



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS I – CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA INDUSTRIAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM BACHARELADO EM QUÍMICA INDUSTRIAL**

VITÓRIA SABRINNA DE AZEVEDO SOARES DA SILVA

**PRODUÇÃO DE ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO UTILIZANDO ABIOMASSA
DOS AGUAPÉS (*EICHHORNIA CRASSIPES*): LEVANTAMENTO
BIBLIOGRÁFICO**

CAMPINA GRANDE-PB 2024

VITÓRIA SABRINNA DE AZEVEDO SOARES DA SILVA

**PRODUÇÃO DE ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO UTILIZANDO ABIOMASSA
DOS AGUAPÉS (*EICHHORNIA CRASSIPES*): LEVANTAMENTO
BIBLIOGRÁFICO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de
Química Industrial da Universidade
Estadual da Paraíba, como requisito
parcial à obtenção do título de Bacharel
em Química Industrial

Orientador (a): Prof^a. Dr^a. Pablícia Oliveira Galdino

CAMPINA GRANDE-PB 2024

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

S586p Silva, Vitoria Sabrinna de Azevedo Soares da.
Produção de etanol de segunda geração utilizando a biomassa dos aguapés (*Eichhornia Crassipes*) [manuscrito] : levantamento bibliográfico / Vitoria Sabrinna de Azevedo Soares da Silva. - 2024.

36 p.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química Industrial) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2024.

"Orientação : Profa. Dra. Pablícia Oliveira Galdino, Coordenação do Curso de Química Industrial - CCT. "

1. Jacinto d'água. 2. Bioetanol. 3. Eutrofização. I. Título

21. ed. CDD 660

VITÓRIA SABRINNA DE AZEVEDO SOARES DA SILVA

PRODUÇÃO DE ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO
UTILIZANDO BIOMASSA DOS AGUAPÉS (*EICHHORNIA
CRASSIPES*): LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de
Química Industrial da Universidade
Estadual da Paraíba, como requisito
parcial à obtenção do título de Bacharel
em Química Industrial.

Aprovada em: 02/07/2024.

BANCA EXAMINADORA

Pablicia Oliveira Galdino

Prof^a. Dr^a. Pablicia Oliveira Galdino (Orientadora)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

REBECA DE ALMEIDA SILVA

Prof^a. Dr^a. Rebeca de Almeida Silva
Universidade Estadual da Paraíba
(UEPB)

Hélvia W. Casullo de Araújo

Prof^a. Dr^a. Hélvia Waleska Casullo de
Araújo Universidade Estadual da
Paraíba (UEPB)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pois sem Ele nada disso seria possível. Em cada dia de luta e nos momentos de desespero, foi Nele que encontrei forças para continuar. Somente Ele conhece tudo o que enfrentei, cada momento em família que abdiquei, ficando a quilômetros de distância deles, para chegar até aqui.

Aos meus pais, Sônia e Walmir, que sempre estiveram ao meu lado e trabalham de dia e de noite para garantir um futuro melhor para mim e meu irmão. Minha família é meu alicerce, e meu maior desejo é ser motivo de orgulho para eles retribuir por tudo o que sempre fizeram e continuam fazendo por mim.

À minha melhor amiga, Rafaela, e à sua família, que desde o início do curso me acolheram em seu lar e me trataram como parte da família. Hoje, após 8 anos de convivência e de tudo o que passamos juntas, considero não apenas uma amiga e uma tia, mas uma irmã e uma segunda mãe. Minha eterna gratidão a vocês!

Ao querido professor Carlos Cristiano, cuja ideia de pesquisa para este trabalho surgiu a partir de suas aulas. Com sua didática diferenciada, ele nos fez pensar fora da caixa e nos incentivou a escrever artigos científicos alinhados ao conteúdo estudado, tornando o aprendizado mais leve e eficaz.

E, por fim, a minha estimada orientadora, Profa. Dra. Pablícia Oliveira Galdino, por todo o apoio e dedicação ao final dessa jornada, mesmo com tantos contratempos.

RESUMO

O aguapé, também chamado de *Eichhornia Crassipes* ou Jacinto d'água, é uma alga que se espalha em águas doces como açudes, rios e lagos devido à alta poluição desses ambientes. Conhecido como "faxineiro das águas", devido à sua capacidade de remover poluentes orgânicos, pode ser usado para tratar efluentes naturalmente se cultivado sob controle. No entanto, seu crescimento rápido pode causar eutrofização, prejudicando significativamente o meio ambiente. Este estudo investigou a viabilidade de usar a biomassa do aguapé para produzir etanol de segunda geração, visando mitigar a eutrofização e proporcionar benefícios econômicos como uma fonte de matéria-prima renovável, sendo conduzido por meio de uma pesquisa descritiva, onde foram analisados 64 materiais didáticos recentemente publicados. A partir deste levantamento, concluiu-se que o aguapé representa uma fonte rica para a produção de etanol. No entanto, são necessários avanços científicos adicionais para melhorar o rendimento e reduzir os custos envolvidos neste processo.

Palavras-Chave: Jacinto d'água; bioetanol; eutrofização.

ABSTRACT

The water hyacinth, also known as *Eichhornia crassipes* or water hyacinth, is an algae that spreads in freshwater environments such as reservoirs, rivers, and lakes due to high pollution levels in these areas. Known as the "cleaner of waters" due to its ability to remove organic pollutants, it can be used to naturally treat effluents if cultivated under control. However, its rapid growth can lead to eutrophication, significantly harming the environment. This study investigated the feasibility of using water hyacinth biomass to produce second-generation ethanol, aiming to mitigate eutrophication and provide economic benefits as a renewable raw material source. The study was conducted through a descriptive research approach, analyzing 64 recently published educational materials. From this survey, it was concluded that water hyacinth represents a rich source for ethanol production. However, further scientific advancements are needed to improve efficiency and reduce costs associated with this process.

Keywords: Water hyacinth; bioethanol; eutrophication.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - O que é biocombustível	10
Figura 2 - Estrutura molecular do etanol	11
Figura 3 - Produção brasileira de etanol	12
Figura 4 - Produção de etanol anidro cresce no Norte e Nordeste.....	13
Figura 5 - Roteiro de conversão da biomassa em energia	17
Figura 6 - Composição química do Agupapé	18
Figura 7 - Estrutura da celulose	18
Figura 8 - Estrutura química da Hemicelulose	19
Figura 9 - Estrutura química da Lignina	20
Figura 10 - Pré-tratamento da biomassa.....	21
Figura 11 - Fermentação Alcólica	26
Figura 12 - Coluna de destilação fracionada.....	27

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	08
2	REFERENCIAL TEÓRICO	10
2.1	Etanol.....	10
2.1.1	<i>Produção de etanol no Brasil.....</i>	11
2.1.2	<i>Produção de etanol na Paraíba.....</i>	13
2.1.3	<i>Etanol como fonte de energia limpa e sustentável</i>	15
2.2	Aguapé como fonte de matéria prima para produção do etanol de segunda geração	16
2.2.1	Composição estrutural do aguapé.....	17
2.2.1.1	<i>Celulose</i>	18
2.2.1.2	<i>Hemicelulose.....</i>	19
2.2.1.3	<i>Lignina.....</i>	19
2.3	Produção de etanol de segunda geração	20
2.3.1	<i>Pré-tratamento da biomassa lignocelulósica</i>	20
2.3.1.1	<i>Pré-tratamento Físico</i>	21
2.3.1.2	<i>Pré-tratamento Químico</i>	22
2.3.1.3	<i>Pré-tratamento Biológico</i>	22
2.3.1.4	<i>Pré-tratamento Combinado (Físico-Químico)</i>	22
2.3.2	<i>Hidrólise enzimática</i>	24
2.3.3	<i>Fermentação alcoólica</i>	25
2.3.4	<i>Destilação.....</i>	27
3	METODOLOGIA.....	29
4	CONCLUSÃO.....	30
	REFERÊNCIAS	31

1 INTRODUÇÃO

Na família das Pontederiaceas (*Pontederiaceae*), existe uma espécie específica de planta aquática conhecida popularmente por aguapé; Baronesa ou Camalote, cujo nome científico é *Eichhornia Crassipes*, e pode ser encontrada em diversos biomas, como a Caatinga, Amazônia, Cerrado, Mata Atlântica, Pampa e Pantanal (Silveira, 2020).

A *Eichhornia Crassipes* é adepta aos climas: Tropical, Subtropical e Equatorial; podendo ser cultivada a pleno sol, normalmente vive em águas de rios, lagos e lagoas, flutuando e captando nutrientes do próprio meio. Além disso, o aguapé é geralmente muito fácil de ser cultivado, pois quando estabelecido, ele não requer mais cuidados, exceto o corte regular e o desbaste ocasional para ajudar a controlar o crescimento da planta e impedir que ela sufoque todo o resto da lagoa; tolerando também a variação no nível da água, velocidade do fluxo de água, extremas variações de nutrientes, de pH, de temperatura e de substâncias tóxicas (Braga, 2018).

No entanto, também pode levar a problemas graves, como o processo de eutrofização:

O termo eutrofização vem do grego *eutrophos*, que significa bem nutrido, e se caracteriza pelo aumento de nutrientes nos corpos hídricos, especialmente fósforo e nitrogênio; o que provoca surgimento excessivo de organismos como algas e cianobactérias, trazendo como algumas das consequências: uma coloração turva na água, a diminuição da quantidade de oxigênio, bem como a morte de várias espécies (Santos, [s.d]).

A eutrofização pode ocorrer de forma natural, onde os nutrientes são carregados naturalmente para os ambientes aquáticos com ação das águas superficiais e da chuva, sendo caracterizado como um processo lento que pode levar centenas de anos para ocorrer (conhecido como “envelhecimento natural”). Ou também artificialmente, no qual o aumento da quantidade de nutrientes pode ser ocasionado de esgotos domésticos, de efluentes industriais não tratados, de plantações com uso excessivo de agrotóxicos, nos quais essa matéria orgânica acaba sendo levada até o corpo d'água mais próximo (fenômeno conhecido como lixiviação) (Almeida, [s.d]; Biologia Net, 2024).

É fato que a proliferação exacerbada das macrófitas tem danos incontáveis ao meio ambiente, e o aguapé possui uma taxa de crescimento bastante elevada em diversos ambientes, chegando a 220 toneladas/hectare por dia em reservatórios, 17,5 toneladas/hectare por dia de biomassa úmida em lagoas de esgoto doméstico, 215 toneladas/hectare por dia retiradas em lagos de Madrid, e 24 milhões de toneladas por dia removidas dos leitos dos rios do Pantanal. Essa rápida taxa de crescimento, juntamente com sua capacidade de competir com outras plantas aquáticas e sua facilidade de adaptação, faz do aguapé uma das plantas mais invasivas, sendo atualmente encontrada nos cinco continentes (Teixeira, 2019).

Contudo, seu rápido crescimento pode ser explorado de maneira positiva, colaborando com o meio ambiente e com a economia; podendo ser uma promissora fonte de biomassa para a produção de biocombustíveis, por se tratar de uma fonte de biomassa lignocelulósica, composta principalmente por alto teor em celulose e hemicelulose, e baixo teor em lignina, o que configura uma excelente matéria-prima para a produção de etanol de segunda geração (Zhang et al., 2015).

Considerando a temática abordada, este estudo teve como objetivo avaliar a biomassa da *Eichhornia Crassipes* (Aguapé) como matéria prima para produção de etanol de segunda geração, a fim de minimizar essa problemática ambiental, bem como trazer uma forma alternativa para obtenção de combustível através de uma fonte renovável.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Etanol

Biocombustíveis são combustíveis produzidos a partir de fontes renováveis, sendo considerados alternativas energéticas (Figura 1). Eles se destacam por emitir baixos níveis de poluentes na atmosfera. Geralmente, são produzidos a partir de matérias-primas agrícolas ou vegetais, como milho, cana-de-açúcar e mamona. Os biocombustíveis mais proeminentes atualmente são o etanol e o biodiesel, amplamente utilizados tanto para a locomoção de veículos quanto para a geração de energia (Hexag Educacional, 2021).

Figura 1 - Biocombustível



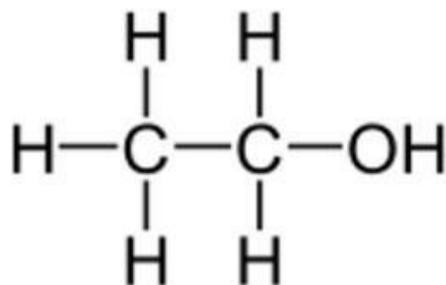
Fonte: Pena, 2024.

O fato de serem derivados de biomassa renovável, possibilita a substituição parcial ou total de combustíveis derivados de petróleo e gás natural em motores a combustão, ou em outro tipo de geração de energia, pois apresentam baixo índice de emissão de poluentes (Brasil, 2022).

O etanol é um composto químico de fórmula molecular C_2H_6O (Figura 2), pertencente à função orgânica conhecida como álcool, que se caracteriza pela presença do grupo -OH (hidroxila). Além disso, trata-se de um biocombustível, ou seja: é produzido através de matéria-prima orgânica, passando por um processo de fermentação do amido e de outros açúcares de origem vegetal (Raízen, 2022).

“É um composto leve, fácil de ser obtido e que se mistura facilmente com água e com a grande maioria dos líquidos de baixo peso molecular. Ele é altamente inflamável, podendo entrar em combustão, se submetido a uma fonte de calor, a partir de 13 °C” (Nova Cana, 2024).

Figura 2 - Estrutura molecular do etanol



Fonte: Lima, 2023.

Dependendo do tipo de tratamento, o etanol pode ser utilizado em diversas aplicações, como o etanol comum (álcool hidratado), que é uma mistura de álcool e água com graduação alcoólica entre 95,1% e 96%; o etanol aditivado, que é álcool hidratado com aditivos para melhorar o rendimento e reduzir o desgaste do motor; o etanol anidro, também conhecido como "puro" ou "etanol absoluto", que possui no mínimo 99,3% de graduação alcoólica e é utilizado na mistura com gasolina para aumentar a octanagem e reduzir a emissão de gases de efeito estufa; e o etanol neutro, um álcool com menos impurezas, amplamente utilizado nas indústrias farmacêutica, cosmética, de tintas e vernizes, bebidas, entre outros setores (Atvos, 2023; Embrapa, 2022; Nova Cana, 2024).

2.1.1 Produção de etanol no Brasil

A demanda global por biocombustíveis é impulsionada por políticas públicas como misturas obrigatórias, regimes fiscais diferenciados e subsídios. De acordo com a OCDE (Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico) e a FAO (Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura) (2021), o Brasil é o único país onde os biocombustíveis superam 10% do consumo de energia no setor de transportes. O Brasil é o segundo maior produtor de etanol, com 27,5% da produção global, atrás apenas dos

Estados Unidos, que possuem 54,6%. A União Europeia e a China têm 4,8% e 3,1%, respectivamente. A produção brasileira de etanol é majoritariamente de cana-de-açúcar, embora a utilização demilho tenha (Vidal, 2022).

A Tabela 1 apresenta o percentual mundial de produção de etanol nos países específicos, entre os anos de 2017 e 2021.

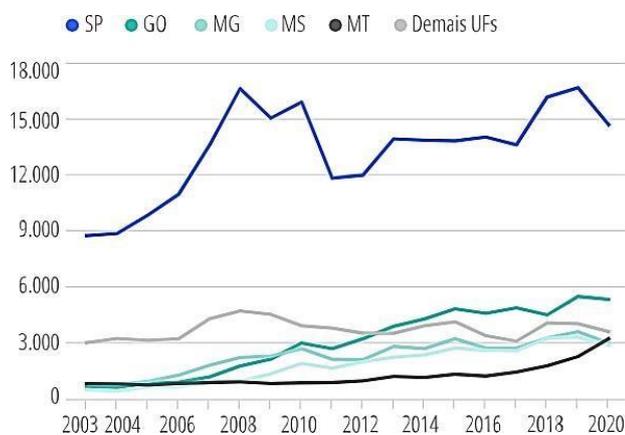
Tabela 1- Percentual na produção mundial de etanol nos países específicos

Países	2017	2018	2019	2020	2021	%
EUA	60.324	60.911	59.726	52.772	56.781	54,9
Brasil	25.589	30.586	33.274	30.586	28.391	27,5
União Europeia	4.997	5.148	5.224	4.770	4.921	4,8
China	3.218	3.066	3.823	3.520	3.255	3,1

Fonte: Vidal, 2022.

Dados da ANP (Agência Nacional do Petróleo) indicam que São Paulo é o maior produtor de etanol no Brasil (Figura 3). Em 2020, o estado produziu 14,7 milhões de metros cúbicos, representando 45% da produção nacional. Aproximadamente dois terços desse volume foram de etanol hidratado, enquanto o restante foi de etanol anidro, utilizado na mistura com a gasolina. São Paulo também lidera na produção de cana-de-açúcar, principal matéria-prima do etanol, com mais da metade da área plantada (5,5 milhões de hectares) e da colheita (425,6 milhões de toneladas) (Seade, 2021).

Figura 3 - Produção brasileira de etanol



Fonte: Seade, 2021.

De acordo com dados da NovaBio (Associação de Produtores de Açúcar, Etanol e Bioenergia), a safra 2022/2023 nas regiões Norte e Nordeste registrou um aumento de 3,3% na produção de etanol anidro (Figura 4), totalizando 425 milhões de litros, comparado aos 412 milhões de litros da safra anterior. Em contraste, a produção de etanol hidratado diminuiu, alcançando 351 milhões de litros, uma redução de 6,9% em relação aos 377 milhões de litros produzidos na safra 2021/2022, conforme os dados até a segunda quinzena de setembro (Falcão, 2022).

Figura 4 - Produção de etanol anidro cresce no Norte e Nordeste



Fonte: RPA NEWS, 2022.

O presidente executivo da NovaBio, que também preside o Sindicato da Indústria do Açúcar e do Alcool do Estado de Pernambuco (Sindaçucar-PE), disse que o estoque físico do hidratado no Norte e Nordeste tem garantido a segurança do abastecimento da frota veicular.

“Estamos com mais de 118 milhões de litros de hidratado estocados, volume 3,64% maior em comparação aos 114 milhões de litros armazenados na safra passada”, lembra. No processamento acumulado até a segunda quinzena de setembro, a moagem de cana somou quase 15 milhões de toneladas. Comparando-se ao mesmo período de 2021, houve aumento de 0,3% no processamento (Falcão, 2022).

2.1.2 Produção de etanol na Paraíba

De acordo com dados do Sindicato da Indústria da Fabricação do Alcool no Estado da Paraíba (Sindalcool, 2022), a produção de etanol na Paraíba tem se destacado nos últimos anos, com um aumento significativo na safra de 2022/2023. As usinas do estado produziram cerca de 425 milhões de litros de etanol, um crescimento de 19,9% em comparação à safra anterior. Esse

incremento é atribuído a condições climáticas favoráveis, especialmente as chuvas bem distribuídas, e aos investimentos em tecnologia de produção pelas usinas.

Além disso, a Sindalcool aponta que o consumo de etanol no estado mais do que dobrou em janeiro de 2024, atingindo 17,2 milhões de litros, um aumento de 106% em relação ao mesmo período de 2023. Esse crescimento é resultado da atratividade dos preços e das campanhas de conscientização sobre os benefícios ambientais e socioeconômicos do etanol; e com isso, as medidas e os resultados obtidos reforçam a importância do etanol como uma alternativa viável e sustentável aos combustíveis fósseis na Paraíba, contribuindo significativamente para a economia local e a redução das emissões de gases de efeito estufa (Duarte, 2024).

2.1.3 Etanol como fonte de energia limpa e sustentável

O ciclo produtivo do etanol pode ser de primeira geração (1ªG), que se baseia na utilização da cana-de-açúcar desde a fase de plantio até o estágio final de produção; ou de segunda geração (2ªG), que está ligado ao aproveitamento de material lignocelulósico (resíduo do ciclo produtivo de 1ªG proveniente de biomassa) (Costa, 2014). A Tabela 2 expõe o comparativo entre os aspectos referentes ao etanol de primeira e segunda geração.

Tabela 2 - Aspectos econômicos, tecnológicos, ambientais e sociais entre os ciclos produtivos do E1G, E2G e E1G/E2G

Aspectos/ Geração	E1G (cana de açúcar)	E2G (resíduo da cana de açúcar)	E1G/E2G (Ciclo Integrado)
Econômicos	<p>Preço mais competitivo frente à gasolina</p> <p>Custos concentrados na Fase agrícola (70%)</p> <p>Porcentagem de Etanol Anidro na gasolina: de 25% a 27%</p> <p>Alterações na CIDE para gasolina</p> <p>Veículos flexfuel: maioria da frota nacional</p>	<p>Custo produtivo maior do que o E1G</p> <p>Preço mínimo de venda médio menor (comp. outras fontes)</p> <p>Produtividade média maior (comp. outras fontes)</p> <p>Custo de capital médio inferior (comp. outras fontes)</p>	<p>Ciclo produtivo de fácil integração</p> <p>Diminuição dos custos (de até 90%)</p> <p>Melhores indicadores financeiros (aumento da receita, potencial econômico e VPL)</p> <p>Ganhos de produtividade</p>
Tecnológicos	<p>Cultura mecanizada</p> <p>Mão de obra com baixo-médio nível de escolaridade</p> <p>Presença de tecnologia intensiva em capital</p> <p>Alta produtividade por área plantada</p>	<p>Indústria altamente tecnológica</p> <p>mão de obra com alto nível de escolaridade</p> <p>Inovação Brasileira (E2G- bagaço)</p> <p>Diferencial entre firmas: fase de pré-tratamento</p>	<p>Melhoria dos processos conjuntos (Fase Agrícola)</p> <p>Maior disponibilidade para cogeração (açúcar e energia elétrica)</p>
Ambientais	<p>Menor uso do solo</p> <p>Emissão CO2 90% menor comparado à gasolina</p>	<p>Inovação ambiental</p> <p>Diminuição dos impactos ambientais E1G</p>	<p>Redução de consumo de água e captação de água</p> <p>Maior reuso da água e da disponibilidade de energia elétrica</p>
Sociais	<p>Média de renda e escolaridade maior comparado à trabalhadores do setor agrícola</p>	<p>Melhoria da qualificação de mão de obra com nível de renda e escolaridade mais elevados</p>	<p>Potencial de inclusão social através de mão de obra qualificada, do nível de renda médio comparado a trabalhadores do setor agrícola</p>

Fonte: Senna & Ansanelli, 2016.

Dados da Engevista (2019), informam sobre estudos da viabilidade de produção de etanol de terceira geração (3ªG), assim como outros combustíveis a partir de algas, as quais, suas diferentes espécies determinam qual tipo de combustível pode ser produzido.

A sustentabilidade ambiental depende fortemente da disponibilidade de fontes de energia limpas e renováveis, com o etanol desempenhando um papel fundamental. A Única (2020) informou que, desde o lançamento dos veículos flex no Brasil, até o ano de 2020, foram evitadas cerca de 535 milhões de toneladas de CO₂ na atmosfera.

Segundo dado da Cable News Network (CNN, 2022), foi feita uma projeção por parte do Instituto Energia e Meio Ambiente (IEMA), e concluiu-se que a cada litro utilizado de etanol, 444 gramas de CO₂ são emitidos, enquanto a cada litro de gasolina usado, são jogados na natureza 2.176 gramas de gás carbônico, ou seja, quase 500% a mais de gases de efeito estufa.

2.2 Aguapé como fonte de matéria prima para produção do etanol de segunda geração

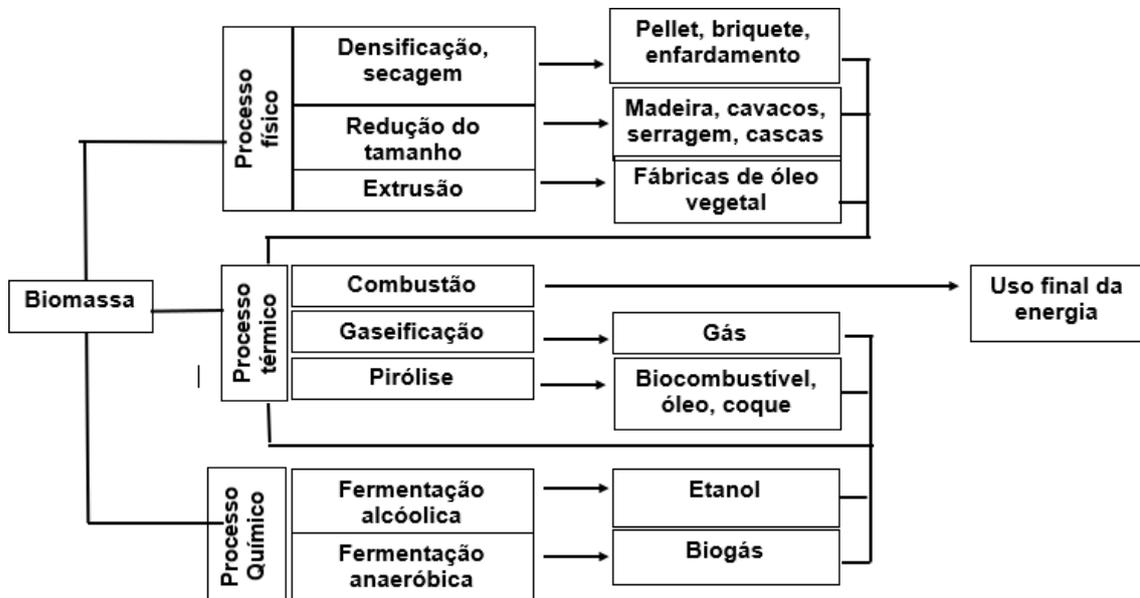
O etanol de segunda geração (2^aG) é um tipo de combustível gerado através de material lignocelulósico, que se trata do resíduo proveniente da produção do etanol de primeira geração. Dentre as principais matérias-primas utilizadas destacam-se a palha e o bagaço da cana, mas também são utilizados resíduos da beterraba, do trigo ou milho (Propeq, 2020; Raízen, 2023).

Outra opção de insumo para obtenção desse tipo de combustível é a biomassa, que se trata de um conjunto de resíduos de origem animal ou vegetal utilizados na produção de energia, proveniente de fontes como vegetais lenhosos, cultivos agrícolas e resíduos urbanos e industriais. Entre os produtos derivados da biomassa estão os biocombustíveis, óleos vegetais e biogás. Por ser uma fonte de energia renovável e econômica, a biomassa é vista como uma alternativa viável para substituir os combustíveis fósseis (Guitarrara, 2024).

O aguapé é uma fonte de matéria prima rica em biomassa lignocelulósica. Porém, o mesmo quando hidrolisado em sua forma natural, apresenta rendimentos menores que 20%; o que contabiliza resultados não muito satisfatórios. Isso ocorre porque essa biomassa possui uma estrutura celular rígida, complexa e recalcitrante à decomposição devido às características estruturais dos tecidos vegetais e às interações de natureza físico-químicas estabelecidas entre a celulose, a hemicelulose e a lignina (MOOD et al., 2013, Teixeira et al., 2019).

Na Figura 5, são observados de maneira resumida alguns processos de tratamento da biomassa e suas respectivas funcionalidades:

Figura 5 - Roteiro de conversão da biomassa em energia



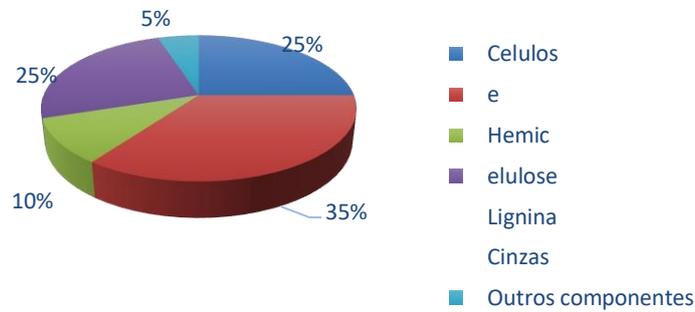
Fonte: Lippel, 2024.

2.2.1 Composição estrutural do aguapé

O aguapé apresenta um significativo teor de água, superior a 90% em comparação com a sua matéria seca. Sua composição química é rica em celulose, o que é um fator atrativo para a produção de energia de segunda geração. A biomassa seca da *E. Crassipes* é composta de aproximadamente 25% de celulose, 35% de hemicelulose e 10% de lignina, 25% de cinzas, e os outros 5% correspondem a outros componentes como metais pesados e outros (Teixeira et al., 2019).

Na Figura 6 estão representados dados da composição química do aguapé:

Figura 6 - Composição química do Aguapé

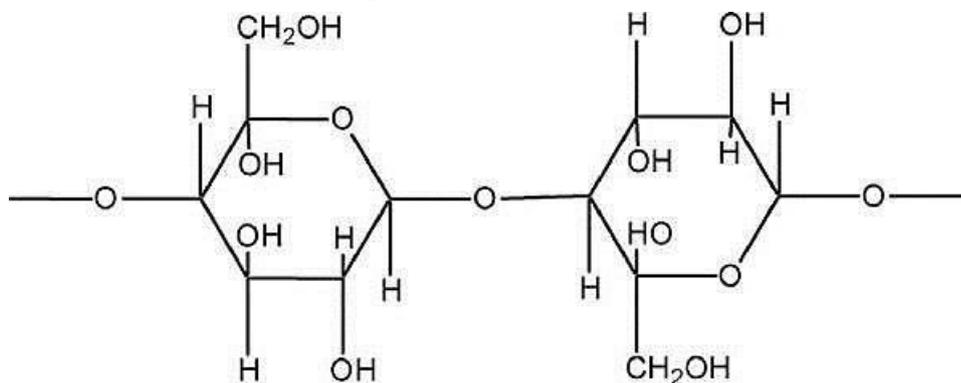


Fonte: Teixeira et al., 2019.

2.2.1.1 Celulose

A celulose (Figura 7), com fórmula química $(C_6H_{10}O_5)_n$, é um carboidrato do tipo polissacarídeo abundante nos vegetais, constituindo até 50% da composição da madeira. Trata-se de um polímero de estrutura linear que estabelece ligações de hidrogênio entre os grupos hidroxilas presentes. Nas células, as moléculas de celulose se arranjam em forma de feixes de fibras, conferindo rigidez às plantas por ser o principal componente da parede celular. Industrialmente, a celulose é utilizada na produção de papéis e fibras, e, quando modificada, pode ser transformada para a elaboração de plásticos (Magalhães, [s.d]).

Figura 7 - Estrutura da celulose

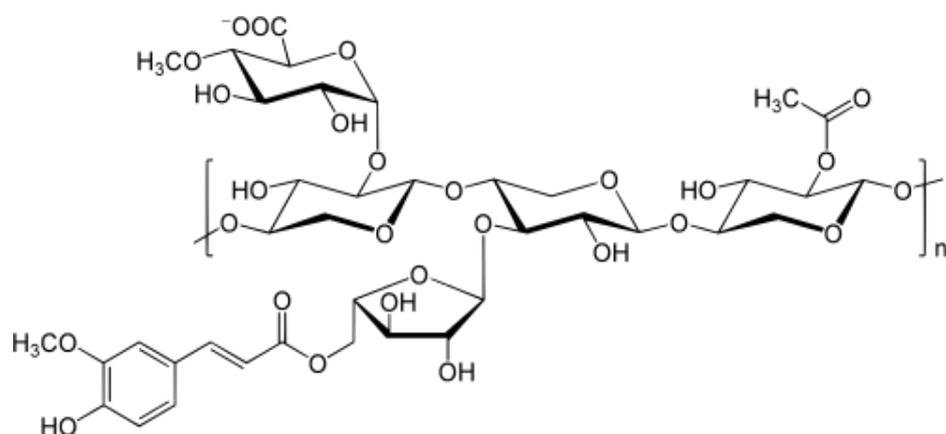


Fonte: Silva et al., 2022.

2.2.1.2 Hemicelulose

A hemicelulose (Figura 8) é uma parte da biomassa relativamente fácil de despolimerizar e solubilizar no processo de pré-tratamento ácido, acompanhado ou não da ação enzimática de xilanases, pois se organizam em um arranjo fibroso totalmente amorfo e oferecem uma maior acessibilidade aos ácidos minerais, comumente utilizados como catalisadores. A hemicelulose ajuda a estabilizar a parede celular através de pontes de hidrogênio com a celulose, formadas na etapa anterior a lignificação. Além disso, ela é ligada por ligações covalentes à lignina, ou seja, a ligação entre hemicelulose e lignina são mais fortes e consistentes que hemicelulose com celulose. A maior parte das hemiceluloses pode ser extraída por soluções aquosas de hidróxido de sódio e hidróxido de potássio (Dos Reis, 2017).

Figura 8 - Estrutura química da Hemicelulose



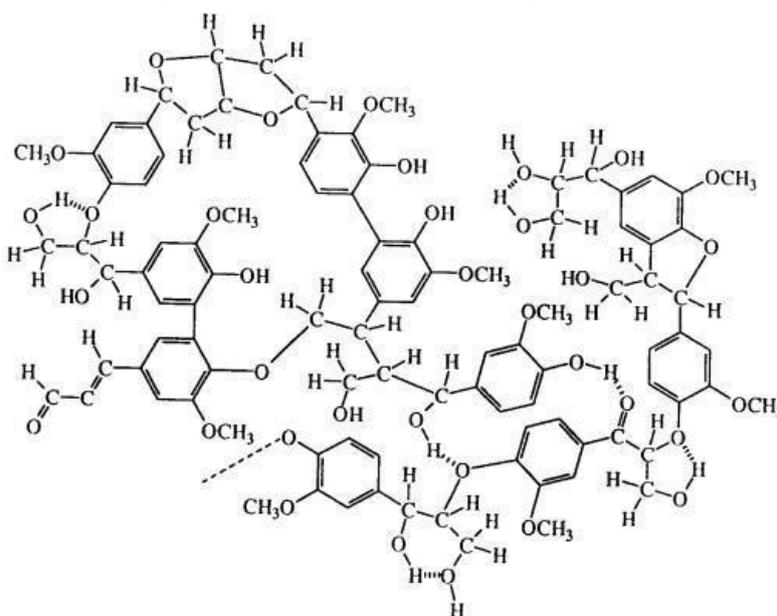
Fonte: Maestrovirtuale, 2024.

2.2.1.3 Lignina

A lignina (Figura 9) é formada apenas em plantas vasculares, que desenvolvem tecidos especializados em funções como o transporte de soluções aquosas e suporte mecânico, protegendo os componentes vasculares da planta ao reduzir a permeabilidade da parede celular à água, atuando como fungicida e proporcionando suporte para a árvore, permitindo que sua copa alcance muitos metros de altura. Além disso, no processo de hidrólise enzimática dos materiais lignocelulósicos, a lignina funciona como uma cola, sendo necessária sua remoção para que a celulose e a hemicelulose sejam

convertidas em açúcares, e age como uma barreira física para as enzimas, que podem ser irreversivelmente capturadas pela lignina, o que influencia na quantidade de enzima requerida para a hidrólise e dificulta a recuperação da enzima após o processo (Meldau, 2024; Santos et al., 2012).

Figura 9 - Estrutura química da Lignina



Fonte: Meldau, 2024.

2.3 Produção de etanol de segunda geração

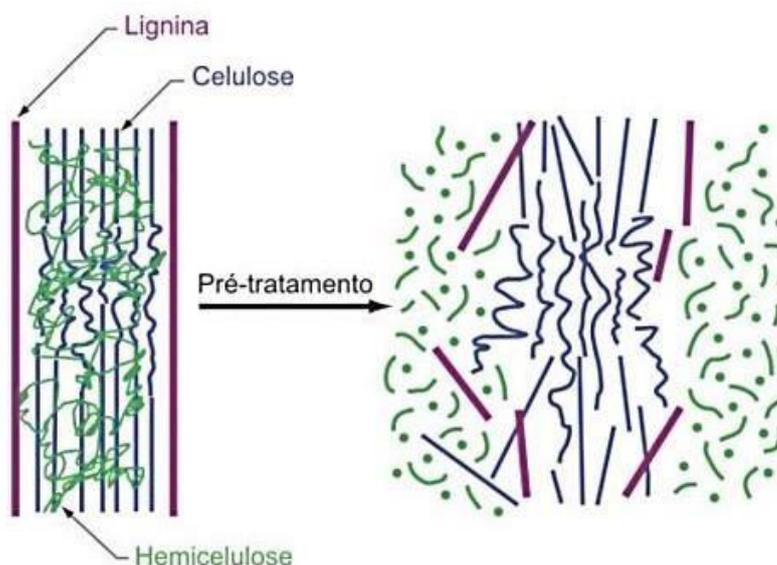
Para a produção de etanol de segunda geração, a celulose deve estar livre para que as enzimas a quebrem em glicose, por isso, é necessário o processamento da fibra para separar a hemicelulose e a lignina dos principais biopolímeros. Desse modo, algumas etapas são necessárias para que se consiga chegar no produto desejado. Sendo elas: pré-tratamento; hidrólise enzimática; fermentação e destilação (Bastos; Wang; Saka, 2016).

2.3.1 Pré-tratamento da biomassa lignocelulósica

Quando a biomassa é hidrolisada em sua forma natural, os rendimentos são muito baixos, ficando abaixo de 20%. Isso se deve à estrutura celular da biomassa, que é rígida, complexa e resistente à decomposição. Essa resistência é resultado das características estruturais dos tecidos vegetais e das interações físico-químicas entre celulose, hemicelulose e lignina. Dessa

forma, o pré-tratamento tem como principais objetivos modificar a estrutura da biomassa; reduzir a cristalinidade e aumentar sua porosidade e área superficial, tornando a celulose mais acessível à hidrólise enzimática. Além disso, um bom pré-tratamento deve evitar a formação de inibidores da fermentação (Cardona; Sanchez, 2010; Mood et al., 2013).

Figura 10 - Pré-tratamento da biomassa



Fonte: Santos et al., 2012.

De modo geral, os processos de pré-tratamento dependem da composição de cada biomassa, e podem ser separados em quatro grupos: biológicos; químicos; físicos ou uma combinação entre eles, visando aumentar o rendimento do processo (Fitzpatrick et al., 2010).

2.3.1.1 *Pré-tratamento Físico*

O pré-tratamento físico pode aumentar a área de superfície acessível e o tamanho dos poros, além de reduzir a cristalinidade e os graus de polimerização da celulose. Vários processos físicos, como moagem (por exemplo, moagem com bolas, de dois rolos, de martelo, coloidal e por energia vibro) e irradiação (por exemplo, com raios gama, feixe de elétrons ou micro-ondas) podem ser utilizados para aprimorar a hidrólise enzimática ou a biodegradabilidade de resíduos lignocelulósicos (Taherzadeh & Karimi, 2008).

2.3.1.2 *Pré-tratamento Químico*

Os pré-tratamentos químicos são classificados principalmente em tratamentos ácidos, alcalinos, oxidativos e de solventes orgânicos, dependendo do tipo de produto químico utilizado. Os principais agentes ácidos envolvidos no pré-tratamento da biomassa incluem ácido sulfúrico, clorídrico, fórmico e nítrico. Durante o pré-tratamento alcalino, agentes como hidróxido de sódio e amônia são comumente usados. Esses tratamentos funcionam principalmente removendo a lignina ou a hemicelulose presente na biomassa, onde o modo de ação depende do produto químico utilizado e das condições de operação no processo de pré-tratamento (Singh et al., 2015).

2.3.1.3 *Pré-tratamento Biológico*

Os processos de pré-tratamento biológico utilizam microrganismos, como fungos e bactérias, tendo como principal objetivo a remoção da lignina, ocasionando em uma exposição das frações de celulose e hemicelulose para uma digestão eficiente. Entre esses, os fungos, especialmente os de podridão branca e parda, são os mais empregados. Este método é considerado um dos mais econômicos e ecologicamente favoráveis, se comparado aos processos físicos e químicos, visto que, é realizado em condições suaves de temperatura e pressão, gerando um menor consumo de energia; e não requer produtos químicos. Contudo, exige monitoramento contínuo e é um processo mais demorado em comparação com outros métodos (Sindhu, Binod & Pandey, 2016; Sun & Cheng 2002; Wan & Li, 2012).

2.3.1.4 *Pré-tratamento Combinado (Físico-Químico)*

O pré-tratamento físico-químico é uma abordagem combinada de métodos químicos e físicos, como a união de um método térmico juntamente com hidrólise ácida; usada para quebrar os polímeros de hemicelulose ou lignina na biomassa lignocelulósica antes do processo de digestão anaeróbia. Durante o pré-tratamento físico-químico, as ligações de hidrogênio entre os polímeros complexos são quebradas pelo calor, aumentando a área de superfície acessível para ação enzimática ou microbiana eficiente em relação à

biomassa (Rodriguez et al., 2017).

Santos et al. (2012) faz um comparativo de maneira resumida sobre as vantagens e desvantagens de alguns tipos de pré-tratamentos que podem ser utilizados no processo produtivo de etanol de 2ª geração a partir da E. Crassipes (Tabela 3).

Tabela 3 - Comparativo entre os pré-tratamentos da biomassa da E. Crassipes

Pré- Tratamentos		Composição da biomassa			Vantagens	Desvantagens
		Celulose	Hemicelulose	Lignina		
Físico	Moinho de bolas	Redução intensa do grau de cristalinidade	Não remove	Não remove	Redução da cristalinidade	Alto consumo de energia
Químico	Ácido diluído	Pouca despolimerização	80-100% de remoção	Pouca remoção, ocorrência de mudança estrutural	Condições médias, alta produção de xilose	Difícil recuperação do ácido; corrosivo e relativamente custoso
	Hidróxido de sódio	Inchaço significativa	Solubilidade considerável	Solubilidade > 50%	Remoção efetiva de ésteres	reagente de alto custo, recuperação alcalina
	Organo-solvente	Considerável inchaço	Solubilidade quase completa	Solubilidade quase completa	Alta produção de xilose e efetiva deslignificação	recuperação do solvente, alto custo
Biológico	Microbiológico	20- 30% de despolimerização	Solubilização acima de 80%	Pouca remoção, ocorrência de mudança estrutural	Baixo requerimento de energia e efetiva deslignificação	perda de celulose, baixa taxa de hidrólise
Combinado	Explosão a vapor	Pouca despolimerização	80-100% de remoção	Pouca remoção, ocorrência de mudança estrutural	energia eficiente, nenhum custo de reciclagem	degradação da xilana como produto inibitório

Fonte: Adaptado de (Santos et al., 2012).

Após a escolha e realização do pré-tratamento, a etapa seguinte é produção do etanol propriamente dita. Que se baseia na Hidrólise enzimática do aguapé, seguida do processo de fermentação da biomassa lignocelulósica através da utilização de micro-organismos, e por fim, a destilação.

2.3.2 Hidrólise enzimática

A hidrólise enzimática de biomassas é um processo essencial para a conversão de materiais lignocelulósicos em açúcares fermentáveis, que podem ser utilizados na produção de biocombustíveis e produtos químicos de valor agregado. Este processo envolve a utilização de enzimas específicas, como celulases e hemicelulases, que degradam os polímeros complexos da biomassa em monômeros de açúcar. Entre as vantagens desse método, destaca-se a alta especificidade das enzimas, que resulta em menos subprodutos indesejados e maior eficiência no uso dos açúcares liberados. Além disso, a hidrólise enzimática é considerada uma tecnologia mais ambientalmente amigável, pois opera sob condições moderadas de temperatura e pH, reduzindo a necessidade de produtos químicos agressivos (Himmel et al., 2007; Lynd et al., 2002; Singh et al., 2015).

O processo de hidrólise enzimática geralmente começa com a preparação da biomassa, que pode incluir moagem e secagem. Em seguida, a biomassa passa por um pré-tratamento para quebrar a lignina e desestruturar as fibras celulósicas, tornando-as mais acessíveis às enzimas. Após o pré-tratamento, a biomassa é incubada com uma mistura de enzimas sob condições controladas de temperatura e pH. As enzimas atuam especificamente nas ligações glicosídicas dos polissacarídeos, liberando açúcares simples como glicose e xilose. O tempo de reação pode variar de algumas horas a vários dias, dependendo da eficiência do pré-tratamento e da atividade enzimática (Alvira et al., 2010; Balan, 2014; Kumar et al., 2010; Sun & Cheng, 2002).

A utilização de enzimas comerciais como a Celluclast* e a Cellic CTec2* produzidas pela Novozymes*, apresentou resultados satisfatórios na conversão da palha do trigo, podendo também ser usada na conversão da biomassa do aguapé. Todavia trata-se de um procedimento de custo elevado (Teixeira et al, 2019).

Bansal et al., 2019; Chundawat et al., 2011; Gao et al., 2011; e Horn et al., 2012 falam sobre a utilização de coquetéis enzimáticos otimizados para maximizar o rendimento da hidrólise enzimática e reduzir os custos, onde a combinação de diferentes tipos de enzimas, tem se mostrado uma abordagem

eficaz. Entre as enzimas mais utilizadas, destacam-se:

- **Celulases:** As celulases são um grupo de enzimas que incluem endoglucanases, exoglucanases (ou celobiohidrolases) e beta-glicosidases. As endoglucanases atacam as regiões amorfas da celulose, as exoglucanases clivam as extremidades da cadeia de celulose para liberar celobiose, e as beta-glicosidases convertem celobiose em glicose. A combinação dessas enzimas é essencial para uma hidrólise eficiente da celulose.

- **Hemicelulases:** As hemicelulases, como xilanases e mananases, são responsáveis pela degradação da hemicelulose, um componente significativo da biomassa lignocelulósica. As xilanases, por exemplo, quebram as ligações nos polímeros de xilano, liberando xilose e outros açúcares hemicelulósicos.

- **Lacases e Peroxidases:** Estas enzimas são utilizadas para degradar a lignina, que é um polímero complexo que dificulta o acesso das enzimas aos carboidratos. A remoção ou modificação da lignina pode aumentar significativamente a eficiência da hidrólise enzimática.

- **Celulases Recombinantes e Enzimas Modificadas Geneticamente:** A engenharia genética tem permitido a criação de enzimas recombinantes com propriedades melhoradas, como maior atividade específica, maior estabilidade térmica e pH, e resistência a inibidores. O uso de microrganismos geneticamente modificados para produzir essas enzimas em grandes quantidades pode reduzir significativamente os custos de produção.

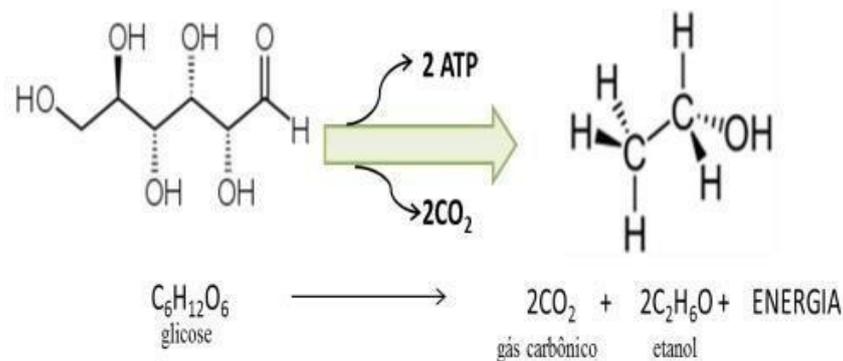
Além de escolher as enzimas corretas, é importante considerar o uso de técnicas de otimização de processos para melhorar a eficiência e reduzir os custos. A reutilização de enzimas, o desenvolvimento de biorreatores eficientes e a integração de processos contínuos são estratégias que podem contribuir para a viabilidade econômica do processo de hidrólise enzimática (Bansal et al., 2019; Chundawat et al., 2011; Gao et al., 2011; Horn et al., 2012).

2.3.3 Fermentação alcoólica

O processo de fermentação alcoólica (Figura 11) caracteriza-se como uma via catabólica, na qual há degradação das moléculas do carboidrato (glicose ou frutose), no interior da célula dos micro-organismos (levedura ou

bactéria) até a formação de etanol e CO₂, acarretando liberação de energia química e térmica (Neto, 2014).

Figura 11 - Fermentação Alcólica



Fonte: Bronzato, 2016.

Os critérios tecnológicos que determinam a utilização comercial de uma levedura na fermentação alcoólica incluem alto rendimento e elevada produtividade, ou seja, a rápida conversão de açúcar em álcool, com mínima produção de componentes secundários. A espécie de levedura mais significativa para esse processo é a *Saccharomyces cerevisiae*, amplamente utilizada na produção de pães, bebidas alcoólicas, etanol, entre outros. A biomassa resultante da fermentação pode ser recuperada como subproduto e transformada em levedura seca, servindo como matéria-prima para a fabricação de ração animal ou suplemento vitamínico para humanos (Neto, 2014).

Teixeira et al. (2019) afirma que apesar das cepas mais utilizadas para a produção de etanol através do aguapé são *Saccharomyces cerevisiae*, *Pichia stipits* e *Zymomonas mobilis*, estudos mostram a eficácia de processos fermentativos do aguapé utilizando as cepas de *Trichoderma reesei* em monoculturas ou associadas a *Pichia stipits*; *Candida shehatae*, e *Candida intermedia*. Além disso, devido a possibilidade de o trabalho com altas temperaturas dificultarem a eficácia do trabalho das leveduras, o uso de bactérias termófilas uma alternativa promissora.

Os processos de hidrólise enzimática e fermentação alcoólica podem ocorrer tanto separadamente (SHF - Separated Hydrolysis and Fermentation), como de maneira simultânea (SSF - Simultaneous Saccharification and Fermentation). Para qual, na SSF ambos ocorrem no mesmo reator, assim a

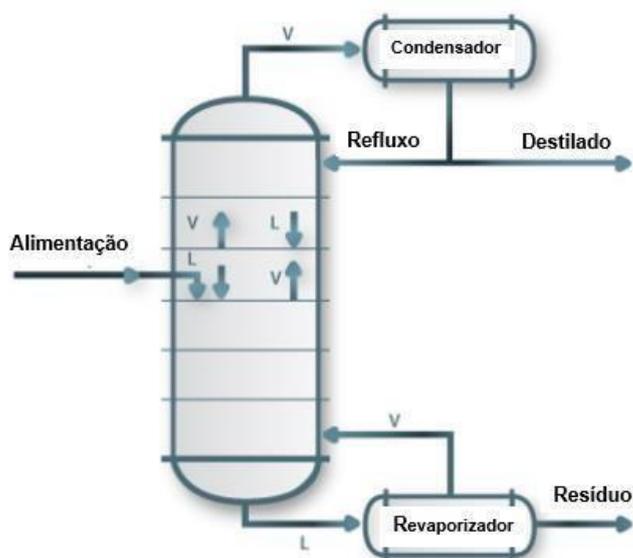
glicose liberada na hidrólise pela ação da celulase é convertida diretamente em etanol por fermentação do microrganismo e essa extração contínua de glicose do meio minimiza a inibição do produto sobre a atividade da enzima, além disso a presença do etanol no meio de cultura evita a contaminação microbiana indesejada. Sendo assim, a SSF apresenta uma maior taxa de sacarificação e produção de etanol em relação à SHF (Teixeira et al., 2019).

2.3.4 Destilação

Sendo amplamente utilizada em laboratórios de Química para separar misturas homogêneas, a destilação baseia-se na diferença de pontos de ebulição entre as substâncias presentes. Existem duas variantes desse processo: a destilação simples, ideal para separar misturas de sólido-líquido, e a destilação fracionada, usada para misturas líquido-líquido. No entanto, a destilação fracionada não é eficaz para misturas azeotrópicas, pois essas se comportam como substâncias puras durante a ebulição, fazendo com que todos os componentes evaporem simultaneamente, o que inviabiliza a separação por destilação (Fogaça, 2024).

A Figura 12 apresenta um esquema simplificado de coluna de destilação fracionada, que é o tipo de destilação utilizada para separar o etanol obtido da mistura fermentada.

Figura 12 - Coluna de destilação fracionada



Fonte: Adaptado de (Portal laboratórios virtuais de processos químicos, 2007).

entre 8% e 12% (Balat et al., 2008; Lin; Tanaka 2006; Taherzader; Karimi, 2007).

A concentração de etanol Após a fermentação, o etanol obtido encontra-se em meio aquoso, e sua concentração geralmente varia entre 8% e 15% em volume, dependendo de diversos fatores, como o tipo de biomassa utilizada, a eficiência da hidrólise, a cepa de levedura empregada, e as condições de fermentação (temperatura,

pH, nutrientes etc.). Em processos industriais, a concentração de etanol obtida diretamente após a fermentação costuma estar mais próxima do limite inferior desse intervalo, normalmente após a fermentação não é suficiente para muitos usos comerciais, sendo necessário aumentar essa concentração por meio da destilação. A destilação é a etapa final e essencial, baseada na diferença de pontos de ebulição entre o etanol (78,37 °C) e a água (100 °C), para separar o etanol da mistura fermentada. Esse processo permite a remoção de água e outras impurezas, alcançando uma concentração de etanol tipicamente de 95% ou mais, tornando-o adequado para uso como biocombustível ou em outras aplicações (Badger, 2002; Lin; Tanaka, 2006).

3 METODOLOGIA

Para a realização deste estudo sobre o aproveitamento da biomassa dos Aguapés (*Eichhornia Crassipes*) na produção de etanol de segunda geração, foi utilizada uma abordagem descritiva. Tomando como base, uma extensa revisão bibliográfica, com ênfase em 64 materiais didáticos recentemente publicados, sendo eles: 24 periódicos, 2 livros internacionais, 2 teses, 4 relatórios, 1 dissertação e 31 sites.

4 CONCLUSÃO

Este estudo focou na viabilidade da produção de etanol de segunda geração a partir da biomassa do aguapé, revelando que essa fonte pode ser economicamente viável, embora não substitua completamente outras formas de produção devido aos seus rendimentos mais baixos.

Em resumo, a obtenção de etanol a partir do aguapé é desafiadora, visto que ainda não há um processo de produção bem estabelecido, e além de requerer etapas adicionais de pré-tratamento e hidrólise para converter carboidratos estruturais em açúcares fermentáveis, as condições dos pré-tratamentos existentes não oferecem vantagens significativas em relação às desvantagens.

Portanto, o aguapé emerge como uma alternativa relevante, especialmente em regiões onde é abundante; contribuindo para iniciativas de sustentabilidade, embora ainda necessite de avanços tecnológicos para competir plenamente em termos de rendimento e custo.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA. **Eutrofização**. Departamento de Microbiologia- Universidade de São Paulo. Disponível em: <https://microbiologia.icb.usp.br/cultura-e-extensao/textos-de-divulgacao/bacteriologia/microbiologia-ambiental/eutrofizacao/#:~:text=Acontece%20que%20quando%20chove%20esse,planta%C3%A7%C3%B5es%20num%20processo%20chamado%20lixivia%C3%A7%C3%A3o>. Acesso em 5 de junho de 2024.

ALVIRA, P., et al. **Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: A review**. Bioresource Technology, vol. 101, no. 13, 2010, pp. 4851-4861.

ATVOS. **O etanol é um dos combustíveis mais populares do Brasil, mas você sabe quais são os tipos que existem e para que servem?** Atvos, 2023. Disponível em: <https://atvos.com/voce-sabe-o-que-e-etanol-anidro/>. Acesso em: 02 jun. 2024.

BADGER, P.C. (2002). **Ethanol from cellulose: A general review**. Trends in new crops and new uses, ASHS Press, Alexandria, VA, 17-21.

BALAN, V. **Current challenges in commercially producing biofuels from lignocellulosic biomass**. ISRN Biotechnology, 2014, pp. 1-31.

BALAT, M., BALAT, H., & ÖZ, C. (2008). **Progress in bioethanol processing**. Progress in Energy and Combustion Science, 34(5), 551-573.

BANSAL, P., et al. **Progressive developments in enzyme-catalyzed lignocellulosic hydrolysis**. Bioresource Technology, vol. 284, 2019, pp. 118-123.

BASTOS, R. G., WANG, L., & SAKA, S. (2016). **Production of bioethanol from second-generation feedstocks**. *In Bioenergy Research: Advances and Applications* (pp. 105-136). Elsevier.

BIOLOGIA NET. **Eutrofização**. Biologia Net, 2024. Disponível em: <https://www.biologianet.com/ecologia/eutrofizacao.htm>. Acesso em: 10 jun. 2024.

BRAGA, C. **Aguapé- Eichhornia Crassipes**. Flores e Folhagens, 2018. Disponível em: <https://www.floresefolhagens.com.br/aguape-eichhornia-crassipes/> Acesso em: 31 maio 2024

BRASIL. Secretaria de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Brasil avança no setor de biocombustíveis**. Secretaria de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2021/07/brasil-avanca-no-setor-de-biocombustiveis>. Acesso; 02 jun. 2024

BRONZATO, Giovana. **Investigação da biomassa de Eichhornia Crassipes (aguapé) para a obtenção de etanol de segunda geração como um processo mitigatório da poluição aquática**. 2016. Tese (Mestrado em Agronomia) -

Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp, Botucatu – SP, 2016

CARDONA, CARLOS A., et al. **A Bioethanol Production: Process Design Trends and Integration Opportunities**. ioresource Technology, Volume 101, Issue 13, 2010, Pages 4754-4766.

CHUNDAWAT, S.P.S., et al. **Multi-scale visualization and characterization of lignocellulosic plant cell wall deconstruction during thermochemical pretreatment**. Energy & Environmental Science, vol. 4, 2011, pp. 973-984.

CNN. **Produção de etanol no Brasil pode dobrar em uma década, aponta Embrapa**. CNN, 2022. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/economia/producao-de-etanol-no-brasil-pode-dobrar-em-uma-decada-aponta-embrapa/#:~:text=Segundo%20uma%20proje%C3%A7%C3%A3o%20do%20Instituto,natureza%20%2C176%20gramas%20de>. Acesso em: 12 set. 2023.

COSTA, A. C. Caso de Sucesso: **Produção de Etanol (2ª Geração)**. Laboratório de Engenharia de Processos Fermentativos e Enzimáticos (LEPFE) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 2014.

DOS REIS, C. V. **Produção heteróloga, caracterização biofísica e estrutural de xilose isomerases visando potenciais aplicações na fermentação pentoses**. 2017 - Tese (doutorado em física), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

DUARTE. **Consumo de etanol na Paraíba mais que dobra em janeiro de 2024**. Sindalcool, 2024. Disponível em: <https://sindalcool.com.br/consumo-de-etanol-em-janeiro-de-2024/>. Acesso em: 03 jun. 2024.

EMBRAPA. **Neutro**. Embrapa, 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana/pos-producao/alcool/mercados/neutro#:~:text=%C3%81lcool%20neutro%20ou%20puro%20refere,tipos%20de%20%C3%A1lcool%20em%20comercializa%C3%A7%C3%A3o>. Acesso em 04 jun. 2024

ENGEVISTA. **Um panorama da implantação do etanol de 3ª geração como uma fonte de energia sustentável**. Engevista, 2019. Disponível em: <https://periodicos.uff.br/engevista/article/view/13289/16399>. Acesso em 2 jun. 2024

FALCÃO. **Safra canavieira no Norte e Nordeste registra alta na produção de etanol anidro**. Revista cultivar, 2022. Disponível em: <https://revistacultivar.com.br/noticias/safra-canavieira-no-norte-e-nordeste-registra-alta-na-producao-de-etanol-anidro>. Acesso em: 29 jun. 2024

FITZPATRICK, M. et al. **A biorefinery processing perspective: Treatment of lignocellulosic materials for the production of value-added products**. Bioresource Technology, v. 101, n. 23, p. 8915–8922, 2010.

FOGAÇA. **Destilação**. Manual da Química. Disponível em: <https://www.manualdaquimica.com/quimica-geral/destilacao.htm>. Acesso em 21 jun. 2024

GAO, D., et al. **Improving the Economics of Lignocellulose Conversion to Biofuels and Chemicals with Novel Enzyme Activities**. Current Opinion in Biotechnology, vol. 22, no. 3, 2011, pp. 414-420.

GUITARRARA, P. **Biomassa**. Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/geografia/biomassa.htm>. Acesso em: 29 jun. 2024.

HEXAG EDUCACIONAL. **Biocombustível: o que é, características e exemplos**. Hexag educacional, 2021. Disponível em: Biocombustível - O que é? Características- Hexag Medicina (cursinhoparamedicina.com.br). Acesso em: 02 jun. 2024.

HIMMEL, M.E., et al. **Biomass Recalcitrance: Engineering Plants and Enzymes for Biofuels Production**. Science, vol. 315, no. 5813, 2007, pp. 804-807.

HORN, S.J., VAAJE-KOLSTAD, G., WESTERENG, B., EIJSINK, V.G.H. **Novel enzymes for the degradation of cellulose**. Biotechnology for Biofuels, vol. 5, no. 45, 2012.

KUMAR, R., et al. **Recent advances in understanding hydrolysis of lignocellulosic biomass**. Bioresource Technology, vol. 101, no. 13, 2010, pp. 4876-4884.

LIMA. **Etanol**. Mundo educação, 2023. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/quimica/etanol.htm>. Acesso em: 05 nov. 2023

LIN, Y., & TANAKA, S. (2006). **Ethanol fermentation from biomass resources: current state and prospects**. Applied Microbiology and Biotechnology, 69(6), 627- 642.

LIPPEL. **Processamento de biomassa**. Lippel, 2024. Disponível em: <https://www.lippel.com.br/artigos-academicos/processamento-de-biomassa/>. Acesso em: 15 set. 2023

LYND, L.R., et al. **Microbial Cellulose Utilization: Fundamentals and Biotechnology**. Microbiology and Molecular Biology Reviews, vol. 66, no. 3, 2002, pp. 506-577.

MAESTROVIRTUALE. **Hemicelulose: classificação, estrutura, biossíntese e funções**. Maestrovirtuale, 2024. Disponível em: https://maestrovirtuale.com/hemicelulose-classificacao-estrutura-biossintese-e-funcoes/?expand_article=1. Acesso em: 29 jun. 2024

MAGALHÃES, Lana. **Celulose**. Toda Matéria, [s.d.]. Disponível em: <https://www.todamateria.com.br/celulose/>. Acesso em: 29 jun. 2024

MELDAU. **Estrutura química da lignina**. Infoescola, 2024. Disponível em: <https://www.infoescola.com/compostos-quimicos/lignina/>. Acesso em: 29 jun. 2024

MOOD, S.H., GOLFESHAN, A.H., TABATABAEI, M., JOUZANI, G.S., NAJAFI, G.H., GHOLAMI, M., ARDJMAND, M. **Lignocellulosic biomass to bioethanol, a comprehensive review with a focus on pretreatment**. Renewable and Sustainable Energy Reviews 27 77–93. 2013.

NETO. U. F. **Reações de Fermentação: aquilo que vale a pena saber a respeito delas**. Igastroped, c.2014. Disponível em: <https://www.igastroped.com.br/reacoes-de-fermentacao-aquilo-que-vale-a-pena-saber-a-respeito-delas/>. Acesso em: 02 jun. 2024

NOVA CANA. **Propriedades físico-químicas do etanol**. Nova Cana, 2024. Disponível em: <https://www.novacana.com/noticias/propriedades-fisico-quimicas>

PENA, Rodolfo F. Alves. **“O que é Biocombustível?”**; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/o-que-e/geografia/o-que-e-biocombustivel.htm>. Acesso em 28 de junho de 2024.

PORTAL LABORATÓRIOS VIRTUAIS DE PROCESSOS QUÍMICOS. **Destilação**. Portal Laboratórios Virtuais De Processos Químicos, 2007. Disponível em: http://labvirtual.eq.uc.pt/siteJoomla/index.php?option=com_content&task=view&id=223&Itemid=413. Acesso em: 03 jun. 2024

PROPEQ. **Etanol de segunda geração: o combustível do futuro?** Propeq, 2020. Disponível em: <https://propeq.com/etanol-de-segunda-geracao/>. Acesso em: 09 set. 2023

RAÍZEN. **Etanol: O que é e como é usado no Brasil**. Raízen, 2022. Disponível em: <https://www.raizen.com.br/blog/etanol> . Acesso em: 02 jun. 2024.

RAÍZEN. **Etanol de segunda geração: potencial e oportunidades**. Raízen, 2023. Disponível em: <https://www.raizen.com.br/blog/etanol-de-segunda-geracao>. Acesso em: 06 ago, 2023

RODRIGUEZ, C., ALASWAD, A.; BENYOUNIS, K.Y., OLABI, A.G. **Pretreatment techniques used in biogas production from grass**. Renew. Sustain. Energy Rev. 2017, 68, 1193–1204. Acesso em: 15 jun. 2024

RPA NEWS. **Produção de etanol anidro cresce no Norte e Nordeste**. RPA News, 2022. Disponível em: <https://revistarpanews.com.br/producao-de-etanol-anidro-cresce-no-norte-e-nordeste/>. Acesso em: 18 ago. 2023

SANTOS, F. A. et al. **Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol**. Química Nova, v. 35, n. 5, p. 1004–1010, 2012.
SANTOS, Vanessa Sardinha dos. **Eutrofização**. Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/biologia/eutrofizacao.htm>. Acesso em: 31 maio 2024.

SEADE. **São Paulo lidera produção de etanol no país**. Seade, 2021. Disponível em: <https://informa.seade.gov.br/sao-paulo-lidera-producao-de-etanol-no-pais/>. Acesso em: 29 jun. 2024

SENNA & ANSANELLI. **Etanol de primeira ou de segunda geração? Uma comparação entre os ciclos produtivos**. Disponível em: <http://pdf.blucher.com.br.s3-sa-east-1.amazonaws.com/engineeringproceedings/1enei/083.pdf>. Acesso em: 03 out. 2023

SILVA, THAYANNE & GUERRA, ITATIANE & MESQUITA, JULIANA & HERNANDES, THAIS & TAKEUCHI, KATIUCHIA. (2022). **Desenvolvimento de soluções filmogênicas para a produção de filmes biodegradáveis, comestíveis e com atividade antioxidante: Revisão Sistemática**. Research, Society and Development. 11. e59511730139. 10.33448/rsd-v11i7.30139.

SILVEIRA, F. F. Flora Campestre, 2020. Laboratório de Estudos em Vegetação Campestre - UFRGS. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/floracampestre/eichhornia-crassipes-aguape/>. Acesso em: 31 de maio 2024

SINDALCOOL. **Safra 2022/23: Usinas da Paraíba aumentam produção de etanol em 10%. Sindicato da Indústria da Fabricação do Álcool no Estado da Paraíba**. Sindalcool, 2022. Disponível em: <https://sindalcool.com.br/safra-2022-23-usinas-da-paraiba-aumentam-producao-de-etanol-em-10/>. Acesso em: 10 jun. 2024.

SINDHU, R., BINOD, P., & PANDEY, A. (2016). **Biological pretreatment of lignocellulosic biomass – An overview**. Bioresource Technology, 199, 76-82
SINGH, A., BISHNOI, N.R., SINGH, N., & AHUJA, N. (2015). **Biofuel production from lignocellulosic biomass: An overview**. Renewable Energy, 77, 18-35.

SUN, Y., CHENG, J. **Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review**. Bioresource Technology, vol. 83, no. 1, 2002, pp. 1-11.
TAHERZADEH, M. J. & KARIMI, K. (2007). **Enzyme-based hydrolysis processes for ethanol from lignocellulosic materials: A review**. Bioresources, 2(4), 707-738.

TAHERZADEH, M. J. & KARIMI, K. (2008) **Pretreatment of lignocellulosic wastes to improve ethanol and biogas production: a review**. Int. J. Mol. Sci, v. 9, p. 1621-1651, 200.

TEIXEIRA, A., et al. **Produção de etanol de segunda geração a partir de aguapé (Eichhornia Crassipes)**. Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Teófilo Otoni-MG, 2019.

ÚNICA. **Uso do etanol evita 515 milhões de toneladas de CO2**. Única, 2020. Disponível em: <https://unica.com.br/noticias/uso-do-etanol-evita-515-milhoes-de-toneladas-de-co2-na-atmosfera/>. Acesso em: 05 nov. 2023

VIDAL. **Biocombustíveis: Biodiesel e Etanol**. Banco do Nordeste, 2022.

Disponível

em:https://www.bnb.gov.br/s482dspace/bitstream/123456789/1441/1/2022_CDS_24_8.pdf. Acesso em: 04 nov. 2023

VIDAL. **Agroindústria – Etanol**. Banco do Nordeste, 2022. Disponível em:

https://www.bnb.gov.br/s482dspace/bitstream/123456789/1409/3/2022_CDS_237.pdf

f. Acesso em: 04 nov. 2023

Wan, C., & Li, Y. (2012). **Fungal pretreatment of lignocellulosic**

biomass. *Biotechnology Advances*, 30(6), 1447-1457

ZHANG, et al. **Optimization of Bioethanol Production Using Whole Plant of Water Hyacinth as Substrate in Simultaneous Saccharification and Fermentation Process**. *Frontiers*.