



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE PALMAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
AGROENERGIA DIGITAL**

RADAMES ASSIS QUEIROZ CARDOSO

**PRODUÇÃO SUSTENTÁVEL DE ETANOL 2G A PARTIR DO RESÍDUO CULTURAL
DO ABACAXIZEIRO (*Ananas Comosus*): OTIMIZAÇÃO DO PRÉ-TRATAMENTO COM
PERÓXIDO DE HIDROGÊNIO**

PALMAS – TO

2025



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE PALMAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
AGROENERGIA DIGITAL**

**PRODUÇÃO SUSTENTÁVEL DE ETANOL 2G A PARTIR DO RESÍDUO CULTURAL
DO ABACAXIZEIRO (*Ananas Comosus*): OTIMIZAÇÃO DO PRÉ-TRATAMENTO COM
PERÓXIDO DE HIDROGÊNIO**

Aluno: Radames Assis Queiroz Cardoso

Orientador: Guilherme Benko de Siqueira

**Dissertação apresentada à Universidade
Federal do Tocantins como parte dos re-
quisitos para obtenção do Título de Mes-
tre em Agroenergia Digital (Área de con-
centração Tecnologias de
transformação).**

**PALMAS – TO
2025**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

C268p Cardoso, Radames Assis Queiroz.
 PRODUÇÃO SUSTENTÁVEL DE ETANOL 2G A PARTIR DO
 RESÍDUO CULTURAL DO ABACAXIZEIRO (Ananas Comosus):
 OTIMIZAÇÃO DO PRÉ-TRATAMENTO COM PEROXÍDO DE
 HIDROGÊNIO. / Radames Assis Queiroz Cardoso. – Palmas, TO,
 2025.

50 f.

Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade Federal do
Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Pós-
Graduação (Mestrado) em Agroenergia, 2025.

Orientador: Guilherme Benko de Siqueira

Coorientadora : Flávia Lucila Tonani Siqueira

1. Resíduo de abacaxi. 2. Biomassa lignocelulósica. 3. Pré-
tratamento. 4. Etanol 2G. I. Título

CDD 333.7

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de
qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que
citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime
estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

**Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha
catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).**

Radames Assis Queiroz Cardoso

**PRODUÇÃO SUSTENTÁVEL DE ETANOL 2G A PARTIR DO RESÍDUO CULTURAL
DO ABACAXIZEIRO (*Ananas Comosus*): OTIMIZAÇÃO DO PRÉ-TRATAMENTO COM
PERÓXIDO DE HIDROGÊNIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agroenergia Digital (PPGAD). Foi avaliado para a obtenção do título de Mestre em Agroenergia Digital e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Data de aprovação: ____/____/____

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Guilherme Benko de Siqueira- UFT/PPGAD

Profa. Dra. Juliana Lobo Paes – UFT/PPGAD

Profa. Dra. Cibelle Christine Brito Ferreira - UNICATÓLICA

PALMAS – TO

2025

RESUMO

A crescente demanda por energias renováveis e a necessidade de gerenciar resíduos agroindustriais de forma sustentável motivam a busca por novas matérias-primas para biocombustíveis. O resíduo cultural do abacaxizeiro (*Ananas comosus*), biomassa lignocelulósica abundante no estado do Tocantins, apresenta grande potencial subutilizado para a produção de etanol de segunda geração (2G). O presente trabalho teve como objetivo otimizar o pré-tratamento químico deste resíduo com peróxido de hidrogênio (H_2O_2) em diferentes condições de pH e concentração, avaliando seu impacto na deslignificação, no rendimento da hidrólise enzimática e na subsequente produção de etanol. A biomassa foi caracterizada quimicamente *in natura* e após os pré-tratamentos (1% H_2O_2 pH 4,5; 1% H_2O_2 pH 11,5; e 3% H_2O_2 pH 11,5). A condição ótima foi submetida à hidrólise enzimática, seguida de fermentação com *Saccharomyces cerevisiae*. A cinética fermentativa foi monitorada pela produção de CO_2 e ajustada a um modelo de regressão não-linear para estimar a produção de etanol. O pré-tratamento com 1% de H_2O_2 em pH 11,5 demonstrou ser o mais eficiente, reduzindo o teor de lignina em 74% (de 25,55% para 6,57%) e elevando a fração de celulose acessível de 13,05% para 47,74%. O coeficiente de hidrólise enzimática alcançou uma média de 17,3%. A modelagem cinética revelou uma produção máxima de etanol estimada em 153,74 L.t⁻¹. Os resultados confirmam a viabilidade técnica da utilização do resíduo do abacaxizeiro para a produção de etanol 2G, destacando a eficácia do pré-tratamento alcalino oxidativo e posicionando esta biomassa como uma alternativa promissora para a valorização de subprodutos agrícolas.

Palavras-chave: Etanol 2G, Resíduo de abacaxi, Pré-tratamento, Peróxido de hidrogênio, Biomassa lignocelulósica.

ABSTRACT

The growing demand for renewable energy and the need for sustainable management of agro-industrial waste motivate the search for new feedstocks for biofuels. Pineapple (*Ananas comosus*) crop residue, an abundant lignocellulosic biomass in the state of Tocantins, has significant underutilized potential for second-generation (2G) ethanol production. This study aimed to optimize the chemical pretreatment of this residue with hydrogen peroxide (H_2O_2) under different pH and concentration conditions, evaluating its impact on delignification, enzymatic hydrolysis yield, and subsequent ethanol production. The biomass was chemically characterized *in natura* and after pretreatments (1% H_2O_2 pH 4.5; 1% H_2O_2 pH 11.5; and 3% H_2O_2 pH 11.5). The optimal condition was subjected to enzymatic hydrolysis, followed by fermentation with *Saccharomyces cerevisiae*. Fermentation kinetics were monitored by CO_2 production and fitted to a non-linear regression model to estimate ethanol production. The pretreatment with 1% H_2O_2 at pH 11.5 proved to be the most effective, reducing the lignin content by 74% (from 25.55% to 6.57%) and increasing the accessible cellulose fraction from 13.05% to 47.74%. The enzymatic hydrolysis coefficient reached an average of 17.3%. Kinetic modeling revealed a maximum estimated ethanol production of 153.74 L.t^{-1} . The results confirm the technical feasibility of using pineapple residue for 2G ethanol production, highlighting the effectiveness of the alkaline oxidative pretreatment and positioning this biomass as a promising alternative for the valorization of agricultural by-products.

Keywords: 2G Ethanol, Pineapple residue, Pretreatment, Hydrogen peroxide, Lignocellulosic biomass.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - destinações para biomassa agrícola;

Figura 2 - Abacaxi - valor da produção no Brasil (mil reais) 2020;

Figura 3 - Abacaxi - valor da produção no Tocantins (mil reais) 2020;

Figura 4 - Estrutura simplificada das fibras de material lignocelulolítico;

Figura 5 - Estrutura molecular da celulose, formada por unidades de celobiose;

Figura 6 - Fibras de celulose em células vegetais

Figura 7 - exemplificação da remoção da lignina e hemicelulose de biomassa celulósica;

Figura 8 - Fermentação alcoólica;

Figura 9 - fluxograma de desenvolvimento do projeto.

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 - Projeção de exportação de produtos agrícolas brasileiros;
- Tabela 2 - produção de abacaxi no Brasil (2020). *por mil;
- Tabela 3 - produção de abacaxi no Tocantins (2020). * Por mil;
- Tabela 4 - Produção brasileira de etanol (em mil litros);
- Tabela 5. - Composição de celulose, hemicelulose e lignina de diferentes biomassas lignocelulósicas;
- Tabela 6 - Alguns tipos de pré-tratamentos e a suas vantagens e desvantagens;
- Tabela 7 - Pré-tratamentos biológico - agentes biológicos, biomassas e resultados;
- Tabela 8 - Enzimas celulolíticas degradadoras de lignocelulose;
- Tabela 9 - diluições para curva padrão

LISTA DE ABREVIACÕES

- 1G - Primeira geração;
- 2G - segunda geração;
- AFEX - Explosão fibras de Amônia;
- °C - Grau Celsius
- CEAGESP - Companhia de entrepostos e armazéns gerais de São Paulo;
- CEASA - Central de abastecimento de alimentos;
- CO² - Dióxido de carbono;
- CTAB - Brometo de Cetrimônio;
- EDTA - Ácido etilenodiamino tetra-acético;
- FDA - Fibras em detergente ácido;
- FDN - fibras em detergente neutro;
- H₂O₂ - Peroxido de hidrogênio;
- H₂SO₄ - Ácido sulfúrico;
- HCL - Ácido clorídrico;
- IBGE - Instituto brasileiro de geografia e estatística;
- LASOR - Laboratório de análise de solos e resíduos;
- Na₂B₄O₇ 10H₂O - Tetraborato de sódio decahidratado;
- Na₂HPO₄ - Fosfato dissódico;
- NaOH - hidróxido de sódio;
- PC - Peso do cadinho;
- PF - Peso do cadinho + resíduo;
- PR - Peso do resíduo;
- UFT - Universidade federal do Tocantins;
- VAR - Variação.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 Contextualização sobre resíduos agrícolas e produção de biocombustíveis.....	10
1.2 Relevância do reaproveitamento de resíduos de abacaxi no Tocantins.....	10
1.3 Objetivos e contribuição da pesquisa	11
1.4 Uso de peróxido de hidrogênio: uma abordagem inovadora.....	11
2 OBJETIVOS	11
2.1 Objetivo Geral	11
2.2 Objetivos Específicos	11
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
3.1 Panorama global e nacional da produção de biocombustíveis	12
3.2 Resíduos agrícolas e sua aplicação na bioenergia	12
3.2.1 Produção agrícola brasileira e geração de resíduos	13
3.2.2 Produção de abacaxi no Brasil e impacto econômico.....	14
3.2.3 Relevância da produção de abacaxi no Tocantins para pesquisa	17
3.3 Biocombustíveis: Etanol de 1G e 2G.....	19
3.4 Biomassa lignocelulósica como matéria-prima	19
3.4.1 Estrutura e composição química da biomassa lignocelulósica	20
3.5 Pré-tratamento de biomassa lignocelulósica	23
3.5.1 Processo químico.....	24
3.5.2 Processo físico.....	25
3.5.3 Processo biológico	25
3.5.4 Uso de peróxido de hidrogênio no pré-tratamento de resíduos agrícolas	27
3.6 Conversão enzimática e fermentação	27
3.6.1 Hidrólise.....	27
3.6.2 Fermentação	29
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	30
4.1 Caracterização do Local de Estudo.....	30
4.2 Material Vegetal, Amostragem e Processamento	30
4.3 Etapas experimentais.....	30
4.4 Delineamentos Experimentais	31
4.5 Caracterização Química do Material in natura	32
4.6 Caracterização do Material Pré-tratado.....	33
4.7 Pré-tratamento com Peróxido de Hidrogênio.....	33
4.8 Hidrólise Enzimática e Determinação de Açúcares.....	34
4.9 Processo Fermentativo	34
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
5.1 Composição e distribuição dos componentes fibrosos	34
5.2 Rendimento e eficiência do pré-tratamento	37
5.3 Coeficiente de hidrólise enzimática	38
5.4 Cinética fermentativa e produção de etanol	40
5.4.1 Descrição do modelo experimental e parâmetros avaliados.....	40
5.4.2 Comportamento da fermentação ao longo do tempo	41
5.4.3 Parâmetros cinéticos ajustados e interpretação.....	44
5.4.4 Produção de etanol estimada e análise de rendimento	45
6 CONCLUSÃO.....	48
REFERÊNCIAS	49

1. INTRODUÇÃO

A sociedade moderna desenvolveu a capacidade de questionar seus próprios processos produtivos, analisando criticamente os efeitos colaterais adversos da industrialização agrotecnológica. Entre esses efeitos destacam-se os problemas ambientais, como o descarte inadequado de resíduos gerados pelos processos agroindustriais (LUDTKE et al., 2015). A transição para uma sociedade reflexiva trouxe consigo a necessidade de implementar soluções sustentáveis que minimizem o impacto ambiental das atividades humanas. Nesse sentido, o esforço mundial para mitigar os danos causados pelo aquecimento global tem impulsionado a utilização de fontes energéticas renováveis de forma sustentável, considerando aspectos econômicos, sociais e ambientais. Assim, a utilização de materiais provenientes da produção agrícola representa uma alternativa energética promissora, capaz de contribuir para a redução da dependência de fontes não renováveis (PAGEL et al., 2018).

Dentro desse contexto, destaca-se a importância do reaproveitamento de resíduos agrícolas, especialmente no estado do Tocantins, que, segundo o IBGE (2020), ocupa a quarta posição entre os maiores produtores de abacaxi do Brasil, com uma produção média de 22 mil frutos por hectare. Em 2019, o estado produziu aproximadamente 69 mil toneladas da infrutescência, cultivadas em uma área de 3.854 hectares. Contudo, grande parte dos resíduos gerados na pós-colheita, como as folhagens do abacaxizeiro, ainda não são aproveitados adequadamente. Estudos indicam que essas folhagens podem ser transformadas em feno ou farinha, mas a prática permanece pouco difundida entre os produtores locais (SANTOS et al., 2013). Considerando sua composição química rica em celulose, hemicelulose e lignina, esses resíduos apresentam grande potencial para a produção de biocombustíveis etanólicos. Além disso, a lignina pode ser utilizada como fonte de energia térmica, reforçando a viabilidade técnica da valorização desses resíduos para fins energéticos (SOARES & ROSELL, 2014).

Diante desse cenário, a presente pesquisa busca desenvolver e otimizar o pré-tratamento químico de resíduos do abacaxi (*Ananas comosus*) com peróxido de hidrogênio, tendo como objetivo a produção sustentável de etanol de segunda geração (2G). A implementação desse processo pode contribuir para o desenvolvimento de

tecnologias que reduzam o desperdício agrícola e fortaleçam a economia local, promovendo o uso sustentável de recursos e mitigando os impactos ambientais associados ao descarte inadequado dos resíduos.

O pré-tratamento químico constitui uma etapa crítica na produção de etanol 2G, uma vez que é responsável pela remoção da lignina e pelo aumento da acessibilidade da celulose para a conversão enzimática subsequente. Entre os diversos agentes químicos disponíveis, o peróxido de hidrogênio destaca-se por sua eficiência e pelo reduzido impacto ambiental. Nesse sentido, este estudo propõe investigar a otimização das condições de aplicação desse reagente, com foco na obtenção de elevados rendimentos em etanol e na sustentabilidade do processo como um todo.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a eficiência do pré-tratamento com peróxido de hidrogênio em diferentes condições de pH e concentração na deslignificação de resíduos do abacaxizeiro, quantificando seu impacto sobre os rendimentos de hidrólise enzimática e subsequente produção de etanol de segunda geração.

2.2 Objetivos Específicos

- I. Avaliar a composição química dos resíduos do abacaxi, identificando os teores de celulose, hemicelulose e lignina.
- II. Testar diferentes condições de pré-tratamento químico com peróxido de hidrogênio, buscando as condições mais eficientes para a remoção da lignina.
- III. Determinar a eficiência da hidrólise enzimática após o pré-tratamento, analisando o rendimento de açúcares fermentáveis.
- IV. Produzir e quantificar o etanol a partir dos hidrolisados obtidos, verificando a viabilidade do processo proposto.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Panorama global e nacional da produção de biocombustíveis

Os biocombustíveis têm se destacado como uma solução sustentável frente aos desafios ambientais e à necessidade de diversificação da matriz energética global. No Brasil, a produção de etanol a partir da cana-de-açúcar consolidou-se como uma das principais estratégias para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para a substituição parcial de combustíveis fósseis. Além do etanol de primeira geração (1G), o etanol de segunda geração (2G) tem sido explorado como alternativa para ampliar o aproveitamento de resíduos agrícolas e reduzir a competição entre áreas destinadas à produção de alimentos e de energia (PAGEL et al., 2018).

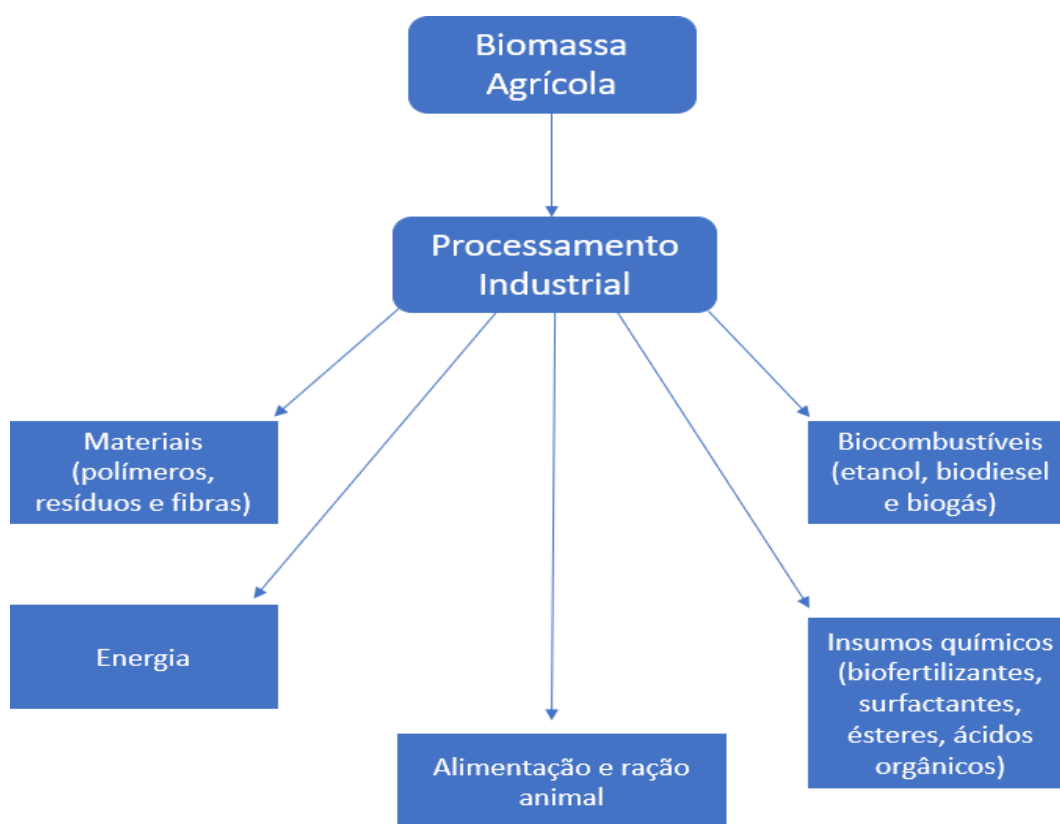
No cenário global, políticas públicas e acordos internacionais, como o Protocolo de Kyoto e o Acordo de Paris, têm incentivado o desenvolvimento e a adoção de biocombustíveis. Países como os Estados Unidos e os membros da União Europeia estão investindo em tecnologias que promovam o uso de biomassa lignocelulósica para a produção de energia renovável, fortalecendo o mercado de biocombustíveis avançados.

3.2 Resíduos agrícolas e sua aplicação na bioenergia

Os resíduos agrícolas, frequentemente descartados ou subutilizados, representam uma fonte valiosa de biomassa para a produção de energia renovável. No Brasil, a extensa produção agrícola gera milhões de toneladas de subprodutos anualmente, incluindo bagaço de cana-de-açúcar, palha de milho, cascas de frutas e folhagens. Estes materiais, ricos em celulose, hemicelulose e lignina, são potenciais precursores para a produção de etanol 2G e outros biocombustíveis (SOARES & ROSSELL, 2014).

A **Figura 1** apresenta um panorama das principais destinações possíveis para a biomassa agrícola, destacando seu potencial multifuncional e sua contribuição para uma economia mais sustentável.

Figura 1 - Destinações para biomassa agrícola



Fonte: Adaptado de Embrapa (2020).

3.2.1 Produção agrícola brasileira e geração de resíduos

O Brasil ocupa posição de destaque na produção agrícola mundial, sendo um dos maiores exportadores de grãos, frutas e outras commodities. Como resultado, uma quantidade expressiva de resíduos lignocelulósicos é gerada anualmente, representando tanto um desafio ambiental quanto uma oportunidade econômica. Estudos indicam que apenas uma pequena fração desses resíduos é atualmente reaproveitada, enquanto o restante é descartado inadequadamente ou queimado, contribuindo para a emissão de gases de efeito estufa (IBGE, 2020).

A Tabela 1 apresenta a projeção de exportação de produtos agrícolas brasileiros, evidenciando a dimensão e o impacto do setor agrícola no país. Essa produção robusta gera subprodutos que, com tecnologias apropriadas, podem ser reaproveitados de forma sustentável.

Tabela 1 - Projeções comparativas de exportação dos principais produtos agrícolas brasileiros: perspectivas de crescimento entre 2016/17 e 2026/27.

Produto	2016/17	2026/27	Variação (%)
Algodão pluma (mil t)	630	1.118	77,5
Milho (mil t)	25.000	35.130	37,8
Soja – grão (mil t)	63.000	84.111	33,5
Soja – farelo (mil t)	15.900	17.240	8,4
Soja – óleo (mil t)	1.550	1.557	0,5
Carne de frango (mil t)	4.280	5.890	37,6
Carne bovina (mil t)	1.800	2.429	34,9
Carne suína (mil t)	900	1.277	41,9
Café (mil t)	2.100	2.760	31,4
Açúcar (mil t)	28.933	39.466	36,4
Suco de laranja (mil t)	2.315	2.769	19,6
Leite (milhões t)	245	337	37,6
Papel (mil t)	2.172	2.380	9,6
Celulose (mil t)	13.858	19.170	38,3

Fonte: EMBRAPA (2022).

3.2.2 Produção de abacaxi no Brasil e impacto econômico

A cultura do abacaxi possui grande relevância econômica no Brasil, sendo o país um dos maiores produtores mundiais da fruta. Segundo dados do IBGE (2020), a produção brasileira de abacaxi alcançou 1,6 milhão de toneladas em 2020, gerando um impacto econômico significativo. Apesar disso, os resíduos gerados durante o cultivo e o processamento da fruta, como folhagens, cascas e coroas, continuam sendo subutilizados.

A Tabela 2 apresenta os dados da produção de abacaxi no Brasil em 2020, demonstrando o volume significativo alcançado em diversas regiões do país. Esses dados reforçam a relevância dessa cultura e o potencial para o aproveitamento dos resíduos gerados no processamento da infrutescência.

Tabela 2 - Indicadores da produção nacional de abacaxi: valor econômico, volume produzido, área cultivada e produtividade (2020).

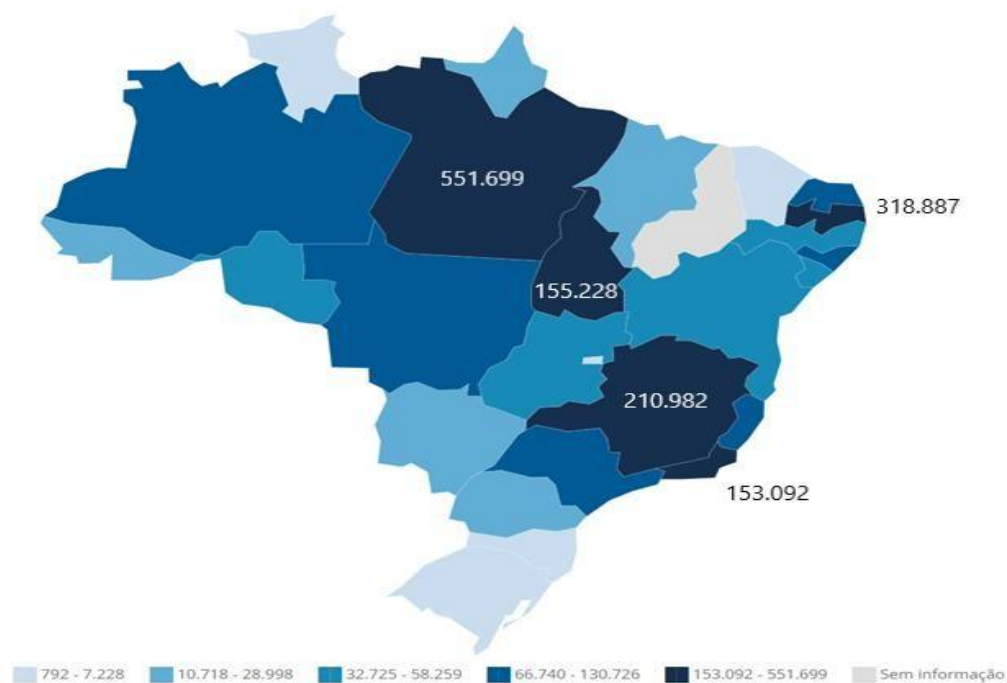
Valor da produção	2.334.120 Mil reais (2020)
-------------------	----------------------------

Quantidade produzida	1.637.126 Mil frutos (2020)
Área colhida	64.687 Hectares (2020)
Rendimento médio	25.269 Frutos/Ha (2020)
Maior produtor	Pará (2020)

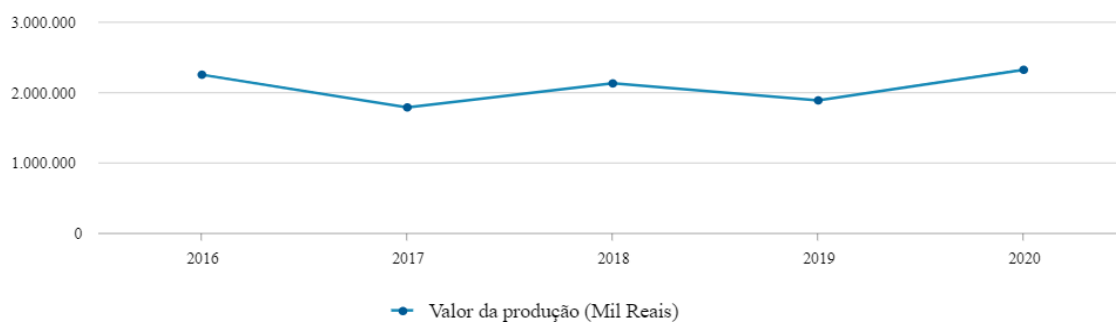
Fonte: Adaptado de IBGE (2020).

Entre os estados brasileiros, o abacaxi destaca-se como uma cultura agrícola de alta relevância econômica, com valores expressivos de produção distribuídos em várias regiões do país. Segundo o IBGE (2020), o estado do Pará liderou o ranking nacional com um valor de produção de 551.699 mil reais, seguido pela Paraíba (318.887 mil reais), Minas Gerais (210.982 mil reais), Tocantins (155.228 mil reais) e Rio de Janeiro (153.092 mil reais). Esses dados evidenciam a importância da cultura para a economia de diferentes estados e reforçam o potencial do reaproveitamento de seus resíduos. A Figura 2 apresenta esses valores de produção de forma detalhada, ilustrando a contribuição de cada estado para o total nacional.

Figura 2 - Distribuição do valor econômico da produção de abacaxi nos principais estados produtores do Brasil (2020).



Série histórica (BR) - Abacaxi - Valor da produção



Fonte: Adaptado de IBGE (2020).

3.2.3 Relevância da produção de abacaxi no Tocantins para a pesquisa

O Tocantins destaca-se como o quarto maior produtor de abacaxi do Brasil, com uma produção média de 22 mil frutos por hectare. Em 2019, o estado produziu aproximadamente 69 mil toneladas da fruta, consolidando-se como um dos principais polos produtores do país. Contudo, os resíduos agrícolas gerados, principalmente as folhas

do abacaxizeiro, possuem alto potencial para aplicações na bioenergia, mas são frequentemente descartados de maneira inadequada (SANTOS et al., 2013). Esta pesquisa explora o reaproveitamento desses resíduos como matéria-prima para a produção de etanol de segunda geração (2G).

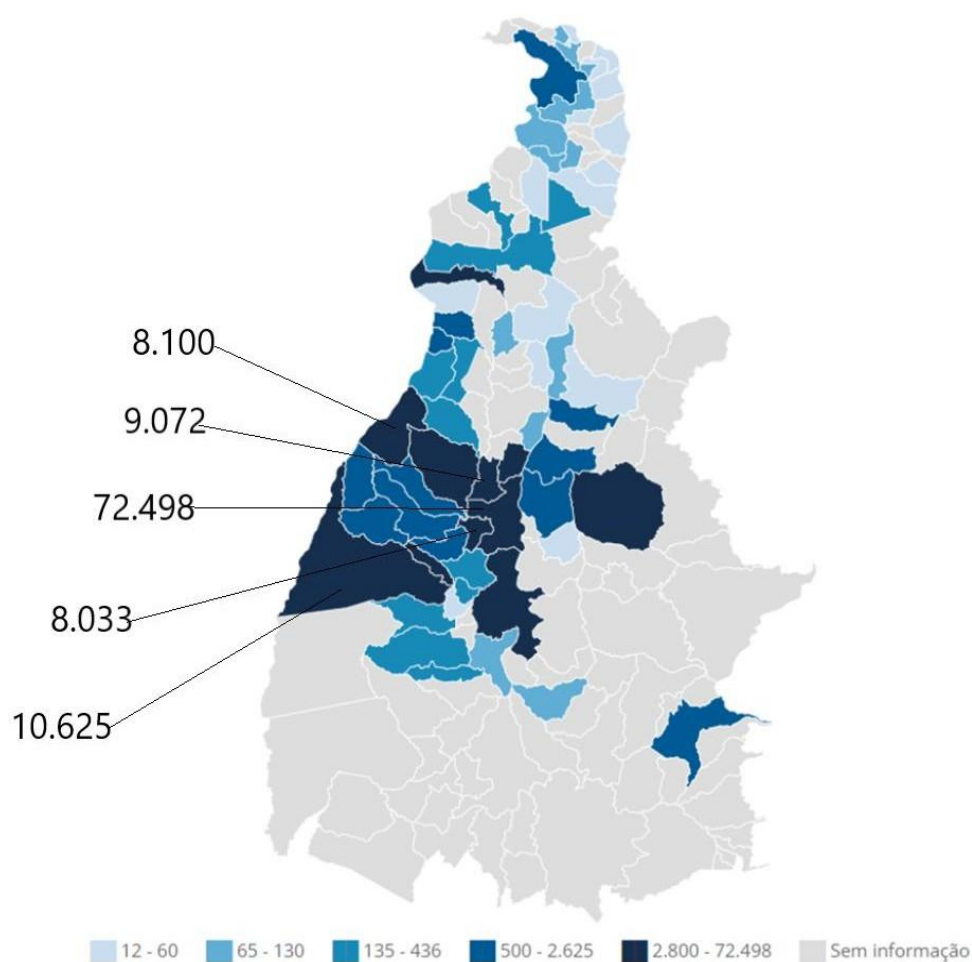
A Tabela 3 apresenta informações detalhadas sobre a produção de abacaxi no Tocantins, incluindo os principais municípios produtores e seus respectivos volumes de produção. Esses dados destacam a relevância da cultura no estado e o potencial para o aproveitamento sustentável dos resíduos gerados, elemento central para a presente pesquisa.

Tabela 3 - Panorama da produção de abacaxi no estado do Tocantins: indicadores econômicos e agrícolas com destaque para o principal município produtor (2020).

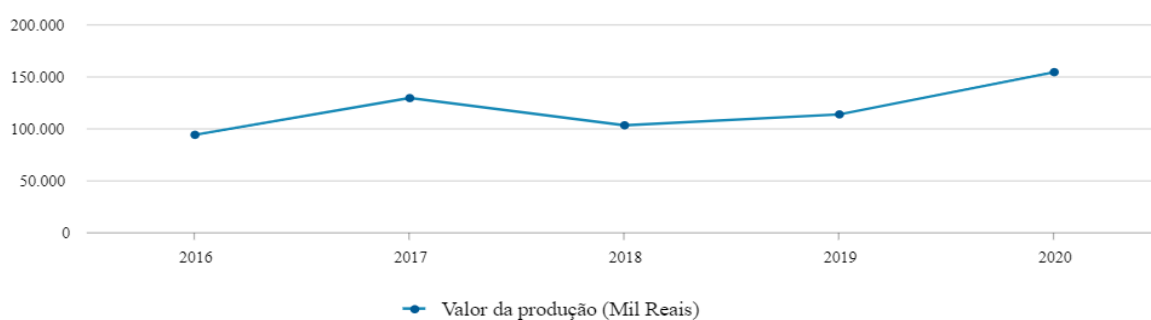
Valor da produção	155.228 Mil reais (2020)
Quantidade produzida	98.523 Mil frutos (2020)
Área colhida	4.727 Hectares (2020)
Rendimento médio	20.843 Frutos/Ha (2020)
Maior produtor	Miracema do Tocantins - To (2020)
Fonte: Adaptado de IBGE (2020).	

O estado do Tocantins ocupa a quarta posição nacional em valor de produção de abacaxi, refletindo a importância da cultura para a economia local, especialmente em municípios que se destacam na produção. Segundo o IBGE (2020), o município de Miracema do Tocantins liderou com um valor de produção de 72.498 mil reais, seguido por Pium (10.625 mil reais), Miranorte (9.072 mil reais), Araguacema (8.100 mil reais) e Barrolândia do Tocantins (8.033 mil reais). Esses dados ressaltam a contribuição desses municípios para a economia regional e o potencial de reaproveitamento dos resíduos gerados. A **Figura 3** apresenta esses valores detalhadamente, destacando os principais produtores dentro do estado.

Figura 3 - Distribuição do valor econômico da produção de abacaxi nos principais municípios produtores do Tocantins (2020).



Série histórica (17) - Abacaxi - Valor da produção



Fonte: Adaptado de IBGE (2020).

3.3 Biocombustíveis: Etanol de 1G e 2G

O etanol de primeira geração (1G) é produzido a partir de matérias-primas ricas em açúcares, como cana-de-açúcar e milho. No entanto, a produção de etanol 1G enfrenta críticas relacionadas à competição com a produção de alimentos e ao uso

intensivo de terras agrícolas. O etanol de segunda geração (2G), por outro lado, utiliza resíduos lignocelulósicos, eliminando esses conflitos e aumentando a eficiência na utilização de recursos agrícolas (CHEN et al., 2017).

A Tabela 4 apresenta os volumes de produção de etanol no Brasil, demonstrando o impacto significativo desse biocombustível na economia nacional. Esses dados destacam a importância de explorar novas fontes, como resíduos agrícolas, para atender à crescente demanda energética de forma sustentável.

Tabela 4 - Evolução regional da produção brasileira de etanol: volumes e variação percentual entre as safras 2017/18 e 2018/19.

Região	2017/18	2018/19	Var %
Norte	237.160	208.304	- 12,2%
Nordeste	1.520.959	1.941.275	+ 27,6%
Centro-Oeste	8.244.333	9.993.609	+ 21,2%
Suldeste	15.944.837	19.378.209	+ 21,5%
Sul	1.290.328	1.621.080	+ 25,6%
Brasil	27.237.654	33.142.477	+ 21,7%

Fonte: Adaptado de (CONAB 2019).

3.4 Biomassa lignocelulósica como matéria-prima

A biomassa lignocelulósica é composta por celulose, hemicelulose e lignina, que formam uma matriz estrutural complexa. Estes componentes são fontes promissoras de açúcares fermentáveis para a produção de biocombustíveis. Contudo, a presença de lignina torna o acesso às frações de celulose e hemicelulose um desafio tecnológico que requer pré-tratamentos adequados (SOARES & ROSSELL, 2014).

3.4.1 Estrutura e composição química da biomassa lignocelulósica

A celulose, um polímero de glicose, é a fração mais abundante e importante

para a produção de etanol. A hemicelulose, composta por diferentes açúcares, complementa o potencial energético da biomassa. Já a lignina, que confere resistência estrutural às plantas, apresenta desafios para a conversão enzimática, sendo um dos principais alvos do pré-tratamento (PAGEL et al., 2018).

A Tabela 5 apresenta a composição percentual desses três componentes em diferentes tipos de biomassa lignocelulósica, destacando as variações entre as fontes de matéria-prima. Esses dados são fundamentais para selecionar as biomassas mais promissoras para processos específicos, como a produção de etanol de segunda geração.

Tabela 5 - Perfil composicional de diversas biomassas lignocelulósicas: variação nos teores de celulose, hemicelulose e lignina em função da origem do material.

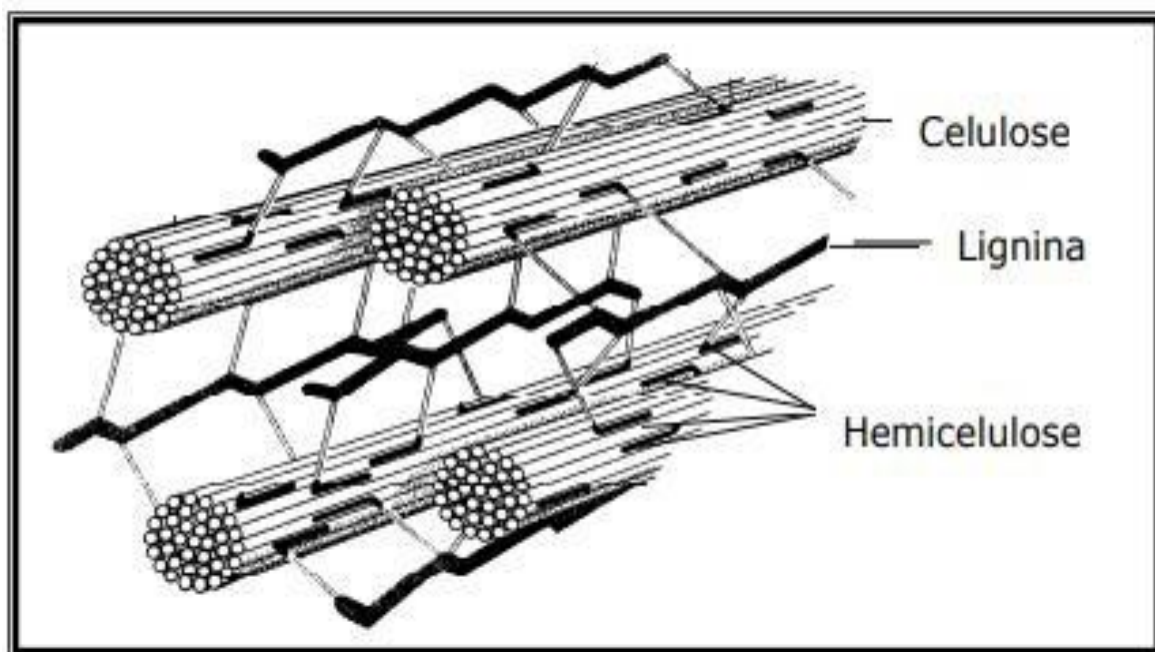
Biomassa lignocelulósica	% Celulose*	% Hemicelulose*	% Lignina*
Bagaço de cana-de-açúcar	31,9 – 43,4	12,2 – 25,5	23,1 – 27,6
Palha de arroz	29,2 – 34,7	23,0 – 25,9	17,0 – 19,0
Cascas de arroz	27,7 – 35,6	12,0 – 29,3	15,4 – 20,0
Palha de milho	30,6 – 38,1	19,1 – 25,3	16,7 – 21,3
Espigas de milho	33,7 – 41,2	31,9 – 36,0	6,1 – 15,9
Talos de milho	35,0 – 39,6	16,8 – 35,0	7,0 – 18,4
Palha de trigo	35,0 – 39,0	23,0 – 30,0	12,0 – 16,0
Casca de cevada	34,0	36,0	13,8 – 19,0
Palha de cevada	36,0 – 43,0	24,0 – 33,0	6,3 – 9,8
Palha de aveia	31,0 – 35,0	20,0 – 33,0	10,0 – 15,0
Palha de sorgo	32,0 – 35,0	24,0 – 27,0	15,0 – 21,0
Palha de centeio	36,0 – 47,05	19,0 – 24,0	9,9 – 24,0

Fonte: Adaptado de (SILVA, 2017).

A biomassa lignocelulósica é composta por uma matriz complexa de celulose, hemicelulose e lignina, cujas interações conferem resistência estrutural às plantas. A celulose, organizada em microfibrilas, é protegida por uma matriz de hemicelulose e lignina, que dificultam o acesso enzimático e, consequentemente, a conversão em biocombustíveis.

A **Figura 4** ilustra a estrutura simplificada das fibras de material lignocelulolítico, destacando a disposição e as interações entre celulose, hemicelulose e lignina. Essa representação facilita a compreensão das barreiras estruturais que precisam ser superadas nos processos de pré-tratamento. Figura 4 - Estrutura simplificada das fibras de material lignocelulolítico.

Figura 4 - Organização estrutural e interação dos principais componentes (celulose, hemicelulose e lignina) em materiais lignocelulósicos.

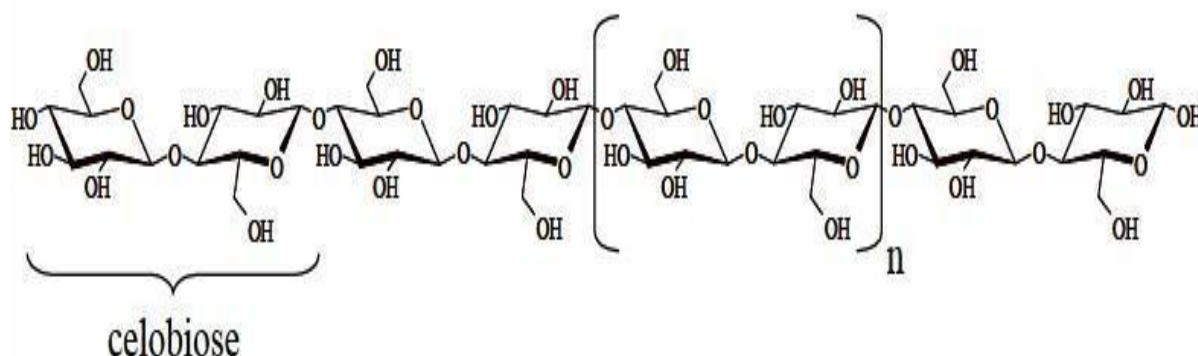


Fonte: VÁSQUEZ (2007).

A celulose é um polissacarídeo linear composto por unidades repetitivas de celobiose, que são formadas por duas moléculas de glicose ligadas por ligações glicosídicas β -1,4. Essa estrutura confere alta estabilidade e resistência à celulose, dificultando sua degradação sem a aplicação de pré-tratamentos adequados.

A Figura 5 ilustra a estrutura molecular da celulose, destacando as unidades de celobiose e as ligações que as mantêm unidas. Essa representação é essencial para compreender o papel da celulose como matéria-prima e os desafios enfrentados na sua conversão para biocombustíveis.

Figura 5 – Estrutura química da celulose: representação das unidades de celobiose e ligações glicosídicas β -1,4.

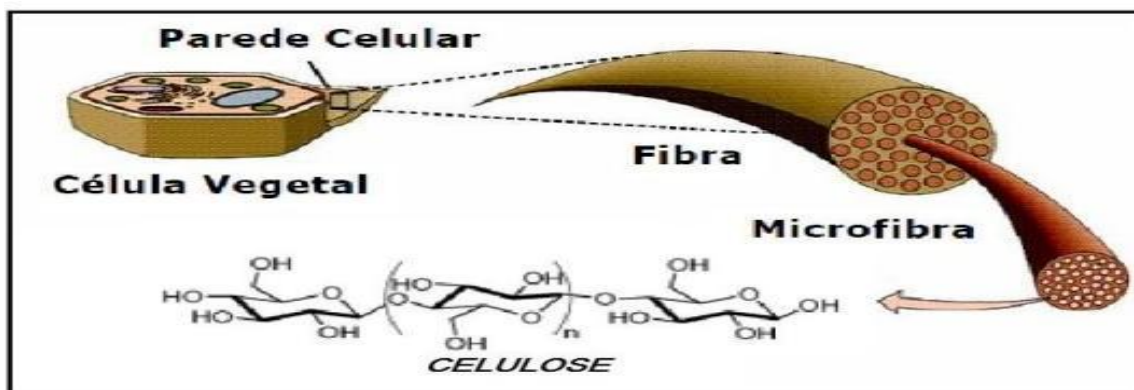


Fonte: FURLAN (2009)

A celulose é o componente mais abundante da biomassa lignocelulósica, composta por cadeias de glicose organizadas em microfibrilas que formam a base estrutural das paredes celulares vegetais. Estas microfibrilas são cercadas por hemicelulose e lignina, que atuam como uma matriz protetora, conferindo rigidez e resistência às plantas.

A **Figura 6** apresenta uma representação visual das fibras de celulose nas células vegetais, destacando sua organização e o papel essencial que desempenham na estrutura da biomassa. Essa visualização complementa o entendimento das barreiras estruturais enfrentadas nos processos de conversão da biomassa em biocombustíveis.

Figura 6 – Organização hierárquica das fibras de celulose na parede celular vegetal



Fonte: SIQUEIRA (2016)

3.5 Pré-tratamento de biomassa lignocelulósica

O pré-tratamento é uma etapa crucial para a desestruturação da biomassa lignocelulósica. Ele visa remover lignina, despolimerizar a hemicelulose e aumentar a acessibilidade da celulose para a hidrólise enzimática. Entre os métodos disponíveis, destacam-se os processos químicos, físicos e biológicos.

O pré-tratamento é uma etapa essencial no processamento da biomassa lignocelulósica para a produção de biocombustíveis. Ele visa remover a lignina, despolimerizar a hemicelulose e aumentar a acessibilidade da celulose para a hidrólise enzimática. Diversos métodos têm sido desenvolvidos, cada um com vantagens e desvantagens que influenciam sua escolha para diferentes tipos de biomassa.

A Tabela 6 apresenta uma comparação entre os principais tipos de pré-tratamentos, destacando suas características, benefícios e limitações. Essa análise é fundamental para a escolha do método mais apropriado, considerando a eficiência, os custos e os impactos ambientais.

Tabela 6 - Análise comparativa de diferentes métodos de pré-tratamento de biomassa lignocelulósica: potencialidades e limitações técnicas.

Pré-tratamentos	Vantagens	Desvantagens
Físico	- Redução da cristalinidade e do grau de polimerização da celulose;	- Elevado gasto energético;
- Moagem;	- Aumento da área superficial	- Não promove remoção de lignina
- Irradiação;		
- Extrusão.		
Químico	- Alto rendimento de glicose;	- O tratamento com ácidos concentrados promove a corrosão dos equipamentos;
- Ácido concentrado;	- Solubilização parcial ou total da lignina;	- Alto custo dos ácidos, bases e dos solventes;
- Ácido diluído;	- Diminuição da cristalinidade da celulose;	- Dificuldades de recuperação dos ácidos, bases e solventes; -
- Alcalino;	- Aumento da área superficial da biomassa;	Formação de produtos inibidores de hidrólise e fermentação;
- Organossolve.	- Diminui o grau de polimerização da celulose.	
Físico-químico	- Solubilização parcial ou total das hemiceluloses;	- Formação de produtos de degradação;
-Explosão a vapor;	- Altos rendimentos de glicose e açúcares de hemicelulose;	- Necessário uma posterior etapa de deslignificação;
- Hidrotérmico, entre outros.		
Biológico	- Remove quantidade considerável de lignina;	- Maior tempo de residência;
- Fungos da podridão branca e bactérias	- Pré-tratamento brando, não formando produtos inibidores de fermentação	- Necessidade de monitoramento durante o crescimento dos microrganismos;
		- Os fungos e bactérias consomem um pouco do carboidrato disponível, reduzindo assim o rendimento dos açúcares.

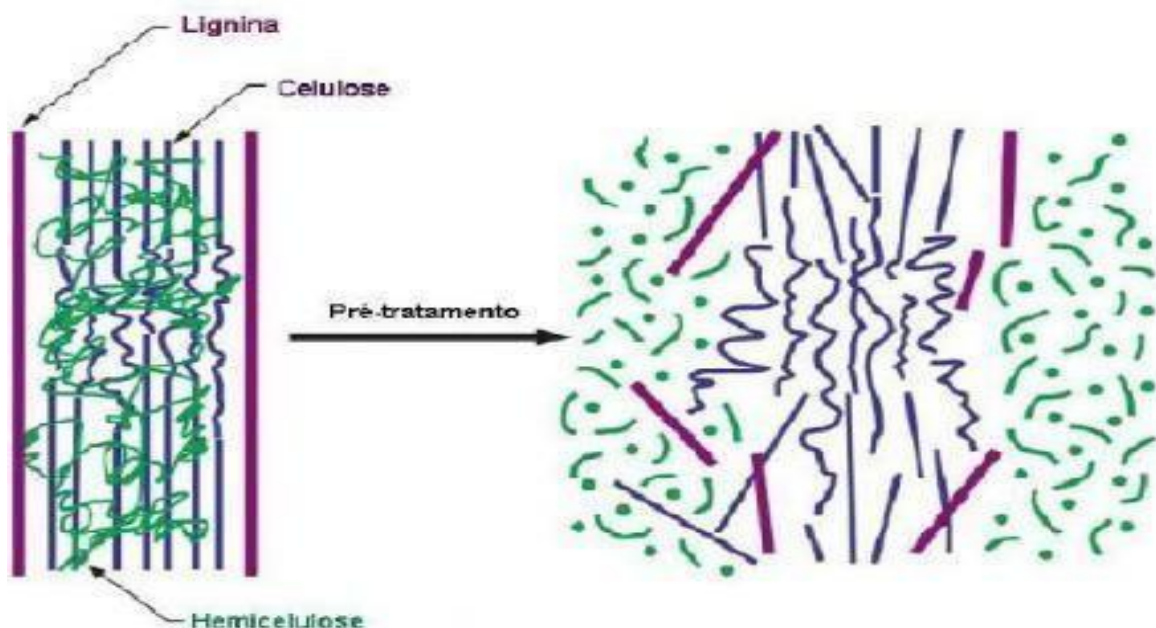
Fonte: Adaptado de (SILVA, 2017).

3.5.1 Processo químico

Os métodos químicos de pré-tratamento são amplamente utilizados para alterar a estrutura da biomassa lignocelulósica, facilitando o acesso às fibras de celulose. Entre os agentes químicos, o uso de ácidos, bases e oxidantes, como o peróxido de hidrogênio, tem se mostrado eficaz na remoção seletiva da lignina e hemicelulose, aumentando a eficiência da hidrólise enzimática subsequente (CHEN et al., 2017).

A Figura 7 exemplifica o processo de remoção da lignina e hemicelulose de biomassa celulósica durante o pré-tratamento químico. Essa representação visual destaca como o processo expõe as fibras de celulose, tornando-as mais acessíveis para as etapas seguintes de conversão enzimática.

Figura 7 - Efeito do pré-tratamento na desestruturação da matriz lignocelulósica: exposição das fibras de celulose após remoção da lignina e hemicelulose.



Fonte: OLIVEIRA (2020).

3.5.2 Processo físico

Os métodos físicos, como explosão a vapor e moagem mecânica, complementam os tratamentos químicos, aumentando a eficiência global do processo. Estes métodos atuam principalmente na redução da cristalinidade e do grau de polimerização da celulose, bem como no aumento da área superficial da biomassa.

3.5.3 Processo biológico

Os pré-tratamentos biológicos utilizam microrganismos, como fungos e bactérias, para degradar a lignina e a hemicelulose, tornando a celulose mais acessível. Esses métodos apresentam vantagens como menor impacto ambiental e baixa geração de inibidores, mas são limitados pela velocidade do processo e pelos custos associados ao cultivo dos agentes biológicos (SOARES & ROSSELL, 2014).

A Tabela 7 apresenta exemplos de pré-tratamentos biológicos, destacando os

agentes biológicos utilizados, os tipos de biomassa processados e os resultados obtidos. Essa análise evidencia a aplicabilidade desses métodos em diferentes contextos e o potencial de otimização para aplicações específicas.

Tabela 7 – Eficiência de diferentes agentes biológicos no pré-tratamento de biomassas lignocelulósicas: microrganismos aplicados, substratos e rendimentos obtidos.

Agente biológico	Biomassa teste	Efeitos relevantes
<i>Punctularia</i> sp. TUFC20056	Colmos de bambu	50% de remoção de lignina
<i>Irpex lacteus</i>	Talos de milho	Rendimento de hidrólise de 82%
Consórcio fúngico	Palha	Aumento de sete vezes na hidrólise
<i>Pleurotus ostreatus</i> <i>Pleurotus pulmonarius</i>	Serragem de <i>Eucalyptus grandis</i>	Aumento de vinte vezes na hidrólise
Consórcio fúngico	Palha de milho	43,8% remoção de lignina / aumento de sete vezes na hidrólise
<i>Ceriporiopsis subvermispora</i>	Palha de trigo	Perda mínima de celulose
<i>Ceriporiopsis subvermispora</i>	Palha de milho	Aumento de 2-3 vezes no rendimento de açúcares redutores
Consórcio fúngico	Biomassa vegetal	Eliminação completa do uso de substâncias químicas perigosas
<i>Ceriporiopsis subvermispora</i>	Palha de milho	Rendimento de 58% em bioetanol e rendimento em açúcares de 57 a 67%
<i>Ceriporiopsis subvermispora</i>	Cedro japonês	Rendimento em bioetanol (em relação ao rendimento máximo teórico baseado na holocelulose) superior a 35%
<i>Ceriporiopsis subvermispora</i>	Seringueira	Rendimento em açúcares 28% superior ao obtido em hidrólise de biomassa sem pré-tratamento
<i>Phanerochaete chrysosporium</i>	Madeira de faia	Rendimento em açúcares de 9,5%
<i>Pycnoporus cinnabarinus</i>	Palha de trigo	Rendimento em açúcares de 55%
<i>Pleurotus ostreatus</i>	Palha de arroz	Rendimento em açúcares de 33% (baseado no teor de holocelulose – açúcares totais).
<i>Pleurotus ostreatus</i>	Casca de arroz	Rendimento em açúcares de 39%
<i>Trametes versicolor</i>	Seringueira	Rendimento em açúcares 16% superior ao obtido em hidrólise de biomassa sem pré-tratamento

<i>Coriolus versicolor</i>	Resíduos de bambu	Rendimento em açúcares de 37%
<i>Stereum hirsutum</i>	Pinho vermelho japonês	Rendimento em açúcares 21%

Fonte: Adaptado de (HARTMANN, 2017).

3.5.4 Uso de peróxido de hidrogênio no pré-tratamento de resíduos agrícolas

O peróxido de hidrogênio é um oxidante ambientalmente amigável que tem demonstrado eficiência no pré-tratamento de resíduos agrícolas. Ele remove seletivamente a lignina, minimizando a formação de subprodutos tóxicos (CHEN et al., 2017). Esta característica é particularmente relevante para processos que visam a produção de etanol, uma vez que a presença de inibidores pode comprometer a etapa de fermentação.

3.6 Conversão enzimática e fermentação

Após o pré-tratamento, a biomassa é submetida à hidrólise enzimática, onde celulasas e hemicelulasas convertem os polímeros em açúcares fermentáveis. Esses açúcares são então utilizados em processos fermentativos para a produção de etanol, empregando microrganismos como *Saccharomyces cerevisiae* (SOARES & ROSELL, 2014).

3.6.1 Hidrólise

A hidrólise enzimática é uma etapa crucial no processo de conversão da biomassa lignocelulósica em açúcares fermentáveis. Esse processo utiliza enzimas celulolíticas, como endoglucanases, exoglucanases e β -glicosidases, para degradar a celulose em glicose. A eficiência dessa etapa depende diretamente das condições do pré-tratamento, que aumenta a acessibilidade da celulose às enzimas.

A Tabela 8 apresenta as principais enzimas celulolíticas, destacando suas funções específicas e seus alvos na estrutura da lignocelulose. Esses dados são essenciais para compreender os mecanismos de ação enzimática e para otimizar o processo de hidrólise, visando à maximização do rendimento de açúcares fermentáveis.

O processo de derivatização de celulose consiste na aplicação de metodologias capazes de converter a celulose em açúcares fermentáveis, tornando-a um substrato valioso para a produção de biocombustíveis etanólicos. Esses biocombustíveis possuem alto potencial para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (MITSUHARA, 2021).

Durante a produção de bioetanol lignocelulósico, a hidrólise desempenha um papel fundamental, promovendo a quebra de polissacarídeos da biomassa em açúcares menores e fermentáveis, essenciais para a fermentação alcoólica subsequente. Os pré-tratamentos aplicados nesta etapa podem ser de natureza ácida, básica ou enzimática, cada qual com vantagens e desafios próprios (MARGON et al., 2018).

A hidrólise enzimática é particularmente eficiente na conversão de celulose em açúcares fermentáveis. Este processo, considerado o segundo passo para a produção de etanol de segunda geração, requer condições específicas para a ação enzimática, incluindo temperatura e pH adequados (ARAÚJO, 2021). Ela apresenta altos rendimentos na conversão de celulose em glicose por meio da quebra de ligações glicosídicas das microfibrilas de celulose, disponibilizando açúcares fermentáveis no meio para posterior conversão em bioetanol (ROSA & PINHEIRO, 2021).

Por outro lado, a hidrólise ácida, embora prática e com reagentes amplamente disponíveis, pode gerar subprodutos indesejados que afetam negativamente a eficiência da fermentação alcoólica (MOURA et al., 2020; ROVIERO, 2017). Já a hidrólise alcalina é amplamente utilizada devido à sua eficiência na remoção da lignina e ao baixo custo de aplicação, sendo especialmente adequada para a separação de cadeias de celulose da lignina solúvel (LUKAJTIS et al., 2018).

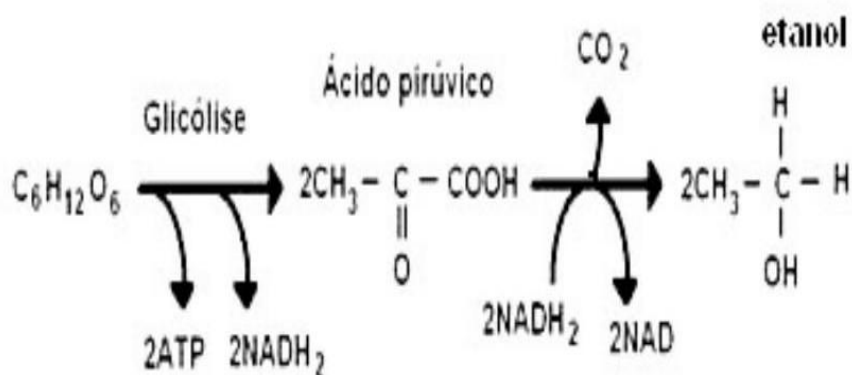
3.6.2 Fermentação

A fermentação alcoólica é o principal processo para a obtenção de etanol a partir de açúcares presentes em matérias-primas renováveis, como biomassa lignocelulósica. O processo, realizado principalmente por leveduras, como *Saccharomyces cerevisiae*, resulta em concentrações de etanol de cerca de 12%. Após a fermentação, o etanol produzido deve ser concentrado por destilação para alcançar níveis apropriados para uso industrial (SUYAMA, 2019).

A levedura *Saccharomyces cerevisiae* é amplamente estudada e utilizada devido à sua alta eficiência e resistência ao etanol, características que foram aprimoradas ao longo do tempo em decorrência de sua demanda industrial (SUYAMA, 2019). O dinamismo da fermentação alcoólica é ilustrado pela sequência de reações bioquímicas que convertem glicose em piruvato, seguida pela descarboxilação do piruvato pela enzima piruvato descarboxilase e pela redução do acetaldeído em etanol, catalisada pela enzima álcool desidrogenase na presença de NADH (MELO, 2020).

A **Figura 8** demonstra o mecanismo de fermentação alcoólica, destacando as etapas bioquímicas envolvidas e os produtos gerados durante o processo.

Figura 8 - Representação bioquímica das vias metabólicas da fermentação alcoólica por *Saccharomyces cerevisiae*.



Fonte: MELO, (2020).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Caracterização do Local de Estudo

O estudo foi desenvolvido no Laboratório de Análises de Solos e Resíduos (LA-SOR) da Universidade Federal do Tocantins (UFT), Campus Universitário de Palmas, onde foram realizadas todas as etapas experimentais do trabalho.

4.2 Material Vegetal, Amostragem e Processamento

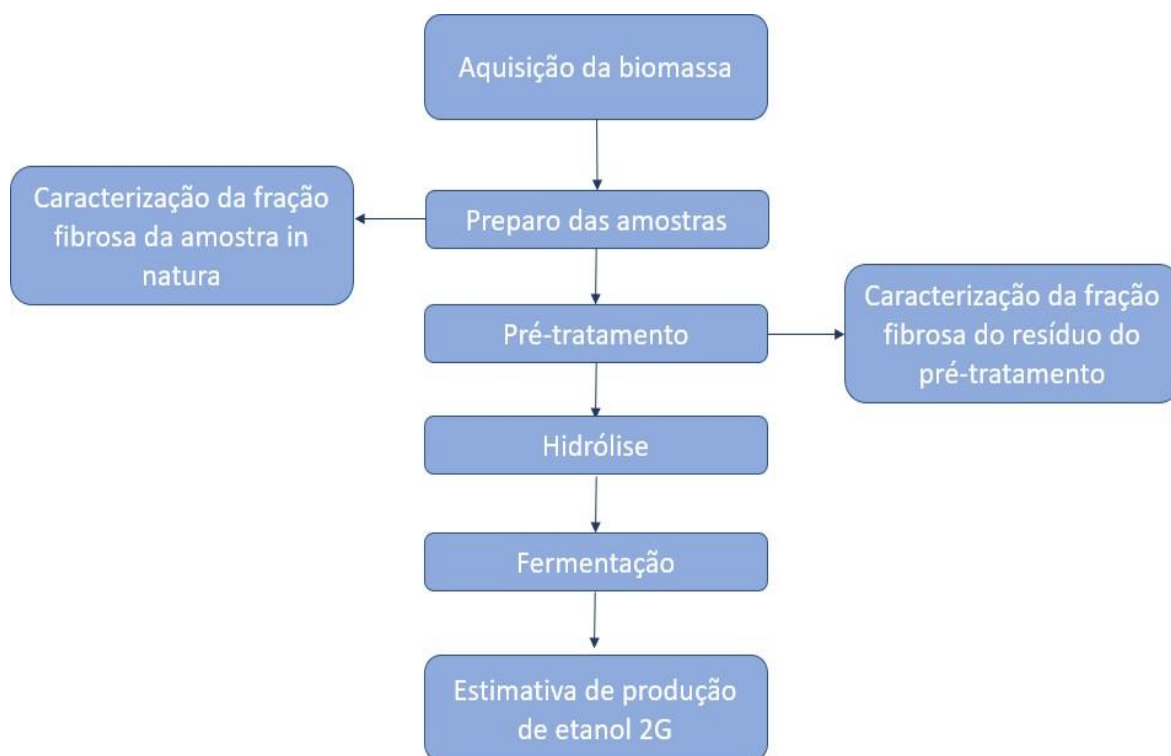
O material utilizado consistiu no resíduo cultural do abacaxizeiro (*Ananas comosus*), especificamente as partes vegetativas residuais das plantas, obtidas através de doação do proprietário da Fazenda Barro Branco, localizada no município de Barro-lândia-TO. Após a coleta, o material foi submetido a um processo de secagem em estufa com circulação de ar forçado a 55°C durante 72 horas. Posteriormente, realizou-se a moagem em moinho de facas equipado com peneira de 10 mesh, visando padronizar a granulometria do material para as análises subsequentes.

4.3 Etapas experimentais

O desenvolvimento do estudo seguiu uma sequência metodológica sistemática, partindo da aquisição e preparo inicial da biomassa até a estimativa final da produção de etanol de segunda geração (2G). O fluxo completo das etapas experimentais é apresentado na Figura 1, que ilustra a interconexão entre as diferentes fases do processo.

A Figura 9 demonstra as etapas sequenciais do desenvolvimento do projeto, desde a aquisição da biomassa até a estimativa de produção de etanol 2G.

Figura 9 - Sequência metodológica integrada: do processamento da biomassa do abacaxizeiro à produção de etanol 2G



Fonte: o autor (2025)

4.4 Delineamentos Experimentais

Os experimentos que compõem este estudo foram conduzidos de forma sequencial e complementar, visando a caracterização e otimização do processo de aproveitamento do resíduo cultural do abacaxizeiro para fins biotecnológicos.

O primeiro experimento, dedicado à caracterização químico-bromatológica do resíduo cultural do abacaxizeiro, foi delineado em um arranjo inteiramente casualizado (DIC), contemplando quatro tratamentos com quatro repetições cada. Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, quando detectadas diferenças significativas, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5%

de probabilidade. A normalidade dos dados foi verificada pelo teste de Shapiro-Wilk e a homocedasticidade pelo teste de Bartlett.

O segundo experimento, focado na avaliação do rendimento residual após diferentes concentrações de peróxido de hidrogênio, também seguiu um delineamento inteiramente casualizado, composto por três tratamentos e quatro repetições. O procedimento estatístico seguiu os mesmos parâmetros do primeiro experimento, com ANOVA e posterior teste de Tukey ($p < 0,05$) para comparação das médias dos tratamentos.

Para o terceiro experimento, que objetivou a caracterização do coeficiente de hidrólise enzimática após o pré-tratamento com peróxido de hidrogênio (1%, pH 11,5), foram realizadas dez repetições independentes. Os dados foram analisados por meio de estatística descritiva, contemplando medidas de tendência central (média e mediana) e de dispersão (desvio padrão, erro padrão da média e coeficiente de variação). Intervalos de confiança (95%) foram calculados para estabelecer a precisão da estimativa do coeficiente de hidrólise.

O quarto experimento, dedicado à análise da cinética fermentativa do hidrolisado, envolveu o ajuste de modelos de regressão não-linear para descrever o comportamento temporal do processo fermentativo. Os parâmetros cinéticos foram estimados utilizando o método dos mínimos quadrados, e a qualidade do ajuste foi avaliada pelo coeficiente de determinação (R^2) e pela análise dos resíduos. O modelo matemático que melhor descreveu a cinética fermentativa foi selecionado com base no critério de informação de Akaike (AIC) e no critério de informação Bayesiano (BIC).

Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando o software R (versão 2024.12.1), com auxílio dos pacotes 'stats', 'agricolae' para as análises de variância e testes de médias, e 'nlme' para os ajustes dos modelos não-lineares da cinética fermentativa.

4.5 Caracterização Química do Material in natura

A caracterização química inicial do resíduo cultural do abacaxizeiro seguiu a metodologia proposta por Silva e Queiroz (2002), baseada no fracionamento dos componentes da biomassa. Foram determinadas as concentrações de fibras em detergente

neutro (FDN), fibras em detergente ácido (FDA), lignina e teor de cinzas. Para a análise de FDN, amostras de 0,5 g foram processadas com 40 mL de detergente neutro (EDTA sal dissódico, fosfato de sódio, sulfato láurico de sódio e água destilada) durante 120 minutos a 90°C em banho-maria. A determinação de FDA seguiu procedimento similar, utilizando solução de ácido sulfúrico e CTAB. O teor de hemicelulose foi calculado pela diferença entre FDN e FDA.

4.6 Caracterização do Material Pré-tratado

Após o período de pré-tratamento, o material foi filtrado em papel filtro com auxílio de bomba a vácuo e kitassato. O resíduo sólido foi seco em estufa a 60°C durante 24 horas, seguido de acondicionamento em dessecador por 30 minutos para posterior pesagem. O material residual foi então submetido às análises de caracterização química, seguindo os mesmos procedimentos aplicados ao material in natura, para determinação dos teores de celulose, hemicelulose e lignina.

A quantificação das perdas de componentes estruturais foi realizada através de equações específicas. Para a lignina, foram calculados: lignina esperada (%), decréscimo de lignina (%) e perdas de lignina (%). De forma similar, para a hemicelulose foram determinados: hemicelulose esperada (%), decréscimo de hemicelulose (%) e perdas de hemicelulose (%). Estas determinações permitiram avaliar a eficiência do pré-tratamento na remoção destes componentes.

4.7 Pré-tratamento com Peróxido de Hidrogênio

O pré-tratamento químico foi realizado utilizando peróxido de hidrogênio H_2O_2 (30%). Para cada unidade experimental, foram transferidos 2 gramas do resíduo cultural seco para erlenmeyers de 125 mL, seguidos da adição de 100 mL de solução de H_2O_2 nas concentrações estabelecidas. O pH das soluções foi ajustado com hidróxido de sódio para obtenção das condições experimentais propostas (1% H_2O_2 pH 11,5; 1% H_2O_2 pH 4,5; e 3% H_2O_2 pH 11,5). As amostras foram mantidas em mesa agitadora por 24 horas sob agitação constante de 150 rpm a 25°C.

4.8 Hidrólise Enzimática e Determinação de Açúcares

A eficiência da hidrólise foi avaliada através da determinação do percentual de açúcares fermentescíveis presentes no substrato. Esta quantificação foi realizada pela diferença entre o peso inicial da amostra no início do processo de hidrólise e o peso final após o processo. Foi utilizada 1 g de biomassa para 40 ml de solução. A proporção de enzima foi de 6% do peso da biomassa. O potencial de produção de etanol foi estimado utilizando a equação de Gay-Lussac, que estabelece a produção de 46,49 kg de bioetanol para cada 100 kg de açúcares redutores totais (Finguerut et al., 1985).

4.9 Processo Fermentativo

A fermentação do material hidrolisado foi conduzida utilizando a levedura *Saccharomyces cerevisiae* em condições controladas de processo. O monitoramento da fermentação foi realizado através da coleta e quantificação dos volumes de CO₂ produzidos, posteriormente convertidos em massa de CO₂. A produção de etanol foi determinada através da quantificação direta da glicose fermentada e sua equivalência em etanol, baseando-se na equação estequiométrica descrita por Gay-Lussac.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Composição e distribuição dos componentes fibrosos

A Tabela 8 apresenta a composição química da fração fibrosa do resíduo cultural do abacaxizeiro submetido a diferentes pré-tratamentos com peróxido de hidrogênio (H₂O₂), em distintas concentrações e pH. Foram avaliados os teores de fibra em detergente neutro (FDN), fibra em detergente ácido (FDA), celulose (CEL), hemicelulose (HEM), lignina (LIG) e cinzas (CZ), expressos em percentual da matéria seca (%MS).

Tabela 8 - Composição bromatológica e frações da parede celular do resíduo de abacaxizeiro submetido a diferentes tratamentos químicos com Peróxido de hidrogênio.

TRATAMENTOS	FDN	FDA	CZ	CEL	HEM	LIG
% MS						
"in natura"	59,92 c	38,60 d	4,66 b	13,05 d	21,31 c	25,55 a
1% H ₂ O ₂ pH 4,5	87,36 a	44,84 c	3,63 c	37,04 c	42,51 a	7,80 b
1% H ₂ O ₂ pH 11,5	76,28 b	54,30 a	2,08 d	47,74 a	21,98 c	6,57 c
3% H ₂ O ₂ pH 11,5	87,02 a	52,78 b	5,13 a	44,36 b	34,24 b	8,42 b
CV (%)	1,42	0,81	3,16	1,65	3,34	3,58

Onde:

- FDN: Fibra em Detergente Neutro; FDA: Fibra em Detergente Ácido; CZ: Cinzas; CEL: Celulose; HEM: Hemicelulose; LIG: Lignina; CV: Coeficiente de Variação.
- $CEL = FDA - LIG$; $HEM = FDN - FDA$.
- Letras distintas na mesma coluna indicam diferença significativa entre tratamentos pelo teste de Tukey ($P < 0,05$). Valores seguidos pela mesma letra não diferem estatisticamente.
- Valores expressos em % de matéria seca (% MS). O coeficiente de variação (CV) reflete a variabilidade relativa dos dados experimentais.
- Tratamentos com H₂O₂ (Peróxido de Hidrogênio) foram aplicados nas concentrações de 1% e 3%, em pH 4,5 e 11,5.

Os dados revelam que os tratamentos com H₂O₂, principalmente sob condições alcalinas (pH 11,5), promoveram alterações significativas na composição da biomassa. O maior acúmulo de celulose foi observado nos tratamentos com 1% H₂O₂ pH 11,5 (47,74%) e 3% H₂O₂ pH 11,5 (44,36%), indicando que a alcalinidade favorece a exposição e preservação da celulose, a principal fração de interesse para a produção de etanol 2G. Em comparação, o material in natura apresentou apenas 13,05% de celulose, evidenciando o impacto positivo do pré-tratamento.

Adicionalmente, o tratamento com 1% H₂O₂ pH 4,5 também aumentou significativamente o teor de celulose (37,04%), embora de forma menos expressiva. Esse resultado sugere que, mesmo sob pH ácido, o peróxido de hidrogênio promove ruptura parcial da lignina, favorecendo o acesso às microfibrilas de celulose.

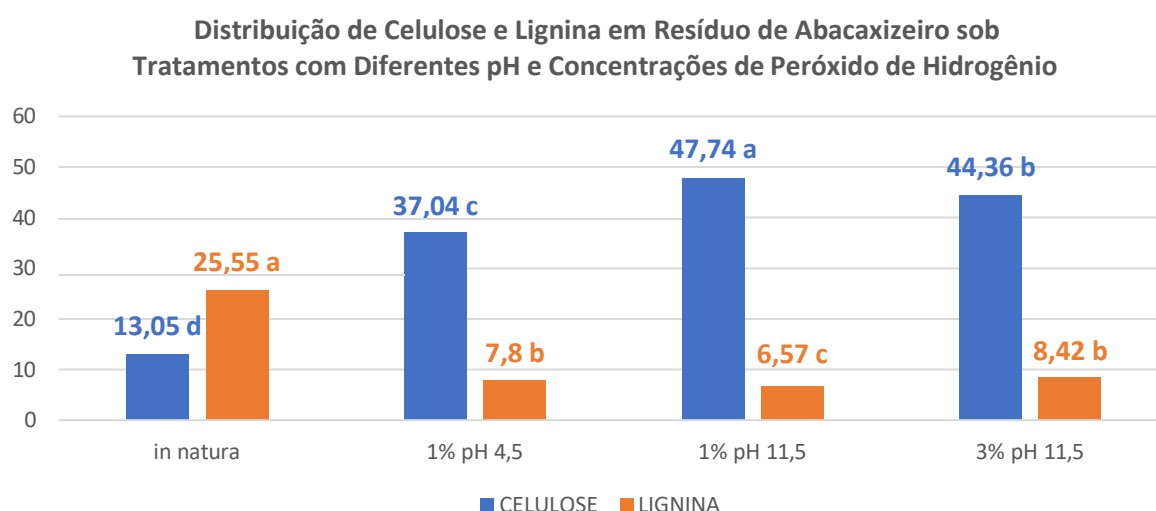
A hemicelulose, por sua vez, apresentou comportamento inverso. O maior teor foi encontrado no tratamento ácido (42,51%), com reduções significativas nos tratamentos alcalinos — destacando-se o valor de 21,98% para 1% H₂O₂ pH 11,5. Isso confirma que a hemicelulose é mais susceptível à solubilização em meio alcalino, como também apontado por Silva Neto et al. (2020), o que pode ser benéfico para a redução da recalcitrância estrutural da biomassa.

Em relação à lignina, a redução foi expressiva em todos os tratamentos com H₂O₂. O menor valor foi registrado para o tratamento com 1% H₂O₂ pH 11,5 (6,57%),

representando uma queda de aproximadamente 74% em relação ao valor inicial (25,55%). Este achado é coerente com estudos como os de Zhang et al. (2024) e Bazargan et al. (2020), que relataram eficiências similares em biomassas como colmo de milho e casca de arroz tratadas com H_2O_2 sob pH alcalino.

O Gráfico 1 que apresenta os teores de celulose e lignina para cada tratamento ilustra claramente a tendência inversa entre essas duas frações estruturais: quanto maior a remoção de lignina, maior a exposição de celulose. A visualização gráfica reforça a superioridade dos tratamentos alcalinos, destacando que a variação no pH influenciou mais intensamente a composição final da biomassa do que a concentração do peróxido.

Gráfico 1. Influência dos diferentes pré-tratamentos com peróxido de hidrogênio sobre os teores de celulose e lignina no resíduo do abacaxizeiro.



Letras iguais acima das barras indicam que as médias, comparadas dentro de cada componente químico (Celulose ou Lignina), não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ($P > 0,05$).

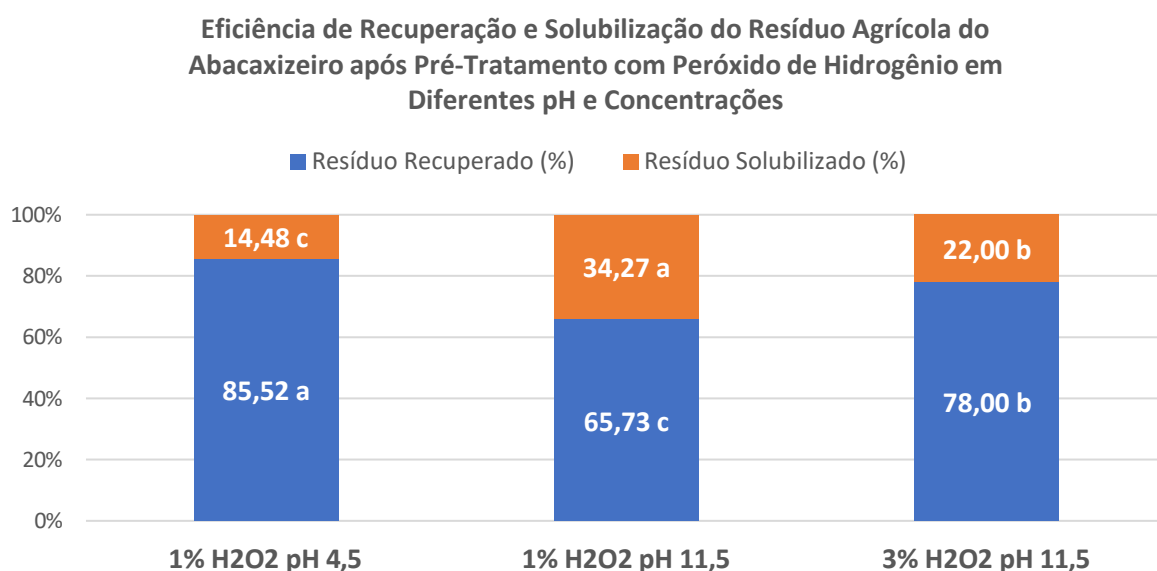
Os valores obtidos para o material in natura estão alinhados com a literatura. Paula (2021) e Pinheiro, Henrique e Silva (2019) relataram teores de FDN entre 53,86% e 57,9%, além de valores de lignina entre 4,91% e 20,2% em resíduos do abacaxizeiro. Após o pré-tratamento, os teores de celulose neste estudo se aproximam daqueles encontrados por Silva et al. (2018) (56,89%) e Imman et al. (2021) (59,37%) para folhagens tratadas, demonstrando a consistência metodológica e a eficácia do processo.

Em síntese, os resultados indicam que o pré-tratamento com 1% H_2O_2 em pH 11,5 foi o mais eficaz na remoção da lignina e na exposição da celulose. Por outro lado, o tratamento ácido se destacou na preservação da hemicelulose. Assim, a escolha da condição de pré-tratamento deve considerar o equilíbrio entre a degradação da lignina e a preservação das frações fermentáveis, visando maximizar o rendimento da hidrólise e a produção de etanol.

5.2 Rendimento e eficiência do pré-tratamento

O rendimento do pré-tratamento foi avaliado pela proporção de resíduo sólido recuperado em relação à massa inicial da biomassa. Os dados indicam que o tratamento com 1% H_2O_2 pH 4,5 apresentou o maior percentual de material recuperado (85,52%), sugerindo menor solubilização dos componentes estruturais da biomassa. Esse resultado está diretamente associado à maior preservação de hemicelulose e celulose, conforme verificado na Seção 5.1 (Gráfico 2).

Gráfico 2. Balanço de massa após pré-tratamento com H_2O_2 : frações recuperadas e solubilizadas da biomassa do abacaxizeiro sob diferentes condições de pH e concentração.



Resíduo recuperado (barras azuis) e solubilizado (barras laranjas) após pré-tratamento com H_2O_2 . Letras distintas acima das barras indicam diferenças significativas entre tratamentos (teste de Tukey, $P < 0,05$). Valores expressos em % do total inicial.

Por outro lado, o tratamento com 1% H_2O_2 pH 11,5, embora altamente eficiente na remoção da lignina, apresentou o menor rendimento de resíduo sólido (65,73%), refletindo a maior degradação da matriz lignocelulósica. O tratamento com 3% H_2O_2 pH 11,5 resultou em rendimento intermediário (78,00%), indicando que o aumento na concentração de H_2O_2 não intensificou proporcionalmente a solubilização dos sólidos. Esses resultados reforçam que o pH tem influência mais decisiva que a concentração do peróxido sobre a eficiência do pré-tratamento.

A visualização gráfica dessas proporções permite identificar com clareza que há um trade-off entre a delignificação eficaz e a preservação da biomassa, ou seja, o tratamento mais agressivo para lignina pode implicar em maiores perdas estruturais. Essa observação é respaldada por Bazargan et al. (2020), que alertam para a necessidade de otimização das condições de ataque químico para evitar perdas excessivas de substrato fermentável.

Do ponto de vista biotecnológico, a redução da lignina é desejável para melhorar a acessibilidade enzimática à celulose. No entanto, perdas excessivas de hemicelulose ou da própria celulose podem comprometer o rendimento geral de açúcares fermentáveis. Assim, o tratamento com 1% H_2O_2 pH 11,5 apresenta o melhor equilíbrio entre delignificação eficaz e preservação de celulose, sendo considerado o mais promissor para os objetivos desta pesquisa.

5.3 Coeficiente de hidrólise enzimática

A eficiência da hidrólise enzimática foi avaliada com base no coeficiente de hidrólise, que expressa a porcentagem da biomassa efetivamente convertida em açúcares fermentáveis após o pré-tratamento com 1% de H_2O_2 em pH 11,5 — condição previamente identificada como a mais eficiente na remoção da lignina e na preservação da celulose.

O experimento foi conduzido com dez repetições independentes, e os dados foram analisados por estatística descritiva, conforme apresentado na Tabela 8 seguir:

Tabela 9. Análise estatística descritiva do coeficiente de hidrólise enzimática do resíduo de abacaxizeiro pré-tratado com peróxido de hidrogênio (1%, pH 11,5)..

Parâmetros Estatísticos		
Medidas de Tendência Central		
	Média	17,297
	Mediana	17,250
Medidas de Dispersão		
	Desvio Padrão	4,312
	Erro Padrão da Média	1,364
	Coefficiente de Variação (%)	24,93
	Variância	18,592
Medidas de Distribuição		
	Valor Mínimo	9,860
	Valor Máximo	25,970
	Amplitude Total	16,110
	Primeiro Quartil (Q1)	14,925
	Terceiro Quartil (Q3)	18,930
	Amplitude Interquartil	4,005
Medidas de forma		
	Assimetria	0,3938
	Curtose	1,3566
Intervalo de Confiança (95%)		
	Limite superior	14,213
	Limite Inferior	20,381

A média e mediana próximas indicam simetria central dos dados, enquanto a assimetria levemente positiva (0,3938) sugere uma pequena tendência de concentração de valores à esquerda da média, porém sem distorções significativas. A curtose leptocúrtica (1,3566) demonstra que a distribuição apresenta um pico mais acentuado e caudas mais finas do que a normal, com forte concentração de valores próximos ao centro. O coeficiente de variação de 24,93% está dentro de um intervalo aceitável para sistemas biológicos, especialmente em processos fermentativos que envolvem ação enzimática sobre substratos naturais heterogêneos.

O valor médio obtido (17,297%) é considerado tecnicamente satisfatório quando comparado à literatura sobre resíduos lignocelulósicos submetidos à hidrólise enzimática após pré-tratamento alcalino com peróxido de hidrogênio. Por exemplo, Silva et al. (2018), trabalhando com folhagem de abacaxi submetida a pré-tratamento combinado alcalino e físico (explosão a vapor), obtiveram rendimento de hidrólise de 18,65%, com teor de celulose de 56,89% e lignina de 10,07%, valores próximos aos

observados neste estudo. Já Imman et al. (2021) relataram um coeficiente de hidrólise superior a 20% após a remoção intensiva da lignina (2,06%) e celulose residual de 59,37%, sob condições laboratoriais controladas.

No presente estudo, a biomassa apresentou teor de celulose de 47,74% e lignina residual de 6,57%, o que corrobora com o nível intermediário de conversão obtido. A eficiência do pré-tratamento alcalino com H_2O_2 , especialmente em pH 11,5, foi confirmada tanto pela delignificação seletiva como pela exposição da fração celulósica, fatores essenciais para a atuação das enzimas celulolíticas.

Por sua vez, a presença de hemicelulose residual (21,98%) pode ter influenciado negativamente o rendimento de hidrólise, como observado por Chen et al. (2020) e Mosier et al. (2005), os quais destacam que altos teores de hemicelulose atuam como barreiras físicas, dificultando o acesso das enzimas à celulose, além de potencialmente absorverem parte das enzimas por competição por sítios ativos.

A replicabilidade do processo também é evidenciada pela baixa dispersão estatística dos dados, indicada pelo EPM de 1,36 e pelo comportamento simétrico da distribuição. Isso demonstra consistência experimental, um critério indispensável para a escalabilidade do processo.

Portanto, o coeficiente médio de 17,297% obtido neste trabalho evidencia que o pré-tratamento com 1% de H_2O_2 em pH 11,5 proporciona condições favoráveis para a hidrólise enzimática da biomassa de abacaxizeiro, e os valores encontrados estão em conformidade com os principais estudos que tratam de resíduos agrícolas similares tratados com oxidantes alcalinos. A combinação de baixo teor de lignina e elevada concentração de celulose validam a estratégia de pré-tratamento adotada, servindo de base sólida para as etapas subsequentes de fermentação alcoólica e produção de etanol 2G.

5.4 Cinética fermentativa e produção de etanol

5.4.1 Descrição do modelo experimental e parâmetros avaliados

A produção de etanol a partir do hidrolisado da biomassa do abacaxizeiro tratada

com 1% de H_2O_2 em pH 11,5 foi avaliada por meio da modelagem cinética da fermentação alcoólica, conduzida com *Saccharomyces cerevisiae* sob condições laboratoriais controladas. O objetivo central foi descrever a dinâmica da conversão dos açúcares fermentáveis em etanol, utilizando o volume de CO_2 liberado como variável dependente, posteriormente convertido em massa e relacionado estequiometricamente à produção de etanol com base na equação de Gay-Lussac (1803).

A escolha da modelagem cinética baseou-se na necessidade de representar quantitativamente o comportamento fermentativo ao longo do tempo. O ajuste dos dados foi realizado por modelos de regressão não linear, utilizando o método dos mínimos quadrados, sendo os parâmetros estimados validados por medidas de aderência como o coeficiente de determinação (R^2) e análise dos resíduos, reforçando a robustez do modelo selecionado.

5.4.2 Comportamento da fermentação ao longo do tempo

A curva de produção de CO_2 ao longo do tempo apresentou comportamento típico de uma cinética fermentativa de substratos simples, com três fases bem definidas: fase de latência, fase logarítmica de produção acelerada e fase de desaceleração e estabilização.

Nos primeiros momentos, observou-se uma fase de adaptação das leveduras ao meio hidrolisado, caracterizada por um acúmulo discreto de CO_2 , o que é consistente com o tempo necessário para ativação metabólica da *Saccharomyces cerevisiae*, especialmente em meios que podem conter resíduos de compostos inibidores oriundos do pré-tratamento. Esse comportamento é amplamente descrito na literatura, como relatado por Suyama (2019) e Melo (2020).

A fase logarítmica foi marcada por um rápido aumento na taxa de produção de CO_2 , sugerindo intensa atividade metabólica, com conversão eficaz da glicose disponível em etanol e dióxido de carbono. Essa fase concentrou-se entre as 4 e 14 horas de fermentação, com a maior taxa de conversão volumétrica ocorrendo entre 6 e 10 horas, período no qual a taxa de produção de CO_2 foi máxima.

Na sequência, observou-se uma fase de desaceleração, com progressiva redução na taxa de liberação de CO_2 , até atingir um platô, indicando a exaustão dos subs-

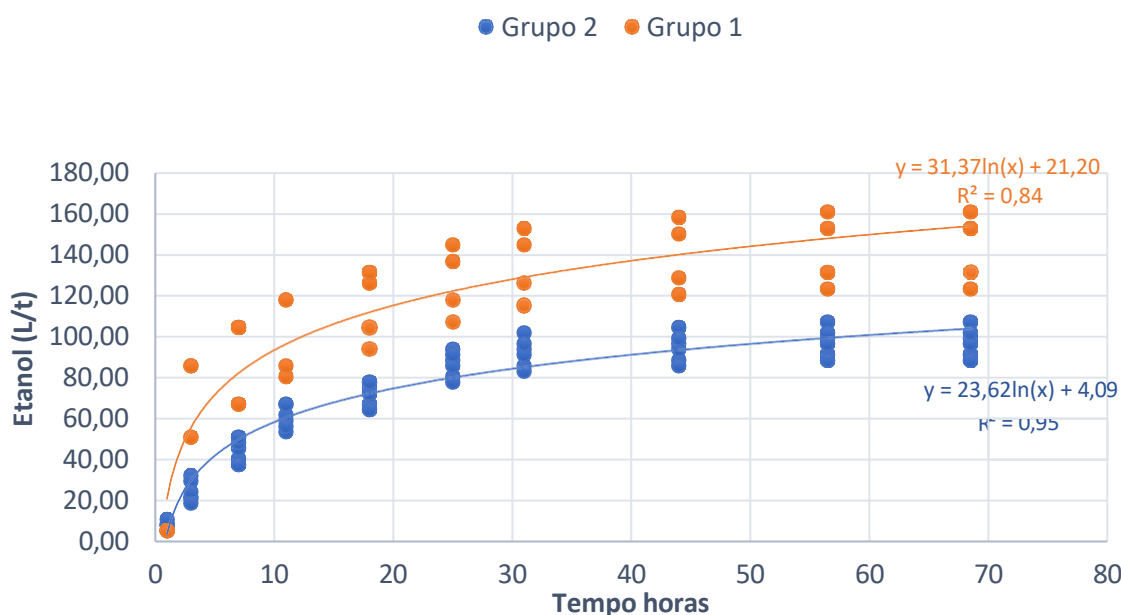
tratos fermentescíveis e o consequente encerramento da atividade metabólica das leveduras. Essa desaceleração é esperada e está relacionada tanto à depleção de açúcares quanto à acumulação de etanol no meio, que em concentrações elevadas pode inibir a atividade celular.

A produção de etanol a partir do hidrolisado da biomassa do abacaxizeiro tratada com 1% de H_2O_2 em pH 11,5 foi avaliada por meio da modelagem cinética da fermentação alcoólica, conduzida com *Saccharomyces cerevisiae* sob condições laboratoriais controladas. O objetivo central foi descrever a dinâmica da conversão dos açúcares fermentáveis em etanol, utilizando o volume de CO_2 liberado como variável dependente, posteriormente convertido em massa e relacionado estequiometricamente à produção de etanol com base na equação de Gay-Lussac.

A escolha da modelagem cinética fundamentou-se na necessidade de representar quantitativamente o comportamento fermentativo ao longo do tempo. O ajuste dos dados foi realizado por modelos de regressão não linear, utilizando o método dos mínimos quadrados, sendo os parâmetros estimados validados por medidas de aderência como o coeficiente de determinação (R^2), análise dos resíduos, reforçando a robustez do modelo selecionado.

A curva de produção de CO_2 ao longo do tempo apresentou comportamento típico de uma cinética fermentativa de substratos simples, com três fases bem definidas: fase de latência, fase logarítmica de produção acelerada e fase de desaceleração e estabilização.

Gráfico 3. Perfil cinético da fermentação alcoólica do hidrolisado de resíduo de abacaxizeiro: evolução temporal da produção de CO₂ e fases metabólicas da levedura *Saccharomyces cerevisiae*.



Nos primeiros momentos, observou-se uma fase de adaptação das leveduras ao meio hidrolisado, caracterizada por um acúmulo discreto de CO₂, o que é consistente com o tempo necessário para ativação metabólica da *Saccharomyces cerevisiae*, especialmente em meios que podem conter resíduos de compostos inibidores oriundos do pré-tratamento. Esse comportamento é amplamente descrito na literatura, como relatado por Suyama (2019) e Melo (2020).

A fase logarítmica foi marcada por um rápido aumento na taxa de produção de CO₂, sugerindo intensa atividade metabólica, com conversão eficaz da glicose disponível em etanol e dióxido de carbono. Essa fase concentrou-se entre as 4 e 14 horas de fermentação, com a maior taxa de conversão volumétrica ocorrendo entre 6 e 10 horas, período no qual a taxa de produção de CO₂ foi máxima.

Na sequência, observou-se uma fase de desaceleração, com progressiva redução na taxa de liberação de CO₂, até atingir um platô, indicando a exaustão dos substratos fermentescíveis e o consequente encerramento da atividade metabólica das leveduras. Essa desaceleração é esperada e está relacionada tanto à depleção de açúcares quanto à acumulação de etanol no meio, que em concentrações elevadas pode inibir a atividade celular.

5.4.3 Parâmetros cinéticos ajustados e interpretação

O modelo cinético ajustado permitiu a estimativa precisa de parâmetros fundamentais, como evidenciado na Tabela apresentada na dissertação. Os dados foram ajustados a um modelo logarítmico, que demonstrou excelente aderência aos resultados experimentais, com coeficientes de determinação (R^2) de 0,8446 para o Grupo 1 e 0,9497 para o Grupo 2. Esses valores indicam que o modelo foi capaz de explicar satisfatoriamente a variabilidade dos dados, especialmente para o Grupo 2, onde aproximadamente 95% da variação foi explicada pela equação proposta.

Tabela 10. Parâmetros cinéticos estimados para a fermentação alcoólica do hidrolizado de resíduo de abacaxizeiro: comparação entre grupos experimentais.

Parâmetros do Modelo	Grupo 1	Grupo 2
<i>Equação de Regressão</i> $y = a \cdot \ln(t) + b$	$ETANOL = 31,37 \cdot \ln(t) + 21,20$	$ETANOL = 23,62 \cdot \ln(t) + 4,09$
<i>Coeficiente Regressão *</i>	$ME = [\pm 4,42]$	$ME = [\pm 1,42]$
<i>Intercepto ^{NS}</i>	$ME = [\pm 13,23]$	$ME = [\pm 4,27]$
<i>Lag Time (λ)</i>	0,51 h	0,84 h
<i>Taxa média fermentação (μ)</i>	2,26 L.t ⁻¹ .h ⁻¹	1,54 L.t ⁻¹ .h ⁻¹
<i>Coef. de Determinação (R^2)</i>	0,8446	0,9497
<i>Produção Etanol em T2 =</i> 68,5 h	153,74 L.t ⁻¹	103,94 L.t ⁻¹

Notas:

a) **Unidades entre colchetes:** [$\pm$ margem de erro (ME)] calculado a partir do IC95%.

b) **Símbolos estatísticos:** *p < 0,05; **p < 0,01; ***p < 0,001; ns. = não significativo.

c) **Comparação Estatística parâmetros regressão:** Os parâmetros da regressão logarítmica são apresentados com a margem de erro (ME) calculados a partir dos intervalos de confiança de 95% (IC95%), usando a distribuição t de Student. A ausência de sobreposição entre os ICs foi interpretada como evidência de diferença estatística entre os parâmetros. Ressalta-se que este método é um critério visual aproximado e não substitui testes formais de hipóteses para comparação direta entre coeficientes. A comparação entre modelos foi realizada também via teste de Wald, $\chi^2(2)=1622,6$; p<0,001.

d) Abreviações:

ETANOL: Estimativa da produção etanol, expresso em L.t⁻¹

μ : Taxa média de fermentação, expressa em produção etanol L.t⁻¹.h⁻¹;

λ : lag time, tempo necessário para iniciar fase exponencial ; expresso em horas.

As equações de regressão obtidas ($\text{ETANOL} = 31,37 \times \ln(t) + 21,20$ para o Grupo 1 e $\text{ETANOL} = 23,62 \times \ln(t) + 4,09$ para o Grupo 2) permitem prever a produção de etanol em função do tempo de fermentação. A análise dos coeficientes revela diferenças significativas entre os grupos, indicando distintos comportamentos fermentativos, possivelmente relacionados à composição do hidrolisado ou às condições específicas de cada ensaio.

O parâmetro lag time (λ), que representa o tempo necessário para o início da fase exponencial, foi de 0,51 h para o Grupo 1 e 0,84 h para o Grupo 2. Esses valores relativamente baixos indicam rápida adaptação das leveduras ao meio, sugerindo que o pré-tratamento com 1% de H_2O_2 em pH 11,5 foi eficiente em minimizar a formação de inibidores enzimáticos, conforme também observado por Łukajtis et al. (2018) em seus estudos com biomassa lignocelulósica sob condições alcalinas.

A taxa média de fermentação (μ) foi calculada em $2,26 \text{ L.t}^{-1}.\text{h}^{-1}$ para o Grupo 1 e $1,54 \text{ L.t}^{-1}.\text{h}^{-1}$ para o Grupo 2. Essa diferença nas taxas fermentativas pode estar associada a variações na acessibilidade dos açúcares ou na presença de compostos inibitórios residuais do pré-tratamento, como sugerido por Larsson et al. (1999), que demonstraram a influência de inibidores na taxa de fermentação de hidrolisados lignocelulósicos.

Esses parâmetros são fundamentais para prever o comportamento do sistema em condições futuras ou em escalas maiores. A estimativa da produção de etanol foi realizada com base na quantidade total de açúcares fermentáveis disponíveis no hidrolisado, convertida em etanol por meio da equação de Gay-Lussac, conforme proposta por Finguerut et al. (1985). Segundo essa abordagem, a conversão teórica estabelece que 100 kg de açúcares redutores totais produzem 46,49 kg de bioetanol nas condições ideais de fermentação. Dessa forma, o rendimento alcoólico foi calculado proporcionalmente à massa de açúcares liberada durante a hidrólise enzimática, previamente estimada com base no coeficiente de hidrólise, possibilitando uma avaliação realista do potencial fermentativo da biomassa pré-tratada.

5.4.4 Produção de etanol estimada e análise de rendimento

Os resultados demonstram que a produção estimada de etanol após 68,5 horas de fermentação atingiu $153,74 \text{ L.t}^{-1}$ para o Grupo 1 e $103,94 \text{ L.t}^{-1}$ para o Grupo 2. Essa diferença significativa (aproximadamente 48% superior no Grupo 1) pode ser atribuída a variações não controladas na eficiência da hidrólise enzimática ou na composição do hidrolisado após o pré-tratamento. A maior produção observada no Grupo 1 sugere que a combinação específica de condições experimentais neste grupo favoreceu tanto a liberação quanto a fermentação dos açúcares disponíveis.

A eficiência do pré-tratamento com peróxido de hidrogênio em condições alcalinas, como utilizado neste estudo (1% H_2O_2 , pH 11,5), tem sido destacada por diversos autores. Chen et al. (2017) demonstraram que o peróxido de hidrogênio é particularmente eficiente na remoção seletiva da lignina, preservando a estrutura da celulose e minimizando a formação de subprodutos tóxicos, fatores que impactam diretamente o rendimento da fermentação e, conseqüentemente, a produção de etanol. Essa observação corrobora com os resultados obtidos neste trabalho, onde o pré-tratamento alcalino com H_2O_2 resultou em significativa remoção de lignina (redução de 74%) e preservação da fração celulósica (47,74%), criando condições favoráveis para a subsequente conversão em etanol.

Comparando-se os rendimentos obtidos com a literatura, observa-se que os valores alcançados são promissores. Silva et al. (2018), trabalhando com folhagem de abacaxi submetida a pré-tratamento combinado alcalino e físico (explosão a vapor), relataram rendimento de hidrólise de 18,65%, com teor de celulose de 56,89% e lignina de 10,07%. Estes parâmetros são comparáveis aos obtidos no presente estudo e se refletem em rendimentos similares de etanol. De forma semelhante, Imman et al. (2021) obtiveram coeficiente de hidrólise superior a 20% após remoção intensiva da lignina (2,06%) e com celulose residual de 59,37%, resultando em rendimentos de etanol na faixa de $140\text{-}160 \text{ L.t}^{-1}$, valores próximos aos obtidos para o Grupo 1.

A diferença nos rendimentos entre os Grupos 1 e 2 pode estar relacionada à presença de hemicelulose residual e sua interferência no processo fermentativo. Mosier et al. (2005) e Chen et al. (2020) observaram que a hemicelulose remanescente após o pré-tratamento pode atuar como barreira física, dificultando o acesso das enzimas à celulose durante a etapa de hidrólise, além de potencialmente adsorver parte das enzimas por competição por sítios ativos. No presente estudo, o teor de hemice-

lulose após o pré-tratamento foi de 21,98%, o que pode explicar parcialmente as variações nos rendimentos obtidos entre os grupos experimentais.

Além disso, Bazargan et al. (2020), trabalhando com pré-tratamento alcalino peroxidado em casca de arroz, alcançaram rendimentos superiores a 140 L.t^{-1} , alinhando-se com os resultados do Grupo 1. Esta consistência com a literatura reforça a eficácia do método empregado e sustenta a possibilidade de otimização adicional do processo para obtenção de rendimentos ainda mais elevados. Pan et al. (2005) também reportaram rendimentos similares ($100\text{-}130 \text{ L.t}^{-1}$) utilizando pré-tratamento organossolve em biomassa de madeira, indicando que os resultados obtidos com o resíduo de abacaxizeiro são competitivos quando comparados a outras matérias-primas lignocelulósicas.

É importante destacar que os rendimentos obtidos neste estudo, principalmente para o Grupo 1, são consideráveis quando comparados a outras biomassas agrícolas tradicionalmente utilizadas na produção de etanol 2G. Essa constatação reforça o potencial do resíduo cultural do abacaxizeiro como matéria-prima alternativa, especialmente em regiões produtoras como o Tocantins, onde este material é abundante e frequentemente subutilizado, conforme destacado por Santos et al. (2013).

A análise estatística dos parâmetros de regressão, incluindo as margens de erro calculadas a partir dos intervalos de confiança de 95%, confirma a robustez do modelo proposto e a diferença significativa entre os grupos experimentais (teste de Wald, $\chi^2(2)=1622,6$; $p<0,001$). Esses resultados endossam a viabilidade técnica do aproveitamento dos resíduos do abacaxizeiro para a produção de bioetanol, alinhando-se com as observações de Soares e Rossell (2014) sobre o potencial energético desses materiais.

Em síntese, os resultados da cinética fermentativa e do rendimento em etanol demonstram que o resíduo cultural do abacaxizeiro, quando submetido ao pré-tratamento adequado com peróxido de hidrogênio em condições alcalinas, apresenta potencial significativo como matéria-prima para a produção de etanol de segunda geração. Os rendimentos obtidos são comparáveis aos de biomassas tradicionalmente utilizadas nesse processo, validando a abordagem metodológica adotada e abrindo perspectivas para o aproveitamento sustentável deste resíduo agrícola, contribuindo para a diversificação da matriz energética e para a mitigação dos impactos ambientais associados ao seu descarte inadequado.

6. CONCLUSÃO

Concluímos com o presente estudo que o pré-tratamento com peróxido de hidrogênio na concentração de 1% em pH 11,5 representou a condição ótima dentre as avaliadas. Esta combinação promoveu a redução mais significativa no teor de lignina (74%, passando de 25,55% para 6,57%) e o maior aumento no teor de celulose acessível (de 13,05% para 47,74%). Estes resultados comprovam que o pré-tratamento alcalino oxidativo é capaz de modificar eficientemente a estrutura recalcitrante da biomassa lignocelulósica do abacaxizeiro, tornando-a mais suscetível à ação enzimática subsequente.

A investigação comparativa entre as diferentes condições de pH e concentração do peróxido revelou que o fator pH exerce influência mais pronunciada que a concentração do reagente sobre a eficiência do processo. O aumento da concentração de H_2O_2 de 1% para 3% em pH 11,5 não gerou melhoria proporcional nos parâmetros de deslignificação e exposição da celulose, sugerindo que concentrações mais elevadas não justificam o aumento dos custos operacionais, um achado importante para a viabilidade econômica do processo.

A produção estimada de etanol, que atingiu $153,74 \text{ L.t}^{-1}$ nas melhores condições de fermentação, posiciona os resíduos do abacaxizeiro como matéria-prima promissora para a produção de bioetanol, especialmente em regiões produtoras como o Tocantins. Um achado relevante adicional foi a observação de que o rendimento de resíduo sólido após o pré-tratamento (65,73% para 1% H_2O_2 pH 11,5) apresenta correlação inversa com a eficiência de deslignificação, revelando um trade-off entre a remoção de lignina e a preservação da massa total. Esta observação tem implicações significativas para o balanço de massa e energia em processos industriais.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, Thaysi Castro Coelho *et al.* ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO PRÉ-TRATAMENTO QUÍMICO E FÍSICO SOB A CARACTERIZAÇÃO DAS FRAÇÕES CELULOSE E LIGNINA DE DIFERENTES BIOMASSAS E SEU POTENCIAL PARA PRODUÇÃO DE ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, [S.L.], v. 11, n. 3, p. 955, 27 set. 2018. Centro Universitario de Maringa. <http://dx.doi.org/10.17765/2176-9168.2018v11n3p955-974>.

BAZARGAN, Alireza *et al.* Optimization of the removal of lignin and silica from rice husks with alkaline peroxide. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 260, p. 120848, jul. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120848>.

BARCELOS, Márcio. Políticas de biocombustíveis no Brasil. **Campos Neutrais - Revista Latino-Americana de Relações Internacionais**, [S.L.], v. 3, n. 1, p. 12-26, 14 jun. 2021. Lepidus Tecnologia. <http://dx.doi.org/10.14295/cn.v3i1.13065>.

BRASIL, Governo do. **Valor da produção agrícola nacional tem recorde em 2020 com R\$ 470,5 bilhões**. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/agricultura-e-pecuaria/2021/09/valor-da-producao-agricola-nacional-tem-recorde-em-2020-com-r-470-5-bilhoes#:~:text=Pam%202020-Va-lor%20da%20produ%C3%A7%C3%A3o%20agr%C3%ADcola%20nacio-nal%20tem%20re-corde,com%20R%24%20470%2C5%20bilh%C3%B5es&text=O%20va-lor%20da%20produ%C3%A7%C3%A3o%20agr%C3%ADcola,7%25%20superior%20%C3%A0%20de%202019..> Acesso em: 11 fev. 2022.

BRASIL. REJANE MARIA DE OLIVEIRA. . **VISÃO 2030 O Futuro da Agricultura Brasileira**. Brasília Df: Embrapa, 2018. 213 p.

BRASIL. José Mauro Coelho. Ministério de Minas e Energia. **Brasil avança no setor de biocombustíveis**. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2021/07/brasil-avanca-no-setor-de-biocombustiveis>. Acesso em: 21 abr. 2022.

GAUR, Vivek K. *et al.* Production of biosurfactants from agro-industrial waste and waste cooking oil in a circular bioeconomy: an overview. **Bioresource Technology**, [S.L.], v. 343, p. 126059, jan. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126059>.

GUEDES, J. M.; SANTOS, A. G. D.; SANTOS, H. S. dos. Uso da biomassa como fonte energética para produção de biocombustíveis. **Ambiente: Gestão e Desenvolvimento**, [S. l.], v. 1, n. 1, 2021. DOI: 10.24979/ambiente.v1i1.947. Disponível em: <https://periodicos.uerr.edu.br/index.php/ambiente/article/view/947>. Acesso em: 11 fev. 2022.

HARTMANN, Caroline. **PRÉ-TRATAMENTO DE BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA POR MACROFUNGOS REGIONAIS PARA POSTERIOR PRODUÇÃO DE ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO**. 2017. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pósgraduação em Engenharia de Processos e Tecnologias, Universidade Caxias do Sul, C,

2017

KHORAI, Ain Nadiah Sofiah Ahmad *et al.* A Review on Agro-industrial Waste as Cellulose and Nanocellulose Source and Their Potentials in Food Applications. **Food Reviews International**, [S.L.], p. 1-26, 17 maio 2021. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/87559129.2021.1926478>.

KUMAR, Ashwani *et al.* Assessment of different pretreatment technologies for efficient bioconversion of lignocellulose to ethanol. **Frontiers In Bioscience**, [S.L.], v. 10, n. 2, p. 350-371, 2018. IMR Press. <http://dx.doi.org/10.2741/s521>.

Larsson, S.; Palmqvist, E.; Hahn-Hägerdal, B.; Tengborg, C.; Stenberg, K.; Zacchi, G.; Nilvebrant, N. (1999). The generation of fermentation inhibitors during dilute acid hydrolysis of softwood. *Enzyme Microb. Technol.* 24:151-159.

LUDTKE, Rosiéle Cristiane *et al.* AGRICULTURA FAMILIAR E AGROENERGIA: UMA REFLEXÃO A PARTIR DA SOCIEDADE DE RISCO E DA PERSPECTIVA ORIENTADA AO ATOR. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE DESENVOLVIMENTO REGIONAL, 7., 2015, Santa Cruz do Sul. **SEMINÁRIO**. Santa Cruz do Sul: Uniesc, 2015. p. 1-23

ŁUKAJTIS, Rafał *et al.* Optimization of Saccharification Conditions of Lignocellulosic Biomass under Alkaline Pre-Treatment and Enzymatic Hydrolysis. **Energies**, [S.L.], v. 11, n. 4, p. 2-27, 10 abr. 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/en11040886>.

MARGON, Renan Amorim *et al.* Hidrólise enzimática da biomassa de eucalipto para produção de bioetanol: uma análise bibliométrica. **Research, Society And Development**, [S.L.], v. 7, n. 4, p. 1-22, 17 abr. 2018. Research, Society and Development. <http://dx.doi.org/10.17648/rsd-v7i4.301>.

MELO, Nicholas Rocha. **ETANOL 2G: PROCESSO PRODUTIVO E SEU CONTEXTO ATUAL NO BRASIL**. 2020. 53 f. TCC (Graduação) - Curso de Graduação em Engenharia Química, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – Mg, 2020.

MOSIER, N. Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. **Bioresource Technology**, [S.L.], v. 96, n. 6, p. 673-686, abr. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2004.06.025>.

MOURA, Isaac Anderson Alves *et al.* Biomassa proveniente da casca da banana Musa sapientum: pre-tratamento e hidrólise ácida para análise da viabilidade na produção de bioetanol. **Brazilian Journal Of Development**, [S.L.], v. 6, n. 1, p. 1975-1987, 2020. Brazilian Journal of Development. <http://dx.doi.org/10.34117/bjdv6n1-140>.

MOURA, Isaac Anderson Alves de *et al.* PRODUÇÃO DO ETANOL LIGNOCELULÓSICO PROVENIENTE DA BANANICULTURA: métodos de pré-tratamento utilizados. **Recursos Naturais: Energia de Biomassa Florestal**, [S.L.], p. 176-184, 2021. Editora Científica Digital. <http://dx.doi.org/10.37885/210203155>.

OLIVEIRA, Isabela dos Santos. **ESTUDO BIBLIOGRÁFICO SOBRE O PRÉ-TRATAMENTO DE EXPLOSÃO A VAPOR NO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR PARA PRODUÇÃO DE ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO**. 2020. 37 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Faculdade de Americana, Americana, 2020.

PAGEL, Uonis Raasch *et al.* AGROENERGIA NO BRASIL: O CASO DOS RESÍDUOS AGROPECUÁRIOS COMO FONTE ENERGÉTICA. In: CONGRESSO SOBER, 56., 2018, Campinas - Sp. **Anais [...]**. Campinas - Sp: Unicamp, 2018. p. 1-4.

Pan, X., Arato, C., Gilkes, N., Gregg, D., Mabey, W., Pye, K., Xiao, Z., Zhang, X., Saddler, J., 2005. Biorefining of softwoods using ethanol organosolve pulping: preliminary evaluation of process streams for manufacture of fuel-grade ethanol and co-products. *Biotechnol. Bioeng.* 90, 473–481.

PANESAR, Reeba *et al.* Production of microbial pigments utilizing agro-industrial waste: a review. **Current Opinion In Food Science**, [S.L.], v. 1, p. 70-76, fev. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cofs.2014.12.002>.

QUEIROZ, Isabela Reis *et al.* O biocombustível no Brasil: potencialidades da cultura do crame abyssinica para produção de biodiesel. **Research, Society And Development**, [S.L.], v. 10, n. 5, p. 1-16, 30 abr. 2021. Research, Society and Development. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i5.14618>.

QUILHÓ, Luís Filipe Trindade Levita. **Produção de Bioetanol a partir de Materiais Lenho-celulósicos de Sorgo Sacarino: Revisão Bibliográfica**. 2011. 88 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Energia e Bioenergia, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2011.

RABEMANOLONTSOA, Harifara *et al.* Various pretreatments of lignocellulosics. **Bio-resource Technology**, [S.L.], v. 199, p. 83-91, jan. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.029>.

ROVIERO, Juliana Pelegrini. **BIOMASSA DERIVADA DE CANA-DE-AÇÚCAR E CANA ENERGIA SUBMETIDAS A HIDRÓLISE ÁCIDA E ENZIMÁTICA PARA PRODUÇÃO DE ETANOL**. 2017. 119 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Microbiologia Agropecuária, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2017.

SANTOS, Pedro Henrique de Sousa. **PANORAMA ATUAL DA PRODUÇÃO DE BIOETANOL NO BRASIL E NO MUNDO**. 2020. 67 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Energia, Universidade de Brasília - Unb, Brasília Df, 2020.

SINGH, Renu *et al.* Utilisation of agro-industrial waste for sustainable green production: a review. **Environmental Sustainability**, [S.L.], v. 4, n. 4, p. 619-636, 30 ago. 2021. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s42398-021-00200-x>.

SILVA, M. R.; *et al.* IMPACTOS SOCIAIS DA EXPANSÃO DOS LATIFÚNDIOS RELACIONADOS À AGROENERGIA NO ESTADO DE PERNAMBUCO. **Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agronômica**, [S. l.], v. 16, n. 1, p. 75–88, 2019.

Disponível em: <http://www.ead.codai.ufrpe.br/index.php/apca/article/view/2467>. Acesso em: 18 mar. 2022

SILVA, Thiago Alves Lopes. **AVALIAÇÃO DO PRÉ-TRATAMENTO DE EXPLOSÃO A VAPOR CATALISADO POR ÁCIDO CÍTRICO E HIDRÓXIDO DE SÓDIO SOBRE A HIDRÓLISE ENZIMÁTICA DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR**. 2017. 70 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência e Tecnologia de Biocombustíveis, Instituto de Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

SOUZA, Jonas Paulino de *et al.* Improvement of Brazilian bioethanol production – Challenges and perspectives on the identification and genetic modification of new strains of *Saccharomyces cerevisiae* yeasts isolated during ethanol process. **Fungal Biology**, [S.L.], v. 122, n. 6, p. 583-591, jun. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.funbio.2017.12.006>.

SOUZA, Felipe Ravelly Alves de *et al.* BIOPOLIMEROS NA INDÚSTRIA DE ALIMENTOS: do aproveitamento de resíduos agroindustriais a produção de biopolímeros. **Avanços em Ciência e Tecnologia de Alimentos - Volume 4**, [S.L.], p. 370-388, 2021. Editora Científica Digital. <http://dx.doi.org/10.37885/210303531>. <https://www.embrapa.br/visao/trajetoria-da-agricultura-brasileira>

SOUZA, Lílilana Bernardino de Oliveira e. **PRÉ-TRATAMENTO ORGANOSSOLVE DA BIOMASSA RESIDUAL DE EUCALIPTO UTILIZANDO ETANOL**. 2021. 101 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Biocombustíveis, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – Mg, 2021

SUYAMA, Heitor. **HIDRÓLISE DE PALHA DE CASCA DE ARROZ PARA PRODUÇÃO DE ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO (2G)**. 2019. 59 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2019.

TOCANTINS. Raquel Oliveira. Governo do Tocantins. **Abacaxi do Tocantins: qualidade e sabor à mesa**. 2021. Disponível em: <https://www.to.gov.br/noticias/abacaxi-do-tocantins-qualidade-e-sabor-a-mesa/4ohoervpw8oh#:~:text=O%20abacaxi%20%C3%A9%20uma%20das,%C3%A1rea%20plantada%20de%203.854%20hectares..> Acesso em: 18 abr. 2022.

VIANA, Josiene *et al.* DINÂMICA DE PRODUÇÃO E COMERCIALIZAÇÃO DE ABACAXI (ANANAS COMOSUS L. MERR) NO ESTADO DO PARÁ. **Extensão Rural em Foco: Apoio à Agricultura Familiar, Empreendedorismo e Inovação - Volume 1**, [S.L.], p. 240-246, 2020. Editora Científica Digital. <http://dx.doi.org/10.37885/200600406>.

ZHAN, Yunni *et al.* Investigation of the alkaline hydrogen peroxide pretreatment: from cellulose saccharification to lignin isolation. **Industrial Crops And Products**, [S.L.], v. 214, p. 118533, ago. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118533>.