

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA
Etec CEL. FERNANDO FEBELIANO DA COSTA
Ensino Médio com Habilitação Profissional Técnica em Meio Ambiente

Daniel Silveira Sousa
Enzo Gabriel Valerio Batista
Glauber Nunes Lopes
João Vitor Leite Braga
Murilo Santos Pacheco
Rafael Melo da Silva

ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO EM AMBIENTE ESCOLAR

PIRACICABA-SP

2025

Daniel Silveira Sousa
Enzo Gabriel Valerio Batista
Glauber Nunes Lopes
João Vitor Leite Braga
Murilo Santos Pacheco
Rafael Melo da Silva

ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO EM AMBIENTE ESCOLAR

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso Técnico em Meio Ambiente da Etec Cel. Fernando Febeliano da Costa, orientado pelos professores Bianca Furlan Danelon e Rafael de Souza, como requisito parcial para a obtenção do título de técnico em Meio Ambiente.

PIRACICABA-SP

2025

Daniel Silveira Sousa
Enzo Gabriel Valerio Batista
Glauber Nunes Lopes
João Vitor Leite Braga
Murilo Santos Pacheco
Rafael Melo da Silva

ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO EM AMBIENTE ESCOLAR

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Técnico em Meio Ambiente da Etec Cel. Fernando Febeliano da Costa, orientado pela Prof^o Bianca Furlan Danelon e Rafael de Souza como requisito parcial para obtenção do título de técnico em Meio Ambiente.

Data de aprovação: ___/___/___

FOLHA DE APROVAÇÃO BANCA EXAMINADORA

Prof.^(a) Bianca Danelon Furlan

Instituição: Etec Cel. Fernando Febeliano da Costa

Prof.^(a) Rafael Souza

Instituição: Etec Cel. Fernando Febeliano da Costa

Prof.^(a) Marisa Natalina Fulan Sega

Instituição: Etec Cel. Fernando Febeliano da Costa

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, glorificamos a Deus, por nos conceder sabedoria, força e perseverança ao longo desta jornada. Sem a Sua presença e bênçãos, este trabalho não teria sido possível.

Logo depois, agradecemos ao escrevente técnico judiciário Elias Jardim de Souza que, durante o estágio dos alunos Daniel Silveira, Glauber Lopes e João Vítor Braga no Fórum de Piracicaba, foi quem abordou o tema em diversas conversas e o sugeriu como temática para o desenvolvimento deste Trabalho de Conclusão de Curso.

Aos professores Rafael de Souza e Bianca Furlan Danelon, por todo o apoio, orientação e dedicação durante o desenvolvimento deste projeto relativo ao etanol de segunda geração (E2G). A contribuição de ambos foi essencial para o desenvolvimento e aperfeiçoamento deste trabalho.

Ao técnico em química André, pela ajuda prática e suporte no laboratório, sempre prestativo e atento à nossa segurança e aos detalhes que fizeram diferença na execução dos experimentos. Seu auxílio foi indispensável para o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao professor de biocombustíveis da Fatec Piracicaba, por nos dar todo o apoio e incentivo, além de proporcionar a moagem e pesagem da cana no laboratório pelo qual é responsável.

Também somos gratos ao Professor Jorge Alberto, que nos auxiliou com a formatação do trabalho e os aspectos relacionados à informática, garantindo a organização e qualidade do material final.

Muito obrigado a todos que fizeram parte dessa caminhada.

RESUMO

A intensificação da poluição ambiental nas últimas décadas está diretamente relacionada ao crescimento populacional, à expansão industrial e ao uso contínuo de combustíveis fósseis, sobretudo no setor de transportes, que se destaca como um dos principais responsáveis pela emissão de gases de efeito estufa, como o dióxido de carbono (CO₂). Esse processo tem contribuído de forma significativa para o agravamento das mudanças climáticas e para o desequilíbrio ecossistêmico global.

Diante desse cenário, surge a necessidade de desenvolvimento e adoção de alternativas energéticas renováveis e sustentáveis. O etanol de segunda geração (E2G), produzido a partir de resíduos lignocelulósicos, apresenta-se como uma alternativa promissora, pois possibilita o aproveitamento de subprodutos agrícolas e pode reduzir em até 80% as emissões de CO₂ quando comparado aos combustíveis fósseis convencionais.

Empresas como a Raízen têm investido em tecnologias voltadas à produção desse biocombustível em escala industrial. Inspirada por esse contexto, esta pesquisa, iniciada na Fatec Piracicaba e desenvolvida na Etec Coronel Fernando Febeliano da Costa, teve como objetivo estudar e testar, em escala reduzida e em ambiente escolar, a produção do etanol de segunda geração, analisando sua viabilidade técnica, bem como seus impactos ambientais, sociais e econômicos.

O trabalho foi estruturado em duas etapas principais: análise teórica e experimentação, a qual contempla as fases de pré-tratamento do bagaço, hidrólise enzimática, fermentação e destilação. No entanto, em razão da indisponibilidade da enzima necessária à hidrólise, associada ao seu elevado custo e à comercialização restrita, o processo experimental foi interrompido após o pré-tratamento. Ainda assim, os resultados obtidos permitiram a compreensão prática dos desafios envolvidos na produção do E2G e evidenciaram seu potencial como fonte energética sustentável.

Dessa forma, o estudo reforça a relevância do etanol de segunda geração como alternativa na transição para uma matriz energética mais limpa, além de destacar a importância da integração entre instituições de ensino, centros de pesquisa e o setor produtivo.

Palavras-chave: Bioetanol. Renovável. Cana-de-açúcar. Sustentável. Combustíveis.

ABSTRACT

The intensification of environmental pollution in recent decades is directly related to population growth, industrial expansion, and the continuous use of fossil fuels, especially in the transportation sector, which stands out as one of the main sources of greenhouse gas emissions, such as carbon dioxide (CO₂). This process has significantly contributed to the worsening of climate change and to global ecosystem imbalance.

In this context, the development and adoption of renewable and sustainable energy alternatives have become essential. Second-generation ethanol (E2G), produced from lignocellulosic residues, emerges as a promising alternative, as it enables the use of agricultural byproducts and can reduce CO₂ emissions by up to 80% when compared to conventional fossil fuels.

Companies such as Raízen have invested in technologies aimed at the industrial-scale production of this biofuel. Inspired by this scenario, this research, initiated at Fatec Piracicaba and developed at Etec Coronel Fernando Febeliano da Costa, aimed to study and test, on a reduced scale and in a school environment, the production of second-generation ethanol, analyzing its technical feasibility as well as its environmental, social, and economic impacts.

The study was structured into two main stages: theoretical analysis and experimentation, which included the stages of bagasse pre-treatment, enzymatic hydrolysis, fermentation, and distillation. However, due to the unavailability of the enzyme required for hydrolysis, associated with its high cost and restricted commercialization, the experimental process was interrupted after the pre-treatment stage. Even so, the results obtained allowed a practical understanding of the challenges involved in E2G production and highlighted its potential as a sustainable energy source.

Therefore, this study reinforces the relevance of second-generation ethanol as an alternative in the transition toward a cleaner energy matrix, while also emphasizing the importance of integration between educational institutions, research centers, and the productive sector.

Keywords: Bioethanol. Renewable. Sugarcane. Sustainable. Fuels.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. DESENVOLVIMENTO	3
2.1. Contextualização	3
2.1.1. Proálcool e incrementação dos motores à álcool	7
2.1.2. Etanol.....	9
2.1.3. Etanol de segunda geração	10
2.2. Metodologia	19
3. RESULTADOS	26
4. CONCLUSÃO	27
4.1 Considerações finais teóricas	27
4.2 Considerações finais experimentais	29
REFERÊNCIAS	31

1. INTRODUÇÃO

O planeta Terra vem sofrendo com a poluição nas últimas décadas e, devido ao consumismo, aos avanços tecnológicos e à produção em massa, é evidente que esse problema tende a se intensificar nos próximos anos. A falta de respeito para com a natureza se apresenta de diversas maneiras na sociedade, seja no desmatamento, na extração de recursos naturais e tantas outras ações antrópicas, mas ao olhar para a poluição do ar, destaca-se como principal responsável o setor de transportes (REVISTA BRASILEIRA DE EDUCAÇÃO AMBIENTAL, 2018). Diante desse cenário, torna-se imprescindível buscar alternativas energéticas mais sustentáveis. Os veículos movidos a combustíveis fósseis, como a gasolina e o diesel, são grandes emissores de gases de efeito estufa, contribuindo de forma significativa para o aquecimento global. Segundo a Agência Internacional de Energia, aproximadamente 44% do consumo mundial de petróleo é destinado ao setor de transportes, o que evidencia a necessidade de substituição gradual dessas fontes por alternativas renováveis.

A título de ilustração, a empresa Raízen é referência global em bioenergia, sendo a maior produtora de etanol de segunda geração (E2G) no mundo. Através da cana-de-açúcar, a companhia oferece produtos como etanol, açúcar, energia elétrica e distribuição de combustíveis. A empresa direciona seus investimentos para a expansão de tecnologias baseadas em fontes renováveis de energia, com foco na redução de emissões de gases de efeito estufa. O E2G, conhecido também como etanol verde, etanol celulósico ou até bioetanol, tem uma pegada de carbono (medida da quantidade de emissões de gases de efeito estufa liberadas na atmosfera) 30% menor quando comparado ao de primeira geração (etanol comum), e até 80% menor do que combustíveis fósseis, como a gasolina, já que emite menos CO₂ na atmosfera. Portanto, além de ser renovável, é considerado um combustível limpo, valendo constar que é considerado um dos que têm a menor pegada de carbono do mundo (TIMES DE ETANOL, AÇÚCAR E BIOENERGIA E SUSTENTABILIDADE DA RAÍZEN. Etanol de segunda geração: potencial e oportunidades, 2023).

A produção de etanol de segunda geração (E2G) a partir do bagaço da cana-de-açúcar, em um contexto de escala local, reduzirá significativamente as emissões de CO₂ em comparação com os combustíveis fósseis, ao mesmo tempo que contribuirá para a independência energética e o desenvolvimento sustentável de

regiões agrícolas, como o Brasil. Além disso, o ciclo natural de absorção de CO₂ pela fotossíntese das plantas compensa boa parte das emissões, tornando-o uma opção ambientalmente responsável e alinhada às metas globais de combate às mudanças climáticas (DIAS, M. O. S. *et al.*, 2012; DIAS, M. O. S. *et al.*, 2013).

Ademais, a transição para o E2G diminui a dependência de petróleo importado, fortalecendo a autonomia energética das nações. Países com vastos recursos agrícolas, como o Brasil, têm a oportunidade de explorar essa tecnologia para liderar o mercado de bioenergia e garantir maior estabilidade econômica (RAELE, R. *et al.*, 2014).

Ao contrário do petróleo, que é um recurso finito e cuja extração frequentemente resulta em danos ambientais, o E2G depende de fontes renováveis. Isso permite uma abordagem mais consciente e sustentável na produção de energia, protegendo o meio ambiente e promovendo práticas agrícolas responsáveis (SANTOS, M. V, 2022).

Esta pesquisa tem como objetivo a produção e o estudo do bioetanol, utilizando meios disponibilizados pela Fatec Piracicaba e Etec Cel. Fernando Febeliano da Costa. Pretende-se desenvolver um biocombustível a partir do bagaço da cana-de-açúcar, inspirando-se no trabalho da Raízen S.A., e apresentar estudos de impactos sociais, econômicos e ambientais.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Contextualização

O efeito estufa tem se intensificado cada vez mais por consequência da emissão desenfreada de gases poluentes, como o dióxido de carbono. Diante desse cenário, diversos países passaram a buscar alternativas sustentáveis visando reduzir os níveis de poluição atmosférica. Paralelamente, muitas empresas foram criadas com o propósito de desenvolver tecnologias voltadas à mitigação dos impactos ambientais causados pelas ações humanas. O Brasil, por sua vez, possui grande potencial para se destacar nesse contexto, já sendo referência na produção de energia limpa, com aproximadamente 50% de sua matriz energética proveniente de fontes renováveis (ANTÔNIO, R. S. M., 2024, p. 6).

Essa distribuição das fontes de energia no país pode ser observada na Figura 1.

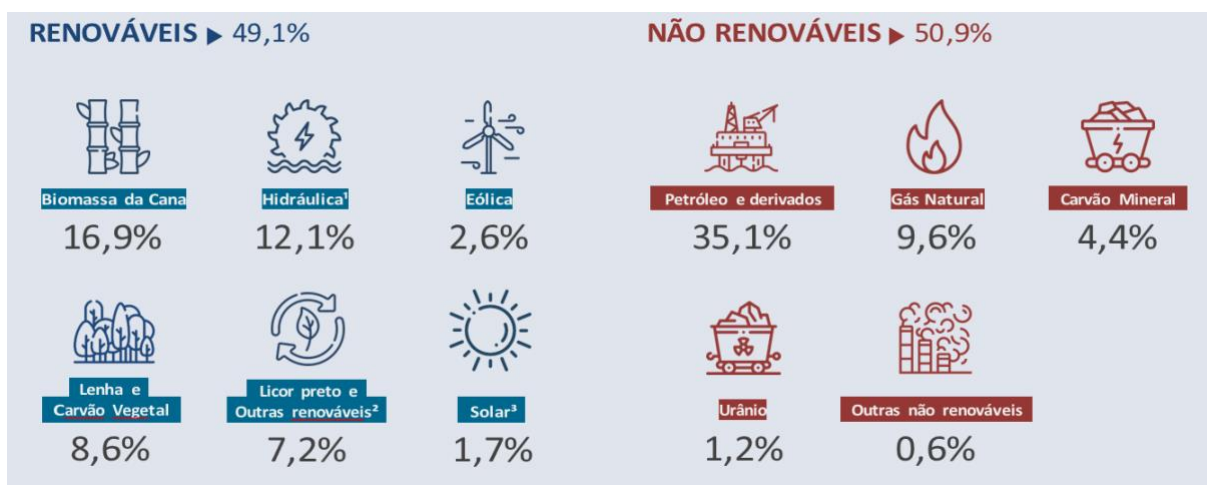


Figura 1 – Matriz energética brasileira.
Fonte: ANTÔNIO (2024).

Desde a Revolução Industrial, iniciada no século XVIII, os combustíveis fósseis, como o carvão e o petróleo, passaram a ser amplamente utilizados como fontes de energia. O petróleo, em especial, tornou-se essencial para o funcionamento de diversos setores econômicos, incluindo transportes, geração de energia e produção industrial (AUTOCLASS BRASIL, 2024). Seu uso intensivo impulsionou o crescimento econômico global, possibilitando o avanço tecnológico e a modernização da sociedade.

Embora tenham proporcionado inúmeros benefícios, os combustíveis fósseis também geraram impactos ambientais e sociais significativos. A queima desses recursos libera grandes quantidades de gases de efeito estufa, como o dióxido de carbono (CO₂), intensificando o aquecimento global. Além disso, a exploração de petróleo pode causar desastres ambientais, como vazamentos em oceanos e contaminação de solos (SERGIO, E. S. DA R. *et al.*, 2009).

A poluição atmosférica causada pelos derivados do petróleo está associada a diversas doenças respiratórias e cardiovasculares. Estudos apontam que a exposição prolongada a poluentes, como o material particulado fino (PM2.5) e os óxidos de nitrogênio (NOx), contribui para o aumento de casos de asma, bronquite crônica e câncer de pulmão. Além disso, o agravamento das mudanças climáticas tem resultado em eventos extremos, como furacões, secas prolongadas e ondas de calor, impactando diretamente a qualidade de vida da população global (MORAES, L. 2024).

Sobretudo, a emissão de gases poluentes causados pela combustão de diversos combustíveis derivados de fósseis tem afetado a atmosfera, intensificando o efeito estufa (alguns gases absorvem o calor dos raios solares que a Terra reflete, mantendo o planeta aquecido). Além dos impactos gerados a partir da queima nos motores dos veículos, os efeitos da produção de combustíveis derivados do petróleo, estendem-se desde a exploração até a queima nos motores à combustão (TIMES DE SUSTENTABILIDADE E COMUNICAÇÃO CORPORATIVA DA RAÍZEN, 2021).

O processo de produção da gasolina, por exemplo, começa com a exploração, a qual passa por três etapas: prospecção, perfuração e extração. Durante a retirada do petróleo bruto, frequentemente encontrado no subsolo dos oceanos, ocorre a contaminação do ambiente marinho. A atividade de exploração de petróleo e gás offshore (fora da costa) é uma fonte de poluição não só de hidrocarbonetos e derivados de petróleo, mas também de partículas em suspensão e outras substâncias químicas, como os metais pesados componentes dos fluidos de perfuração, os quais serão descritos mais adiante (POZEBON *et al.*, 2005).

A etapa de desenvolvimento e produção tem como impactos mais severos os observados durante a construção, perfuração e outras atividades, tanto em terra, quanto no mar, pois são acompanhadas pelo tráfego intenso de embarcações de

suporte e geração de resíduos. Essas embarcações incluem carregadores e lançadores de dutos, coletores de cascalhos de perfuração e outros resíduos. As operações de perfuração, produção (responsável pela maior parte) e transporte geram mais de oitocentas substâncias químicas em seus efluentes líquidos, sólidos e gasosos ou aerossóis. Nessas etapas, os impactos potenciais se concentram nas emissões de rejeitos e resíduos com efeitos crônicos sobre a fauna bêntica e pelágica, impactos de sedimentos sobre a qualidade da água, geração de efluentes e emissões atmosféricas. Essas operações afetam a fauna e a flora devido a mudanças nas variações na água, no ar e na qualidade do solo/sedimentos, além de causar perturbações à vida aquática como ruídos, iluminação e mudanças na cobertura vegetal. Como consequência, as espécies atingidas podem sofrer prejuízos relacionados ao habitat, alimentação, rotas de migração e vulnerabilidade a predadores. No entanto, cabe ressaltar que esses impactos podem ser evitados, minimizados e/ou mitigados (MARIANO, 2007).

Em contraponto a esse cenário altamente impactante, os biocombustíveis, sobretudo o etanol de segunda geração, emergem como uma alternativa energética significativamente mais limpa e sustentável. Por serem produzidos a partir de resíduos agrícolas, como o bagaço e a palha da cana-de-açúcar, esses combustíveis evitam a exploração direta de recursos fósseis finitos e reduzem a necessidade de novas áreas de extração. Além disso, os biocombustíveis apresentam uma pegada de carbono consideravelmente inferior, uma vez que o dióxido de carbono liberado em sua queima é, em grande parte, compensado pelo processo de fotossíntese realizado durante o crescimento das plantas. Dessa maneira, contribuem diretamente para a mitigação do aquecimento global e para a redução das emissões de gases de efeito estufa (SANTOS, M. V, 2022).

Outro benefício relevante está relacionado à valorização de resíduos agroindustriais, promovendo o reaproveitamento de materiais que, em muitos casos, seriam descartados de forma inadequada no ambiente. A utilização desses resíduos na produção de biocombustíveis também favorece a economia circular, gera empregos no meio rural, fortalece a agroindústria e reduz a dependência de combustíveis importados, colaborando para a segurança energética nacional. Portanto, quando comparados aos combustíveis fósseis, os biocombustíveis apresentam vantagens ambientais, sociais e econômicas expressivas, consolidando-

se como uma solução viável e estratégica para uma matriz energética mais sustentável (RAÍZEN BIOCOMBUSTÍVEL, 2022).

2.1.1. Proálcool e incrementação dos motores à álcool

Em meio ao primeiro choque do petróleo em 1973, o governo brasileiro passou a buscar formas alternativas para reduzir a dependência do país em relação aos combustíveis fósseis e amenizar os efeitos do choque na economia brasileira. Com a deterioração do balanço de pagamentos e aumento da inflação, causados pelo preço elevado do petróleo, o Brasil, que importava 80% da sua necessidade, se viu obrigado a buscar formas renováveis de combustível. Dentre vários programas propostos, o que obteve maior êxito foi o Programa Nacional do Álcool – Proálcool, lançado em 1975, que visava a produção de álcool anidro (MICHELLON, *et al.*, 2008).

Com o segundo choque do petróleo em 1979, o programa foi ampliado, visando o álcool para substituir a gasolina, sendo aqui priorizada a produção de álcool hidratado de cana-de-açúcar, em destilarias anexas às usinas, para ser adicionado à gasolina. O programa nasce alicerçado em subsídios e financiamentos públicos, ficando a cargo do governo, através da Petróleo Brasileiro S/A – PETROBRAS, a compra, transporte, armazenamento, distribuição e mistura do álcool à gasolina, e também a determinação do preço de venda do produto. O governo passa então a estimular o consumo de álcool dando isenções fiscais para a aquisição dos veículos movidos exclusivamente a álcool e, também, convertendo sua frota de veículos a esse combustível (MICHELLON, *et al.*, 2008).

A partir de 1982, o governo investiu para aumentar as vendas de veículos a álcool. Criaram-se facilidades aos compradores, como um maior prazo de financiamento, taxas mais baixas e a inserção do sistema de partida a frio. Além disso, com o fim de evitar a corrosão, os carburadores passaram a ser revestidos com zinco e os tanques de combustível com estanho. Apesar do sucesso técnico do Proálcool, ocorreram muitas críticas à sua implantação, especialmente pelo aumento das áreas destinadas ao cultivo de cana-de-açúcar (MICHELLON, *et al.*, 2008).

Apesar do clima de otimismo, a partir de 1986 o PROÁLCOOL passou a sofrer alguns reveses, devido à queda do preço do petróleo e à escassez de recursos públicos. O aumento da demanda e a diminuição da produção levaram à crise de abastecimento entre 1989 e 1990, a qual pôs em xeque a credibilidade do programa (MAGOSSI, E. 2011; SOUSA, P. N, *et al.* 2012).

Na década de 90, o programa continuava em letargia, com o governo promovendo a desregulamentação do mercado, liberando os preços dos produtos e permitindo a livre concorrência. Já no final da década, os empresários do setor começam a se agrupar para tentar dar novo ânimo ao programa (MICHELLON, *et al.*, 2008).

Em 2003, o programa começa a ressurgir com força, amparado pelo lançamento dos veículos flex-fuel, pela alta do preço do petróleo e pelo aumento da demanda externa oriunda da conscientização ambiental (MICHELLON, *et al.*, 2008).

No Brasil, as iniciativas governamentais e privadas conduziram à criação do motor flex-fuel, responsável pela aceleração do mercado nacional de etanol. Entre 2003 e 2007, a demanda por etanol aumentou expressivamente, demonstrando o crescimento do setor (EPE, 2008; IICA, 2008 apud SENNA, P. P. 2016). Esse avanço do setor sucroenergético no Brasil pode ser visualizado na Figura 2.

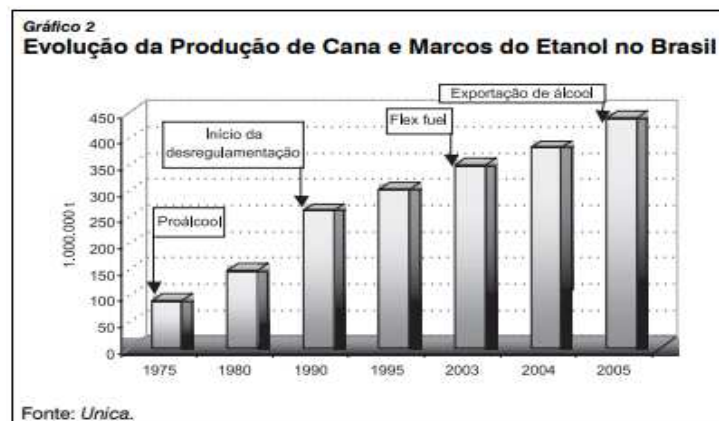


Figura 1 – Evolução do setor sucroenergético no Brasil.
Fonte: BNDES (2007).

2.1.2. Etanol

As preocupações ambientais, junto à necessidade de diminuir as emissões poluentes definidas pelo Protocolo de Kyoto, contribuíram para o aumento da produção de biocombustíveis. Uma das alternativas economicamente viáveis é o etanol (WALTER *et al.*, 2007).

Em 1990, ocorreu a liberalização dos preços, culminando na importação de grandes volumes de etanol em 1995 (MARJOTTA, M. M. C, 2002).

O Acordo de Paris, firmado em 2015, reforçou a necessidade de reformas nos setores de energia e transporte, impulsionando ainda mais o uso de fontes renováveis, como o etanol (SOUSA, P. N. *et al.*, 2012).

A crise de 2008–2009 impactou negativamente o setor sucroenergético, resultando no fechamento de usinas e aumento do endividamento (BACCHI; MORAES, 2014). Em 2010, as exportações caíram devido à alta demanda interna e à elevação dos preços (MAPA, 2011; MAGOSSY, 2011; SOUSA *et al.*, 2012).

Essas oscilações no setor podem ser observadas na Figura 3, que apresenta dados relacionados à produção ao longo do período indicado.

	1933	1939	1941
Nº de destilarias	1	31	44
Capacidade anual (mil litros)	100	38.000	76.600

Fonte: Szmrecsányi (1979).

Figura 2 – Dados do setor sucroenergético brasileiro.

Fonte: REVISTA DE POLÍTICA AGRÍCOLA (2014).

O etanol é um composto químico formado por dois átomos de carbono, seis de hidrogênio e um grupo hidroxila. É um líquido incolor e inflamável, utilizado tanto na indústria como combustível (TIME DE PRODUÇÃO DE ETANOL DA RAÍZEN, 2022).

O biocombustível possui ampla aplicação, sendo seu maior uso como combustível alternativo, devido às suas propriedades físico-químicas (TIME DE PRODUÇÃO DE ETANOL DA RAÍZEN, 2022).

2.1.3. Etanol de segunda geração

Embora tenham proporcionado inúmeros benefícios, os combustíveis fósseis também geraram impactos ambientais e sociais significativos. A queima desses recursos libera grandes quantidades de gases de efeito estufa, como o dióxido de carbono (CO_2), intensificando o aquecimento global. Além disso, a exploração de petróleo pode causar desastres ambientais, como vazamentos em oceanos e contaminação de solos (SERGIO, E. S. DA R. *et al.*, 2009).

A poluição atmosférica causada pelos derivados do petróleo está associada a diversas doenças respiratórias e cardiovasculares. Estudos apontam que a exposição prolongada a poluentes, como o material particulado fino ($\text{PM}_{2.5}$) e os óxidos de nitrogênio (NO_x), contribui para o aumento de casos de asma, bronquite crônica e câncer de pulmão. Além disso, o agravamento das mudanças climáticas tem resultado em eventos extremos, como furacões, secas prolongadas e ondas de calor, impactando diretamente a qualidade de vida da população global (MORAES, L. 2024).

O etanol é um composto químico formado por dois átomos de carbono, seis de hidrogênio e um grupo hidroxila ($-\text{OH}$). É o tipo de álcool mais utilizado na indústria devido à sua versatilidade. Em condições ambientes, trata-se de um líquido incolor, com odor característico, facilmente evaporável, inflamável e completamente solúvel em água. Com a fórmula molecular $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$, o etanol pode ser encontrado nas formas anidra e hidratada, diferenciando-se principalmente pelo teor de água presente. Apesar de ser um composto orgânico, não ocorre puro na natureza, precisando ser produzido antropicamente. Sua obtenção pode ocorrer por fermentação de açúcares ou por síntese química, sendo esta última a principal via para a produção do etanol anidro (TIME DE PRODUÇÃO DE ETANOL DA RAÍZEN, 2022).

O biocombustível possui ampla aplicação industrial, sendo utilizado na fabricação de tintas, vernizes, lacas e como solvente em indústrias farmacêuticas, químicas, de perfumes e bebidas. Além disso, é empregado como desinfetante, fluido térmico em termômetros operando abaixo de -40°C e como reagente em diversas sínteses orgânicas. No entanto, seu maior uso atualmente é como combustível. Etanol é um composto orgânico da família dos álcoois, composto por 52,24% de carbono, 13,13% de hidrogênio e 34,73% de oxigênio. Sua massa molar é de 46,07 g/mol e, em comparação com combustíveis como gasolina e diesel, é considerado um

composto leve, devido à sua estrutura de apenas dois átomos de carbono. Essa característica faz com que seja naturalmente um líquido à temperatura ambiente, com um ponto de ebulição relativamente baixo de 78,4°C. Além disso, sua leveza favorece a produção e, teoricamente, resulta em menor impacto ambiental (TIME DE PRODUÇÃO DE ETANOL DA RAÍZEN, 2022).

A presença do grupo hidroxila (-OH) confere ao etanol alta solubilidade em água e em outros líquidos polares. Isso ocorre porque a molécula é polar, possuindo regiões de carga elétrica diferenciada devido à presença do oxigênio, o que facilita interações intermoleculares e solubilidade em meios aquosos. Diante dos desafios impostos pelo uso excessivo de combustíveis fósseis, tornou-se necessário buscar fontes de energia mais limpas e sustentáveis. Entre as alternativas renováveis, destacam-se a energia solar, eólica, hidrelétrica e os biocombustíveis. Um dos biocombustíveis mais promissores é o etanol de segunda geração (E2G), que apresenta menor impacto ambiental e pode contribuir para a redução da dependência do petróleo (SANTOS, M. V, 2022).

O etanol de segunda geração (E2G), também conhecido como etanol celulósico, é produzido a partir de resíduos lignocelulósicos, como o bagaço e a palha da cana-de-açúcar, resíduos que anteriormente eram subutilizados ou descartados. Por essa razão, apresenta menor impacto ambiental e maior eficiência no aproveitamento da biomassa (DE ANDRADE, 2014).

Sua pegada de carbono é até 80% inferior à da gasolina e cerca de 30% menor que a do etanol de primeira geração, tornando-se uma alternativa altamente sustentável (TIMES DE SUSTENTABILIDADE E COMUNICAÇÃO CORPORATIVA DA RAÍZEN, 2021).

O E2G é um biocombustível avançado produzido a partir de resíduos agrícolas e materiais lignocelulósicos, como bagaço de cana-de-açúcar, palha e restos florestais. Diferente do etanol de primeira geração (E1G), o etanol verde não compete com a produção de alimentos e aproveita resíduos que seriam descartados, tornando-se uma alternativa mais sustentável. Além disso, sua pegada de carbono é mais de 80% menor do que a da gasolina, ajudando na redução das emissões de gases de efeito estufa (PACHECO, T. F, 2011).

O bagaço e o palhiço da cana-de-açúcar possuem composição rica em celulose, hemicelulose e lignina, sendo potenciais matérias-primas para a produção de E2G. A

partir de uma tonelada de cana, é possível obter quantidades significativas desses resíduos, os quais podem gerar um rendimento expressivo de etanol, conforme demonstrado por ALMEIDA (2017).

O bagaço, que é o resíduo resultante da extração do caldo, e o palhiço da cana, composto por folhas verdes, folhas secas e ponteiros, são os materiais que podem ser convertidos em E2G. As quantidades médias são: Bagaço – aproximadamente 280 kg com 50% de umidade são gerados a partir de 1,0 tonelada de cana. No entanto, esse valor pode oscilar entre 220 kg e 340 kg, dependendo de diversos fatores. Palhiço – pesquisas de campo indicam que cada tonelada de cana pode conter entre 170 kg e 300 kg de palhiço. Atualmente, as usinas que mais utilizam o palhiço para cogeração recolhem e transportam para a indústria entre 100 kg e 120 kg de palhiço por tonelada de cana. O bagaço novo, que sai da moenda, apresenta em 1,0 tonelada aproximadamente 200 kg de celulose, 126 kg de hemicelulose, 100 kg de lignina, 18,5 kg de açúcares (AR), 500 kg de água e o restante composto por outros elementos, como sais e proteínas (ALMEIDA, M, 2017).

O bagaço, considerando sua composição mencionada anteriormente, apresenta um rendimento máximo teórico de 163,1 litros de etanol hidratado (E2G) por tonelada, resultante da conversão da celulose e dos açúcares residuais (AR). A taxa de conversão das moléculas de celulose em açúcares, desde o pré-tratamento até o fim da hidrólise, varia entre 60% e 70%. Supondo uma taxa de conversão de 67% e uma eficiência de fermentação/destilação de 89,5%, a conversão total da celulose em etanol alcança cerca de 60%, o que permite a produção de 101,5 litros de E2G por tonelada de bagaço. O palhiço possui uma composição semelhante à do bagaço, com um teor de umidade entre 35% e 50%. Considerando uma umidade de 35%, a conversão máxima teórica é de 203 litros de E2G por tonelada. Com uma taxa de conversão total de 60% para a conversão da celulose em etanol, o rendimento prático esperado é de 122 litros de E2G por tonelada de palhiço (ALMEIDA, M, 2017).

O Brasil, devido à ampla produção de cana-de-açúcar, destaca-se na pesquisa e implementação do E2G, sendo a Raízen uma das principais empresas investidoras dessa tecnologia no país, consolidando-se como referência mundial no setor (RAÍZEN BIOCOMBUSTÍVEL, 2022; INSTITUTO CNA, 2025).

Esse cenário de destaque pode ser visualizado na Figura 4, que apresenta a produção mundial de cana-de-açúcar por país.

País	Produção (Toneladas)	Produção por Pessoa (Kg)	Área cultivada (Hectare)	Rendimento (Kg / Hectare)
Brasil	715 659 212	3 415,496	9 970 958	71 774,4
Índia	405 399 000	303,333	5 159 219	78 577,6
República Popular da China	107 258 724	76,951	1 136 199	94 401,4
Paquistão	88 650 593	439,143	1 260 291	70 341,4
Tailândia	66 278 506	958,015	1 495 417	44 321,1
México	55 485 308,93	444,816	813 781	68 182,1
Indonésia	32 200 000	121,502	448 000	71 875
Austrália	31 133 488	1 242,884	362 320	85 928,2
Estados Unidos da América	29 964 310	91,42	379 400	78 978,1
Guatemala	27 755 312,88	1 604,16	241 930	114 724,5
Filipinas	26 277 401,74	246,947	420 229	62 531,1

Figura 3 - Produção mundial de cana-de-açúcar por país.
Fonte: INSTITUTO CNA (2025).

Os 10 principais produtores de açúcar e o balanço global de O&D – milhões de toneladas						
	2018/19	2019/20F	2020/21E	2021/22F	Var 21/22 vs 20/21	
tel quel (período safra*)	CS Brasil	26,5	26,6	38,5	35,5	-7,8%
	Índia	33,1	27,4	30,0	31,0	3,3%
	EU (28)	17,6	17,3	15,4	16,3	5,8%
	Tailândia	14,6	8,2	7,4	9,9	33,8%
	China	10,7	10,4	10,7	10,5	-1,9%
	EUA	8,2	7,4	8,3	8,4	1,2%
	México	6,5	5,3	6,1	6,4	-4,9%
	Paquistão	5,2	5,0	5,4	5,5	1,9%
	Rússia	6,2	7,9	5,2	6,3	21,2%
	Austrália	4,5	4,1	4,1	4,4	7,3%
Valor bruto** (out-set)	Produção Global	185,9	179,2	179,8	186,0	3,4%
	Consumo Global	184,3	182,7	184,7	186,7	1,1%
	Superávit/Déficit	1,5	-3,5	-4,9	-0,8	

Figura 4 - Balanço global de produção e consumo de açúcar.
Fonte: ORGANIZAÇÃO DO MERCADO GLOBAL DE AÇÚCAR (2022).

A Figura 5 mostra os 10 maiores produtores de açúcar do mundo e o equilíbrio entre produção e consumo no período analisado. O principal produtor é o Brasil (região Centro-Sul), seguido pela Índia, União Europeia, Tailândia, China, EUA, México, Paquistão, Rússia e Austrália. Cada coluna mostra quanto cada país produziu em milhões de toneladas em cada safra de ano para ano.

Na última coluna à direita, observa-se a variação da produção de 2021/22 comparada com 2020/21. O Brasil, por exemplo, produziu 7,8% menos açúcar, enquanto a Índia aumentou a produção em 5,2%. Alguns países, como a Rússia, cresceram bastante (21,2%), enquanto outros, como a China, tiveram queda pequena na produção. Na parte de baixo da tabela aparece a produção global de açúcar e o consumo global. Em 2018/19, o mundo produziu mais açúcar do que consumiu, gerando um pequeno superávit de 1,5 milhão de toneladas. Já em 2019/20 e 2020/21,

houve déficit, ou seja, o mundo produziu menos do que consumiu. Em 2021/22, a produção voltou a crescer 3,4%, enquanto o consumo subiu 1,1%, fazendo o déficit quase desaparecer.

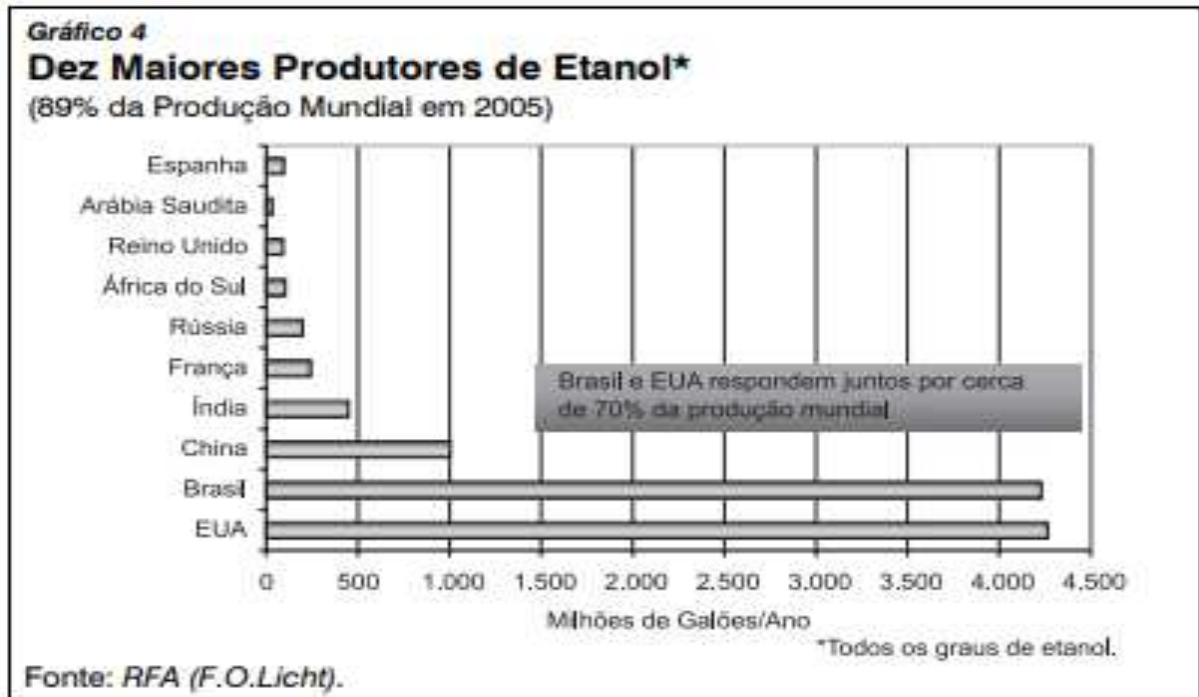


Figura 5 – Principais produtores mundiais de etanol em 2005.
Fonte: BNDES (2007).

A Figura 6 mostra os dez maiores produtores de etanol do mundo no ano de 2005. O etanol é um tipo de combustível feito a partir de plantas como milho e cana-de-açúcar. No gráfico, os países estão listados na vertical, e o tamanho da barra mostra o quanto cada um produziu em milhões de galões por ano. Os Estados Unidos aparecem como o maior produtor, seguidos pelo Brasil. Depois deles vêm China, Índia, França, Rússia, África do Sul, Reino Unido, Arábia Saudita e Espanha, mas com produções bem menores. Um destaque importante no gráfico é que Brasil e Estados Unidos juntos eram responsáveis por cerca de 70% de toda a produção mundial de etanol naquele ano. Percebe-se que o Brasil está constantemente na frente dos demais países ficando atrás somente dos EUA. Tratando-se de etanol produzido a partir da cana, com o E1G e o E2G, aumenta-se o amplo potencial de expansão da cultura de cana e, por consequência, da economia energética e sucroalcooleira local (Figura 6 – BNDES (BANCO NACIONAL DO DESENVOLVIMENTO, 2007)).

A produção de E2G tem potencial para impulsionar a economia global, gerando novos empregos e fortalecendo o setor agrícola. Países como o Brasil, que possuem uma forte base agroindustrial, estão em vantagem para se tornarem líderes no mercado de biocombustíveis. Além disso, o desenvolvimento do E2G pode reduzir a dependência de combustíveis fósseis importados, tornando a matriz energética mais diversificada e sustentável. Diversas empresas ao redor do mundo têm investido na produção de E2G, visando atender à crescente demanda por combustíveis mais limpos (PACHECO, T. F, 2011). No Brasil, a Raízen se destaca como uma das principais produtoras desse biocombustível, utilizando tecnologia de ponta para transformar resíduos da cana-de-açúcar em etanol celulósico.

A Raízen é uma empresa integrada de energia, fruto da parceria entre a Shell e o Grupo Cosan. Atuando em toda a cadeia produtiva do setor sucroenergético, a empresa tem investido fortemente na produção de etanol de segunda geração, consolidando-se como uma referência mundial em inovação e sustentabilidade no setor de biocombustíveis (RAÍZEN BIOCOMBUSTÍVEL, 2022).

O etanol verde, por ser produzido a partir de resíduos agrícolas, acaba evitando o desperdício e reduzindo a necessidade de novas áreas de cultivo. Outra vantagem é a baixa emissão de carbono, visto que possui uma pegada de carbono significativamente menor em comparação com os combustíveis fósseis (SANTOS, M. V, 2022).

A celulose e a hemicelulose são formadas por longas cadeias de moléculas de açúcares que, quando quebradas, liberam esses açúcares, em um processo chamado hidrólise (DE ROSSI, E. *et al.*, 2014). A partir dessas moléculas de açúcares, é possível produzir etanol.

Inicialmente é necessário que o bagaço seja submetido a um pré-tratamento, em seguida as cadeias moleculares da celulose e hemicelulose são “quebradas” pela ação de ácidos, enzimas ou processos mistos, liberando os açúcares. A rota atual preferida para a hidrólise tem sido a enzimática. As enzimas não são produzidas na Usina, sendo adquiridas de empresas especializadas. Os açúcares obtidos são transformados em etanol nos processos fermentativos e a solução final contendo basicamente água e etanol é enviada aos aparelhos de destilação que irão separar a fração etanol da água (ALMEIDA, M, 2017).

Na atual tecnologia, somente a celulose que é constituída por moléculas de glicose, pode ser convertida em etanol nos processos fermentativos. Os açúcares da hemicelulose constituídos basicamente de moléculas de xilose e arabinose (conhecidos como pentose), não são convertidos em etanol pela levedura *Saccharomyces cerevisiae*. Está em fase de pesquisas a utilização de microrganismos que possam converter eficientemente estes açúcares em etanol. A lignina e outros resíduos da hidrólise são separados e queimados nas caldeiras para produção de vapor (ALMEIDA, M, 2017).

A produção de etanol de segunda geração (E2G) é uma solução promissora para a geração de biocombustíveis mais sustentáveis. No entanto, esse processo exige etapas específicas para garantir a eficiência na conversão da biomassa em etanol. Uma dessas etapas fundamentais é o pré-tratamento.

O pré-tratamento é uma etapa crucial para otimizar a conversão enzimática, pois aumenta a área superficial da biomassa e melhora a porosidade dos materiais. Além disso, ele facilita a quebra da hemicelulose, um polímero de carboidratos encontrado na matéria vegetal, composto principalmente por pentoses (como xilose e arabinose), hexoses (como glicose, manose e galactose) e ácidos úricos (ISIDORIO, M. A. S., 2022). Esse processo pode ser realizado por meio de agentes químicos, como ácidos e bases, ou métodos físicos, como a aplicação de vapor. Um exemplo comum é o uso de vapor de amônia, uma base eficiente nesse procedimento. Entre as técnicas mais utilizadas estão a Expansão da Fibra em Amônia (AFEX), a hidrólise, o Processo Separado de Sacarificação (SHF) e a Fermentação Simultânea (SSF). O principal objetivo do pré-tratamento é remover a lignina, tornando a celulose e a hemicelulose mais acessíveis para conversão posterior (DE ROSSI, E. *et al.*, 2014).

No processo AFEX (Ammonia Fiber Expansion), a biomassa seca é tratada com amônia concentrada a 100°C sob pressão. Quando a pressão é liberada, a amônia evapora e pode ser reciclada. Esse método mantém a biomassa relativamente seca após o tratamento, evitando sua diluição em água. Isso melhora a eficiência da hidrólise subsequente, além de preservar a celulose, pois o ambiente não é ácido nem de temperatura extrema, fatores que poderiam degradá-la e aumentar a formação de pentoses indesejadas (CHUNDAWAT, S. P. S, *et al.* 2020).

O processo AFEX reduz a cristalinidade da celulose, limita a geração da pentose xilana e permite a recuperação da amônia. No entanto, sua eficiência na remoção da lignina é limitada, exigindo quantidades significativas de amônia para obter bons resultados (CHUNDAWAT, S. P. S, *et al.*, 2020). Outro método é o de explosão a vapor, utiliza vapor sob alta pressão e temperatura, semelhante ao processo em autoclaves, seguido por uma descompressão abrupta. Essa rápida liberação de pressão provoca a ruptura da parede celular da biomassa, criando fissuras que facilitam a penetração do vapor quente e da água entre suas camadas estruturais. Como resultado, o material se torna mais acessível para etapas subsequentes, como a hidrólise enzimática (ISIDORIO, M. A. S., 2022).

Depois do pré-tratamento temos opções de hidrólise, sendo elas hidrólise enzimática e a hidrólise ácida. Na hidrólise enzimática as enzimas atuam sobre substratos específicos, quebrando as ligações químicas das moléculas com a ajuda da água. Esse processo reduz moléculas grandes em componentes menores, que podem ser mais facilmente absorvidos ou utilizados pelo organismo. Já a hidrólise ácida ocorre quando um ácido mineral, que é derivado de substâncias inorgânicas, reage em meio aquoso. Essa reação pode acontecer tanto em soluções diluídas quanto em concentradas (HIJAZIN, *et al.*, 2010).

Passando pelo processo de hidrólise vem a fermentação. A fermentação é um processo de obtenção de energia utilizado por certos microrganismos, como bactérias e leveduras. Nesse processo, a glicose (ou outras substâncias, como o amido) é quebrada em piruvato, que depois se transforma em diferentes compostos, como etanol ou lactato. Dependendo do produto, a fermentação pode ser classificada como alcoólica, láctica, butílica, oxálica ou acética. Esse mecanismo ocorre na ausência de oxigênio, pois não utiliza esse elemento como aceptor final de elétrons, caracterizando um ambiente anaeróbico (MURAKAMI, L. S. N. A. *et al.*, 2016). No entanto, sua eficiência energética é relativamente baixa, gerando apenas dois ATPs por molécula de glicose, sendo cerca de dezoito vezes menos eficiente que a respiração aeróbica.

A fermentação alcoólica ocorre no citoplasma e é mediada por enzimas, que são influenciadas por fatores como nutrientes, minerais, vitaminas, inibidores, pH e temperatura. Esses elementos podem estimular ou inibir a ação enzimática, afetando a eficiência do processo. No final, a energia gerada é usada para o

crescimento e reprodução das leveduras, enquanto o etanol é apenas um subproduto dessa atividade metabólica. O caldo é destinado às dornas (tanques) na qual é misturado a um fermento composto por leveduras – microrganismos que se alimentam do açúcar presente no caldo. As leveduras quebram as moléculas de sacarose, produzindo etanol e gás carbônico (HENRIQUE, M. R. 2013).

A fermentação e a destilação são os principais processos e parecidos com o processo produtivo do etanol de primeira geração. A diferença é que a fermentação do açúcar xilose requer o uso de uma levedura geneticamente modificada. A planta de E2G pode realizar outras etapas secundárias, como evaporação dos caldos, separação de sólidos, secagens, tratamento de efluentes, águas etc. (TIMES DE ETANOL, AÇÚCAR E BIOENERGIA E SUSTENTABILIDADE DA RAÍZEN, 2023).

Na destilação ocorre a separação do etanol de outros compostos por diferença de volatilidade. Para esse processo ocorrer, o vinho é enviado para as colunas de destilação, nas quais é aquecido até evaporar. Depois acontece a condensação (transformação em líquido). Com isso, está pronto o álcool hidratado, usado como etanol combustível, com grau alcoólico de cerca de 96% (MURAKAMI, L. S. N. A. *et al.*, 2016).

O processo de conversão da biomassa lignocelulósica em etanol ainda apresenta custos elevados, dificultando sua competitividade com os combustíveis tradicionais. O desenvolvimento e a escalabilidade da produção do E2G exigem investimentos contínuos em pesquisa e inovação (RABELO, S. C. 2011).

2.2. Metodologia

A coleta de dados para este estudo foi realizada por meio de uma abordagem metodológica abrangente, que incluiu a análise documental de artigos científicos e não científicos, trabalhos de conclusão de curso, reportagens atualizadas, além de informações disponibilizadas em *sites* de empresas atuantes em áreas correlatas. Complementarmente, foram realizadas consultas a especialistas nas áreas de biologia, microbiologia e biocombustíveis, com o intuito de garantir uma compreensão aprofundada e multidisciplinar do tema investigado.

Inicialmente, realizou-se uma análise histórica, envolvendo a revisão dos marcos e avanços ao longo do tempo que influenciaram a evolução do tema, proporcionando uma base sólida para o entendimento do contexto atual. Na sequência, foi conduzida uma análise científica, voltada para estudos e pesquisas relevantes que fundamentam teoricamente o tema, possibilitando um aprofundamento nos processos e tecnologias envolvidos.

Após isso, iniciou-se a experimentação, que seguiu as diretrizes estabelecidas pelas metodologias previamente selecionadas. Contudo, ressalta-se que, como a infraestrutura da Etec não comportaria integralmente os procedimentos propostos, adaptações não prejudiciais foram implementadas conforme necessário.

O processo experimental é estruturado em quatro fases principais: pré-tratamento, hidrólise enzimática, fermentação e destilação. Entretanto, para garantir a confiabilidade do processo experimental, foi realizado um período preliminar de testes, voltado à avaliação das propriedades físico-químicas e do desempenho funcional das amostras. Durante essa fase inicial, todos os estágios do processo (descritas posteriormente) foram executados em escala reduzida, o que possibilitou a análise da eficácia dos métodos empregados e das modificações realizadas.

Nessa fase, a biomassa foi inicialmente triturada e desfibrada, utilizando o desfibrador da Fatec, processo que ampliou sua superfície de contato, como mostram a Figura 7 e a Figura 8.



Figura 6 – Desfibrador.
Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.



Figura 7 – Desfibrador em operação.
Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

Após isso, pesou-se o material moído que, em seguida, foi submetido à secagem em estufa, mostrado na Figura 9 e na Figura 10, procedimento essencial

para a eliminação de umidade e de possíveis interferências externas, assegurando condições adequadas para os processos posteriores.



Figura 8 – Balança.
Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.



Figura 9 – Estufa.
Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

Ademais, uma vez que se adotou o pré-tratamento químico, foram separadas 5 porções, cada uma com 20 gramas de bagaço, as quais foram submetidas a soluções aquosas de ácido sulfúrico de concentrações específicas (0,1%, 0,5%, 1,5%, 2,5% e 2,9%), mantendo, sempre, a razão sólido/líquido de 1:10, conforme apresentado nas figuras 11 e 12.



Figura 10 – Solução pré-tratamento.
Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.



Figura 11 – 5 soluções de diferentes concentrações (mais ácida à menos ácida).
Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

Depois, foram colocadas na autoclave nos diferentes tempos de reação a 120°C, como ilustram as figuras 13 e 14. Vale lembrar que todas as especificações se encontram na Tabela 1 da metodologia norteadora.



Figura 12 – Autoclave.
Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.



Figura 13 - Medidor de temperatura da autoclave (120°C).
Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

Para finalizar esse processo, a parte sólida (celulignina) foi filtrada, a fração líquida (licor) teve seu pH medido para o cálculo do fator de severidade combinado, em conformidade com a Figura 15 e, por último, a celulignina foi lavada três vezes, com 200 mL de água destilada em cada lavagem.

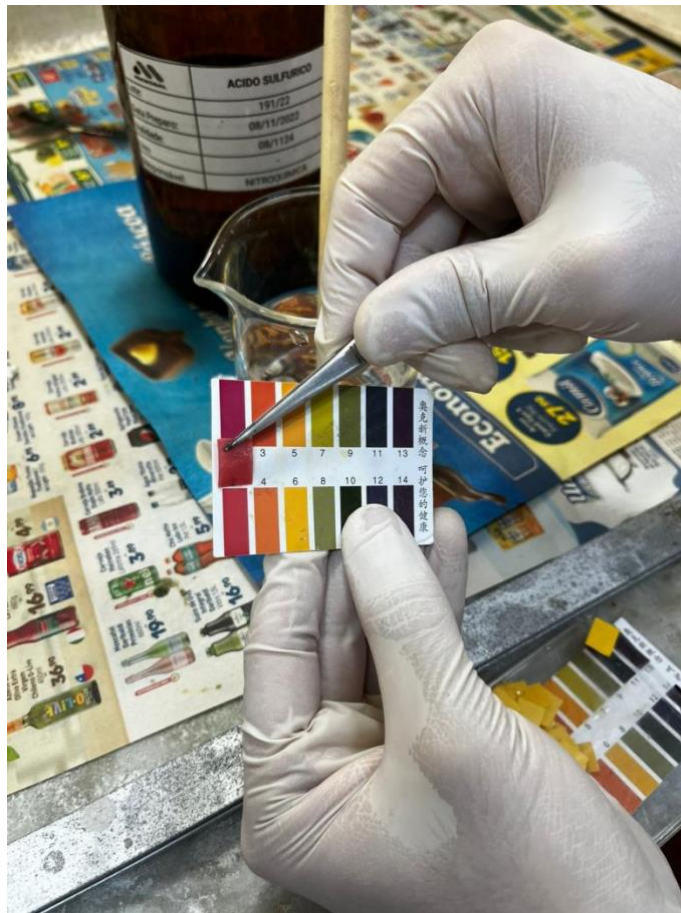


Figura 14 - Classificação do pH (pHmetro).
Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

Na sequência, durante a etapa de hidrólise enzimática, empregariam-se enzimas específicas com a finalidade de converter os polissacarídeos presentes na biomassa, especialmente a celulose, em açúcares fermentáveis, como a glicose e a xilose — compostos fundamentais para a produção do etanol de segunda geração.

A etapa de fermentação consiste na conversão dos açúcares obtidos na hidrólise enzimática em etanol, por meio da ação da levedura *Saccharomyces cerevisiae*, conforme o processo convencional de fermentação alcoólica. Essa fase seria conduzida com base na metodologia intitulada “Estudo da fermentação do

bagaço de cana para obtenção de etanol de segunda geração.” (HENRIQUE, M. R. 2013).

Por fim, a etapa de destilação seria responsável pela separação e concentração do etanol produzido, com o objetivo de se obter um produto com maior grau de pureza que seja adequado para utilização como biocombustível.

A etapa final da pesquisa, que previa a análise dos resultados experimentais e a avaliação da viabilidade da produção de etanol de segunda geração em uma instituição de ensino, não pôde ser realizada em sua totalidade devido à impossibilidade de continuidade do experimento após o pré-tratamento da biomassa. Essa limitação ocorreu, principalmente, pela indisponibilidade da enzima necessária para a hidrólise enzimática, cujo custo elevado e acesso restrito inviabilizaram sua aquisição no contexto da pesquisa.

Além disso, a infraestrutura laboratorial disponível não atendia às exigências técnicas das etapas subsequentes do processo, como fermentação controlada e destilação, que requerem equipamentos específicos ou adaptações nos procedimentos, mas sem alterar as condições rigorosas de operação. Dessa forma, a ausência de dados experimentais concretos impossibilitou a realização de uma análise final quantitativa sobre a viabilidade do processo, restringindo esta etapa à abordagem teórica e bibliográfica.

3. RESULTADOS

Este trabalho teve por meta a produção de um litro de E2G, utilizando meios laboratoriais de fácil acesso disponibilizados pelas instituições educacionais Escola Técnica Estadual Coronel Fernando Febeliano da Costa e Fatec Piracicaba, sob orientação dos professores Bianca Danelon, Rafael de Souza e Marcos Prada. Contudo, alguns obstáculos impossibilitaram a finalização do projeto. Os experimentos foram realizados de acordo com a disponibilidade dos laboratórios, ou seja, houve variação nos intervalos de tempo em que se deram os procedimentos.

No pré-tratamento químico, o qual envolveu os processos iniciais, todos os passos foram seguidos e finalizados com sucesso. Destaca-se a facilidade e a viabilidade da adoção desse método com o objetivo de remover a lignina da biomassa e deixá-la preparada para as etapas subsequentes de modo acessível a instituições escolares que possuam ao menos um laboratório de química e materiais à disposição, como os instrumentos laboratoriais e substâncias, como o ácido sulfúrico.

Contudo, não foi possível avaliar as demais experimentações, devido à inacessibilidade de aquisição da enzima Novozymes, necessária para a hidrólise enzimática, que seria responsável por quebrar as ligações químicas das moléculas do bagaço com a ajuda da água. Essa enzima é fundamental para quebrar algumas cadeias moleculares de alta dureza presentes na cana-de-açúcar, entretanto, ela é escassa e patenteada, além de que os fornecedores negociam os preços diretamente com as usinas. Também não se conseguiram parcerias com empresas privadas para patrocinar este projeto, uma vez que o projeto não apresentava retorno financeiro direto para as empresas.

Diante disso, não foi possível a experimentação das etapas a partir da hidrólise, sendo a única atestada o pré-tratamento.

4. CONCLUSÃO

4.1 Considerações finais teóricas

A crescente preocupação com os impactos ambientais decorrentes do uso intensivo e prolongado de combustíveis fósseis tem impulsionado, em escala global, a busca por fontes energéticas mais limpas, renováveis e ambientalmente responsáveis. O agravamento das mudanças climáticas, o aumento das emissões de gases de efeito estufa e os inúmeros prejuízos ambientais associados à exploração do petróleo evidenciam a necessidade urgente de substituição progressiva dessas fontes por alternativas sustentáveis.

Nesse contexto, o etanol de segunda geração (E2G) destaca-se como uma alternativa altamente promissora, uma vez que é produzido a partir de resíduos agrícolas, como o bagaço e a palha da cana-de-açúcar, materiais que, em grande parte, seriam subutilizados ou descartados. Dessa forma, além de representar uma fonte de energia renovável, o E2G contribui para o aproveitamento integral da biomassa, reduzindo desperdícios e promovendo uma gestão mais eficiente dos recursos naturais.

Ao longo do desenvolvimento teórico desta pesquisa, foi possível compreender, de maneira aprofundada, as etapas envolvidas no processo de produção do etanol de segunda geração, incluindo o pré-tratamento da biomassa, a hidrólise enzimática, a fermentação dos açúcares e a posterior destilação do etanol. Compreendeu-se também a importância dessas etapas para a eficiência do processo, bem como os desafios tecnológicos associados à quebra das estruturas lignocelulósicas presentes na biomassa.

Diferentemente do etanol de primeira geração, que é obtido principalmente a partir do caldo da cana-de-açúcar e, portanto, pode competir com a produção de alimentos, o E2G não concorre diretamente com a cadeia alimentar, pois utiliza resíduos agrícolas. Essa característica confere ao etanol celulósico um importante diferencial ambiental e social, tornando-o uma opção mais sustentável e eticamente mais aceitável no contexto atual.

Além dos benefícios ambientais, o etanol de segunda geração apresenta grande relevância econômica e estratégica para países com forte base agroindustrial, como o Brasil. A ampla disponibilidade de biomassa, aliada à experiência consolidada

do país na produção de etanol de primeira geração, coloca o Brasil em posição de destaque no cenário mundial dos biocombustíveis. Dessa maneira, o desenvolvimento e o aprimoramento das tecnologias envolvidas na produção do E2G podem contribuir significativamente para a diversificação da matriz energética nacional, a geração de empregos e o fortalecimento do setor sucroenergético.

Portanto, o estudo do etanol de segunda geração, abordado neste trabalho, evidencia seu elevado potencial como alternativa viável no contexto da transição energética global. Tal biocombustível se apresenta não apenas como uma solução ambientalmente mais limpa, mas também como uma estratégia importante para a redução da dependência dos combustíveis fósseis, colaborando para a construção de um modelo de desenvolvimento mais sustentável, equilibrado e consciente.

4.2 Considerações finais experimentais

No que se refere à etapa experimental deste trabalho, verificou-se que a realização completa do processo de produção do etanol de segunda geração em ambiente escolar apresenta limitações consideráveis, especialmente relacionadas à infraestrutura, ao acesso a insumos específicos e às condições técnicas necessárias para a continuidade das etapas mais avançadas do processo. Apesar dessas dificuldades, foi possível executar com êxito a fase de pré-tratamento químico do bagaço da cana-de-açúcar, demonstrando que as etapas iniciais da produção do E2G podem ser desenvolvidas em instituições de ensino que possuam um laboratório básico e acompanhamento técnico adequado.

A realização do pré-tratamento permitiu observar, na prática, a viabilidade de preparação da biomassa para as etapas subsequentes, confirmando os conhecimentos teóricos adquiridos ao longo da pesquisa. Essa fase mostrou-se fundamental para a compreensão dos processos físico-químicos envolvidos na remoção parcial da lignina e na maior exposição da celulose e da hemicelulose, componentes essenciais para a conversão em açúcares fermentáveis. Assim, mesmo de forma parcial, a experimentação cumpriu um papel significativo no processo de aprendizagem e consolidação dos conteúdos estudados.

Entretanto, a etapa de hidrólise enzimática configurou-se como o principal obstáculo para a continuidade do experimento. A necessidade de utilização de enzimas específicas, de alto custo, patenteadas e com comercialização restrita ao setor industrial inviabilizou a sua aquisição em tempo hábil. Em razão dessa limitação, não foi possível dar prosseguimento às etapas de fermentação e destilação, o que impediu a obtenção do produto final, ou seja, o etanol de segunda geração propriamente dito.

Esse fato evidencia que, embora seja possível realizar parte do processo produtivo do E2G em ambiente educacional, a execução completa do procedimento depende diretamente de recursos tecnológicos e financeiros que ultrapassam a realidade de instituições de ensino técnico. Dessa forma, fica claro que a produção integral desse biocombustível, de maneira autônoma, não é viável sem o estabelecimento de parcerias externas consistentes com universidades, centros de pesquisa ou empresas do setor sucroenergético.

Ainda assim, os resultados obtidos demonstram a relevância científica e educacional deste trabalho, uma vez que permitiram compreender, de forma prática, os desafios e limitações existentes na produção do etanol celulósico. A experiência adquirida contribui tanto para a formação técnica dos alunos quanto para a ampliação do conhecimento sobre energias renováveis em ambiente escolar.

Por fim, recomenda-se que estudos futuros deem continuidade a essa pesquisa por meio do fortalecimento de parcerias institucionais, do acesso a insumos especializados e da ampliação da infraestrutura laboratorial, possibilitando, assim, a realização integral das etapas de hidrólise, fermentação e destilação, e, conseqüentemente, a validação completa do processo de produção do etanol de segunda geração em escala experimental.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, M. Etanol de segunda geração (e2g) – 15 perguntas e respostas. Piracicaba, SP, 2017. Disponível em: <https://www.piracicabaengenharia.com.br/etanol-de-segunda-geracao/>. Acesso em: 30 abr. 2025.
- ANTÔNIO. R. S. M. Balanço energético nacional: Brasília, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2024>. Acesso em: 23 abr. 2025.
- AUTOCLASS BRASIL. Quanto petróleo os carros consomem? entenda o impacto no consumo e na economia global. out. 2024. Disponível em: <https://www.autoclassbrasil.com.br/quanto-petroleo-os-carros-consoem-entenda-o-impacto-no-consumo-e-na-economia-global/#:~:text=O%20petr%C3%B3leo%20como%20fonte%20de,e%20%C3%A0%20efici%C3%Aancia%20do%20motor>. Acesso em: 23 abr. 2025.
- BACCHI, M. R. P; MORAES, M. L. Etanol do início às fases atuais de produção. Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste), 2014. Disponível em: <https://seer.sede.embrapa.br/index.php/RPA/article/view/950>. Acesso em: 28 mar. 2025.
- CHUNDAWAT, S. P. S; *et al.* Ammonia Fiber Expansion (AFEX) Pretreatment of Lignocellulosic Biomass. Journal of Visualized Experiments, n. 158, 2020. Disponível em: <https://app.jove.com/v/57488/ammonia-fiber-expansion-afex-pretreatment-of-lignocellulosic-biomass>. Acesso em: 30 abr. 2025.
- DE ANDRADE, L. F. Produção de etanol de segunda geração. IN: DE ANDRADE, L. F. Belo Horizonte, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUBD-9K5KBG>. Acesso em: 28 mar. 2025.
- DE ROSSI, Eduardo; *et al.* Pré-tratamentos na produção de etanol de segunda geração. Revista Monografias Ambientais - REMOA, v. 13, n. 4, p. 3516-3522, set.-dez. 2014. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/231167884.pdf>. Acesso em: 30 abr. 2025.
- DIAS, M. O. S. *et al.* Biorefineries for the production of first and second generation ethanol and electricity from sugarcane. Applied Energy, 109, 72-78, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261913002778>. Acesso em: 28 mar. 2025.
- DIAS, M. O. S. *et al.* Integrated versus stand-alone second generation ethanol production from sugarcane bagasse and trash. Bioresource Technology, 103(1), 152-161, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852411014088>. Acesso em: 28 mar. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Balanço Energético Nacional 2008: relatório final: ano-base 2007. Brasília: EPE, 2008. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Balanco-Energetico-Nacional-2008>. Acesso em: 28 abr. 2025.

HENRIQUE, M. R. Efeitos da concentração dos compostos fenólicos do mosto na fermentação alcoólica. 2013. 103 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Energia na Agricultura) – UNESP, Botucatu, 2013. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/2b760e1d-963d-4c68-ae76-2042b9de81d2/content>. Acesso em: 30 abr. 2025.

HIJAZIN, C. A. H.; SIMÕES, A. T.; SILVEIRA, D. R. Hidrólise ácida, alcalina e enzimática. Revista Atitude – Faculdade Dom Bosco de Porto Alegre, ano IV, n. 7, p. 1–5, jan./jun. 2010. Disponível em: <https://scholar.google.com.br/...> Acesso em: 28 mar. 2025.

INSTITUTO CNA. Panorama do Agro. Brasília, 2025. Disponível em: <https://www.cnabrazil.org.br/cna/panorama-do-agro>. Acesso em: 28 abr. 2025.

ISIDORIO, M. A. S. Etapas de pré-tratamento de bagaço de cana-de-açúcar para produção de etanol de segunda geração: uma revisão. 2022. Trabalho de Graduação – Fatec Campinas. Disponível em: <http://ric-cps.eastus2.cloudapp.azure.com/handle/123456789/11891>. Acesso em: 30 abr. 2025.

MAGOSSI, E. 2011 apud Sousa, P. N, *et al.* 2012. Panorama da cadeia produtiva do etanol no Brasil. Revista GEPROS, 7(3), 145. Disponível em: <https://revista.feb.unesp.br/gepros/article/view/394>. Acesso em: 28 mar. 2025.

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Exportação Brasileira de Etanol. Disponível em: http://www.agricultura.gov.br/arg_editor/file/Desenvolvimento_Sustentavel/. Acesso em: 23 abr. 2025.

MARIANO, J. B. Proposta de Metodologia de Avaliação Integrada de Riscos e Impactos Ambientais... 2007. Tese (Doutorado – UFRJ). Disponível em: <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/21453887>. Acesso em: 23 abr. 2025.

MARJOTTA, M. M. C. Ajustes nos mercados de álcool e gasolina no processo de desregulamentação. 2002. Tese (Doutorado) – USP, Piracicaba, 2002. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11132/tde-20112002-090448/>. Acesso em: 30 abr. 2025.

MICHELLON, E.; *et al.* Breve Desc. do Proálcool e Perspectivas Futuras. Maringá, 2008. Disponível em: <https://ageconsearch.umn.edu/record/109225/?v=pdf>. Acesso em: 28 mar. 2025.

MORAES, L. Poluição do ar aumenta riscos de Parkinson e AVC. 4 out. 2024. Disponível em: <https://veja.abril.com.br/saude/poluicao-do-ar-aumenta-riscos-de-parkinson-e-avc-apontam-estudos>. Acesso em: 28 mar. 2025.

MURAKAMI, L. S. N. A.; *et al.* Processo produtivo do etanol usando cana-de-açúcar, 2016. Disponível em: https://fecilcam.br/anais/x_eepa/data/uploads/13-alimentos/13-02.pdf. Acesso em: 30 abr. 2025.

PACHECO, T. F. Produção de etanol: Primeira ou segunda geração? Brasília: Embrapa Agroenergia, 2011. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/886571>. Acesso em: 30 abr. 2025.

POZEBON, D.; LIMA, E. C.; MAIA, S. M.; FACHEL, J. M. G. Heavy metals contribution... Fuel, v. 84, n. 1, p. 53-61, 2005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236104002170>. Acesso em: 23 abr. 2025.

RABELO, S. C. Avaliação e otimização de pré-tratamentos e hidrólise enzimática do bagaço de cana. 2010. Tese (Doutorado) – Unicamp, 2011. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/acervo/detalhe/770600>. Acesso em: 28 mar. 2025.

RAÍZEN BIOCOMBUSTÍVEL. Raízen amplia utilização de resíduos orgânicos..., 2022. Disponível em: <https://www.raizen.com.br/sala-de-imprensa/raizen-amplia-utilizacao-de-residuos-organicos...> Acesso em: 28 mar. 2025.

REVISTA BRASILEIRA DE EDUCAÇÃO AMBIENTAL. Revbea, São Paulo, V. 13, No 3: 299-315, 2018. Disponível em: <https://www.academia.edu/download/64011006/artigo%20revista%20educa%C3%A7%C3%A3o%20emambiental%202018.pdf>. Acesso em: 28 mar. 2025.

SANTOS, M. V. Etanol de Segunda Geração: Vantagens e Desvantagens. IFAL, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ifal.edu.br/bitstream/123456789/446/1/MARIANE%20VASCONCELOS%20SANTOS.pdf>. Acesso em: 28 mar. 2025.

SERGIO, E. S. DA R.; JORGE, L. F. G. O etanol de segunda geração: limites e oportunidades. Revista do BNDES, v. 34, n. 32, p. 117–156, 2009. Disponível em: <https://scholar.google.com.br/...> Acesso em: 30 abr. 2025.

SOUSA, P. N. *et al.* Panorama da cadeia produtiva do etanol no Brasil. Revista GEPROS, 7(3), 145, 2012. Disponível em: <https://revista.feb.unesp.br/gepros/article/view/394>. Acesso em: 28 mar. 2025.

TIME DE PRODUÇÃO DE ETANOL DA RAÍZEN. Etanol: o que é, como é produzido e quais seus benefícios? fev. 2022. Disponível em: <https://www.raizen.com.br/blog/etanol>. Acesso em: 30 abr. 2025.

TIMES DE ETANOL, AÇÚCAR E BIOENERGIA E SUSTENTABILIDADE DA RAÍZEN. Etanol de segunda geração: potencial e oportunidades, fev. 2023. Disponível em: <https://www.raizen.com.br/blog/etanol-de-segunda-geracao>. Acesso em: 28 mar. 2025.

TIMES DE SUSTENTABILIDADE E COMUNICAÇÃO CORPORATIVA DA RAÍZEN.
Pegada de Carbono: Desvende Suas Dúvidas, dez. 2021. Disponível em:
<https://www.raizen.com.br/blog/pegada-de-carbono>. Acesso em: 28 mar. 2025.

WALTER, A.; *et al.* International Energy Agency. SOBER, Rio Branco, v. 1, p. 1-16,
jul. 2007. Disponível em: <https://ageconsearch.umn.edu/record/109225/?v=pdf>.
Acesso em: 30 abr. 2025.