cassava starch**, International Journal of Biological Macromolecules, Volume 319, Part 2, 2025, 145532, ISSN 0141-8130, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.145532>.  
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141813025060878>), acessado em 26 de fevereiro de 2026.

ZHU, Laiyin; et al. **Impacts of climate change on cassava yield and lifecycle energy and greenhouse gas performance of cassava ethanol systems: An example from Guangxi Province, China**, Journal of Environmental Management, Volume 347, 2023, 119162, ISSN 0301-4797, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119162>.  
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479723019503>)