

CENTRO PAULA SOUZA
ETEC PROF. CARMELINO CORRÊA JÚNIOR
ENSINO MÉDIO COM HABILITAÇÃO PROFISSIONAL
DE TÉCNICO EM QUÍMICA

Estevão da Costa Santana Junior
Kaio Gabriel dos Santos Alvares
Gabriel Faria Tostes
Emanoel Ataide Soares dos Santos

BIOCOMBUSTÍVEL

FRANCA

2025

Estevão da Costa Santana Junior

Kaio Gabriel dos Santos Alvares

Gabriel Faria Tostes

Emanoel Ataide Soares dos Santos

BIOCOMBUSTÍVEL

Trabalho de Conclusão de curso, apresentado ao Curso Técnico em Biotecnologia Integrado ao Ensino Médio da Etec Prof. Carmelino Corrêa Júnior, orientado pela Profa. Dra. Joana D'Arc Félix de Sousa, como requisito parcial para obtenção do título de Técnico em Química.

FRANCA

2025

Estevão da Costa Santana Junior

Kaio Gabriel dos Santos Alvares

Gabriel Faria Tostes

Emanoel Ataide Soares dos Santos

BIOCOMBUSTÍVEL

Orientador(a): _____

Nome: Profa. Dra. Joana D'Arc Felix Sousa

Instituição: ETEC Prof. Carmelino Corrêa Júnior

Examinador(a) 1: _____

Nome:

Instituição ETEC Prof. Carmelino Corrêa Júnior

Examinador(a) 2: _____

Nome:

Instituição ETEC Prof. Carmelino Corrêa Júnior

Examinador(a) 3: _____

Nome:

Instituição: ETEC Prof. Carmelino Corrêa Júnior

Franca, ____ / ____ / ____

DEDICAMOS este trabalho a ETEC Prof. Carmelino Corrêa Júnior, para que este trabalho possa inspirar novos alunos a buscarem sempre a inovação a partir da imaginação.

AGRADECEMOS aos professores, colegas de classe, e todos os que colaboraram para elaboração desse trabalho.

RESUMO

SANTOS, Emanuel Ataíde Soares; JUNIOR, Estevão da Costa Santana; TOSTES, Gabriel Faria; ALVARES, Kaio Gabriel Dos Santos; BIOCOMBUSTÍVEL, Trabalho de Conclusão de Curso Apresentado para Obtenção do Título de Técnico em Química Integrado ao Ensino Médio. ETEC Prof. Carmelino Corrêa Júnior, Franca/SP, 2025.

Este Trabalho de Conclusão de Curso tem como objetivo analisar o etanol derivado da cana-de-açúcar como uma alternativa sustentável aos combustíveis fósseis, com ênfase nos aspectos químicos, energéticos e ambientais envolvidos em sua produção e utilização. O estudo, de natureza teórica, baseou-se em revisão bibliográfica de artigos científicos, livros técnicos e documentos oficiais, buscando compreender os processos químicos da fermentação alcoólica, a purificação do etanol e os impactos ambientais comparativos em relação à gasolina. São discutidas ainda as vantagens e limitações do etanol como biocombustível, incluindo sua eficiência energética, renovabilidade, emissão de gases do efeito estufa e o papel do Brasil como líder mundial na produção. Conclui-se que o etanol da cana-de-açúcar representa uma solução viável e menos poluente, mas que seu uso deve estar aliado a práticas sustentáveis e políticas públicas que promovam seu desenvolvimento tecnológico contínuo.

Palavras-chave: Etanol; Cana-de-açúcar; Biocombustíveis; Sustentabilidade; Química Ambiental.

ABSTRACT

SANTOS, Emanuel Ataíde Soares; JUNIOR, Estevão da Costa Santana; TOSTES, Gabriel Faria; ALVARES, Kaio Gabriel Dos Santos; BIOCOMBUSTÍVEL, . Completion of Course Work Presented for Obtaining the Title of Technician in Chemistry Integrated to High School. ETEC Prof. Carmelino Corrêa Júnior, Franca/SP, 2025.

This undergraduate thesis aims to analyze sugarcane-derived ethanol as a sustainable alternative to fossil fuels, focusing on the chemical, energetic, and environmental aspects involved in its production and use. The study is theoretical in nature and based on a literature review of scientific articles, technical books, and official reports, with the objective of understanding the chemical processes of alcoholic fermentation, ethanol purification, and comparative environmental impacts in relation to gasoline. The advantages and limitations of ethanol as a biofuel are also discussed, including its energy efficiency, renewability, greenhouse gas emissions, and Brazil's role as a global leader in its production. The research concludes that sugarcane ethanol represents a viable and less polluting solution, though its use must be accompanied by sustainable practices and public policies that support continuous technological advancement.

Keywords: Ethanol; Sugarcane; Biofuel; Sustainability; Environmental Chemistry.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	09
1.1	Justificativas.....	09
1.2	Objetivos	10
2	DESENVOLVIMENTO.....	11
2.1	Referencial Teórico	11
3	CONCLUSÃO.....	14
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	16
	APÊNDICES.....	
	ANEXOS.....	

1 INTRODUÇÃO

1.1 Justificativas

A crescente poluição do ar, a degradação dos solos e a contaminação das águas são alguns dos maiores desafios ambientais enfrentados atualmente. A queima de combustíveis fósseis, como petróleo e carvão, é uma das principais responsáveis pela poluição atmosférica, contribuindo para o aumento da concentração de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera e intensificando o aquecimento global. Em 2020, segundo a Agência Internacional de Energia (AIE), o setor de energia foi responsável por aproximadamente 73% das emissões globais de GEE (AIE, 2020). Esse processo de poluição não afeta apenas o clima, mas também prejudica a saúde humana, uma vez que o ar contaminado está associado a doenças respiratórias, cardiovasculares e câncer (WHO, 2021).

Além disso, os rios, mares e solos estão sendo constantemente poluídos por resíduos industriais, produtos químicos e metais pesados. O uso intensivo de fertilizantes e pesticidas na agricultura, combinado com o descarte inadequado de resíduos industriais, tem comprometido a qualidade da água, afetando a biodiversidade e, em muitos casos, tornando a água imprópria para consumo humano. Um exemplo claro disso são os *dead zones* (zonas mortas) nos oceanos, áreas onde a falta de oxigênio, causada pela poluição, resulta na morte de peixes e outros organismos aquáticos (Diaz & Rosenberg, 2008).

Do ponto de vista econômico, o alto custo dos combustíveis fósseis é uma preocupação constante para muitos países, especialmente os em desenvolvimento, que dependem da importação de petróleo e gás natural. Em 2022, o Brasil, por exemplo, gastou mais de US\$ 20 bilhões em importações de combustíveis fósseis (MDIC, 2022). Este cenário não só sobrecarrega a balança comercial, mas também aumenta a vulnerabilidade econômica desses países a flutuações no mercado internacional de energia, tornando-os dependentes de fontes externas de energia e tornando seus sistemas econômicos mais instáveis.

A combinação desses problemas – ambientais e econômicos – exige ações rápidas e eficazes para mitigar seus efeitos. Este trabalho, ao explorar as implicações do uso

de biocombustíveis, foca especialmente em como esta fonte de energia renovável pode aliviar, pelo menos em parte, esses impactos negativos, criando um equilíbrio entre desenvolvimento econômico e sustentabilidade ambiental.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo analisar o uso de biocombustíveis como uma solução lógica e sustentável para enfrentar problemas ambientais, como a poluição do ar, do solo, dos rios e mares. Esses impactos comprometem diretamente a fauna e a flora em nível global. Além disso, buscamos discutir como os biocombustíveis podem contribuir para a redução do alto custo associado ao uso de combustíveis fósseis, promovendo uma alternativa que integre ecologia e economia.

2 DESENVOLVIMENTO

1. 2.1 Conceito de Biocombustível e Etanol

Os biocombustíveis constituem fontes de energia renováveis obtidas de matéria orgânica, como sobras de origem vegetal e animal, que podem ser transformadas em combustíveis em formas líquidas, sólidas ou gasosas. A sua utilização tem sido cada vez mais promovida devido aos desafios ambientais enfrentados globalmente, incluindo a mudança climática, a diminuição de recursos naturais e a dependência em relação aos combustíveis fósseis. Dentre os principais tipos de biocombustíveis, revelam-se o biodiesel e o etanol, com este último sendo um dos mais amplamente empregados no mundo, especialmente no Brasil.

O etanol se configura como um álcool que pode ser fabricado através da fermentação de açúcares simples contidos em matérias-primas como cana-de-açúcar, milho, beterraba, mandioca e outras culturas. A sua produção é geralmente dividida em duas

gerações: o etanol de primeira geração (1G), que utiliza açúcares solúveis extraídos da biomassa (sobretudo sacarose), e o etanol de segunda geração (2G), que utiliza os resíduos lignocelulósicos da biomassa, como a palha e o bagaço da cana, para a criação do combustível.

No Brasil, a cana-de-açúcar é a principal fonte para o etanol de primeira geração, graças à sua alta produtividade agrícola e à eficácia do processo industrial. Dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2021) posicionam o país como o segundo maior produtor de etanol do mundo, superado apenas pelos Estados Unidos, que focam principalmente na produção a partir do milho. O etanol brasileiro se destaca por sua sustentabilidade, apresentando um saldo energético extremamente positivo e uma das menores pegadas de carbono em relação aos combustíveis líquidos disponíveis. Segundo Goldemberg et al. (2018), para cada unidade de energia fóssil utilizada na produção de etanol de cana-de-açúcar, são geradas entre 8 a 10 unidades de energia renovável.

Ademais, a utilização do etanol como combustível tem desempenhado um papel crucial na diminuição das emissões de gases de efeito estufa (GEE) no setor de transporte. Estudos realizados pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2022) evidenciam que os biocombustíveis sustentáveis são fundamentais para a descarbonização da matriz energética global, especialmente em nações em desenvolvimento. No contexto brasileiro, iniciativas como o Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB) e o RenovaBio exemplificam políticas públicas que incentivam a adoção de biocombustíveis, visando promover a segurança energética e a mitigação ambiental.

O etanol traz benefícios tanto econômicos quanto sociais. A cadeia produtiva da cana-de-açúcar é uma fonte significativa de empregos, tanto diretos quanto indiretos, impulsionando a economia em diversas regiões do país. Ademais, o setor de açúcar e energia tem incentivado a criação de tecnologias inovadoras, como a geração de energia a partir do bagaço da cana e a produção de etanol celulósico (2G), que otimiza o uso da biomassa e minimiza ainda mais os impactos ambientais.

A fabricação de etanol de segunda geração, embora esteja em um estágio inicial de crescimento, representa um avanço tecnológico crucial. Ao contrário do etanol tradicional, que extrai açúcares simples, o etanol 2G envolve a conversão da celulose e hemicelulose, que são componentes complexos da parede celular das plantas. O grande desafio desse processo é a demanda por tecnologias mais sofisticadas para a hidrólise enzimática e a fermentação, o que eleva os custos de produção. Entretanto, com investimentos em pesquisa e desenvolvimento, há uma expectativa de que o etanol 2G se torne viável economicamente em larga escala, aumentando a capacidade de produção sem a necessidade de expandir as áreas cultiváveis.

Do ponto de vista ambiental, o etanol se destaca como uma das soluções mais promissoras para a transição energética, especialmente no transporte. A sua combustão em motores de veículos gera menos poluentes, como monóxido de carbono e partículas em suspensão, contribuindo para a melhoria da qualidade do ar nas cidades. Pesquisas, como a de Lima et al., demonstram que trocar a gasolina por etanol em veículos leves pode reduzir em até 90% as emissões de CO₂ ao longo do ciclo de vida do combustível.

Por último, é fundamental ressaltar que, mesmo com os progressos, a sustentabilidade do etanol está ligada a práticas agrícolas responsáveis, à preservação de áreas nativas e à gestão efetiva dos recursos hídricos e do solo. O setor sucroenergético está se dedicando a obter certificações ambientais, monitorar emissões e adotar boas práticas agrícolas, com o objetivo de garantir que o etanol brasileiro mantenha sua posição como líder global em biocombustíveis sustentáveis.

Em síntese, os biocombustíveis — especialmente o etanol — surgem como uma alternativa promissora frente aos desafios energéticos e ambientais atuais. Com uma base renovável e forte respaldo técnico-científico, o etanol ajuda a diversificar a matriz energética, reduzir emissões de gases de efeito estufa e estimular o desenvolvimento econômico local. O constante progresso tecnológico, juntamente com políticas públicas eficazes e uma abordagem sustentável, será crucial para solidificar o papel do etanol no futuro energético do Brasil e do mundo.

Os biocombustíveis constituem fontes de energia renováveis obtidas de matéria orgânica, como sobras de origem vegetal e animal, que podem ser transformadas em

combustíveis em formas líquidas, sólidas ou gasosas. A sua utilização tem sido cada vez mais promovida devido aos desafios ambientais enfrentados globalmente, incluindo a mudança climática, a diminuição de recursos naturais e a dependência em relação aos combustíveis fósseis. Dentre os principais tipos de biocombustíveis, revelam-se o biodiesel e o etanol, com este último sendo um dos mais amplamente empregados no mundo, especialmente no Brasil.

O etanol se configura como um álcool que pode ser fabricado através da fermentação de açúcares simples contidos em matérias-primas como cana-de-açúcar, milho, beterraba, mandioca e outras culturas. A sua produção é geralmente dividida em duas gerações: o etanol de primeira geração (1G), que utiliza açúcares solúveis extraídos da biomassa (sobretudo sacarose), e o etanol de segunda geração (2G), que utiliza os resíduos lignocelulósicos da biomassa, como a palha e o bagaço da cana, para a criação do combustível.

No Brasil, a cana-de-açúcar é a principal fonte para o etanol de primeira geração, graças à sua alta produtividade agrícola e à eficácia do processo industrial. Dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2021) posicionam o país como o segundo maior produtor de etanol do mundo, superado apenas pelos Estados Unidos, que focam principalmente na produção a partir do milho. O etanol brasileiro se destaca por sua sustentabilidade, apresentando um saldo energético extremamente positivo e uma das menores pegadas de carbono em relação aos combustíveis líquidos disponíveis. Segundo Goldemberg et al. (2018), para cada unidade de energia fóssil utilizada na produção de etanol de cana-de-açúcar, são geradas entre 8 a 10 unidades de energia renovável.

Ademais, a utilização do etanol como combustível tem desempenhado um papel crucial na diminuição das emissões de gases de efeito estufa (GEE) no setor de transporte. Estudos realizados pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2022) evidenciam que os biocombustíveis sustentáveis são fundamentais para a descarbonização da matriz energética global, especialmente em nações em desenvolvimento. No contexto brasileiro, iniciativas como o Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB) e o RenovaBio exemplificam políticas públicas que incentivam a adoção de biocombustíveis, visando promover a segurança energética e a mitigação ambiental.

O etanol traz benefícios tanto econômicos quanto sociais. A cadeia produtiva da cana-de-açúcar é uma fonte significativa de empregos, tanto diretos quanto indiretos, impulsionando a economia em diversas regiões do país. Ademais, o setor de açúcar e energia tem incentivado a criação de tecnologias inovadoras, como a geração de energia a partir do bagaço da cana e a produção de etanol celulósico (2G), que otimiza o uso da biomassa e minimiza ainda mais os impactos ambientais.

A fabricação de etanol de segunda geração, embora esteja em um estágio inicial de crescimento, representa um avanço tecnológico crucial. Ao contrário do etanol tradicional, que extrai açúcares simples, o etanol 2G envolve a conversão da celulose e hemicelulose, que são componentes complexos da parede celular das plantas. O grande desafio desse processo é a demanda por tecnologias mais sofisticadas para a hidrólise enzimática e a fermentação, o que eleva os custos de produção. Entretanto, com investimentos em pesquisa e desenvolvimento, há uma expectativa de que o etanol 2G se torne viável economicamente em larga escala, aumentando a capacidade de produção sem a necessidade de expandir as áreas cultiváveis.

Do ponto de vista ambiental, o etanol se destaca como uma das soluções mais promissoras para a transição energética, especialmente no transporte. A sua combustão em motores de veículos gera menos poluentes, como monóxido de carbono e partículas em suspensão, contribuindo para a melhoria da qualidade do ar nas cidades. Pesquisas, como a de Lima et al., demonstram que trocar a gasolina por etanol em veículos leves pode reduzir em até 90% as emissões de CO₂ ao longo do ciclo de vida do combustível.

Por último, é fundamental ressaltar que, mesmo com os progressos, a sustentabilidade do etanol está ligada a práticas agrícolas responsáveis, à preservação de áreas nativas e à gestão efetiva dos recursos hídricos e do solo. O setor sucroenergético está se dedicando a obter certificações ambientais, monitorar emissões e adotar boas práticas agrícolas, com o objetivo de garantir que o etanol brasileiro mantenha sua posição como líder global em biocombustíveis sustentáveis.

Em síntese, os biocombustíveis — especialmente o etanol — surgem como uma alternativa promissora frente aos desafios energéticos e ambientais atuais. Com uma

base renovável e forte respaldo técnico-científico, o etanol ajuda a diversificar a matriz energética, reduzir emissões de gases de efeito estufa e estimular o desenvolvimento econômico local. O constante progresso tecnológico, juntamente com políticas públicas eficazes e uma abordagem sustentável, será crucial para solidificar o papel do etanol no futuro energético do Brasil e do mundo.

2. 2.2 Histórico da Produção de Etanol no Brasil

O Brasil se firmou como um modelo internacional em bioenergia com a introdução do Programa Nacional do Álcool, conhecido como Proálcool, criado em 1975 como uma resposta estratégica à crise do petróleo que afetou o mundo durante a década de 1970. Em resposta ao aumento drástico dos preços dos combustíveis fósseis e à fragilidade energética resultante da alta dependência do petróleo importado, o governo brasileiro implementou o Proálcool para promover uma substituição parcial da gasolina pelo etanol, valorizando a cana-de-açúcar como a principal matéria-prima energética.

Esse programa gerou mudanças significativas na matriz energética do Brasil. Ele não só estimulou o crescimento da agroindústria de cana-de-açúcar, mas também impulsionou o progresso tecnológico nos setores agrícola e industrial ligados à produção de etanol, resultando em uma cadeia produtiva altamente colaborativa. Segundo Goldemberg e colaboradores, o Proálcool foi decisivo para a transição energética no Brasil, estabelecendo o etanol como um componente crucial para a segurança energética e a diminuição das emissões de gases de efeito estufa.

Desde sua implementação, o Proálcool passou por várias etapas - começando com subsídios governamentais e incentivos fiscais voltados para a produção e o consumo de etanol hidratado, até seu fortalecimento no ano de 1980, com a introdução de veículos que funcionavam exclusivamente com álcool. Apesar das crises enfrentadas na década de 1990, o programa fundamentou o modelo contemporâneo de produção integrada de açúcar, etanol e energia elétrica a partir da biomassa da cana, conhecido como setor sucroenergético.

O papel do Brasil na bioenergia foi mais uma vez fortalecido pelo advento de novas políticas públicas, como o programa RenovaBio, estabelecido pela Lei nº 13.576/2017, que define metas nacionais para redução de emissões e promove a valorização dos biocombustíveis mediante a certificação da eficiência ambiental na produção. Essa política intensifica ainda mais a competitividade do etanol no mercado, tanto interno quanto externo, consolidando o país como um dos principais protagonistas na migração para uma matriz energética mais limpa e renovável.

Além de seus benefícios para o meio ambiente e a eficiência energética, a indústria sucroenergética exerce uma função socioeconômica significativa, especialmente em áreas rurais do Brasil, onde cria oportunidades de trabalho tanto diretas quanto indiretas e impulsiona o progresso das comunidades. Acredita-se que a indústria da cana-de-açúcar empregue mais de 800 mil trabalhadores no país (UNICA, 2022), o que ressalta a relevância do etanol não só como uma alternativa energética, mas também como uma ferramenta para promover políticas de desenvolvimento sustentável.

Um dos aspectos que diferencia o etanol produzido no Brasil de outros países, como os Estados Unidos, é sua sustentabilidade ambiental. Enquanto o etanol americano é predominantemente derivado do milho, que implica um maior consumo de energia e impacto ambiental, o etanol brasileiro, originado da cana-de-açúcar, evidencia uma das melhores relações de eficiência energética e emissões. De acordo com um relatório da Agência Internacional de Energia, o etanol de cana pode reduzir as emissões de CO₂ em até 90% em comparação com a gasolina, além de demandar significativamente menos energia fóssil durante todo o seu ciclo de vida.

De forma resumida, o Proálcool foi muito mais do que apenas uma iniciativa para substituir combustíveis fósseis. Ele estabeleceu uma nova abordagem de aproveitamento de energia que se fundamenta em recursos renováveis, além de apoiar a independência energética, a redução das emissões no setor de transporte e a consolidação do Brasil como um país de vanguarda em bioenergia no cenário internacional. Esse legado continua a ser reforçado por meio de inovações tecnológicas, políticas de preservação ambiental e abordagens sustentáveis, o que mantém o país em evidência nas discussões globais sobre energia e questões climáticas.

3. 2.3 Etanol de Primeira e Segunda Geração

1. 2.3.1 Etanol de Primeira Geração

O etanol de primeira geração, conhecido como 1G, é obtido por meio da fermentação do suco extraído da cana-de-açúcar e se destaca como o principal biocombustível no Brasil. Este método, que se encontra bem estabelecido na indústria nacional, é notável por sua eficiência energética elevada, maturidade tecnológica e por sua conexão com a produção de açúcar e de energia elétrica. A fermentação dos açúcares do caldo resulta na produção de etanol hidratado e anidro, sendo o anidro utilizado como aditivo renovável na gasolina (Leal et al., 2020).

Uma característica marcante do modelo brasileiro de produção de etanol é seu enfoque em uma economia circular. Durante o processamento da cana, ocorre a geração de diversos subprodutos que são reutilizáveis de forma eficaz. Por exemplo, a vinhaça é utilizada como fertilizante nas plantações através da fertirrigação; o bagaço serve como biomassa para a cogeração de energia nas próprias usinas; e o CO₂ gerado durante a fermentação pode ser capturado para uso em processos industriais. Esta abordagem que aproveita toda a biomassa desempenha um papel crucial na minimização dos impactos ambientais e no fortalecimento da sustentabilidade do setor (Souza et al., 2017).

Além dos benefícios ambientais, esse modelo integrado traz também vantagens econômicas e logísticas, aumentando a competitividade do etanol brasileiro em relação a biocombustíveis agrícolas, como o etanol de milho fabricado nos Estados Unidos. De acordo com Bonomi et al. (2016), o sistema sucroenergético do país apresenta um dos menores custos de produção e uma das maiores eficiências energéticas globais, com um índice de energia produzida em relação à energia investida (EROI) que varia entre 8 e 10.

Entretanto, a produção de etanol 1G também se depara com desafios ambientais significativos, especialmente no que tange à expansão das áreas agrícolas. A crescente demanda por biocombustíveis pode colocar em risco os ecossistemas naturais, como o Cerrado e a Amazônia, se as diretrizes de zoneamento agroecológico não forem seguidas. A conversão de áreas de vegetação nativa em

monoculturas de cana-de-açúcar pode resultar em perda de biodiversidade, degradação do solo, escassez de água e conflitos socioambientais (Lapola et al., 2020).

Em síntese, o etanol de primeira geração é uma tecnologia madura, eficiente e bem consolidada no Brasil. Seu modelo de produção, que prioriza a economia circular e o uso sustentável de resíduos, oferece benefícios econômicos e ambientais significativos. Contudo, os riscos associados a uma expansão agrícola desordenada exigem políticas robustas de governança territorial e de sustentabilidade ambiental, para assegurar que os ganhos proporcionados pelos biocombustíveis não sejam comprometidos por efeitos negativos sobre o meio ambiente.

2. 2.3.2 Etanol de Segunda Geração (2G)

O etanol de segunda geração, também conhecido como etanol 2G, representa uma inovação significativa no setor de biocombustíveis, pois possibilita a utilização da fração lignocelulósica da biomassa, incluindo principalmente o bagaço e a palha da cana-de-açúcar, para a produção de etanol destinado ao consumo energético. Ao contrário do etanol de primeira geração, que se baseia nos açúcares livres das plantas, o etanol 2G é produzido a partir de materiais com composições mais complexas, tais como celulose, hemicelulose e lignina, que constituem as paredes celulares das plantas. Essa estratégia proporciona um aumento na produção de etanol por hectare cultivado, sem a necessidade de expandir a área agrícola, representando um avanço importante em termos de sustentabilidade ambiental.

No cenário brasileiro, essa tecnologia mostra um potencial considerável, uma vez que o país conta com uma grande quantidade de resíduos agroindustriais oriundos da cana-de-açúcar. Estimativas indicam que, ao explorar completamente o bagaço e a palha, seria possível duplicar a produção de etanol para cada tonelada de cana processada, aperfeiçoando a eficiência do ciclo produtivo sem causar impactos negativos aos ecossistemas naturais. Ademais, o etanol 2G auxilia na promoção de uma economia de baixo carbono, apresentando uma fonte de combustível renovável com menor emissão de carbono e melhor aproveitamento energético.

Entretanto, mesmo com todo esse potencial, o etanol de segunda geração ainda enfrenta consideráveis desafios para ser viabilizado de forma ampla. Entre os principais obstáculos estão a complexidade das tecnologias envolvidas, especialmente na fase de hidrólise enzimática, na qual as enzimas convertem a celulose em açúcares que podem ser fermentados, além do alto custo dos insumos necessários, como enzimas industriais e equipamentos especializados. Outro fator complicador é que o pré-tratamento da biomassa lignocelulósica exige condições químicas e físicas específicas, o que torna o processo mais caro e menos competitivo em relação ao etanol tradicional.

Do ponto de vista financeiro, os elevados custos de investimento e operação ainda restringem a competitividade do etanol 2G em relação a outras fontes de energia. De acordo com a Agência Internacional de Energia Renovável, a produção de etanol 2G carece de subsídios e investimentos públicos para alcançar uma escala que lhe confira competitividade no mercado. No entanto, diversas iniciativas, tanto no Brasil quanto em outras partes do mundo, têm buscado romper essas barreiras por meio da promoção de pesquisas, parcerias entre setores público e privado e incentivos à inovação.

O progresso da pesquisa científica, aliado à atuação de centros tecnológicos e instituições de ensino superior, tem sido crucial para o desenvolvimento das rotas tecnológicas do etanol de segunda geração. A biotecnologia industrial tem trabalhado na criação de cepas microbianas que são mais robustas e eficientes, além de enzimas que exibem uma maior capacidade catalítica e estabilidade térmica, o que resulta em custos mais baixos e maior produção (Jung et al., 2020). O Brasil, devido à sua posição estratégica na indústria sucroenergética, tem se destacado na pesquisa aplicada e na construção de usinas que utilizam tecnologia 2G, como é o caso da planta industrial da Raízen em Piracicaba, São Paulo, que é uma das primeiras do mundo a produzir etanol celulósico em escala comercial.

Além do desenvolvimento tecnológico, a implementação de políticas públicas voltadas especificamente para o setor, como o programa RenovaBio, também é essencial para promover a adoção de biocombustíveis avançados. O modelo de créditos de descarbonização (CBIOS) introduzido pelo programa valoriza a eficiência ambiental dos biocombustíveis e pode trazer vantagens econômicas para o etanol de segunda

geração, graças ao seu alto desempenho na redução de emissões de gases de efeito estufa (Oliveira et al., 2019).

Em resumo, o etanol de segunda geração abre uma nova perspectiva para a bioenergia, apresentando um grande potencial técnico, ambiental e estratégico. Apesar dos obstáculos ainda presentes, a combinação de avanços tecnológicos, fomento à inovação e políticas públicas sólidas pode possibilitar a produção em larga escala, solidificando a posição do Brasil como um dos líderes na transição para fontes de energia renováveis.

4. 2.4 Impactos Econômicos e Sociais

O setor sucroenergético do Brasil, especialmente no que diz respeito à fabricação de etanol, desempenha um papel crucial na economia do país. Sua relevância se dá não apenas pela contribuição à matriz energética e às exportações, mas também pelos impactos positivos no emprego, na renda e no desenvolvimento das regiões. Segundo informações da União da Indústria da Cana-de-Açúcar (UNICA, 2020), o Brasil alcançou uma produção de aproximadamente 30 bilhões de litros de etanol naquele ano, movimentando uma cadeia produtiva que vai desde pequenos agricultores até grandes conglomerados industriais, resultando na criação de mais de 800 mil postos de trabalho diretos e indiretos.

A produção de etanol é predominantemente realizada nos estados do Centro-Sul, com ênfase em São Paulo, Minas Gerais e Goiás, que juntos representam mais de 85% da produção total do país. Nessas regiões, o setor é essencial para impulsionar a economia local, ajudando a aumentar a arrecadação de impostos, melhorar a infraestrutura rural e combater desigualdades socioeconômicas por meio de um desenvolvimento mais abrangente (Bonomi et al., 2016).

O etanol exerce uma influência direta na matriz de transporte do Brasil, gerando efeitos significativos na economia. O uso do etanol hidratado como combustível para veículos e a adição obrigatória de etanol anidro à gasolina (atualmente estabelecido em 27%) são alternativas estratégicas em relação aos combustíveis fósseis, favorecendo uma maior estabilidade nos preços, diminuindo a dependência do petróleo importado e reforçando a autonomia energética do país (Leal et al., 2020).

Ademais, o etanol ajuda a reduzir problemas ambientais nas áreas urbanas, uma vez que diminui as emissões de poluentes e gases de efeito estufa provenientes do setor de transportes (IEA, 2021).

Entretanto, os impactos sociais da indústria não estão isentos de desafios. Questões relacionadas ao trabalho e ao meio ambiente, que são históricas, ainda requerem a atenção contínua de órgãos públicos, empresas e da sociedade civil. Entre os principais desafios, estão as condições de trabalho precárias, especialmente nas fases manuais da colheita, antes da mecanização, além dos efeitos da mecanização no corte da cana, que, embora tenha reduzido práticas prejudiciais, também resultou na diminuição da demanda por trabalhadores e no aumento do desemprego rural em algumas áreas (Silva et al., 2018).

Além disso, a concentração das terras e os modelos de arrendamento ainda limitam a inclusão de pequenos agricultores na cadeia produtiva. Portanto, é essencial que políticas públicas focadas na inclusão social e produtiva sejam implementadas para democratizar os ganhos econômicos do setor, criando cadeias produtivas mais justas e sustentáveis. Nesse contexto, iniciativas de certificação socioambiental, como o RenovaBio, têm buscado promover práticas responsáveis dentro da indústria, vinculado incentivos econômicos a critérios de eficiência energética e respeito aos direitos sociais (Oliveira et al., 2019).

Em contrapartida, a indústria de açúcar e energia se configura como um espaço propício para inovações e aperfeiçoamento profissional, destacando o aparecimento de novas oportunidades de trabalho em setores como automação, logística, avaliação ambiental e biotecnologia. O desenvolvimento das tecnologias para a produção de etanol de segunda geração e a maior utilização da biomassa para geração de energia abrem possibilidades para perfis profissionais distintos e a elevação do capital humano nas áreas produtoras.

De forma resumida, os efeitos econômicos e sociais da indústria sucroenergética são significativos e variados. Além de ser uma fonte crucial de renda, emprego e crescimento regional, o setor enfrenta desafios relacionados à equidade social, formação da força de trabalho e inclusão de pequenos agricultores. A criação de um

modelo que seja tanto sustentável quanto justo requer a interação entre inovações tecnológicas, uma regulação pública eficiente e uma responsabilidade social corporativa, assegurando que os benefícios econômicos venham acompanhados de importantes progressos sociais.

5.

6. **2.5 Impactos Ambientais**

O etanol de resíduos orgânicos é realmente uma alternativa energética importante para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Conforme destacado por Macedo et al. (2008), a redução de até 90% nas emissões de CO₂ em comparação com a gasolina é significativa, especialmente quando se considera o ciclo de vida completo do combustível, que inclui desde o cultivo da cana até a queima do etanol no motor. Além disso, o manejo sustentável dos resíduos pode trazer benefícios ambientais adicionais, como a recuperação de áreas degradadas e a preservação dos serviços ecossistêmicos, que são essenciais para a manutenção da biodiversidade e da qualidade do solo e da água. Por fim, a gestão adequada dos resíduos, como a vinhaça, é crucial para evitar a contaminação ambiental.

A vinhaça, rica em matéria orgânica e nutrientes, pode ser utilizada como fertilizante, mas seu uso inadequado pode levar à poluição do solo e da água, afetando ecossistemas e a saúde humana. Portanto, a sustentabilidade do setor sucroalcooleiro depende de um equilíbrio entre avanços tecnológicos, práticas agrícolas responsáveis e políticas públicas que promovam o desenvolvimento social e ambientalmente justo. Além disso, embora os biocombustíveis emitam menos CO₂ na queima, a produção e o transporte deles ainda envolvem o uso de combustíveis fósseis e liberam gases de efeito estufa. Ou seja, a emissão total ao longo de todo o ciclo de vida pode não ser tão baixa quanto se espera, principalmente se houver impactos indiretos como desmatamento.

Em resumo, o lado negativo dos biocombustíveis está nos impactos ambientais e sociais causados pelo seu cultivo em larga escala, que podem comprometer sua sustentabilidade se não forem controlados com políticas públicas e práticas agrícolas responsáveis.

3 CONCLUSÃO

3.1 Considerações Finais

O presente trabalho teve como objetivo central discutir os biocombustíveis, com ênfase no etanol, como alternativa estratégica frente aos desafios ambientais e econômicos relacionados ao uso de combustíveis fósseis. A partir da análise dos

impactos ambientais da matriz energética baseada em petróleo, da trajetória histórica do etanol no Brasil e das inovações tecnológicas no setor sucroenergético, foi possível compreender o papel transformador dessa fonte renovável na busca por um modelo de desenvolvimento mais sustentável.

Observou-se que o etanol, particularmente aquele derivado da cana-de-açúcar, possui vantagens significativas, tanto no aspecto ambiental — pela drástica redução das emissões de gases de efeito estufa — quanto no aspecto socioeconômico, promovendo geração de emprego, desenvolvimento regional e redução da dependência energética externa. Além disso, os avanços em etanol de segunda geração mostram-se promissores no aumento da eficiência produtiva, reduzindo a pressão por expansão agrícola e aproveitando melhor os resíduos da biomassa.

Entretanto, os benefícios associados ao etanol não devem ocultar os desafios que ainda se impõem. Questões como a sustentabilidade do uso da terra, o uso da água, os impactos sociais da mecanização e os riscos da monocultura devem continuar a ser monitorados com rigor por meio de políticas públicas, pesquisa científica e regulamentação ambiental adequada. A busca por equilíbrio entre produção energética, justiça social e preservação ambiental continua sendo uma meta complexa e urgente.

Nesse sentido, a transição energética baseada em biocombustíveis como o etanol requer uma abordagem integrada, que leve em conta as especificidades regionais, a inovação tecnológica e o compromisso com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 da ONU. O Brasil, com sua expertise consolidada no setor, tem o potencial de liderar essa transformação, contribuindo não apenas para sua própria segurança energética, mas também para um futuro energético mais limpo e justo em escala global.

Dessa forma, conclui-se que os biocombustíveis representam não apenas uma alternativa viável, mas uma necessidade no enfrentamento dos desafios contemporâneos impostos pelas mudanças climáticas, degradação ambiental e crise energética. Recomenda-se que futuros estudos ampliem a análise dos impactos da produção de etanol em territórios tradicionais, em áreas de conflito fundiário e sobre

a biodiversidade local, buscando consolidar uma produção verdadeiramente sustentável e inclusiva.

4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). (2023). *Boletim Mensal dos Combustíveis Renováveis*. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/>

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. (2021). *Balanço Energético Nacional 2021*. Brasília: MME.

Goldemberg, J., Coelho, S. T., & Guardabassi, P. (2018). The sustainability of ethanol production from sugarcane. *Energy Policy*, 123, 548–556.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Sixth Assessment Report*. Geneva: IPCC.

Lima, R. S., Souza, M. T., & Pacca, S. A. (2020). Life cycle assessment of sugarcane ethanol: Brazilian context and international relevance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 118, 109531.

Rezende, C. A., et al. (2017). Second-generation ethanol from sugarcane biomass. *BioEnergy Research*, 10(3), 652–665.

Santos, R. M., et al. (2018). Technological challenges for the production of second-generation ethanol in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92, 914–927.

Soccol, C. R., et al. (2019). Second generation ethanol: Alternative energy, bioeconomy and sustainable development. *Springer Nature*.

Goldemberg, J., Coelho, S. T., & Guardabassi, P. (2018). The sustainability of ethanol production from sugarcane. *Energy Policy*, 123, 548–556.

IEA – International Energy Agency. (2021). *Renewables 2021: Analysis and forecast to 2026*. Paris: IEA.

Leal, M. R. L. V., Oliveira, F. C., & Macedo, I. C. (2020). Sugarcane bioenergy in Brazil: History, achievements and future directions. *Environmental Development*, 33, 100505.

Oliveira, M. E. D., Santos, J. M. F., & Cavalcante, A. S. (2019). O RenovaBio e a certificação da produção de biocombustíveis no Brasil. *Revista de Política Agrícola*, 28(3), 53–64.

Souza, G. M., Victoria, R. L., Joly, C. A., & Verdade, L. M. (2017). Bioenergy & sustainability: Bridging the gaps. *Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE)*.

UNICA – União da Indústria da Cana-de-Açúcar. (2022). *Dados do Setor Sucroenergético*. Disponível em: <https://unica.com.br>

Bonomi, A., Cavalett, O., Cunha, M. P., & Lima, M. A. P. (2016). *Virtual Biorefinery: An Optimization Strategy for Renewable Carbon Valorization*. Springer.

Leal, M. R. L. V., Oliveira, F. C., & Macedo, I. C. (2020). Sugarcane bioenergy in Brazil: History, achievements and future directions. *Environmental Development*, 33, 100505.

Lapola, D. M., et al. (2020). Limiting the expansion of sugarcane for biofuel production avoids biodiversity loss and improves food security. *Global Environmental Change*, 60, 102011.

Nassar, A. M., Moreira, M. M. R., & Antoniazzi, L. B. (2017). The expansion of agriculture and its impacts on land use, environment, and food security in Brazil. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 5(1), 1-10.

Oliveira, M. E. D., Santos, J. M. F., & Cavalcante, A. S. (2019). O RenovaBio e a certificação da produção de biocombustíveis no Brasil. *Revista de Política Agrícola*, 28(3), 53–64.

Souza, G. M., Victoria, R. L., Joly, C. A., & Verdade, L. M. (2017). *Bioenergy & sustainability: Bridging the gaps*. Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE).

IRENA – International Renewable Energy Agency. (2021). *Innovation Outlook: Advanced Liquid Biofuels*. Abu Dhabi: IRENA.

Jung, S., Kalyani, D., & Kang, C. (2020). Recent progress in enzymatic hydrolysis of lignocellulosic biomass for bioethanol production. *Bioresource Technology Reports*, 11, 100491.

Oliveira, M. E. D., Santos, J. M. F., & Cavalcante, A. S. (2019). O RenovaBio e a certificação da produção de biocombustíveis no Brasil. *Revista de Política Agrícola*, 28(3), 53–64.

Rezende, C. A., et al. (2017). Second-generation ethanol from sugarcane biomass. *BioEnergy Research*, 10(3), 652–665.

Silva, C. A., Lopes, C. E., & Rocha, G. J. M. (2021). Economic and technological aspects of second-generation ethanol production: Challenges and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 136, 110444.

Soccol, C. R., et al. (2019). Second generation ethanol: Alternative energy, bioeconomy and sustainable development. *Springer Nature*.