



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA**



VINÍCIUS FERREIRA DE BRITO SILVEIRA

**FORMAS ALTERNATIVAS DE SE PRODUZIR ETANOL: UMA ANÁLISE SOBRE
O ETANOL DE PRIMEIRA, SEGUNDA E TERCEIRA GERAÇÃO.**

**UBERLÂNDIA
2023**

VINÍCIUS FERREIRA DE BRITO SILVEIRA

**FORMAS ALTERNATIVAS DE SE PRODUZIR ETANOL: UMA ANÁLISE SOBRE
O ETANOL DE PRIMEIRA, SEGUNDA E TERCEIRA GERAÇÃO.**

Monografia de graduação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários para a aprovação na disciplina Trabalho de Conclusão de curso, do curso de Engenharia Química.

Orientadora: Profa. Dra. Miria Hespanhol Miranda Reis

UBERLÂNDIA

2023

VINÍCIUS FERREIRA DE BRITO SILVEIRA

**FORMAS ALTERNATIVAS DE SE PRODUZIR ETANOL: UMA ANÁLISE SOBRE
O ETANOL DE PRIMEIRA, SEGUNDA E TERCEIRA GERAÇÃO.**

Monografia de graduação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários para a aprovação na disciplina Trabalho de Conclusão de curso, do curso de Engenharia Química.

Uberlândia, 23 de junho de 2023.

Banca Examinadora:

Profa. Dra. Miria Hespanhol Miranda Reis – Orientadora (FEQ - UFU)

Prof. Dr. Sérgio Mauro da Silva Neiro – Docente (FEQ - UFU)

Guilherme Guimarães Ascendino – Mestrando (FEQ - UFU)

Igor Geraldo Fiuza Costa – Mestrando (FEQ - UFU)

RESUMO

O presente estudo tem como objetivo analisar e comparar diferentes formas de produção de etanol, focando nas gerações de primeira, segunda e terceira. O uso de biocombustíveis, como o etanol, surge como uma alternativa mais sustentável, reduzindo as emissões de gases de efeito estufa e sendo menos prejudicial à saúde e ao meio ambiente. A demanda por biocombustíveis está aumentando, e é necessário um aumento significativo na produção para cumprir as metas do Acordo de Paris. O Brasil possui expertise em bioenergia e é um grande produtor de etanol de primeira geração, obtido principalmente da cana-de-açúcar. No entanto, enfrenta desafios relacionados à competição por terras agrícolas e impactos ambientais. O etanol de segunda geração lignocelulósico utiliza resíduos agrícolas como matéria-prima, mas ainda enfrenta desafios técnicos e financeiros. O etanol de terceira geração, obtido a partir de algas, apresenta potencialidades interessantes, como maior eficiência fotossintética e menor competição por recursos agrícolas, mas sua produção em escala comercial ainda requer avanços tecnológicos. Destacam-se os esforços da empresa Raízen na construção de usinas de etanol de segunda geração, demonstrando o compromisso do Brasil em buscar soluções mais sustentáveis. É importante diversificar as matérias-primas avançadas, como algas e biomassa, para alcançar metas de sustentabilidade. Conclui-se que o etanol de primeira geração continua sendo a principal fonte de produção no Brasil, enquanto o de segunda e terceira geração ainda enfrentam desafios. Investimentos contínuos em pesquisa, desenvolvimento e inovação são essenciais para avançar nessas tecnologias e alcançar um futuro mais sustentável na produção de etanol, contribuindo para o cumprimento das metas estabelecidas nas Conferências das Partes (COPS) e no Acordo de Paris, no que se diz respeito ao combate às mudanças climáticas.

Palavras-chave: Etanol, Etanol lignocelulósico, Etanol avançado, Descarbonização.

ABSTRACT

The present study aims to analyze and compare different forms of ethanol production, focusing on first, second, and third generations. The use of biofuels, such as ethanol, emerges as a more sustainable alternative, reducing greenhouse gas emissions and being less harmful to health and the environment. The demand for biofuels is increasing, and a significant increase in production is necessary to meet the goals of the Paris Agreement. Brazil has expertise in bioenergy and is a major producer of first-generation ethanol, mainly obtained from sugarcane. However, it faces challenges related to competition for agricultural land and environmental impacts. Second-generation lignocellulosic ethanol utilizes agricultural waste as raw material but still faces technical and financial challenges. Third-generation ethanol, obtained from algae, presents interesting potentialities such as higher photosynthetic efficiency and lower competition for agricultural resources, but its commercial-scale production still requires technological advancements. The efforts of the company Raízen in the construction of second-generation ethanol plants stand out, demonstrating Brazil's commitment to seeking more sustainable solutions. It is important to diversify advanced feedstocks, such as algae and biomass, to achieve sustainability goals. It is concluded that first-generation ethanol remains the main source of production in Brazil, while second and third generations still face challenges. Continuous investments in research, development, and innovation are essential to advance these technologies and achieve a more sustainable future in ethanol production, contributing to the fulfillment of goals established in the Conference of the Parties (COPs) and the Paris Agreement in combating climate change.

Keywords: Ethanol, Lignocellulosic ethanol, Advanced ethanol, Decarbonization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Matriz energética mundial 2020.	9
Figura 2 – Matriz energética brasileira 2021.	9
Figura 3 – Oferta interna de energia no Brasil.....	10
Figura 4 – Estrutura do material lignocelulósico.....	18
Figura 5 – Estrutura do material lignocelulósico antes e pós pré-tratamento.....	21
Figura 6 – Processo de produção E2G.	22
Figura 7 – Processo de produção E3G.	33
Figura 8 – Fotobiorreator aberto (Raceways).....	34
Figura 9 – Fotobiorreatores fechados	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição Biomassa lignocelulósica.....	17
Tabela 2 – Histórico mundial de plantas de E2G	25
Tabela 3 – Classificação dos tipos de biocombustíveis	29

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
2	OBJETIVO	11
2.1	OBJETIVO GERAL	11
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
3	REFERENCIAL TEÓRICO.....	12
3.1	DEFINIÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO DOS BIOCOMBUSTÍVEIS.....	12
3.2	CONTEXTO HISTÓRICO DOS BIOCOMBUSTÍVEIS	13
3.3	ETANOL DE PRIMEIRA GERAÇÃO	14
3.4	ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO.....	15
3.4.1	Estrutura da biomassa	17
3.4.2	Processo de produção E2G	20
3.4.3	Vantagens e desvantagens na utilização de E2G.....	23
3.4.4	Plantas industriais de E2G.....	24
3.4.5	O cenário Brasileiro de etanol de segunda geração	26
3.5	ETANOL DE TERCEIRA GERAÇÃO	28
3.5.1	Biomassa das algas como matéria-prima para produção de bioetanol.....	31
3.5.2	Processo de produção E3G	33
3.5.3	Desafios encontrados na área do etanol de terceira geração.....	38
3.6	ETANOL COMO COMBUSTÍVEL E CENÁRIO FUTURO	40
4	CONCLUSÃO	42
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

1 INTRODUÇÃO

Há muito tempo, a humanidade mantém uma elevada dependência em relação aos combustíveis fósseis não renováveis, os quais são representados principalmente pelo carvão e petróleo. No entanto, essa intensa dependência, aliada às mudanças climáticas permanentes causadas pelo uso desenfreado desses recursos pela ação humana e à variação dos preços decorrente de conflitos externos, tem despertado um alerta crescente nos governantes, levando-os a buscar cada vez mais formas alternativas de obtenção de energia.

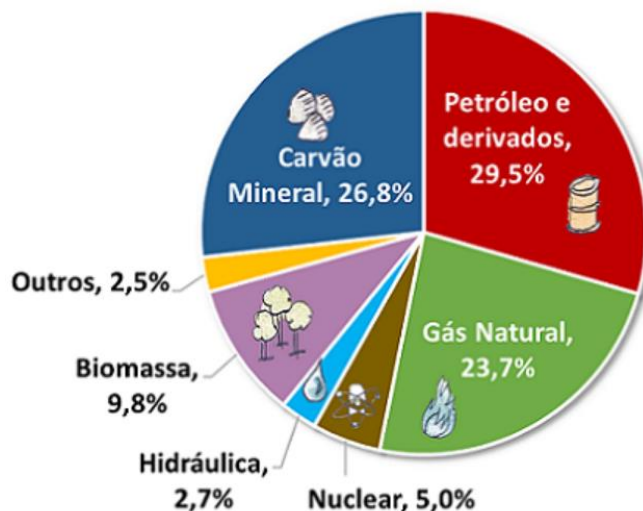
A emissão de poluentes resultantes da queima de combustíveis fósseis causa um impacto significativo e negativo tanto na saúde humana quanto no meio ambiente. Entre os principais problemas destacam-se a acidificação de rios e florestas, deterioração de materiais, aumento de doenças respiratórias e circulatórias, além de contribuir para o efeito estufa e o consequente aumento do aquecimento global. As partículas também podem se dispersar através das correntes de ar, sendo transportadas para outras regiões, não se limitando à sua origem de queima (SANTOS, 2012).

Por outro lado, os biocombustíveis, como o etanol, têm se mostrado um caminho mais sustentável. De acordo com uma pesquisa realizada pela UNICA entre março de 2003 e 2020, o consumo de etanol (anidro e hidratado) no setor de transporte pode evitar a emissão de cerca de 500 milhões de toneladas de CO₂ na atmosfera. Ademais, o etanol apresenta outras vantagens em comparação aos combustíveis fósseis. Além de reduzir em até 90% as emissões de gases de efeito estufa, diminuir a emissão de monóxido de carbono, é biodegradável, não tóxico e emite menos partículas prejudiciais à saúde (UNICA, 2019).

A demanda por biocombustíveis em 2021 alcançou 4 EJ (159.200 milhões de litros), voltando aos níveis próximos de 2019 após uma queda causada pela pandemia de covid-19. No entanto, para cumprir as metas estabelecidas pela ONU no Acordo de Paris de combater as mudanças climáticas e limitar o aumento médio da temperatura global em 1,5 °C, bem como alcançar o objetivo de zero emissões líquidas de carbono (net zero), será necessário um aumento significativo na produção de biocombustíveis até 2050 (IEA, 2022).

Ao se analisar o gráfico da Figura 1 pode-se inferir que a matriz energética mundial ainda é muito concentrada em fontes não renováveis.

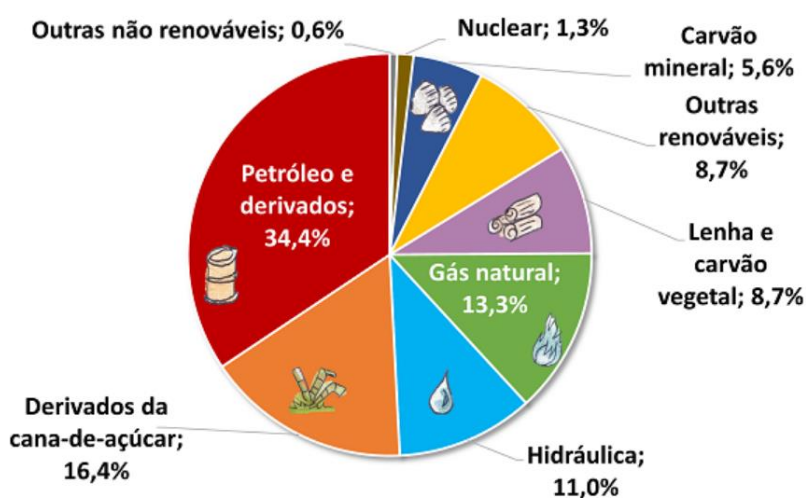
Figura 1 – Matriz energética mundial 2020.



Fonte: IEA (2022).

As fontes renováveis correspondem a apenas 15% da matriz energética mundial. Já no Brasil, o contexto é diferente, visto que se usa mais fontes renováveis que no resto do planeta. Juntando lenha, carvão vegetal, derivados da cana e outros renováveis, a matriz brasileira chega a quase metade da matriz energética, onde totalizou 44,8% no ano de 2021, podendo ser verificado na Figura 2.

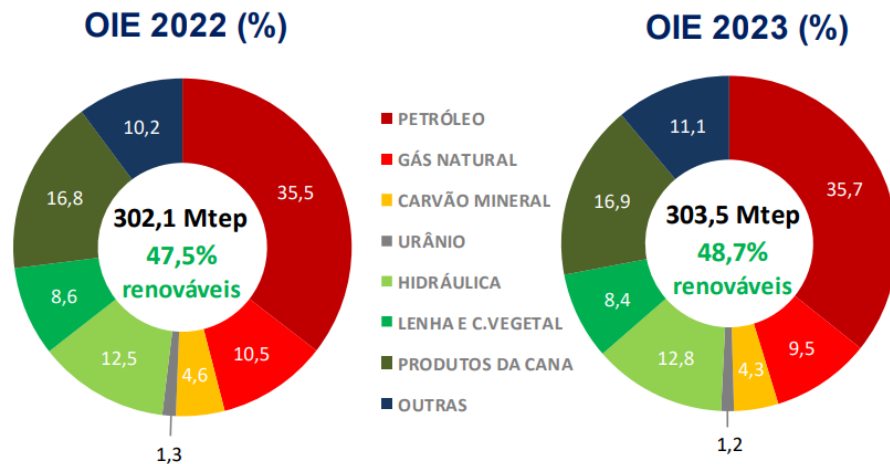
Figura 2 – Matriz energética brasileira 2021.



Fonte: EPE (2022)

A Figura 3 apresenta a oferta interna de energia no Brasil, permitindo uma análise mais detalhada da matriz energética do país e sua distribuição. Observa-se que o Brasil está se tornando mais sustentável ao longo do tempo, com um aumento no uso de fontes de energia renovável em comparação com anos anteriores.

Figura 3 – Oferta interna de energia no Brasil.



Fonte: MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (2023).

Pelas informações e dados apresentados, percebe-se que a matriz energética brasileira é mais renovável do que a mundial. Isso significa que de toda a energia produzida e consumida no Brasil, aproximadamente, 48% são originárias de fontes energéticas renováveis, como o sol, o vento, a água e a biomassa, sendo que a bioenergia representa 27% desse total. Dentre a bioenergia, aproximadamente 17% são provenientes da cana-de-açúcar, sendo uma proporção significativamente alta em comparação com outros países (EPE, 2022).

O Brasil possui uma grande expertise acumulada na área de bioenergia e é reconhecido por exportar tecnologia nesse setor. No que diz respeito à geração de energia elétrica, quase 10% da energia brasileira é produzida a partir do aproveitamento dos resíduos da cana-de-açúcar. Como a matriz brasileira e mundial ainda dependem bastante dos combustíveis fósseis existe um grande espaço para avanço rumo a descarbonização (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2023).

No contexto atual, com o objetivo de cumprir as metas do Acordo de Paris até 2030, é necessário alcançar uma produção de 15 EJ de biocombustíveis, o que requer um crescimento médio de 16% ao ano. Para isso, é essencial expandir o uso de matérias-primas avançadas, como algas e microalgas (etanol de terceira geração),

além dos biocombustíveis produzidos a partir de resíduos e biomassa (etanol de segunda geração). Essas fontes devem representar 45% da demanda total de biocombustíveis até 2030, em comparação com aproximadamente 8% em 2021 (IEA, 2022).

De acordo com Cinelli, (2012), o etanol pode ser produzido das seguintes maneiras:

- Etanol de primeira geração: etanol convencional, produzido a partir de matérias-primas comestíveis, como açúcar, amido e óleos vegetais. Como exemplo, incluem-se os processos de etanol da cana, milho e beterraba.
- Etanol de segunda geração: etanol celulósico, produzido a partir de biomassa não alimentar, como resíduos agrícolas e resíduos florestais.
- Etanol de terceira geração: etanol avançado, produzido a partir de matérias-primas não alimentares e não celulósicas, como algas e microalgas.

Atualmente, a maioria da produção de biocombustíveis se baseia em matérias-primas convencionais, como cana-de-açúcar, milho e soja. No entanto, é de extrema importância ampliar a produção de biocombustíveis para incluir matérias-primas avançadas, de modo a garantir um impacto mínimo no uso da terra, nos preços dos alimentos, nas rações e em outros aspectos ambientais além de chegar aos objetivos estipulados pelo Acordo de Paris de diminuir as emissões de GEE (Gases do efeito estufa (IEA, 2022).

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste estudo é realizar uma revisão bibliográfica a fim de analisar e comparar diferentes formas de se produzir etanol, focando no de 1^a, 2^a e 3^a geração, englobando suas características, processos de produção, vantagens, desvantagens, desafios assim como as perspectivas futuras com o propósito de compreender o impacto frente à descarbonização dos biocombustíveis.

2.2 Objetivos específicos

Aprofundando-se no tema, os objetivos específicos deste estudo são:

- realizar uma apresentação e um histórico sobre o etanol como biocombustível e sua importância frente à redução das emissões de gases de efeito estufa.
- analisar o etanol de 1ª geração, abrangendo suas características, matérias-primas de produção, vantagens e desvantagens.
- discorrer sobre o etanol de 2ª geração, analisando as tecnologias e processos utilizados, as matérias-primas alternativas, vantagens, desvantagens, os desafios e avanços nessa área mundialmente e nacionalmente.
- estudar o etanol de 3ª geração, explorando as novas tecnologias e processos em desenvolvimento, as fontes de matéria-prima e os benefícios ambientais e de sustentabilidade.
- fazer uma comparação entre as três formas de produção e estimar o cenário futuro.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Definição e contextualização dos biocombustíveis.

Define-se como biocombustível todo combustível elaborado a partir das transformações de diferentes componentes orgânicos de uma forma renovável, por exemplo: produtos agrícolas, produtos florestais, resíduos agrícolas e florestais, resíduos industriais, algas e resíduos animais, e outros similares (CASCONI, 2007).

Considera-se o etanol um dos mais importantes biocombustíveis renováveis, uma vez que é produzido de maneira a contribuir para a diminuição do efeito estufa, isto é, ele é capaz de substituir, parcialmente ou totalmente, os combustíveis derivados do petróleo e gás natural em motores a combustão ou em uma diferente forma de produzir energia (BÖRJESSON, 2009).

No Brasil, os dois principais biocombustíveis líquidos produzidos são o etanol de primeira geração proveniente da fermentação da cana-de-açúcar, e o biodiesel que é produzido por meio de óleos vegetais ou gorduras animais e adicionado ao diesel que vem do petróleo (ANP, 2016).

O etanol pode ser fabricado por processos químicos ou microbiológicos. A via química se baseia na hidratação do etileno, enquanto o processo microbiológico é realizado pela levedura *Saccharomyces cerevisiae*, entretanto outros microrganismos possuem a capacidade de produzir o etanol.

Hoje, a principal rota industrial usada para se produzir etanol no mundo é o processo microbiológico, conhecido como fermentação alcoólica. Nesse processo os açúcares presentes em vegetais são convertidos em etanol, energia, biomassa celular, CO₂ e outros produtos pela célula de levedura (HIDZIR, N.S.; SOM, A.S.; ABDULLAH, Z., 2014).

3.2 Contexto histórico dos biocombustíveis

Historicamente, os primeiros carros projetados foram movidos a etanol, tornando a invenção da produção do etanol biocombustível um tanto quanto impressionante. Porém, o avanço em tecnologia na área do petróleo, a abundância e os preços baixos no início do século XX, deram preferência aos combustíveis a base de petróleo. Foi nesse contexto que a gasolina se tornou a principal opção de combustível em todo o mundo (AMORIM, H.V.; LOPES, M.L., 2005).

Após ocorrer a crise do petróleo, o governo brasileiro decidiu lançar o programa “Proálcool” em 1975 a fim de reduzir as dependências do país em relação ao petróleo. Primeiramente, o etanol foi adicionado na gasolina, porém após a segunda crise em 1979, a indústria automobilística começou a produzir o primeiro carro a funcionar exclusivamente com etanol para o mercado brasileiro.

Na década de 1980, a produção de veículos movido a etanol atingiu uma meta surpreendente no Brasil, representando 95% de toda a frota produzida. Esse avanço alavancou o consumo do combustível renovável e reduziu consideravelmente a dependência do país em relação ao petróleo. Porém diversos fatores se combinaram nesse período, incluindo a queda nos preços do petróleo, a redução dos subsídios aos produtores e o aumento dos preços do açúcar, o que resultou em escassez de combustível e em uma drástica diminuição na demanda por carros movidos a etanol.

Já no século XXI, o cenário mudou. Devido ao avanço da tecnologia *flexfuel* (carros movidos a gasolina e a etanol) junto aos preços elevados do petróleo no mercado global, o uso do etanol voltou a crescer. A utilização de misturas de etanol resultou em uma melhora na qualidade do ar em áreas urbanas densamente povoadas, com uma redução das emissões de monóxido de carbono de 50 g/km percorridos para menos de 5,8 g/km percorridos. Atualmente, a gasolina inclui uma proporção de 27% de etanol anidro em sua composição (POTTER, 2008).

Graças à tecnologia de carros flexfuel, os consumidores puderam optar pelo combustível mais conveniente e econômico. Em 2015, a produção e venda de carros e veículos comerciais leves flexfuel representaram 85,45% do total. Atualmente, o uso do etanol como biocombustível no Brasil tem se destacado como o programa mais bem-sucedido mundialmente na substituição de combustíveis fósseis (GOLDEMBERG, 2008).

A classificação dos biocombustíveis pode ser feita entre 1^a, 2^a e 3^a geração dependendo da matéria-prima utilizada, maturidade tecnológica e o nível de emissão de gases efeito estufa. As tecnologias convencionais são os processos já maduros e consolidados comercialmente, como o etanol de primeira geração. Por outro lado, o etanol de segunda e terceira geração se encaixam em fase de pesquisa e desenvolvimento, que são processos menos maduros tecnologicamente (CORRÊA, 2014).

Hoje no Brasil, é produzido etanol de primeira e segunda geração. Os automóveis da frota brasileira utilizam o etanol de duas formas: etanol hidratado que é usado em sua forma pura, proveniente do processo de fermentação alcoólica, em carros que utilizam somente esse combustível ou em carros modelo flexfuel. Já o anidro é o álcool hidratado que passa pelo processo de desidratação, sendo misturado na gasolina numa proporção entre 20 e 25% no Brasil (ANP, 2016).

3.3 Etanol de primeira geração

O etanol de primeira geração é um biocombustível produzido a partir de matérias-primas alimentícias, como cana-de-açúcar e milho. A escolha da matéria-prima depende de fatores como região, solo, tecnologia disponível e disponibilidade de terras. A principal diferença nos processos de obtenção de etanol está nas etapas anteriores à fermentação, sendo que as etapas de fermentação e destilação são

geralmente comuns a todos os processos (MACEDO, 1993).

A cana-de-açúcar e o milho têm alta eficiência na conversão de CO₂ e água em açúcares e polímeros por meio da fotossíntese. A cana-de-açúcar contém sacarose prontamente fermentável, enquanto o milho requer um processo de hidrólise para converter o amido em açúcares fermentáveis. O etanol apresenta várias vantagens em relação aos derivados do petróleo, sendo uma fonte renovável que reduz as emissões de gases do efeito estufa. O etanol de cana-de-açúcar é mais vantajoso do que o de milho em termos de produtividade, com cada hectare de cana produzindo mais etanol do que o milho (NIGAM; SINGH, 2011).

Além disso, as necessidades energéticas das destilarias podem ser atendidas pela cogeração a partir da biomassa residual da cana-de-açúcar, como palha e bagaço. Isso reduz o consumo de combustíveis e gera excedentes de eletricidade que podem ser comercializados. O etanol de cana-de-açúcar também tem a capacidade de reduzir as emissões de gases do efeito estufa em comparação com a gasolina (MUSSATTO *et al.*, 2010).

No entanto, o desafio do etanol de primeira geração em larga escala está na dualidade entre a produção de alimentos e combustíveis. A produção agrícola para biocombustíveis pode levar à expansão de terras e afetar ecossistemas com alto estoque de carbono. Embora alguns estudos tenham opiniões divergentes, a área destinada ao cultivo de cana-de-açúcar para etanol de primeira geração é relativamente pequena em comparação com a área total destinada à agropecuária (RAÍZEN, 2023).

A longo prazo, pode surgir um problema se houver uma disputa entre a produção de alimentos e biocombustíveis, especialmente se a demanda aumentar significativamente. Apesar do processo de produção de etanol de primeira geração ser estabelecido e produtivo, há espaço para avanços. A introdução do etanol de segunda geração, proveniente de matéria-prima celulósica, pode ser uma solução para contornar esse problema.

3.4 Etanol de segunda geração

No contexto em que o etanol de primeira geração possui certas limitações, foi proposto o de segunda geração. O etanol de segunda geração ou celulósico é obtido a partir de compostos presentes em um material lignocelulósico, utilizando a biomassa

coletada de resíduos agrícolas e florestais (ADITIYA *et al.*, 2016).

Assim, alguns exemplos de biomassa vegetal lignocelulósica utilizada para produzir etanol de segunda geração são: a palha, folhas, bagaço, lascas de madeiras e outras fontes de biomassa não comestível.

É importante ressaltar que entre o etanol de primeira geração e o de segunda não existem diferenças quimicamente. Essa divergência está apenas na forma e matéria prima utilizada para produzi-los (RAÍZEN, 2023).

Uma vez que o E2G (etanol de segunda geração) é produzido por meio de biomassa, ele se torna uma fonte mais sustentável de energia, demonstrando menos impactos ambientais em termos de emissões de CO₂ quando comparado com a gasolina (HAJI ESMAEILI *et al.*, 2020).

No caso da cana-de-açúcar, matéria-prima mais utilizada no Brasil para produzir etanol, e devido à importância do setor sucroalcooleiro no país, é importante pensar no resíduo feito pelo processo (bagaço) como uma grande possibilidade de utilização como matéria-prima de produção do etanol de segunda geração.

No processo de produção de etanol no Brasil, somente o caldo da cana-de-açúcar é utilizado, enquanto o bagaço e a palha, que representam cerca de dois terços da biomassa, são aproveitados como fonte de energia térmica para os processos de geração de vapor, e ainda sobram excedentes que podem ser largamente utilizados no processo de produção de E2G. (CHEMMÉS *et al.*, 2013).

Assim, o etanol de segunda geração tem a proposta de produzir mais etanol utilizando a mesma área plantada, uma vez que ele é produzido através de resíduos da produção (MONTES, 2017).

As tecnologias de primeira geração são baseadas na fermentação alcoólica de certos polissacarídeos, enquanto as de segunda geração envolvem a produção de etanol celulósico a partir da quebra dos polissacarídeos encontrados nas paredes celulares vegetais dos resíduos lignocelulósicos, por meio de etapas de pré-tratamento e hidrólise da celulose antes da fermentação (PITARELO, 2013).

Nota-se que a progressiva implementação da colheita mecanizada da cana-de-açúcar, a proibição da queima da palha e a tendência de uso de caldeiras de alto desempenho resultaram em excedentes de bagaço e palha, que podem ser transformados em etanol de segunda geração. Estima-se que o aproveitamento do bagaço e das palhas e pontas da cana aumente a produção de álcool em 30 a 40%, para a mesma área plantada.

Algumas matérias-primas, como capim-elefante, braquiárias e árvores de crescimento rápido, podem representar alternativas competitivas e eficientes em locais onde a cana-de-açúcar não é cultivada (PACHECO, 2011).

A utilização da biomassa lignocelulósica tem se tornado cada vez mais relevante como uma fonte de energia emergente, devido à sua abundância, disponibilidade e caráter renovável. Resumidamente, a produção do E2G segue as etapas de pré-tratamento, hidrólise enzimática, fermentação e destilação (SANTOS *et al.*, 2022).

3.4.1 Estrutura da biomassa

Biomassa é todo recurso renovável proveniente da matéria orgânica ou como qualquer matéria de origem vegetal que dispõe de energia e quando passada por um processo fornece formas bioenergéticas mais apropriadas para o uso final. Como exemplo tem-se resíduos de serrarias, carvão vegetal, resíduos agropecuários e materiais a lenha. (SILVA, 2010).

A composição da biomassa lignocelulósica geralmente fica próxima aos seguintes valores, 38 a 48% de celulose, 20 a 25% de hemicelulose e 20 a 28% de lignina (DOS REIS, 2017). Assim, materiais lignocelulósicos (matéria-prima do E2G) são os principais componentes da biomassa e representam a opção de energia renovável mais abundante disponível no globo (WOICIECHOWSKI *et al.*, 2020). Na Tabela 1, é possível observar algumas composições de diferentes biomassas lignocelulósicas.

Tabela 1 – Composição Biomassa lignocelulósica.

Biomassa Lignocelulósica	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)
Bagaço de Cana	32-48	19-24	23-32
Palha de cana	40-44	30-32	22-25
Madeira dura	43-47	25-35	16-24
Algodão	95	2	0,3
Espiga de milho	45	35	15
Palha de arroz	43,3	26,4	16,3

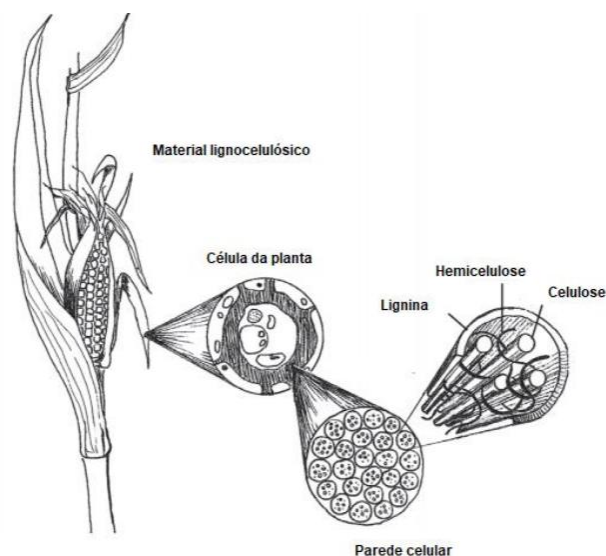
Fonte: adaptado de (SANTOS, 2012).

Nesse contexto, a lignina, celulose e hemicelulose da biomassa são conectadas por pontes de hidrogênio ou ligações covalente em uma estrutura cristalina, e essa estrutura é altamente estável, por esse motivo é necessário realizar um pré-tratamento a fim de expor a fração de celulose e hemicelulose no formato de açúcares que podem ser fermentados, diferentemente da sacarose contida no processo de primeira geração, que pode ser fermentado facilmente (CHEMMÉS *et al.*, 2013).

Assim, devido às propriedades estruturais e químicas da biomassa lignocelulósica, ela apresenta características que a tornam resistente à biodegradação por enzimas e microrganismos. Essa resistência do material lignocelulósico é conhecida como recalcitrância. A conversão eficiente da biomassa lignocelulósica em biocombustíveis e produtos de alto valor agregado é extremamente desafiadora devido à sua estrutura complexa e à recalcitrância da lignocelulose (VINZANT *et al.*, 2005).

Uma vez que a biomassa possui a estrutura como o modelo apresentado na Figura 4, cada uma das partes que a forma pode ser utilizada com uma finalidade. Celulose e hemicelulose da biomassa podem ser hidrolisadas em açúcares e posteriormente fermentadas. Já a lignina, pode ser deteriorada em frações menores sendo utilizadas em alguns processos químicos, como por exemplo na fabricação de espumas, resinas e fibras de carbono (PACHECO, 2011).

Figura 4 – Estrutura do material lignocelulósico.



Fonte: adaptado de (MONTGOMERY *et al.*, 2014).

A celulose é o carboidrato mais abundante na terra (polissacarídeo) de estrutura linear, majoritariamente cristalina, sendo encontrada mais comumente em plantas. Possui unidades repetidas de glicose, ligadas por β -1,4 ligações glicosídicas. Os vegetais possuem características como rigidez, e sustentabilidade estrutural das paredes celulares, oriundo das interações entre os polissacarídeos da celulose. Uma função importante da celulose é a sustentação estrutural, que é possível devido sua grande insolubilidade em água.

As cadeias de celulose são empacotadas em microfibras cristalinas cobertas em uma matriz de hemicelulose e lignina, tornando a estrutura resistente a enzimas de sacarificação. A própria estrutura da celulose, juntamente com as ligações de hidrogênio entre as moléculas, confere a ela uma alta resistência à tração, tornando-a insolúvel em água e em diversos outros solventes. Essas características são parcialmente responsáveis pela sua resistência à degradação microbiana.

Além disso, a superfície hidrofóbica da celulose leva à formação de uma camada densa de água, atuando como uma proteção e impedindo a difusão de enzimas e produtos de degradação próximos à sua superfície (HASUNUMA; KONDO, 2012).

Já a hemicelulose é um composto que está presente em todas as paredes celulares vegetal, está associada fortemente com a celulose e a lignina. A composição dela na parede celular das plantas chega a 30%, tornando-a um dos carboidratos mais abundantes na natureza. (RABELO, 2010). Na estrutura vegetal, a hemicelulose está presente de forma intercalada nas microfibras de celulose e em uma fase anterior à lignificação. Isso confere ao material características de elasticidade e flexibilidade ao agregado de microfibra, impedindo que elas se toquem.

A estrutura da hemicelulose pode consistir em uma única unidade (homopolímero), como a xilana, ou em duas ou mais unidades (heteropolímero), como a glucomanana, que estão ligadas por ligações de hidrogênio entre si (FREITAS, 2017). A hidrólise da hemicelulose é relativamente mais fácil em comparação com a hidrólise da celulose. Por conseguinte, ao compararmos a fermentação da pentose, proveniente da hemicelulose, com a fermentação da hexose, proveniente da celulose, observamos que a fermentação da pentose é menos avançada (BNDES, 2008).

A lignina é uma molécula de tamanho grande ou macromolécula tridimensional, composta principalmente por unidades de fenilpropano. Sua estrutura apresenta configurações polifenólicas complexas, cujas características não são totalmente

conhecidas e que não podem ser convertidas em açúcares fermentáveis (FENGEL; WEGENER, 1989).

Na etapa de hidrólise enzimática de materiais lignocelulósicos, a lignina desempenha o papel de uma substância adesiva, sendo necessário removê-la para que a celulose e a hemicelulose possam ser convertidas em açúcares.

Além disso, a lignina atua como uma barreira física para as enzimas, podendo capturá-las irreversivelmente. Isso pode afetar a quantidade de enzimas necessárias para a hidrólise e dificultar a recuperação das enzimas após o processo de hidrólise (SANTOS, 2012). Sua principal função é proporcionar proteção à planta, envolvendo as moléculas de celulose e hemicelulose, a fim de dificultar o acesso de microrganismos. Isso representa um desafio na produção de biocombustíveis, pois o uso da biomassa como substrato requer a quebra dos componentes de sua fibra e o acesso das enzimas à sua estrutura interna (DOS REIS, 2017).

Conhecida a estrutura que compõe a matéria-prima utilizada para produzir E2G é importante compreender o processo de produção, o qual é apresentado no tópico seguinte.

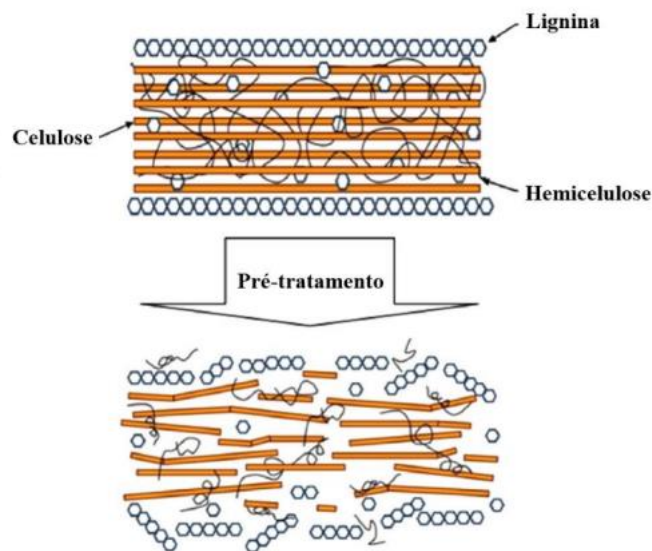
3.4.2 Processo de produção E2G

As etapas do processo de produção do etanol de segunda geração por meio de do material lignocelulósico segue da seguinte forma:

- **Pré-Tratamento:** para a produção de etanol a partir de materiais lignocelulósicos, é necessário converter a celulose e a hemicelulose em monômeros de glicose e xilose, respectivamente, além de converter esses açúcares em etanol por meio de microrganismos. No entanto, a celulose natural encontrada na natureza está fortemente protegida pela matriz de lignina e carboidrato, o que torna a hidrólise da celulose um processo desafiador e lento (RABELO, 2010). Portanto, é necessário realizar pré-tratamentos no bagaço para aumentar a exposição das fibras de celulose, tornando-as mais acessíveis aos processos de hidrólise enzimática ou ácida (FREITAS, 2017). Essa é uma das principais fases do processo uma vez que tem um custo significativo além de influenciar o custo posterior e anterior ao processo (RABELO, 2010). Na Figura 5, é possível visualizar a alteração da estrutura da biomassa após o pré-

tratamento, no qual a lignina e a hemicelulose são removidas, reduzindo sua cristalinidade e expondo a celulose à ação das enzimas responsáveis por converter os polissacarídeos em açúcares fermentáveis. Os objetivos principais do pré-tratamento são: diminuir a cristalinidade da celulose, desassociar o complexo lignina-celulose, aumentar a área superficial da biomassa, preservar as pentoses para maximizar os rendimentos em açúcares e prevenir ou minimizar a formação de compostos inibidores tanto na etapa de hidrólise quanto na etapa de fermentação (RABELO, 2010).

Figura 5 – Estrutura do material lignocelulósico antes e pós pré-tratamento.



Fonte: adaptado de (MOOD *et al.*, 2013).

- Hidrólise enzimática: nessa etapa são inseridas enzimas que fazem a quebra da hemicelulose e celulose em açúcares – xilose(pentose) e glicose. Os tipos de hidrólise são a química (mais barata e rápida, porém com rendimentos menores) ou enzimática (é a mais utilizada, sendo mais seletiva e pode atingir rendimentos elevados, a reação é mais lenta). O fato de a etapa enzimática utilizar um coquetel enzimático e o fato de a etapa ser muito bem controlada (condições de pH, temperatura e tempo) para não aparecer inibidores de fermentação encarece o processo.
- Separação: a polpa hidrolisada passar por um processo de separação bem parecido com os primeiros processos de separação da polpa bruta, no pré-tratamento. Assim, essa polpa agora é rica em glicose, xilose e lignina.

- **Evaporação:** as duas correntes de processo são misturadas em um tanque que será enviado ao processo de evaporação. Esse processo tem por finalidade, concentrar os açúcares através da retirada de água.
- **Fermentação:** esse processo é parecido com o do etanol de primeira geração. Para fermentar a xilose necessita-se de uma levedura geneticamente modificada. Nesse contexto, no processo de primeira geração o inóculo de levedura (pé de cuba) é preparado poucas vezes ao longo da safra devido ao reciclo, já para o etanol de segunda geração há necessidade de sempre preparar um novo inóculo. Isso se deve justamente pela engenharia genética presente nas leveduras. Pode-se constatar que após alguns ciclos, as leveduras perdiam a capacidade de expressar o gene responsável por dar a habilidade de metabolizar xilose.
- **Destilação:** após consumir todo o açúcar o vinho é enviado para a destilaria e segue com o processo de destilação. Trata-se de um processo bastante simples onde ocorre a fervura desse vinho e a recuperação do etanol através dos condensadores de placa.

A Figura 6 mostra através de um fluxograma como é realizado o processo de produção de etanol de segunda geração.

Figura 6 – Processo de produção E2G.



Fonte: BARROSO (2022).

3.4.3 Vantagens e desvantagens na utilização de E2G

Primeiramente, assim como o etanol de primeira geração, o de segunda geração emite menos gases poluentes que os combustíveis fósseis.

A pegada de carbono é um termo utilizado que avalia a quantidade de carbono (CO₂) ou outros gases equivalentes que um processo é capaz de emitir. O E2G possui uma pegada de carbono 30% menor que o de E1G e pode chegar até 80% menor quando se comparado a gasolina (RAÍZEN, 2023).

Além disso, segundo a Raízen (2023), uma vez que o etanol de segunda geração tem a mesma constituição química e aplicações que o de primeira geração, é praticável aumentar a eficiência em até 50% (caso da cana), sem precisar aumentar a área plantada, visto que não é preciso nenhuma cana-de-açúcar a mais para produzi-lo, apenas utilizando os resíduos da produção do etanol de primeira geração.

Ademais, a matéria-prima para produzir etanol de segunda geração está amplamente disponível e ajuda a superar a questão relacionada entre produção de etanol e de alimentos (SANTOS *et al.*, 2022).

Existe uma vantagem na questão logística também. As matérias-primas utilizadas para se produzir o E2G são subprodutos ou coprodutos do processo tradicional de produção do combustível. No cenário do Brasil, esses insumos estão acessíveis na própria unidade, após o processamento da cana pela tecnologia de primeira geração.

Além disso, a cana-de-açúcar, a palha e o bagaço representam a maior parte (aproximadamente 2/3) do potencial energético dessa cultura. Ao utilizar esses subprodutos do processo habitual na produção de etanol de segunda geração (E2G), é possível aproveitar todo o potencial energético desses materiais, o que aumenta a relação custo-benefício para os produtores. O mesmo princípio se aplica a todas as cadeias agroindustriais que possuem excedentes de biomassa, como papel e celulose, soja, milho, trigo e outras.

Adicionalmente, diferentemente da cana-de-açúcar que requer processamento imediato após a colheita, os resíduos agrícolas provenientes da produção de etanol de primeira geração podem ser armazenados e aproveitados posteriormente, especialmente durante os períodos de entressafra quando as usinas estão inativas. Esses novos recursos podem também possibilitar a produção de etanol em regiões e países com limitações de áreas adequadas para o cultivo de cana (BNDES, 2016).

Por outro lado, apesar da matéria-prima utilizada para produzir o E2G estar largamente disponível, a complexidade e as estruturas de cada tipo, que dependem da origem e posição geográfica, fazem com que gerem obstáculos econômicos para produzir o bioetanol em grande quantidade (LIMAYEM; RICKE, 2012).

Existem também problemas relacionados às etapas dos processos, por exemplo: na etapa de pré-tratamento o desafio é encontrar o método apropriado para cada tipo de biomassa, visando expor o material celulósico de maneira econômica, com mínimas perdas, além de obter alta recuperação e rendimento de açúcares fermentáveis. A falta de um pré-tratamento adequado resulta em consequências negativas na hidrólise enzimática, exigindo o uso de uma mistura de enzimas otimizadas, que são dispendiosas e requerem longos períodos de incubação. A formação de inibidores nessa etapa também prejudica o rendimento na produção de etanol na fermentação.

Restrições mecânicas no manuseio da biomassa e o acúmulo excessivo de areia proveniente da colheita da biomassa são problemas operacionais que podem resultar em ineficiência e problemas nos equipamentos (TOOR *et al.*, 2020).

Por sua vez, apesar do custo médio de produção desses biocombustíveis ainda ser de duas a três vezes maior do que o equivalente aos combustíveis fósseis, também mais caro que o etanol de primeira geração, existe a possibilidade de uma redução de até 27% ao longo da próxima década, sendo que qualquer diferença de custo remanescente seria coberta por medidas políticas para incentivar a produção e a demanda (PRAVEEN BAINS, 2022).

Por fim, apesar da redução de 78% no preço das enzimas nos últimos quatro anos, esse componente ainda representa o maior custo na produção. No entanto, é crucial ter uma perspectiva de longo prazo, levando em consideração os planos e projeções recentes. Além disso, estudos indicam que o etanol de segunda geração possui um potencial de lucratividade superior ao do etanol de primeira geração (DOS REIS, 2017).

3.4.4 Plantas industriais de E2G.

Embora as tecnologias para produção de etanol (E1G) existam desde o início da década de 1970, as patentes apresentando tecnologias para produção de etanol utilizando biomassa lignocelulósica (E2G) só surgiram a partir de 2006. A razão

principal para esse fenômeno foram os fortes incentivos públicos direcionados para esse desenvolvimento, uma vez que investimentos em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias na área são necessários por meio de políticas públicas e empresas privadas para torná-lo economicamente viável (IEA, 2021). Motivados pela crescente nos preços do petróleo desde a crise do Iraque em 2003 e pelas questões ambientais, muitos países investiram fortemente no desenvolvimento em energias renováveis, incluindo os biocombustíveis (LONDOÑO-PULGARIN *et al.*, 2020).

A partir da primeira década dos anos 2000, novos esforços para produzir E2G em escala comercial permitiram a instalação de seis plantas industriais entre os anos de 2013 e 2016. As plantas utilizam diferentes matérias-primas, como palha de arroz, palha de trigo, cana-de-açúcar e resíduos de palha de milho, e estão localizadas em diferentes países, como Itália, Brasil, Espanha e Estados Unidos. As políticas públicas e pressões sociais para reduzir a poluição atmosférica impulsionaram essa iniciativa. As duas usinas que foram criadas no Brasil foram a GranBio no Alagoas, em 2014 e a planta da Raízen, em São Paulo, no ano de 2015. O avanço tecnológico nas etapas do processo e o desenvolvimento de microrganismos geneticamente alterados pareciam prover resultados satisfatórios para reduzir os custos de produção e viabilizar as plantas em escala comercial.

No entanto, em 2016, devido a problemas financeiros, a Abengoa teve que declarar falência de sua usina de bioetanol, e a GranBio suspendeu as atividades de sua usina devido a dificuldades técnicas na etapa de pré-tratamento, retomando as operações somente em 2019. Em 2018, a DuPont vendeu sua divisão de biocombustíveis celulósicos em Nevada, e a usina de Crescentino, operada pela Beta Renewables, também foi vendida para quitar dívidas do Grupo M&G. No mesmo ano, a Poet-DSM anunciou o encerramento das operações industriais de sua unidade, que seria transformada em um centro de pesquisa e desenvolvimento, devido a questões de mercado e à redução de incentivos fiscais pelo governo dos Estados Unidos.

Em 2019, a GranBio anunciou a retomada de suas operações em São Miguel dos Campos (Brasil) e a Raízen continuou operando sua usina em São Paulo. Restaram, então, apenas duas usinas de produção de etanol de segunda geração em funcionamento, ambas localizadas no Brasil (SANTOS *et al.*, 2022). A Tabela 2 demonstra algumas informações sobre o histórico da criação das plantas de E2G no mundo.

Ano	Grupo	Local	Matéria-prima	Produção(L/ano)
2013	Chemtex(M&G)	Crescentino, Itália	Palha de arroz e trigo	75 milhões
2014	Poet / DSM	Emmetsburg, Iowa, EUA	Casca de milho	94,5 milhões
2014	GranBio	São miguel dos Campos, Brasil	Palha de cana-de-açúcar	82 milhões
2014	Abengoa	EUA	Palha de milho	95 milhões
2015	Raízen	São Paulo, Brasil	Bagaço e palha cana-de-açucar	40 milhões
2015	DuPont	Nevada, Iowa, EUA	Casca de milho	120 milhões

Fonte: adaptado de (SANTOS et al., 2022).

Especificamente no caso do E2G, o fracasso das plantas influenciou os interesses públicos e privados a fim de incentivar o desenvolvimento produtivo do E2G, uma vez que foi injetada grande quantidade de recursos financeiros os quais não trouxeram resultados em custo-benefício esperado (GRANBIO, 2020).

Um fator interessante a ser notado é que para se projetar e construir indústrias desse porte, deve existir um nível alto de maturidade tecnológica capaz de enfrentar os problemas recorrentes. Embora houve um crescimento a partir de 2008, o número de patentes no setor ainda está muito abaixo do necessário para a instalação de várias plantas. Assim, a falta de desenvolvimento tecnológico para lidar com as variações do uso de diferentes tipos de biomassa para produzir o E2G pode explicar parte dos problemas que ocorreram. (SANTOS *et al.*, 2022).

3.4.5 O cenário Brasileiro de etanol de segunda geração

O Proálcool foi um programa muito bem-sucedido com a finalidade de substituir a larga escala dos derivados do petróleo. Com isso, foi desenvolvido para diminuir as dependências externas por meio de financiamentos e subsídios governamentais. Nesse sentido, de 1975 a 2000, foram produzidos cerca de 5,6 milhões de veículos a álcool hidratado (KOHLHEPP, 2010).

Desde o Proálcool em 1974, o Brasil vem fazendo vários esforços governamentais e industriais para implementar tecnologias que garantem uma frota

de veículos movidos a etanol e, como resultado, uma extensa rede de postos combustíveis espalhados por toda a malha rodoviária nacional. Isso não deixa de incluir os investimentos e esforços que foram feitos em relação a desenvolver tecnologias de E2G.

Em 2008, a União da indústria de Cana-de-açúcar (ÚNICA), abriu o primeiro escritório internacional para participar mais ativamente das contribuições socioeconômicas e ambientais no setor do etanol, açúcar e bioeletricidade.

Em 2011, o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) juntamente a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) fizeram o Plano de Apoio à Inovação nos Setores Sucroenergético e Sucroquímico (PAISS), a fim de desenvolver novas tecnologias de processamento de biomassa através de programas de pesquisa e produção em larga escala. Entre 2011 e 2018, esse projeto injetou cerca de R\$ 4,7 bilhões em centros de pesquisa e empresas tornando o maior programa de incentivo ao E2G no território brasileiro.

Por meio do PAISS, alguns projetos foram financiados. A construção de plantas E2G em escala comercial pela Granbio em 2014 e pela Raízen em 2015, e uma planta de demonstração pelo CTC em 2014, foram alguns dos resultados desse programa. Essas três plantas juntas tiveram um custo de R\$ 1,7 bilhões em subvenções, financiamentos e participação acionária (LORENZI, 2019).

Já em 2017, o RenovaBio veio para alavancar a economia de produção de biocombustíveis, trazendo metas de redução de emissões que os distribuidores de combustíveis podem atender obtendo certificados de redução comercializáveis, chamados de CBIOS. Segundo Lorenzi, 2019 estes são alguns objetivos do programa:

- determinar objetivos nacionais anuais de descarbonização;
- diminuir as emissões de gases de efeito estufa;
- prover uma relevante contribuição para o cumprimento dos compromissos estabelecidos pelo Brasil no Acordo de Paris;
- garantir estabilidade para o setor de combustíveis, promovendo melhorias na eficiência energética e diminuição das emissões ao longo dos processos de produção, distribuição e utilização de biocombustíveis.

Como resultado dessas medidas, o Brasil se destacou na produção e consumo de E2G como um combustível avançado capaz de impulsionar o mercado, resultado de políticas públicas projetadas para esse fim. O impacto dessas ações na criação e

proteção de invenções tecnológicas relacionadas à produção nacional de E2G e no interesse global pelo mercado brasileiro pode ser observado claramente, especialmente no período de 2015 a 2019, quando houve um aumento significativo na aplicação de PD no setor (SANTOS *et al.*, 2022).

Uma análise importante a ser feita é estar ciente que muitas empresas nacionais do setor dos biocombustíveis têm apoio internacional para operar, onde as invenções tecnológicas provavelmente são desenvolvidas. Assim, devido a estratégias de sigilos comerciais muitas pesquisas e desenvolvimentos não são divulgadas. Por exemplo a Raízen, é uma *joint venture* que resulta da parceria entre a empresa brasileira Cosan, sediada em São Paulo, e a Royal Dutch Shell, com sede em Haia, Holanda. A Royal Dutch Shell é uma gigante reconhecida globalmente pelas suas tecnologias inovadoras que vêm sendo desenvolvidas há mais de 100 anos na produção e distribuição de combustíveis (GRANBIO, 2020).

Entretanto, segundo a Nova Cana (2023), a Raízen vem sendo destaque mundial no setor dos biocombustíveis, sendo que a empresa pretende destinar grande parte de seu Capex (Investimentos de capital em ativos de longo prazo) no etanol de segunda geração. A gigante do mercado sucroenergético possui uma planta de E2G em operação e mais cinco em construção, cada uma com capacidade de 82 milhões de litros e Capex de 1,2 bilhões. As cinco novas plantas, que serão integradas às usinas da Raízen têm previsão de início de operação entre 2025 e 2027 e serão responsáveis pela produção do combustível. A Raízen anunciou sua meta de alcançar 20 plantas de E2G até 2030 ou 2031, com o objetivo de atingir uma capacidade instalada de 1,6 bilhão de litros de etanol de segunda geração. Graças à sua tecnologia proprietária, a empresa se tornará líder como o maior produtor e distribuidor mundial de etanol celulósico, com a maior parte do volume sendo comercializado por meio de acordos de longo prazo.

3.5 Etanol de terceira geração

Considerando os desafios enfrentados pelo etanol de primeira e segunda geração, uma alternativa viável para aumentar a produção é o etanol de terceira geração, onde açúcares provenientes das algas são fermentados. O processo de produção de etanol a partir de algas possui características vantajosas sobre as matérias-primas tradicionais, como uma menor necessidade de extensão de terra, alta

produtividade, ausência de competição com o abastecimento de alimentos, captura de carbono altamente eficiente, preservação de florestas tropicais e terras aráveis e alto teor de lipídeos e amido (SUBHADRA; EDWARDS, 2010).

Por meio da Tabela 3, é possível comparar o etanol de terceira geração com o de primeira e segunda geração.

Tabela 3 – Classificação dos tipos de biocombustíveis.

	Etanol de 1ª Geração	Etanol de 2ª Geração	Etanol de 3ª Geração
Matéria-prima	Cereais, matérias alimentícias	Biomassa lignocelulósica	Algas
Conversão de açúcar em etanol	Fermentação direta dos açúcares presentes na matéria-prima	Pré-tratamento da biomassa para quebrar a celulose e hemicelulose em açúcares fermentáveis, seguido de fermentação	Extração e conversão dos açúcares presentes nas algas em etanol
Uso de Terras	Requer grande área de plantio	Utiliza resíduos agrícolas e florestais, reduzindo a necessidade de áreas de cultivo	Não requer grandes áreas de cultivo
Rendimento (L/há * ano)	6190 - 7500 (<i>Cana-de-açúcar</i>)	1050 - 1400 (<i>Palha de milho</i>)	46760 - 140290 (<i>Microalgas</i>)
Custo de produção	Relativamente baixo custo de produção devido à infraestrutura estabelecida	Geralmente custo de produção mais alto devido ao pré-tratamento e processos adicionais	Mais caro devido à tecnologia em desenvolvimento e escala de produção menor
Redução de gases de efeito estufa	Moderada	Alta	Muito alta

Perspectivas futuras	Limitado pela competição com alimentos e recursos agrícolas	Maior aproveitamento de resíduos agrícolas, mas ainda dependente de biomassa	Potencial para uso sustentável de recursos aquáticos e desenvolvimento de tecnologias de cultivo de algas
Vantagem	Baixo custo e tecnologia já desenvolvida	Não compete com a alimentação possibilidade de integração ao E1G	Não precisa de grandes áreas para o cultivo, não compete com os alimentos e tem ciclos de produção curtos
Desvantagem	Compete diretamente com o preço dos alimentos	Alto custo na remoção da lignina para a produção do combustível	Maior consumo de energia, usada no cultivo das algas, alto custo de produção

Fonte: Adaptado de (MUSSATO et al., 2010).

Os biocombustíveis de terceira geração são caracterizados por um alto teor de hidrogênio, devido às proteínas e à clorofila presentes. Em comparação com outras fontes de biocombustíveis, os biocombustíveis de terceira geração possuem um maior poder calorífico, baixa densidade e baixa viscosidade, o que os torna mais adequados para a produção de biocombustíveis em comparação com os de primeira geração (MIAO, 2011).

Assim, além das algas disponibilizarem metabólitos de interesse como carboidratos e lipídeos, a parede celular desses organismos é bem parecida com a das demais matérias-primas lignocelulósicas, porém, possui menos lignina e hemicelulose em sua composição. Devido a esse fato, o rompimento da parede celular, que é um processo que encarece a produção, e sua consequente liberação dos açúcares fermentescíveis se torna mais fácil (RODRIGUES, 2020).

A produção de biocombustível a partir de algas tem sido reconhecida por seu potencial promissor. As algas são microrganismos fotossintéticos aquáticos que

podem se desenvolver em diversos ambientes, como água salgada, água residual de áreas urbanas e até mesmo em terras inadequadas para a agricultura convencional.

O processo de fotossíntese realizado por esses organismos difere das plantas superiores, pois as algas não precisam de um sistema complexo para transportar nutrientes, o que torna o processo mais eficiente. Enquanto as plantas superiores transformam apenas cerca de 0,5% da energia solar absorvida, as algas podem aproveitar mais de 10% dessa energia (SMITH, 2010).

As microalgas podem ser colhidas de forma contínua ao longo de todo o ano em regiões tropicais, eliminando a necessidade de um período de entressafra. Além disso, o cultivo e processamento das microalgas podem ocorrer no mesmo local, o que favorece a produção integrada e sequencial de múltiplos produtos, reduzindo os custos logísticos nas instalações das biorrefinarias (AGROENERGIA EM REVISTA, 2016).

3.5.1 Biomassa das algas como matéria-prima para produção de bioetanol

Uma vez que a biomassa utilizada para produzir E3G (etanol de terceira geração) são as algas, é importante descrevê-las. Esses organismos fotossintéticos podem ser classificados como microalgas e macroalgas, como base em sua morfologia e tamanho. As macroalgas podem ser classificadas em três grupos: algas marrons (*Phaeophyceae*), algas vermelhas (*Rhodophyceae*) e algas verdes (*Chlorophyceae*); enquanto as microalgas são geralmente agrupadas em diatomáceas (*Bacillariophyceae*), algas verdes (*Chlorophyceae*), algas douradas (*Chrysophyceae*) e cianobactérias (*Cyanophyceae*). Macroalgas são principalmente marinhas e microalgas podem ser tanto marinhas quanto de ambientes de água doce.

O teor de carboidrato varia entre macroalgas, entre gêneros e espécies dentro de cada classificação. Essa característica das algas de sintetizar grandes quantidades de carboidrato como reserva de energia as torna ótimas para se produzir bioetanol, um combustível renovável (SYRPAS, 2020).

Esses organismos possuem uma capacidade notável de se adaptar, sendo capazes de utilizar diferentes processos metabólicos para obtenção de energia, como fotossíntese, respiração e fixação/assimilação de nitrogênio. Além disso, eles têm a habilidade de se desenvolver em ambientes com baixos níveis de nutrientes disponíveis.

A composição bioquímica das microalgas, incluindo a concentração de proteínas, lipídios e carboidratos, pode variar de acordo com as condições de cultivo, como intensidade luminosa, temperatura, pH e agitação, os quais são fatores importantes durante o cultivo (ORTENZIO *et al.*, 2015).

As macroalgas são organismos multicelulares que possuem estruturas semelhantes a raízes, caules e folhas de plantas superiores. Em contraste, as microalgas são organismos microscópicos e em grande parte unicelulares (JOHN *et al.*, 2011). Além disso, microalgas têm vantagens em relação às macroalgas devido à sua maior produtividade de açúcar, resultante principalmente do rápido crescimento celular, sendo a glicose o principal monossacarídeo derivado do carboidrato de sua estrutura. Por outro lado, nas macroalgas encontram-se alginato e manitol, os quais são mais difíceis de fermentar, tornando desafiador converter macroalgas em etanol (SHIHHSIN *et al.*, 2013).

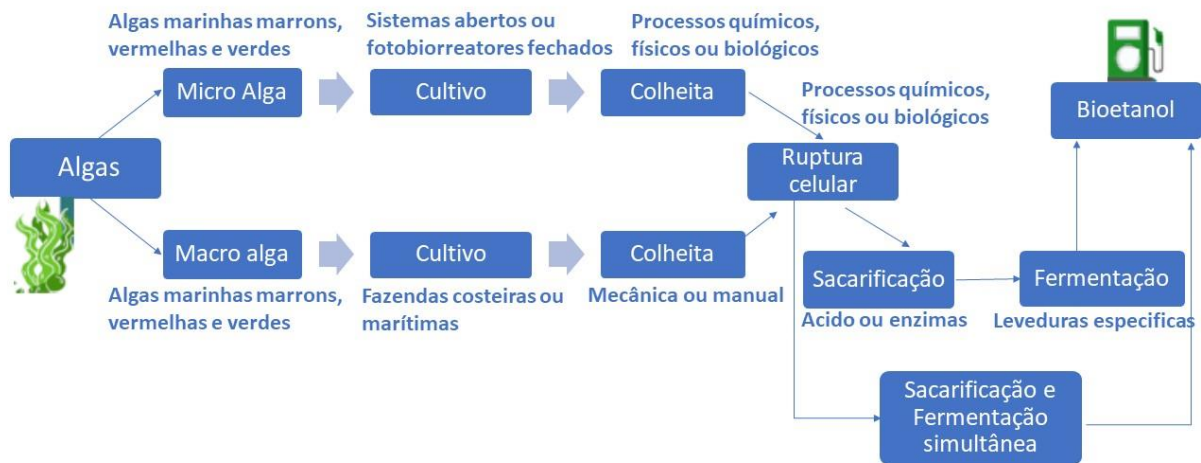
No momento, os produtos derivados de algas são amplamente utilizados nos setores de cosméticos, higiene pessoal, nutrição humana e animal. Esses produtos possuem um alto valor agregado e são fabricados principalmente em pequena e média escala, com destaque para a China, Japão e Estados Unidos como os principais produtores. A produção de microalgas é uma vertente mais recente e em constante crescimento no cultivo de algas. A produção global anual de biomassa de microalgas triplicou entre 2004 e 2013, alcançando a marca de 15 mil toneladas por ano (peso seco).

Nesse contexto, é importante reforçar que as algas apresentam um grande potencial na produção de bioetanol. O que torna as algas tão promissoras nesse aspecto é a sua capacidade de serem cultivadas utilizando dióxido de carbono e energia solar, em uma ampla variedade de ambientes aquáticos. Além disso, as algas podem ser cultivadas em terras não utilizáveis para cultivos convencionais, uma vez que são criadas na água. Elas demonstram uma alta produtividade devido ao seu rápido crescimento, além de conterem baixa quantidade de lignina tornando a hidrólise mais simples (REVISTARURAL, 2022).

3.5.2 Processo de produção E3G

O processo de produção do etanol de terceira geração através de micro e macroalga está representado na Figura 8.

Figura 7 – Processo de produção E3G.



Fonte: adaptado de (MÜLLER *et al.*, 2022)

De acordo com Müller *et al.* (2022), o processo de produção do etanol através de algas se dá das seguintes formas apresentadas a seguir:

Cultivo: Existem diferenças entre o cultivo de microalgas e macroalgas, fazendo com que o processo seja específico para cada um desses organismos. As macroalgas são cultivadas em águas salgadas em fazendas próximas às costas, que são mais comuns, ou em *offshore* em águas profundas.

Compostos de carboidratos são abundantes em macroalgas, os quais favorecem a produção de bioetanol.

A seleção de métodos de cultivo correto é essencial para garantir o uso da biomassa uma vez que diferentes condições no cultivo de microalgas resultam em mudanças significativas de concentração, produtividade e composição da biomassa. O tipo de cepa e a fonte de nutrientes também impactam no tipo de cultivo.

As microalgas possuem a capacidade de modificar sua composição bioquímica em resposta à manipulação do ambiente, como mudanças nutricionais no cultivo. Dessa maneira, é possível melhorar o conteúdo de carboidratos e a produtividade da biomassa alterando fatores ambientais e nutricionais.

Alguns fatores ambientais como, intensidade da luz, pH, temperatura e a salinidade podem influenciar a composição bioquímica das microalgas. Além disso, os fatores nutricionais que podem ser alterados são a disponibilidade e o tipo de nitrogênio, carbono, fósforo etc. A engenharia de microalgas também é uma alternativa promissora para aumentar a produção de biocombustíveis, através do aumento da produtividade da biomassa e o acúmulo de carboidratos.

Microalgas podem ser cultivadas em sistemas abertos (*raceway*), Figura 9 ou fotobiorreatores fechados, Figura 10. Lagoas abertas são aplicadas em escala comercial devido a aspectos econômicos e operacionais, porém possuem baixa produtividade de biomassa em comparação com fotobiorreatores. O fotobiorreator é usado para o cultivo em um ambiente controlado e permite um crescimento da espécie desejada por longa duração sem mudanças nas características físicas e biológicas. No sistema aberto, água e nutrientes circulam por canais com uma profundidade de 15-20 cm e um rotor com pás fornece agitação e circulação.

Figura 8 – Fotobiorreator aberto (Raceways).



Fonte: adaptado de (ALDRIDGE, 2012).

Figura 9 – Fotobiorreatores fechados



Fonte: adaptado de (ALDRIDGE, 2012).

As culturas de microalgas apresentam a vantagem de não necessitarem de terras aráveis e podem utilizar águas residuais como fonte de nutrientes, reduzindo os custos de cultivo, enquanto as macroalgas são principalmente cultivadas em regiões costeiras.

Ruptura celular: Antes de converter a biomassa de microalgas e macroalgas em bioetanol, é preciso primeiro romper a parede celular para liberar os compostos intracelulares desejados, que no caso do bioetanol são os carboidratos. A viabilidade celular em diferentes ambientes é determinada pela composição única da parede celular de cada espécie, que atua na defesa das células contra fatores bióticos e abióticos, além de fornecer plasticidade para permitir a expansão e formação de diferentes células. Para extrair mais compostos orgânicos intracelulares das microalgas, é necessário destruir a barreira protetora da parede celular, uma vez que as estruturas da parede celular das microalgas podem variar em função dos ambientes de crescimento e entre as espécies. Sob diferentes condições ambientais as paredes celulares das microalgas podem se alterar, como por exemplo, através da escassez de nutrientes.

Uma vez que as paredes celulares das micro e macroalgas são semelhantes e existe variabilidade entre as espécies, não existem métodos específicos para rompimento celular para cada alga; assim, ambas as algas possuem paredes com composições muito parecidas. Os métodos mais utilizados para romper as paredes

são os processos físicos(ultrassom), químicos (soluções ácidas e básicas) e biológicos(enzimas).

Sacarificação de polissacarídeos: Após a ruptura da célula e liberação dos componentes intracelulares das algas, eles devem ser hidrolisados a fim de serem transformados em monossacarídeos que serão fermentados posteriormente. Para ocorrer uma sacarificação de qualidade essa etapa deve priorizar uma alta eficiência e redução da formação de subprodutos que possam impactar a fermentação. Enzimas e ácidos concentrados são utilizados para transformar os carboidratos intracelulares das algas.

A hidrólise enzimática é bastante utilizada por fornecer condições mais suaves e menos formação de subprodutos, amilases e celulasas são os complexos enzimáticos mais utilizados. A implementação em larga escala é dificultada uma vez que a hidrólise de compostos de microalgas pode se cara, além da utilização de vários processos. As macroalgas também encontram as mesmas dificuldades pois compartilham de um processo semelhante. O fato de ser necessário um conjunto específico de enzimas na hidrólise de macroalgas, a ocorrência dos processos em larga escala torna-se complicada, nas microalgas.

As macroalgas possuem uma vantagem quando comparadas às microalgas, visto que por podem acumular um valor médio de até 60% de carboidrato, aumentando o rendimento de formação de açúcares redutores, fazendo com que o processo se torne mais vantajoso.

Fermentação: Após o processo de hidrólise, os monômeros que foram disponibilizados precisam ser fermentados para produzir o bioetanol ou outro produto de interesse. Isso pode ser feito usando leveduras específicas que utilizam os açúcares redutores da biomassa de microalgas, ou por meio de microalgas geneticamente modificadas que produzem diretamente o etanol. As rotas de fermentação para os polissacarídeos das microalgas são semelhantes às usadas na produção de amido, o que facilita a implementação em grande escala.

Existem dois tipos de fermentação de levedura: sacarificação simultânea e sacarificação e fermentação separadas. Na sacarificação e fermentação separadas, a biomassa de microalgas é hidrolisada em glicose e fermentada em unidades separadas, enquanto na sacarificação simultânea ocorre em uma única etapa. A

sacarificação e fermentação separadas são vantajosas devido ao baixo custo de produtos químicos, curta duração e simplicidade para aplicação em grande escala. Já a sacarificação simultânea requer menos etapas e resulta em maiores rendimentos de bioetanol. As leveduras do gênero *Saccharomyces* e as bactérias do gênero *Zymomonas* são amplamente utilizadas nesses processos.

A *S. cerevisiae* tem sido usada historicamente na produção de bebidas alcoólicas devido à sua eficiência em converter açúcares em etanol. As microalgas são uma fonte potencial de substratos fermentáveis, podendo ser fermentadas diretamente ou após pré-tratamento devido aos altos níveis de compostos de carbono em sua composição.

Os mesmos processos podem ser usados para fermentar os monossacarídeos de macroalgas. As macroalgas possuem monossacarídeos específicos que são fermentados por rotas específicas, exigindo o uso de biocatalisadores específicos, o que aumenta os custos e pode inviabilizar o processo. As macroalgas contêm frações de manitol e laminarina que são removidas e fermentadas por microrganismos específicos. Essas frações de monossacarídeos específicos não estão presentes nas microalgas, o que confere uma vantagem às macroalgas. No entanto, é necessário otimizar os processos de fermentação total das frações de carboidratos das macroalgas (alginato, laminarina e manitol) para converter em etanol com alto rendimento e produtividade. Essa otimização pode ser alcançada por meio do desenvolvimento de microrganismos capazes de atuar em todas as frações de substratos, mas ainda há a necessidade de avanços tecnológicos para implementar a produção em larga escala e atingir o objetivo de biorefinaria, ou seja, a utilização total da fração de macroalgas.

Essa otimização do processo pode resultar em maior rendimento e concentração de etanol a partir das estratégias mencionadas, como mudanças nas culturas para obter biomassa de micro ou macroalgas com alto teor de carboidratos. Isso possibilita a geração de hidrolisados com alto teor de açúcares redutores, utilizando enzimas que atuam em todos os polissacarídeos presentes na biomassa. Após a geração desses açúcares fermentáveis, diferentes leveduras podem aumentar os rendimentos de conversão.

3.5.3 Desafios encontrados na área do etanol de terceira geração

É importante ressaltar, que atualmente o etanol de terceira geração (E3G) é uma tecnologia em desenvolvimento e com perspectiva para o futuro, uma vez que o etanol de segunda geração ainda está nos estágios iniciais da produção comercial em larga escala.

Entretanto, recentemente, pesquisadores em todo o mundo têm se dedicado a explorar métodos de otimização da produção de E3G. Embora haja esses esforços, ainda persistem obstáculos que precisam ser superados para tornar a produção mais economicamente atraente (VANDENBERGHE *et al.*, 2022).

Assim, ainda não se alcançou a viabilidade econômica do cultivo em larga escala de algas para a produção de produtos de baixo valor agregado, como *commodities* químicas, biomateriais e energia.

Segundo a Agroenergia em Revista (2016), os processos atuais ainda não possuem custos de produção competitivos em comparação aos derivados da indústria petroquímica. Os desafios tecnológicos atuais estão focados principalmente no aprimoramento genético de cepas, no desenvolvimento de métodos eficientes de cultivo, no controle de pragas, na otimização dos processos de colheita e nos processos de produção em si.

Uma grande parte das pesquisas dedicadas à produção de microalgas tem como foco a resolução dos desafios relacionados ao cultivo em escala ampliada. Obter a mesma produtividade surpreendente das microalgas observada em laboratórios em escalas maiores não é simples, e às vezes pode não ser possível.

Especialmente quando se trata de utilizar microalgas como matéria-prima para biocombustíveis, estamos falando de volumes na ordem dos milhões de litros. Nas bancadas de laboratórios, as microalgas estão protegidas de grandes flutuações de temperatura, pH, luz e concentração de nutrientes, além da competição com outros microrganismos.

No entanto, nos tanques a céu aberto e até mesmo nos sistemas fechados de cultivo, não há controle absoluto dessas condições, e as algas precisam gastar energia se defendendo e se adaptando. Como resultado, seu crescimento é comprometido.

Os reatores fechados oferecem um maior controle ambiental e menor risco de contaminação por bactérias ou microalgas de outras espécies, porém apresentam

custos elevados. Por outro lado, os reatores abertos são mais viáveis financeiramente, mas reduzem significativamente as condições de controle das culturas, aumentando o risco de contaminação e a possibilidade de perda de todo o trabalho realizado. O desafio do escalonamento da produção de microalgas é uma questão que precisa ser abordada e resolvida.

Em pequena escala, como em bancadas laboratoriais, onde as condições de cultura, como temperatura, concentração de nutrientes, luminosidade, entre outros, são ideais para uma determinada espécie, as microalgas apresentam um crescimento excelente e a produção é promissora.

Além disso, é necessário realizar a colheita e o processamento de todo o material produzido pelas microalgas, o que também pode apresentar desafios metodológicos. Cada microalga possui particularidades em sua membrana ou parede celular, o que significa que uma metodologia de processamento que funciona para uma microalga pode não ser adequada para outra espécie do mesmo grupo taxonômico ou de outro grupo. Isso evidencia a necessidade de abordagens específicas e adaptadas para o processamento de cada tipo de microalga (AGROENERGIA EM REVISTA, 2016).

Segundo Eliodório *et al.* (2019) a etapa de fermentação dos açúcares disponíveis após a hidrólise da biomassa das algas representa um dos principais desafios encontrados. A levedura *Saccharomyces cerevisiae*, amplamente empregada na indústria de etanol combustível, apresenta limitações na fermentação de diversos açúcares hidrolisados de algas, o que resulta em menor eficiência e rendimento de etanol.

A eficiência da etapa de fermentação é essencial para alcançar altos rendimentos de etanol. Diversos estudos têm avaliado o potencial fermentativo de leveduras a partir de matéria-prima de algas.

A levedura *Saccharomyces cerevisiae* é bem estabelecida na produção de álcool, como cerveja e vinho, e etanol de primeira geração, onde glicose ou sacarose são os principais substratos. No entanto, a composição das diferentes macro e microalgas requer organismos capazes de fermentar pentoses e outras hexoses, além de tolerar uma ampla faixa de pH, altas temperaturas, concentrações elevadas de etanol e estresse osmótico encontrado no mosto de fermentação (ELIODÓRIO *et al.*, 2019).

Portanto, é necessário identificar leveduras não-*Saccharomyces* com essas características, juntamente com a engenharia genética de *S. cerevisiae*, para fermentar uma maior diversidade de carboidratos e aumentar a eficiência do processo.

Uma vez que as algas podem ser cultivadas em diversos ambientes os pesquisadores também estão explorando a possibilidade de utilizar a vinhaça, um resíduo poluente gerado durante a produção de etanol de cana-de-açúcar, como um meio de cultivo para microalgas. O descarte da vinhaça tem sido uma preocupação significativa para a indústria sucroalcooleira devido aos altos custos envolvidos. Além disso, o resíduo é frequentemente utilizado como adubo na fertirrigação de plantações, apresentando riscos de contaminação dos lençóis freáticos e causando danos ambientais. O objetivo é encontrar uma maneira de agregar valor à vinhaça por meio do uso das microalgas, trazendo benefícios tanto para as usinas quanto para o meio ambiente. Essa possibilidade de associação com os passivos é uma forma de baratear o processo (AGROENERGIA EM REVISTA, 2016).

Outra estratégia adicional para reduzir os custos do processo envolve aproveitar o resíduo da biomassa utilizada na produção de etanol para obter subprodutos de valor agregado. Um exemplo disso é a utilização de cianobactérias, organismos fotossintéticos que possuem características tanto de algas quanto de bactérias, para a produção de biopolímeros. Sob condições de estresse, como um meio de cultura com alta exposição à luz, as cianobactérias capturam dióxido de carbono e sintetizam grânulos de polihidroxibutirato (PHB) em seu interior, um tipo de bioplástico. Dessa forma, é possível obter subprodutos valiosos a partir da biomassa residual, contribuindo para a redução dos custos do processo (REVISTARURAL, 2022).

3.6 Etanol como combustível e cenário futuro

O crescimento dos veículos elétricos é um fator que pode afetar significativamente a indústria de biocombustíveis em geral. Esse impacto é esperado tanto a curto e médio prazo nos países mais desenvolvidos, quanto a médio e longo prazo nos países em desenvolvimento.

As empresas têm direcionado seus investimentos principalmente para tecnologias de transporte sustentável, como veículos híbridos e elétricos (HEVs), baterias elétricas e soluções inovadoras de mobilidade. Isso reflete uma tendência em

busca de alternativas mais limpas e eficientes para reduzir a dependência dos combustíveis fósseis.

Contudo, nos últimos tempos, têm surgido iniciativas que destacam a importância do etanol nesse novo mercado, e o Brasil pode assumir uma posição de liderança nesse aspecto. Essas medidas que serão apresentadas mostram que o etanol será parte integrante desse novo mercado. A título de exemplo, no Brasil, a Volkswagen, em parceria com a Raízen e a Shell, firmou um acordo para utilizar etanol em carros elétricos, híbridos e *flex fuel*.

Além disso, a montadora japonesa Nissan, que também possui filial no país, está colaborando com o IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (USP - Universidade de São Paulo) no desenvolvimento de tecnologias para extrair hidrogênio a partir do etanol, essencial para as células de combustível. Esse mecanismo viabiliza a geração de energia por meio de uma reação química, anulando a necessidade de recarregar as baterias dos veículos em pontos específicos ou tomadas residenciais. A empresa alemã Bosch também está investindo em tecnologias que permitem a separação do hidrogênio do etanol através de um processo químico realizado diretamente nos veículos, superando os desafios relacionados ao abastecimento do cilindro e às questões de segurança dos carros movidos a hidrogênio.

Essas parcerias entre empresas do setor privado, instituições de pesquisa e o apoio governamental fornecem *insights* sobre as futuras direções tecnológicas para o setor de bioetanol, especialmente no Brasil. Mesmo em âmbito global, de acordo com os relatórios da Agência Internacional de Energia (IEA) de 2022, uma variedade de combustíveis líquidos, gasosos e sólidos continuará desempenhando um papel significativo na matriz energética mundial até 2050.

Assim, considerando a possibilidade de aumentos nos preços do petróleo, um cenário promissor se desenha para o crescimento na produção de biocombustíveis, incluindo etanol e E2G (SANTOS *et al.*, 2022).

4 CONCLUSÃO

O objetivo deste estudo foi explorar o etanol de primeira geração, o etanol de segunda geração lignocelulósico e o etanol de terceira geração derivado da biomassa de algas. Ao longo da pesquisa, foram examinados o histórico do biocombustível, assim como as características, vantagens, desvantagens e desafios associados a cada uma dessas formas de produção de etanol.

O etanol de primeira geração, obtido principalmente a partir da cana-de-açúcar, é uma tecnologia consolidada e amplamente adotada no Brasil. Segundo dados da Unica (2022), o país conta com aproximadamente 360 usinas de etanol que produzem biocombustível a partir da cana-de-açúcar, gerando emprego para cerca de 2,4 milhões de pessoas, de forma direta e indireta. Essas informações reforçam a importância e a maturidade do etanol de primeira geração, corroborando as evidências apresentadas ao longo deste trabalho. No entanto, ainda apresenta dificuldades principalmente relacionadas à competição por terras agrícolas e impactos ambientais decorrentes da expansão da produção.

Por sua vez, o etanol de segunda geração lignocelulósico surge como uma promissora alternativa e pode ser complementar ao etanol de primeira geração. Isso ocorre porque utiliza resíduos agrícolas, como o bagaço da cana-de-açúcar e a palha do milho, como matéria-prima. Porém, foi visto que sua produção ainda enfrenta desafios técnicos e financeiros, principalmente relacionados à complexidade da quebra da celulose e hemicelulose em açúcares fermentáveis, além de demandar investimentos significativos em pesquisa e desenvolvimento.

Quanto ao etanol de terceira geração, embora sua produção ainda não esteja otimizada e esteja em fase de pesquisa e testes, atualmente não existem plantas de produção em funcionamento. No entanto, o etanol obtido a partir da fermentação dos açúcares da biomassa de algas oferece várias possibilidades promissoras para o futuro. O E3G apresenta vantagens interessantes, como uma maior eficiência na fotossíntese e uma redução na competição por recursos agrícolas, o que contribui para a segurança alimentar. No entanto, são necessários avanços tecnológicos para tornar sua produção comercialmente viável em larga escala.

Uma possível solução para lidar com o aumento da demanda por energia e alimentos é a utilização de novos recursos renováveis e a integração de processos

industriais em uma abordagem de biorrefinaria. Nesse contexto, a biomassa é submetida a processos que a convertem em uma variedade de produtos comercializáveis e energia, otimizando o uso dos recursos e minimizando a geração de resíduos. A integração dos processos de E1G (Etanol de Primeira Geração), E2G (Etanol de Segunda Geração) e E3G (Etanol de Terceira Geração) é uma solução eficiente para suprir parte da demanda por energia, alimentos, produtos químicos e materiais.

No cenário brasileiro, é relevante ressaltar os esforços da empresa Raízen, que está empenhada na construção de seis usinas de etanol de segunda geração nos próximos anos. Essa iniciativa evidencia o compromisso e a importância do país em buscar soluções mais sustentáveis e eficientes para a produção de biocombustíveis. Além disso, os fatores históricos abordados no estudo, juntamente com a maturidade do etanol de primeira geração, reforçam a relevância do Brasil no contexto da descarbonização e na busca por alternativas energéticas mais sustentáveis.

Portanto, o etanol de primeira geração continua sendo a principal fonte de produção no Brasil, enquanto o etanol de segunda e terceira geração enfrentam desafios a serem superados. Para avançar nessas tecnologias, é essencial investir constantemente em pesquisa, desenvolvimento e inovação, buscando um futuro mais sustentável e eficiente na produção de etanol, tanto a nível nacional quanto global. Esses esforços são fundamentais para cumprir as metas estabelecidas nas Conferências das Partes (COPS) e no Acordo de Paris, contribuindo assim para o combate às mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADITIYA, H. B. et al. Second generation bioethanol production: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 66, p. 631–653, 2016.

AGROENERGIA EM REVISTA. Brasília: Embrapa Agroenergia, v. 10, dez. 2016. Mensal. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/153095/1/Agroenergia-Revista-microalgas-ed10-red.pdf>. Acesso em: 05 abr. 2023.

A. Limayem, S.C. Ricke, Lignocellulosic biomass for bioethanol production: Current perspectives, potential issues and prospects, *Prog. Energy Combust. Sci.* 38 (2012) 449–467.

ALDRIDGE, David. Phytoplankton to the rescue: the promise offered by algal biofuels. 2012. Disponível em: <https://wordsinmocean.com/2012/03/06/phytoplankton-to-the-rescue-the-promise-offered-by-algal-biofuels/>. Acesso em: 06 maio 2023.

Amorim HV, Lopes ML. Ethanol production in a petroleum dependent world. *Sugar J.* 2005; 67:11–14.

ANP. Biocombustíveis. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2016. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/biocombustiveis>

B.R. Lorenzi, T.H.N. de Andrade, Second generation ethanol in Brazil: Policies and socio-technical networks, *Rev. Bras. Ciências Sociais.* 34 (2019), <https://doi.org/10.1590/3410014/2019>.

BARROSO, Marlon do Valle. A poderosa diversidade microbiana do rúmen pode ser a chave para a produção de biocombustível. 2022. Disponível em: <https://elevagro.com/component/content/article/2612>. Acesso em: 06 maio 2023.

BÖRJESSON, P. Good or bad bioethanol from a greenhouse gas perspective – what determines this? *Applied Energy*, n. 86, p. 589-594, 2009.

BNDES; CGEE – BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL; CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (Org.). Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável. Rio de Janeiro: BNDES, 2008.

BNDES (Brasil). Etanol 2G: inovação em biocombustíveis | Artigo. 2016. Disponível em:<https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/conhecimento/noticias/noticia/etanol-2g-inovacao-biocombustiveis>. Acesso em: 23 maio 2023

CASCONE, R. Biofuels: what is beyond ethanol and biodiesel? *Hydrocarbon Processing*, p.95-109, Sep. 2007.

CHEMMÉS, C. S. et al. Estudo de métodos físico-químicos no pré-tratamento de resíduos lignocelulósicos para produção de etanol de segunda geração. 2013.

CINELLI, B. Produção de etanol a partir da fermentação simultânea à hidrólise do amido granular de resíduo agroindustrial. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

CORRÊA, C. B. Parcerias estratégicas tecnológicas em projetos de etanol celulósico: oportunidades e desafios para as firmas nacionais. 2014 - Dissertação (Pós-Graduação em Política Científica e Tecnológica), Universidade Estadual De Campinas. Campinas. 2014.

D. Londoño-Pulgarin, G. Cardona-Montoya, J.C. Restrepo, F. Muñoz-Leiva, Fossil or bioenergy? Global fuel market trends, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 143 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110905>.

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.

EPE. Matriz Energética e Elétrica. 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 02 jun. 2023.

FENGEL, D.; WEGENER, G. Wood. Chemistry: Ultrastructure: Reactions. Berlin. Walter de Gruyter. 1989.

FREITAS, L.A. Produção de etanol de segunda geração utilizando bagaço de sorgo sacarino, forrageiro e biomassa. Tese (doutorado em microbiologia agropecuária). 2017. 179p. Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2017.

Goldemberg, J. The Brazilian biofuels industry. *Biotechnol Biofuels* 1, 6 (2008). <https://doi.org/10.1186/1754-6834-1-6>

GranBio, GranBio and NextChem sign partnership to develop cellulosic ethanol market, GranBio. (2020). <http://www.granbio.com.br/en/site/press-releases/granbio-andnextchem-sign-partnership-to-develop-cellulosic-ethanolmarket/>(accessed Mai 30, 2023).

HAJI ESMAEILI, S. A. et al. First-generation vs. second-generation: A market incentives analysis for bioethanol supply chains with carbon policies. *Applied Energy*, v. 277, n. July, p. 115606, 2020.

HASUNUMA, T.; KONDO, A. Consolidated bioprocessing and simultaneous saccharification and fermentation of lignocellulose to ethanol with thermotolerant yeast strains. *Process Biochemistry*, v. 47, n. 9, p. 1287–1294, 2012.

Hidzir NS, Som AS, Abdullah Z. Ethanol production via direct hydration of ethylene: a review. In: International conference on global sustainability and chemical engineering (ICGSE). 2014. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/277957681> Ethanol Production via Direct Hydration of Ethylene A review.

HO, SHIHHSIN et al. Bioethanol production using carbohydrate-rich microalgae

biomass as feedstock. *Hidrólise Ácida! Bioresource technology*. v. 135, p. 191–198, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.10.015>.

IEA (França). *Biofuels: tracking biofuels supply*. Tracking Biofuels Supply. 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/energy-system/low-emission-fuels/biofuels>. Acesso em: 31 abr. 2023.

IEA, International Energy Agency, *Transport Biofuels* (2021). <https://www.iea.org/reports/transport-biofuels>.

JOHN, R. P., ANISHA, G. S., NAMPOOTHIRI, K. M., PANDEY, A. Micro and macroalgal biomass: A renewable source for bioethanol. *Bioresource Technology*, v. 102, p. 186-193, 2011.

KEVY PONTES ELIODÓRIO, Gabriel Caetano de Gois e Cunha, Caroline Müller, Ana Carolina Lucaroni, Reinaldo Giudici, Graeme Maxwell Walker, Sérgio Luiz Alves, Thiago Olitta Basso, Chapter Three - Advances in yeast alcoholic fermentations for the production of bioethanol, beer and wine, Editor(s): Geoffrey Michael Gadd, Sima Sariaslani, *Advances in Applied Microbiology*, Academic Press, Volume 109, 2019, Pages 61-119, ISSN 0065-2164, ISBN 9780128176221, <https://doi.org/10.1016/bs.aambs.2019.10.002>.

KOHLHEPP, G. Análise da Situação da Produção de Etanol e Biodiesel no Brasil. *Estudos Avançados*, v. 24, n. 68, p. 223–253, 2010.

LORENCI WOICIECHOWSKI, A. et al. Lignocellulosic biomass: acid and alkaline pretreatments and their effects on biomass recalcitrance – conventional processing and recent advances. *Bioresource technology*, v. 304, n. January, p. 122848, 2020.

L.P.S. Vandenberghe, K.K. Valladares-Diestra, G.A. Bittencourt, L.A. Zevallos Torres, S. Vieira, S.G. Karp, E.B. Sydney, J.C. de Carvalho, V. Thomaz Soccol, C.R. Soccol, *Beyond sugar and ethanol: The future of sugarcane biorefineries in Brazil*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 167, 2022, 112721, ISSN 1364-

0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112721>.

MACEDO, L. C. H. de. *Álcool etílico: da cachaça ao cereal*. São Paulo: Ícone, 1993.

M. Syrpas, P.R. Venskutonis, Chapter 6 - Algae to produce bio-based products, in: C.M. Galanakis (Ed.), *Biobased Prod. Ind.*, Elsevier, 2020, pp. 203– 243. ISBN 9780128184936, doi: 10.1016/B978-0-12-818493-6.00006-3

M. Toor, S.S. Kumar, S.K. Malyan, N.R. Bishnoi, T. Mathimani, K. Rajendran, A. Pugazhendhi, An overview on bioethanol production from lignocellulosic feedstocks, *Chemosphere*. 242 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125080>.

MIAO, X., WU, Q., YANG, C. 2011. Production of liquid biofuels from renewable resources. *Progress in Energy and Combustion Science*. 37; 52-68.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (Brasil). Boletim Mensal de Energia - Fevereiro 2023. 2023. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/spe/publicacoes/boletins-mensais-de-energia/2023-1/portugues/boletim-mensal-de-energia-fevereiro_v3.pdf/view. Acesso em: 02 jun. 2023.

MONTES, A. C. R. *Avaliação do processo de obtenção de etanol de 2ª geração utilizando bagaço de cana*. 2017. Dissertação (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

MONTGOMERY, L; BOCHMANN, G. Pretreatment of feedstock for enhanced biogas production. IEA Bioenergy. 2014. Disponível em: https://www.ieabioenergy.com/wpcontent/uploads/2014/02/pretreatment_web.pdf. Acesso em: 29 mai. 2023.

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, v. 27, p. 77-93, 2013.

MÜLLER, Caroline *et al.* Challenges and opportunities for third-generation ethanol production: a critical review. *Engineering Microbiology*, [S.L.], v. 3, n. 1, p. 100056, mar. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engmic.2022.100056>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667370322000479?via%3Dihub>. Acesso em: 05 maio 2023.

MUSSATTO, S. I.; DRAGONE, G.; GUIMARÃES, P. M. R.; SILVA, J. P. A.; CARNEIRO, L. M.; ROBERTO, I. C.; VICENTE, A.; DOMINGUES, L.; TEIXEIRA, J. A. Technological trends, global market, and challenges of bio-ethanol production. *Biotechnology Advances*, v. 28, n. 6, p. 817–830, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biotechadv.2010.07.001>>.

Nigam, P.S. and Singh, A. (2011) A Production of Liquid Biofuels from Renewable Resources. *Progress in Energy and Combustion Science*, 37, 52-68. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2010.01.003>.

NOVA CANA (Brasil) (ed.). *Cogeração: como funciona a produção de energia elétrica numa usina sucroalcooleira*. 2013. Disponível em: <https://www.novacana.com/noticias/cogerao-como-funciona-producao-energia-eletrica>. Acesso em: 15 maio 2023.

ORTENZIO, T., Y.; AMARAL, G. G. do; ALMEIDA, S. dos S.; OLIVEIRA, E. C. A. M. de. Cultivo de microalgas utilizando resíduos agroindustriais para a produção de biocombustíveis: perspectivas e desafios. *Bioenergia em Revista: diálogos*, ano 5, n. 1, p. 58-65, jan./jun. 2015.

PACHECO, T. F. *Produção de Etanol: Primeira ou Segunda Geração? Circular Técnica 04*, v. 1, p. 6, 2011.

PITARELO, A. P. *Produção de etanol celulósico a partir do bagaço de cana pré-tratado por explosão a vapor*. 2013. Tese (doutorado em Química) - Universidade

Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

PRAVEEN BAINS (Paris). Biofuels. 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/biofuels>. Acesso em: 31 maio 2023.

Potter Ni. How Brazil achieved energy independence and the lessons the United States should learn from Brazil's experience. Wash U Glob Stud Law Rev. 2008;7(2):331-351 Available from: https://openscholarship.wustl.edu/law_globalstudies/vol7/iss2/7/

RABELO, S. C. Avaliação e otimização de pré-tratamentos e hidrólise enzimática do bagaço de cana-de-açúcar para a produção de etanol de segunda geração. 447f, 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Química). 154 Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, 2010.

RAÍZEN (Brasil). Etanol de segunda geração: potencial e oportunidades. 2023. Disponível em: <https://www.raizen.com.br/blog/etanol-de-segunda-geracao>. Acesso em: 23 maio 2023.

REVISTARURAL (Brasil). Projeto quer transformar CO₂ de algas e bactérias em bioetanol. 2022. Disponível em: <https://www.revistarural.com.br/2022/02/02/projeto-quer-transformar-co2-de-algas-e-bacterias-em-bioetanol/>. Acesso em: 14 jun. 2023.

RODRIGUES, A. O. Avaliação do uso de biomassa de microalga como substrato para leveduras na síntese de etanol. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2020.

SANTOS, Daniel de C. L. e Penalva et al. Brazil and the world market in the development of technologies for the production of second- generation ethanol. 2022. 18 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência e Tecnologia, Ufrj, Rio de Janeiro, 2022. Cap. 2

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.

SILVA, N. L. C. Produção de bioetanol de segunda geração a partir de biomassa residual da indústria de celulose. 2010. Tese (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

SMITH, V. H., STURM, B. S. M., DENOYELLES, F. J, BILLINS, S. A. 2010. The ecology of algal biodiesel production. *Trends Ecol. Evol.* 25; 301-309.

SUBHADRA, B.; EDWARDS, M. An integrated renewable energy park approach for algal biofuel production in United States. *Energy Policy*, v. 38, n. 9, p. 4897–4902, 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2010.04.036>.

UNICA. Missão conhece produção de etanol no Brasil. 2022. Disponível em: <https://unica.com.br/noticias/missao-conhece-producao-de-etanol-no-brasil/>. Acesso em: 12 jun. 2023.

UNICA. Uso do etanol evitou a emissão de 535 milhões de toneladas de CO₂. 2019. Disponível em: <https://unica.com.br/noticias/uso-do-etanol-evitou-a-emissao-de-535-milhoes-de-toneladas-de-co2eq-em-16-anos/>. Acesso em: 03 jun. 2023.

VINZANT, T., BOWER, S., & JECHURA, J. BSCL use plan: solving biomass recalcitrance. National Renewable Energy Laboratory. 2005

Zaky, A.S., Greetham, D., Tucker, G.A. et al. The establishment of a marine focused biorefinery for bioethanol production using seawater and a novel marine yeast strain. *Sci Rep* 8, 12127 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-30660-x>