



Universidade Federal de Ouro Preto  
Escola de Minas  
Departamento de Engenharia de Produção



## **CRESCIMENTO DA CADEIA PRODUTIVA DO ETANOL DE MILHO NO BRASIL: UMA ANÁLISE DO AVANÇO SETORIAL**

**MARIA CLARA REZENDE NOGUEIRA**

**Ouro Preto  
2025**

**MARIA CLARA REZENDE NOGUEIRA**

**CRESCIMENTO DA CADEIA PRODUTIVA DO ETANOL DE MILHO NO  
BRASIL: UMA ANÁLISE DO AVANÇO SETORIAL**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau em Bacharel em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Gustavo Nikolaus Pinto de Moura

**Ouro Preto**

**2025**

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

N778c Nogueira, Maria Clara Rezende.  
Crescimento da cadeia produtiva do etanol de milho no Brasil  
[manuscrito]: Uma Análise do Avanço Setorial. / Maria Clara Rezende  
Nogueira. Maria Nogueira. - 2025.  
50 f.: il.: color., tab..

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Moura.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.  
Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Produção .

1. Planejamento empresarial - Análise SWOT. 2. Alcool - Milho. 3.  
Biocombustíveis. 4. Desenvolvimento energético - Transição energética.  
5. Sustentabilidade. I. Nogueira, Maria. II. Moura, Gustavo. III.  
Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 658.5

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CB-1716



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
REITORIA  
ESCOLA DE MINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO,  
ADMINISTRAÇÃO E ECON



**FOLHA DE APROVAÇÃO**

**MARIA CLARA REZENDE NOGUEIRA**

**CRESCIMENTO DA CADEIA PRODUTIVA DO ETANOL DE MILHO NO BRASIL: UMA ANÁLISE DO  
AVANÇO SETORIAL**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Produção.

Aprovada em 24 de outubro de 2025

**Membros da banca**

D.Sc. - Gustavo Nikolaus Pinto de Moura - Orientador(a) Universidade Federal de Ouro Preto

D.Sc. - Bruna de Fátima Pedrosa Guedes Flausino - Universidade Federal de Ouro Preto

D.Sc. - Mateus Pereira Lavorato - Universidade Federal de Ouro Preto

Gustavo Nikolaus Pinto de Moura, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 04/11/2025



Documento assinado eletronicamente por **Gustavo Nikolaus Pinto de Moura, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 20/01/2026, às 19:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1044610** e o código CRC **8DE2A41B**.

## RESUMO

Este trabalho analisa a expansão da cadeia produtiva do etanol de milho no Brasil, considerando seus aspectos históricos, econômicos, tecnológicos e energéticos no contexto da transição para uma matriz mais sustentável. A pesquisa baseia-se em revisão bibliográfica e documental, abordando desde o surgimento do etanol de cana até o recente avanço do etanol de milho, cuja produção vem crescendo rapidamente, especialmente na região Centro-Oeste, impulsionada pela disponibilidade de matéria-prima, alta eficiência industrial e geração de coprodutos como DDGS e bioeletricidade. A análise SWOT revelou forças como produtividade e integração tecnológica, e oportunidades ligadas à demanda por biocombustíveis de baixa pegada de carbono. Contudo, desafios como o alto custo de investimento, a concentração regional e a volatilidade do mercado ainda limitam sua expansão. Conclui-se que o etanol de milho representa um vetor promissor para a transição energética brasileira, contribuindo para o cumprimento das metas de descarbonização. Recomenda-se, em estudos futuros, explorar o uso da inteligência artificial na otimização do processo produtivo e na viabilização do etanol de segunda geração (E2G).

**Palavras-chave:** Análise Swot; Etanol de milho; Biocombustíveis; Transição energética; Sustentabilidade.

## **ABSTRACT**

This study analyzes the expansion of the corn ethanol production chain in Brazil, considering its historical, economic, technological, and energy aspects within the context of the transition to a more sustainable energy matrix. The research is based on bibliographic and documentary review, addressing the development of sugarcane ethanol and the recent growth of corn ethanol, whose production has rapidly increased, especially in the Central-West region, driven by the availability of raw materials, high industrial efficiency, and the generation of co-products such as DDGS and bioelectricity. The SWOT analysis revealed strengths such as productivity and technological integration, as well as opportunities related to the growing demand for low-carbon biofuels. However, challenges such as high investment costs, regional concentration, and market volatility still limit its expansion. It is concluded that corn ethanol represents a promising vector for Brazil's energy transition, contributing to achieving decarbonization goals. Future studies are recommended to explore the use of artificial intelligence to optimize the production process and enhance the viability of second-generation ethanol (E2G).

**Keywords:** Swot Analysis; Corn ethanol; Biofuels; Energy transition; Sustainability.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1: Participação das renováveis na OIE .....</b>	<b>16</b>
<b>Figura 2: Repartição da Oferta Interna de Energia (OIE) 2023 .....</b>	<b>17</b>
<b>Figura 3: Repartição da OIE .....</b>	<b>18</b>
<b>Figura 4: Participação do milho na produção de etanol .....</b>	<b>22</b>
<b>Figura 5: Distribuição geográfica das usinas de etanol de milho no Brasil .....</b>	<b>25</b>
<b>Figura 6: Oferta Interna de Energia (OIE) .....</b>	<b>28</b>
<b>Figura 7: Evolução da produção, importação e exportação de etanol no Brasil (2013–2022) .....</b>	<b>29</b>
<b>Figura 8: Fluxograma das rotas para obtenção de bioethanol de primeira e segunda geração .....</b>	<b>32</b>

## **LISTA DE QUADROS**

<b>Quadro 1: Análise <i>SWOT</i> – Expansão da Produção de Etanol de Milho no Brasil .....</b>	<b>38</b>
<b>Quadro 2: Quadro de Cruzamento da Análise <i>SWOT</i> – Etanol de Milho no Brasil .....</b>	<b>42</b>



## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	4
1.1 Problemática e Justificativa	7
1.2 Objetivos	8
1.2.1 Objetivo geral	8
1.2.2 Objetivos específicos	8
2 METODOLOGIA	10
2.1 Tipo de pesquisa	10
2.2 Universo e amostra	11
2.3 Procedimentos de coleta de dados	11
2.4 Procedimentos de Análise de Dados	12
3 A PRODUÇÃO DE ETANOL DE MILHO NO BRASIL	13
3.1 O Brasil como um grande produtor de etanol de cana de açúcar	14
3.2 O Brasil como um novo produtor de etanol de milho	20
3.3 Balanço da Exportação e Importação do Etanol no Brasil	27
3.4 Possibilidade de Expansão da Produção de Etanol de Milho de Segunda Geração	31
4 ANÁLISE SWOT PARA O CENÁRIO ENERGÉTICO BRASILEIRO CONSIDERANDO A EXPANSÃO DA PRODUÇÃO DE ETANOL DE MILHO	37
5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	44
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

## 1 INTRODUÇÃO

O etanol tem desempenhado um papel central na matriz energética brasileira há praticamente um século, sendo registrado seu uso como combustível desde 1925, quando um automóvel movido a álcool etílico 70% participou de uma corrida no Rio de Janeiro (DIAS; JOSÉ, 2012). Contudo, seu uso como fonte alternativa de energia só foi institucionalmente promovido a partir da década de 1970, durante as crises mundiais provocadas pelo choque nos preços do petróleo. Com o aumento dos preços internacionais e a dependência brasileira da importação de combustíveis fósseis, tornou-se necessário buscar soluções internas e sustentáveis.

Foi nesse cenário que o governo federal lançou, em 1975, o Programa Nacional do Álcool (Proálcool), com o objetivo de incentivar a produção e o consumo de etanol derivado da cana-de-açúcar. O programa contou com incentivos fiscais, financiamentos e parcerias com a indústria automobilística para adaptar motores ao novo combustível. O sucesso do Proálcool consolidou a posição do Brasil como um dos maiores produtores mundiais de biocombustíveis, contribuindo para a renovabilidade do setor de transporte e estruturou uma cadeia produtiva sólida em torno do setor sucroenergético, especialmente no estado de São Paulo.

Nas décadas seguintes, apesar dos problemas que levaram à retirada de subsídios do Proálcool e às crises no abastecimento, a produção de etanol passou por avanços tecnológicos que culminaram, no início dos anos 2000, com a introdução dos veículos bicomcombustíveis (flex-fuel) a partir de iniciativas que surgiram nos EUA. Lançados comercialmente em 2003, esses automóveis permitiram aos consumidores brasileiros a escolha entre etanol e gasolina no momento do abastecimento, impulsionando novamente o consumo do biocombustível e a ampliação da produção agrícola de cana-de-açúcar, sobretudo na região Centro-Sul (MORAES; BACCHI, 2014).

Atualmente, os produtos da cana (caldo, mel, bagaço e palha) representam o maior percentual na oferta de energia interna do país com 16,7%, segundo BEN 2025, sendo que o etanol de cana-de-açúcar representa a principal fonte de biocombustível produzida no Brasil. Esse etanol, classificado como de primeira geração, utiliza diretamente os açúcares presentes na biomassa vegetal (neste caso, a sacarose da cana) para produção do álcool por meio da fermentação. A sua

consolidação contribuiu decisivamente para a diversificação da matriz energética brasileira, tornando-a uma das mais renováveis do mundo. Segundo o último Balanço Energético Nacional (BEN 2025), publicado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), em 2024 o Brasil atingiu 47,4% de participação de fontes renováveis em sua matriz energética total, muito acima da média mundial, que gira em torno de 14,5% (EPE, 2024).

Dentre as fontes renováveis, os produtos da cana-de-açúcar (etanol e bagaço, por exemplo) ocupam a segunda posição na matriz energética nacional, sendo a principal fonte primária renovável, com uma participação de 16,8% na oferta interna de energia (EPE, 2024). Além disso, de acordo com o mesmo relatório, aproximadamente 84% da produção de etanol no Brasil ainda é derivada da cana-de-açúcar, o que reafirma a liderança do país no setor sucroenergético e o papel central que o etanol ocupa no debate sobre a transição energética e a redução da emissão de gases do efeito estufa (GEE).

O estado de São Paulo destaca-se historicamente como o maior produtor nacional de etanol, concentrando 41,3% das unidades autorizadas pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Em 2020, o estado foi responsável por aproximadamente 14,7 milhões de metros cúbicos de etanol, o que corresponde a cerca de 45% de toda a produção nacional (ANP, 2021). Essa concentração se explica pela estrutura já consolidada de usinas, pela disponibilidade de mão de obra e pela tradição agrícola associada à cana-de-açúcar.

Apesar da predominância histórica da cana-de-açúcar, a partir da segunda década dos anos 2000, um novo modelo produtivo começou a ganhar força no país: a produção de etanol a partir do milho. Essa alternativa de matéria-prima para produção do biocombustível, também de primeira geração, segue o mesmo princípio tecnológico do etanol de cana, mas utilizando como biomassa o amido do milho, além de apresentar diferenças estratégicas em termos de localização geográfica e infraestrutura industrial.

A produção de etanol de milho é especialmente relevante na região Centro-Oeste do Brasil, onde a cultura do cereal é amplamente cultivada. Estados como Mato Grosso, Goiás e Mato Grosso do Sul concentram uma grande oferta de matéria-prima e sinergia com o setor de proteína animal (por meio da utilização dos

coprodutos, como o DDG - Grãos Secos de Destilaria, em inglês, *Distillers Dried Grains*, na alimentação de rebanhos).

De acordo com dados da União Nacional do Etanol de Milho (UNEM), o Brasil produziu 4,5 bilhões de litros de etanol de milho na safra 2022/2023, o que representou 15% da produção nacional de etanol. Na safra 2023/2024, o volume subiu para cerca de 6 bilhões de litros, e a projeção para 2024/2025 é de 8,19 bilhões de litros, ou aproximadamente 23% da produção total de etanol no país (UNEM, 2024). Das 18 usinas dedicadas à produção do biocombustível em operação até 2024, 16 estavam instaladas na região Centro-Oeste, evidenciando a importância estratégica da localidade para o crescimento desse segmento.

Esse crescimento vem sendo impulsionado por fatores como o aumento da produtividade do milho, os preços competitivos no mercado interno, a alta demanda por biocombustíveis e os avanços tecnológicos das usinas chamadas “flex”, que operam com cana durante a safra e com milho na entressafra. A produção de etanol a partir do milho, portanto, configura-se como alternativa complementar à de cana-de-açúcar, contribuindo para o aproveitamento da capacidade industrial ociosa e para a diversificação da matriz de biocombustíveis. Embora possa demandar ajustes no uso da terra em determinadas regiões, essa expansão tende a ocorrer a produção de alimentos, especialmente quando associada ao desenvolvimento de tecnologias de segunda geração (E2G), que aproveitam resíduos agrícolas como matéria-prima.

O etanol de milho, embora ainda represente uma parcela menor do total produzido no Brasil, apresenta tendência de crescimento acelerado, impulsionado pela ampliação da capacidade industrial, pela integração com usinas flex e pelo aumento da demanda por biocombustíveis de menor pegada de carbono. Estudos da EPE (2024) e da UNEM (2023) indicam que o setor reúne condições de competitividade econômica, especialmente nas regiões produtoras de grãos, além de vantagens ambientais associadas à redução de emissões de CO<sub>2</sub> certificadas por meio dos créditos de descarbonização (CBIOS) no âmbito do RenovaBio. A consolidação desse mercado poderá gerar ganhos expressivos para a economia regional, sobretudo no Centro-Oeste, estimulando o desenvolvimento industrial, a interiorização de investimentos e a criação de emprego e renda no interior do país.

Dessa forma, o presente trabalho propõe-se a analisar a expansão da produção de etanol de milho no Brasil, considerando os fatores históricos,

energéticos, econômicos e regionais que têm impulsionado esse crescimento. O estudo também visa compreender os desafios e as perspectivas desse segmento em um cenário de transição energética e busca por fontes alternativas sustentáveis.

## **1.1 Problemática e Justificativa**

O etanol produzido a partir da cana-de-açúcar consolidou-se historicamente como o principal biocombustível do Brasil, sendo responsável por uma parcela significativa da matriz energética nacional. No entanto, diante do aumento da demanda energética, da pressão internacional por fontes mais limpas e do compromisso brasileiro com metas de descarbonização, como as previstas para até 2035<sup>1</sup>, surge a necessidade de diversificar e modernizar a produção de biocombustíveis. Nesse contexto, o etanol de milho desponta como uma alternativa viável de curto e médio prazo. Ainda assim, sua expansão levanta questões relevantes: em que medida o etanol de milho pode complementar a matriz energética brasileira de forma sustentável? Quais os impactos econômicos, logísticos e ambientais da sua ampliação? O Brasil está preparado para integrar, de forma eficiente, esse modelo produtivo ao seu sistema energético nacional? A investigação dessas questões é importante para compreender o papel estratégico do milho na nova configuração energética do país.

Este estudo se justifica pela urgência em discutir e analisar soluções energéticas renováveis diante do atual cenário de transição energética global. A crescente preocupação com as mudanças climáticas e a necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa impulsionam o desenvolvimento e a adoção de alternativas aos combustíveis fósseis. O etanol de milho, embora ainda recente na realidade brasileira, vem apresentando expansão acelerada e potencial para contribuir significativamente com as metas de sustentabilidade do país. Sua integração à matriz energética pode representar não apenas uma resposta à demanda crescente por energia limpa, mas também uma estratégia de aproveitamento eficiente de recursos agrícolas já disponíveis, especialmente nas regiões produtoras do Centro-Oeste. Além disso, o debate sobre biocombustíveis de

---

<sup>1</sup> Previsto no âmbito da Contribuição Nacionalmente Determinada, apresentada pelo país ao Acordo de Paris. O Brasil se compromete a reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 50% até 2030, em relação aos níveis de 2005, e alcançar a neutralidade climática até 2050. O Plano Nacional de Energia e o Plano Clima preveem ações estruturantes para o setor energético que visam ampliar o uso de fontes renováveis e acelerar a transição energética até 2035, ano considerado estratégico para consolidação dessas políticas.

segunda geração e a modernização da cadeia produtiva reforça a relevância do tema, ao passo que o aprofundamento da análise sobre o etanol de milho pode orientar políticas públicas, investimentos e decisões estratégicas no campo da bioenergia. Assim, a presente pesquisa se propõe a investigar esse fenômeno com base em dados atualizados e em uma abordagem técnico-científica voltada para a sustentabilidade energética e econômica do país.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo geral**

*Compreender o cenário atual da produção de etanol de milho no Brasil e apresentar a perspectiva de crescimento do setor para os próximos 10 anos.*

### **1.2.2 Objetivos específicos**

Como objetivos específicos, pretende-se:

- a) Resgatar o histórico da produção de etanol no Brasil, destacando a trajetória do etanol de cana-de-açúcar desde o Proálcool até a consolidação dos veículos *flex-fuel*;
- b) Analisar a composição da matriz energética brasileira, com ênfase na participação dos biocombustíveis e no papel do etanol como fonte renovável de energia;
- c) Caracterizar o modelo de produção do etanol de milho, identificando suas particularidades tecnológicas, logísticas e agroindustriais em relação ao etanol de cana;
- d) Mapear as regiões brasileiras com maior destaque na produção de etanol de milho, com foco especial no Centro-Oeste, e descrever os fatores que favorecem essa concentração territorial;
- e) Apresentar os dados mais recentes de produção, consumo e capacidade instalada do etanol de milho no Brasil, utilizando fontes oficiais como UNEM, ANP e EPE;
- f) Investigar os fatores que impulsionam o crescimento do etanol de milho, como aumento da oferta de milho, avanços tecnológicos, incentivos econômicos e demandas ambientais;

- g) Apontar os principais desafios enfrentados pelo setor, incluindo aspectos regulatórios, logísticos, ambientais e de concorrência com outros usos do milho;
- h) Projetar cenários futuros para o setor, com base em dados de produção, projeções de mercado e políticas públicas relacionadas à transição energética e à descarbonização da matriz de transportes.

## 2 METODOLOGIA

A metodologia deste estudo foi desenvolvida com o propósito de coletar, organizar e interpretar informações que possibilitem uma visão abrangente sobre o cenário atual e as perspectivas futuras da produção de etanol de milho no Brasil. O foco está em compreender os fatores que impulsionam o crescimento desse biocombustível no contexto da matriz energética nacional e da transição para fontes renováveis.

O estudo foi estruturado a partir de uma abordagem qualitativa, descritiva e exploratória, com base em revisão bibliográfica de fontes acadêmicas e institucionais. Para complementar a análise, foi elaborada uma matriz *SWOT* (*Strengths* - Forças, *Weaknesses* - Fraquezas, *Opportunities* - Oportunidades e *Threats* - Ameaças), que permitiu sistematizar os principais pontos fortes, fragilidades, oportunidades e ameaças relacionadas à expansão do etanol de milho no país. Essa estratégia buscou garantir uma análise crítica e fundamentada, capaz de orientar reflexões sobre o papel desse biocombustível no desenvolvimento sustentável do setor energético brasileiro.

### 2.1 Tipo de pesquisa

Este trabalho caracteriza-se como uma pesquisa qualitativa, exploratória e descritiva. A abordagem qualitativa foi escolhida por possibilitar uma compreensão aprofundada do contexto social, econômico e energético relacionado à produção de etanol de milho no Brasil. Trata-se também de uma pesquisa exploratória, uma vez que busca investigar e sistematizar um fenômeno ainda recente e em crescimento no cenário nacional. A dimensão descritiva, por sua vez, permite a apresentação e interpretação de dados históricos, institucionais e científicos que compõem o panorama do setor.

A base metodológica do estudo é uma revisão bibliográfica, fundamentada em fontes secundárias como livros, artigos científicos, dissertações, teses, documentos institucionais, relatórios de órgãos públicos, publicações de organizações não governamentais e projeções de instituições especializadas, nacionais e



internacionais, com foco na produção e nas perspectivas do etanol de milho no Brasil.

## **2.2 Universo e amostra**

Por se tratar de um estudo de base bibliográfica, o universo da pesquisa corresponde à produção acadêmica e técnico-científica relacionada ao etanol de milho, à matriz energética brasileira e à transição para fontes renováveis de energia. A amostra compreende os materiais selecionados com base em sua relevância, atualidade e confiabilidade, publicados preferencialmente entre os anos de 2010 e 2024.

Foram priorizados documentos oriundos de instituições como a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o Ministério de Minas e Energia (MME), além de entidades como a União Nacional do Etanol de Milho (UNEM), entre outras. Também foram utilizadas bases de dados acadêmicas, como *Scielo*, *Google Scholar* e periódicos especializados na área de energia, agronegócio e meio ambiente.

## **2.3 Procedimentos de coleta de dados**

A coleta de dados foi realizada por meio de levantamento bibliográfico, com a seleção de materiais publicados em meios físicos e digitais. Os critérios utilizados para a escolha das fontes incluíram: atualidade das informações, credibilidade institucional ou científica, pertinência ao tema proposto e contribuição para a compreensão do objeto de estudo.

Foram considerados textos acadêmicos (livros, artigos e teses), relatórios governamentais, publicações técnicas de instituições do setor energético e agroindustrial, além de documentos produzidos por organizações voltadas à temática de sustentabilidade e energia renovável.

## 2.4 Procedimentos de Análise de Dados

Os dados coletados foram analisados por meio de leitura crítica, sistematização temática e categorização das informações relevantes. Após essa etapa, foi elaborada uma análise *SWOT* (*Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats*), também conhecida como FOFA (Forças, Oportunidades, Fraquezas e Ameaças), com o objetivo de identificar os principais fatores que favorecem ou limitam a produção e expansão do etanol de milho no Brasil.

A análise *SWOT* é uma ferramenta estratégica originalmente aplicada no ambiente empresarial, mas amplamente utilizada em estudos de mercado, políticas públicas e planejamento setorial, que permite examinar tanto os aspectos internos (forças e fraquezas) quanto os externos (oportunidades e ameaças) que impactam o desenvolvimento de determinado setor. Neste trabalho, a matriz *SWOT* foi construída com base nas informações extraídas da revisão bibliográfica, permitindo uma síntese analítica das condições atuais e das projeções futuras para o setor de etanol de milho no país.

### 3 A PRODUÇÃO DE ETANOL DE MILHO NO BRASIL

O setor energético mundial enfrenta desafios crescentes relacionados à sustentabilidade, segurança energética e redução de emissões de gases de efeito estufa. Nesse contexto, os biocombustíveis têm se destacado como alternativas promissoras aos combustíveis fósseis, especialmente no setor de transportes. O Brasil, com sua vasta experiência na produção de etanol a partir da cana-de-açúcar, consolidou-se como referência mundial nesse segmento, desenvolvendo ao longo de décadas uma cadeia produtiva robusta e tecnologicamente avançada (MILANEZ *et al.*, 2014).

Nos últimos 5 anos, entretanto, uma nova fronteira tem se aberto no horizonte da produção de biocombustíveis no país: o etanol de milho. Inicialmente desenvolvido como alternativa para otimizar a capacidade instalada das usinas durante a entressafra da cana-de-açúcar, o etanol de milho ganhou relevância própria, impulsionado pela expansão da produção do grão, especialmente na região Centro-Oeste brasileira (NEVES *et al.*, 2021).

Paralelamente ao desenvolvimento do etanol de milho de primeira geração, que utiliza o amido presente nos grãos como matéria-prima, avançam as pesquisas e implementações de tecnologias para a produção de etanol de segunda geração. Este último, também denominado etanol lignocelulósico, é produzido a partir da conversão da celulose e hemicelulose presentes na biomassa vegetal, como palha, sabugo e outras partes não aproveitadas do milho, em açúcares fermentescíveis (EMBRAPA, 2021).

Este capítulo tem como objetivo apresentar uma análise abrangente sobre a produção de etanol no Brasil, com ênfase no avanço do etanol de milho no cenário energético nacional. Inicialmente, será abordada a trajetória do país como tradicional produtor de etanol de cana-de-açúcar, destacando sua relevância histórica, econômica e ambiental. Em seguida, será explorado o papel emergente do milho como nova matéria-prima para a produção do biocombustível, evidenciando o crescimento recente do setor e os fatores que impulsionam essa mudança. Também será analisado o balanço das exportações e importações de etanol, contextualizando a inserção do Brasil no mercado internacional. Por fim, discute-se a possibilidade de expansão do etanol de milho de segunda geração, considerando os avanços

tecnológicos, os desafios e as oportunidades que tornam essa rota promissora para a consolidação de uma matriz energética mais limpa e sustentável.

### **3.1 O Brasil como um grande produtor de etanol de cana de açúcar**

O etanol, ou álcool etílico ( $C_2H_5OH$ ), é um biocombustível renovável produzido a partir da fermentação de açúcares presentes em biomassa vegetal. A classificação do etanol em gerações está relacionada ao tipo de matéria-prima e ao processo tecnológico utilizado para sua produção (PACHECO, 2011).

O etanol de primeira geração (E1G) é produzido a partir de matérias-primas que contêm açúcares diretamente fermentescíveis, como a sacarose da cana-de-açúcar, ou amido, como no caso do milho, que precisa ser convertido em açúcares simples antes da fermentação. No Brasil, a produção de E1G é tradicionalmente realizada a partir da cana-de-açúcar, enquanto nos Estados Unidos predomina o uso do milho (MILANEZ *et al.*, 2014).

Já o etanol de segunda geração (E2G), também conhecido como etanol lignocelulósico, é produzido a partir da biomassa lignocelulósica, composta principalmente por celulose, hemicelulose e lignina. Essas matérias-primas incluem resíduos agrícolas (palha, bagaço, sabugo), resíduos florestais, gramíneas e culturas energéticas não alimentares. A produção de E2G envolve processos mais complexos, que incluem pré-tratamento da biomassa, hidrólise (enzimática ou ácida) para liberação dos açúcares, fermentação e destilação (SANTOS *et al.*, 2012).

O Brasil possui uma longa trajetória na produção de biocombustíveis, especialmente o etanol. Conforme destacam Moraes e Bacchi (2014), as primeiras iniciativas para produção de etanol combustível no país datam da década de 1920, mas foi com a criação do Programa Nacional do Álcool (Proálcool) em 1975, em resposta à crise do petróleo, que a produção ganhou escala industrial e relevância na matriz energética nacional.

Na década de 1970, diante da crise do petróleo e da alta dos preços internacionais, o Brasil lançou o Programa Nacional do Álcool (Proálcool), instituído oficialmente em 1975. O programa visava promover o uso do etanol combustível como alternativa à gasolina, utilizando a cana-de-açúcar como matéria-prima principal. Com isso, o governo federal passou a conceder incentivos fiscais, subsídios e financiamentos para a construção de usinas e adaptação de veículos,

além de estimular parcerias com a indústria automobilística (MORAES; BACCHI, 2014). A adesão dos consumidores foi reforçada pela criação de veículos movidos exclusivamente a álcool, e o etanol consolidou-se como um componente importante da matriz de transportes no Brasil.

O ingresso do álcool como fonte energética para automóveis no Brasil se deu a partir do ano de 1925, motivado principalmente pela necessidade de amenizar as crises do setor açucareiro e reduzir a dependência da importação de petróleo (PORTAL ONSV, 2023). A partir do Governo Vargas, com a criação do Instituto do Açúcar e do Alcool (IAA), iniciou-se o controle estatal da produção e distribuição do álcool e do açúcar, fomentando políticas públicas voltadas ao fortalecimento do setor e à organização de sua cadeia produtiva.

Durante décadas, o setor sucroalcooleiro brasileiro desenvolveu tecnologias e processos que tornaram o etanol de cana-de-açúcar uma alternativa economicamente viável aos combustíveis fósseis. A introdução dos veículos *flex-fuel* em 2003 representou um marco importante para a consolidação do mercado interno de etanol, permitindo aos consumidores escolher entre etanol e gasolina no momento do abastecimento (GOLDEMBERG, 2008).

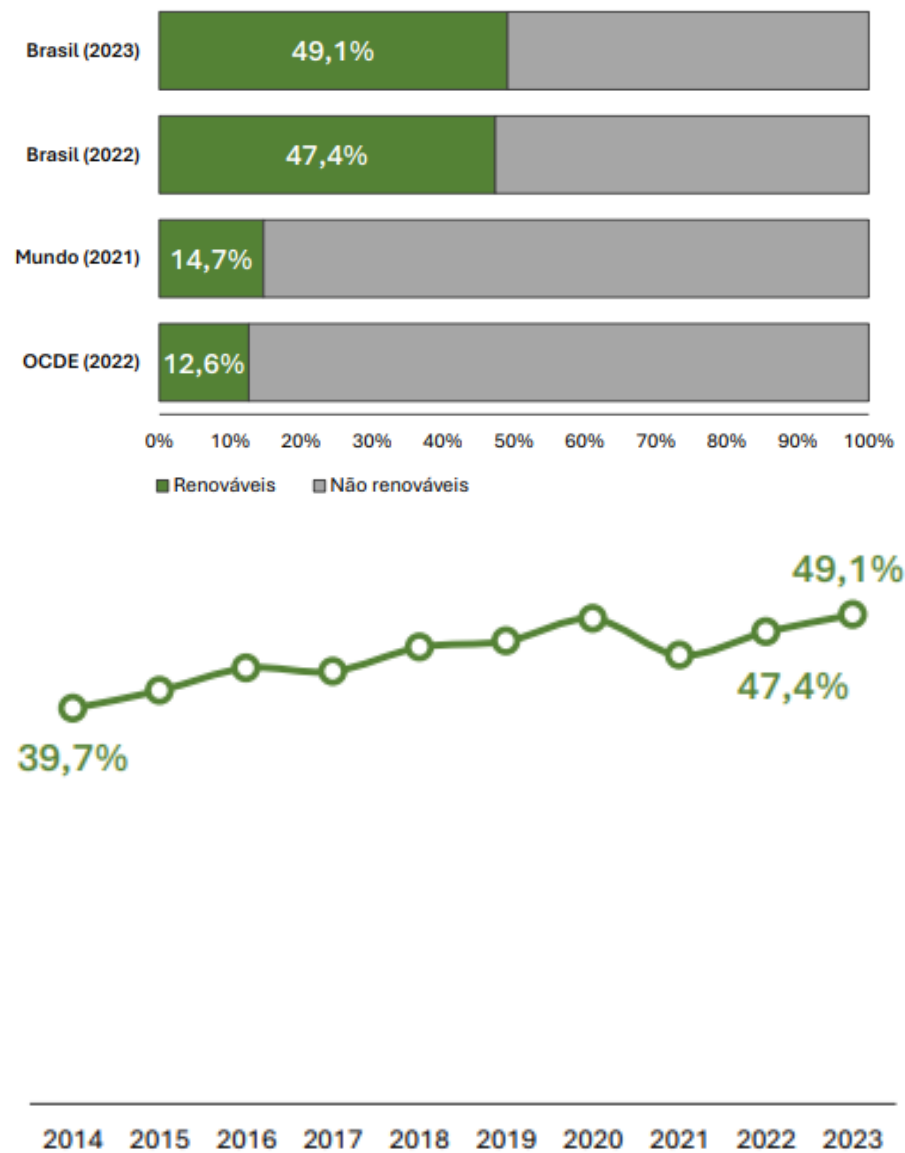
A introdução dos veículos *flex-fuel*, em 2003, marcou um novo ciclo de expansão para o setor sucroenergético. A tecnologia bicomcombustível permitiu ao consumidor optar entre etanol e gasolina no momento do abastecimento, o que impulsionou novamente a produção de cana-de-açúcar, especialmente na região Centro-Sul, e consolidou o etanol como uma das principais fontes renováveis utilizadas no país. Esse crescimento sustentado durou até 2008, quando a crise financeira internacional reduziu o ritmo de expansão da produção (MORAES; BACCHI, 2014).

Até o início dos anos 2010, a produção de etanol no Brasil era quase exclusivamente baseada na cana-de-açúcar. Entretanto, como apontam Silva *et al.* (2020), a busca por matérias-primas alternativas na entressafra da cana intensificou-se no país, visando otimizar o processo produtivo e reduzir os custos industriais.

O etanol de cana-de-açúcar é considerado uma das soluções mais sustentáveis do ponto de vista ambiental. De acordo com Amorim *et al.* (2011), sua utilização proporciona uma redução de até 89% nas emissões de gases de efeito estufa (GEE) em relação à gasolina ao longo de seu ciclo de vida. Por essa razão, o

Brasil é reconhecido internacionalmente como referência no uso de biocombustíveis, ocupando posição de destaque entre os países com maior percentual de fontes renováveis em sua matriz energética. Conforme o Balanço Energético Nacional (BEN), publicado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), em 2023 o Brasil atingiu 49% de participação de fontes renováveis na matriz energética, enquanto a média mundial foi de apenas 14,7% (EPE, 2024). Dentre essas fontes, a cana-de-açúcar figura como a principal fonte primária de energia renovável, com 16,9% de representatividade na Oferta Interna de Energia (OIE), como pode ser observado na Figura 1.

Figura 1: Participação das renováveis na OIE

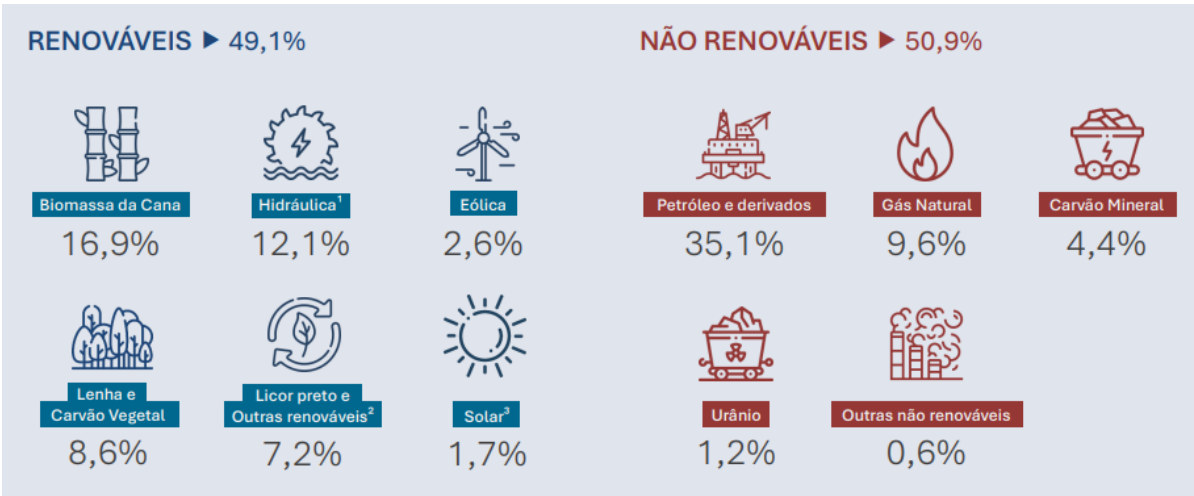


Fonte: EPE (2024)

A Figura 2 apresenta a repartição da Oferta Interna de Energia (OIE) por fontes renováveis no Brasil, com destaque para a biomassa da cana-de-açúcar, que aparece como a principal fonte renovável do país, representando 16,9% da matriz energética nacional em 2023, segundo o Relatório Síntese da EPE (2024). Esse dado reforça a relevância histórica e estratégica da cana no setor energético brasileiro, não apenas por sua utilização na produção de etanol combustível, mas também pelo aproveitamento dos resíduos agrícolas, como o bagaço, utilizados na geração de energia elétrica e térmica dentro das usinas, o que caracteriza o conceito de biomassa.

A biomassa da cana representa, portanto, um exemplo de fonte renovável de alta eficiência, por integrar a lógica da economia circular: o subproduto do processo de moagem se transforma em insumo energético, reduzindo desperdícios e contribuindo para a sustentabilidade do setor. Essa característica coloca o Brasil em posição de destaque mundial, já que poucos países possuem uma participação tão expressiva de uma única cultura agrícola na sua matriz energética. Além disso, o uso intensivo da biomassa da cana contribui diretamente para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE), sendo uma aliada fundamental nos compromissos climáticos assumidos pelo país, especialmente no contexto da transição para uma economia de baixo carbono (EPE, 2024).

Figura 2: Repartição da Oferta Interna de Energia (OIE) 2023

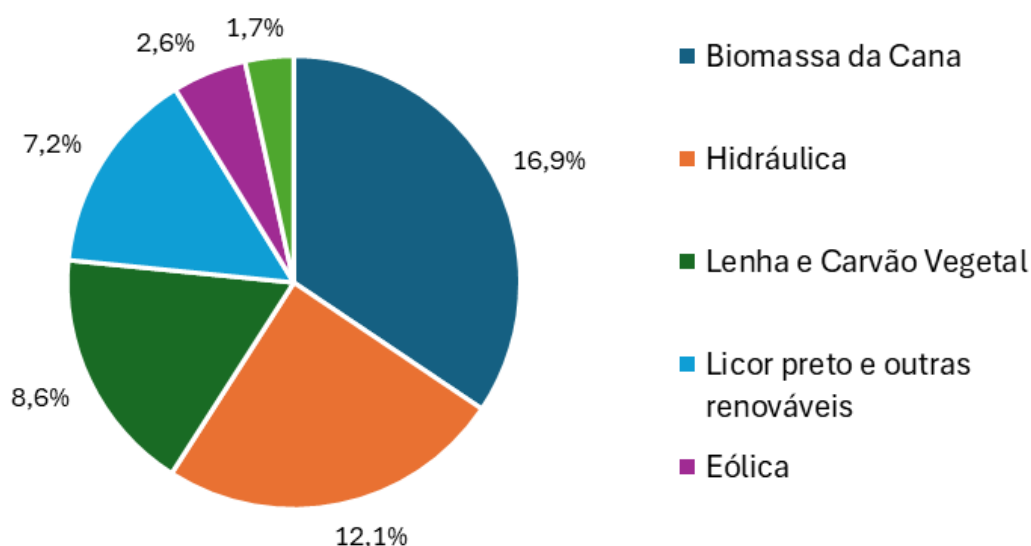


Fonte: Relatório Síntese 2024 – EPE

Além da contribuição à matriz energética, o etanol de cana possui papel central no setor de transportes. Em 2023, aproximadamente 45% do consumo de combustíveis dos veículos leves no Brasil foi atendido pelo etanol, seja na forma pura (etanol hidratado), seja misturado à gasolina (etanol anidro). Tal desempenho reafirma a importância desse biocombustível para a segurança energética nacional, redução da emissão de poluentes e diminuição da dependência de derivados do petróleo (EPE, 2024).

A biomassa da cana-de-açúcar ocupa a maior parcela entre as fontes renováveis da matriz energética brasileira, com 16,9% de participação na Oferta Interna de Energia (OIE) em 2023. Conforme demonstra a Figura 3, extraída do Relatório Síntese 2024 da EPE, a biomassa da cana supera fontes como a hidráulica (12,1%), lenha e carvão vegetal (8,6%), licor preto e outras renováveis (7,2%) e energia eólica (2,6%). Essa distribuição evidencia o papel central da cana-de-açúcar na matriz energética do país, tanto em volume quanto em diversificação de uso, considerando sua aplicação na produção de etanol, bioeletricidade e outros coprodutos.

Figura 3: Repartição da OIE



Fonte: Elaborado pelo autor com base em dados da EPE (2024).

O processo produtivo do etanol de cana-de-açúcar envolve diversas etapas: a moagem da cana, a extração do caldo, a fermentação alcoólica e a destilação. Além disso, o bagaço gerado durante a moagem é amplamente utilizado para



cogeração de energia elétrica, contribuindo para a autossuficiência das usinas e para o fornecimento de excedente energético ao sistema interligado nacional. Em usinas mais modernas, também se tem investido na produção de etanol de segunda geração (E2G), a partir do processamento de resíduos como palha e bagaço. Essa tecnologia tem grande potencial de ampliar a produção de etanol sem necessidade de expansão da área plantada.

O setor sucroenergético brasileiro é composto por grandes grupos empresariais que atuam na produção de açúcar, etanol e energia elétrica. Em 2025, destacam-se empresas como a Raízen, a maior produtora de etanol do Brasil, resultado da joint venture entre a Shell e a Cosan, com dezenas de unidades industriais no Centro-Sul e investimentos crescentes em etanol de segunda geração. Outras companhias de grande relevância são o Grupo São Martinho, a Copersucar, a Atvos e a Biosev, que atuam com elevado grau de verticalização e modernização tecnológica (UNICA, 2024).

A Raízen, por exemplo, opera unidades com capacidade instalada de moagem superior a 59 milhões de toneladas de cana por ano e planeja ampliar sua produção de etanol celulósico com base em tecnologia própria. Em parceria com o BNDES, a empresa recebeu em 2024 mais de R\$ 1 bilhão em investimentos para expansão de unidades de E2G, com a meta de alcançar a produção de 440 milhões de litros anuais até 2028 (BNDES, 2024).

Apesar de sua importância histórica e estratégica, o crescimento da produção de etanol de cana-de-açúcar no Brasil tem se mostrado modesto na última década. Entre 2013 e 2023, a produção passou de aproximadamente 23,7 bilhões de litros para cerca de 28 bilhões de litros, o que representa um crescimento acumulado de cerca de 18%, segundo dados do Ministério de Minas e Energia (MME, 2024). Fatores como oscilações nos preços internacionais, aumento nos custos de produção, impactos climáticos recorrentes e incertezas regulatórias contribuíram para esse cenário de crescimento limitado. A moagem da safra 2024/25 no Centro-Sul, por exemplo, registrou 621,9 milhões de toneladas de cana, o maior volume da série histórica, mas o crescimento da produção de etanol foi de apenas 4,06% em relação ao ciclo anterior, totalizando 34,96 bilhões de litros (UNICA, 2025).

Diante dessa relativa estagnação, o etanol de milho tem ganhado destaque no cenário energético brasileiro como uma alternativa complementar e estratégica à

cana-de-açúcar. A produção de etanol a partir do milho, iniciada comercialmente há pouco mais de uma década, vem crescendo a taxas aceleradas, especialmente na região Centro-Oeste, onde a oferta do cereal é abundante e a estrutura logística favorece a instalação de usinas dedicadas. Na safra 2024/2025, a produção de etanol de milho no Brasil alcançou 8,19 bilhões de litros, o que representa cerca de 23,4 % do etanol renovável produzido na região Centro-Sul. Em âmbito nacional, esse volume corresponde a aproximadamente 22 % da produção total de etanol no país<sup>2</sup> (UNICA; EPE, 2025). Essa participação representa um avanço expressivo frente aos anos anteriores e aponta para a consolidação do milho como matéria-prima relevante no contexto da bioenergia nacional.

Essa transição não significa a substituição do etanol de cana, mas sim uma diversificação da base produtiva, o que permite maior resiliência ao setor, melhor aproveitamento regional de recursos agrícolas e avanços no cumprimento das metas climáticas brasileiras. A coexistência dos dois modelos tende a fortalecer o papel do Brasil como potência em biocombustíveis e a ampliar as possibilidades de inovação e geração de valor no campo energético.

### **3.2 O Brasil como um novo produtor de etanol de milho**

A diversificação das matérias-primas para a produção de etanol foi destaque no ano de 2023, impulsionando o aumento da produção do combustível no país. A utilização do milho para a produção de etanol se intensificou nos últimos anos devido ao aumento da produção do grão que é utilizado na rotação das áreas de cultivo, sendo o plantio de segunda safra utilizado em predominância para a produção do biocombustível. No Centro-Oeste está concentrada a indústria alcooleira a partir do milho, com operação durante todo o ano, uma vez que esse grão pode ser armazenado. Em 2023, o milho teve uma participação de 16% na produção de etanol no Brasil (EPE, 2024).

De acordo com Neves *et al.* (2021), a produção de etanol de milho no Brasil teve início em 2012, com a inauguração de uma planta industrial pela USIMAT, na

---

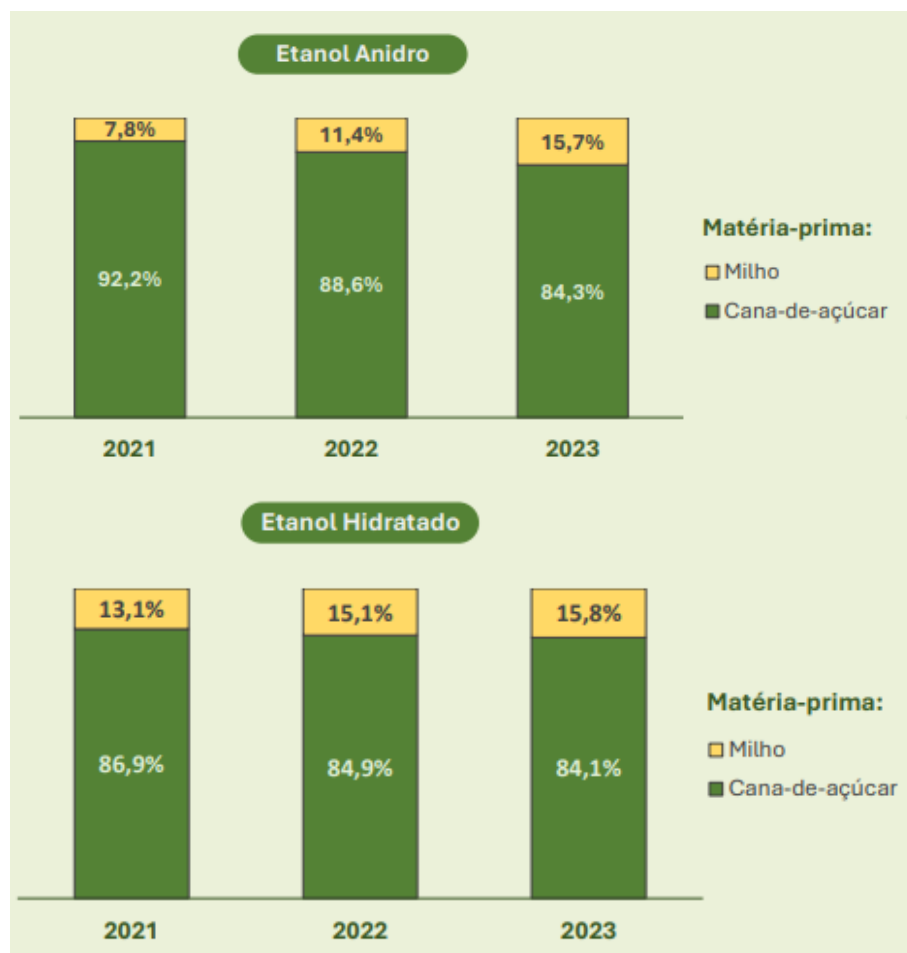
<sup>2</sup> Com base nos dados consolidados no Balanço Energético Nacional 2025 (ano base 2024), estima-se que o etanol de milho representou cerca de 20 % da produção total de etanol no Brasil em 2024, o que corresponde a aproximadamente 7,55 bilhões de litros. A projeção para 2025 aponta aumento para cerca de 22 %, considerando o volume estimado da safra 2024/25 (UNICA, 2025; EPE, 2025).

cidade de Campos de Júlio, estado de Mato Grosso. A unidade, que produzia etanol a partir de cana-de-açúcar desde 2006, inaugurou o modelo industrial do tipo flex, que possui estrutura para a produção de etanol usando cana e milho na mesma unidade industrial.

O sucesso desse modelo motivou novos investimentos e a instalação de outras unidades, inicialmente concentradas no estado de Mato Grosso e posteriormente expandindo-se para Goiás e São Paulo. Segundo dados da União Nacional do Etanol de Milho (UNEM, 2023), a produção de etanol de milho no Brasil cresceu de forma expressiva nos últimos anos, passando de aproximadamente 100 milhões de litros em 2012 para mais de 6 bilhões de litros em 2023.

A crescente participação do milho na produção de etanol no Brasil pode ser observada de forma clara ao se analisar a evolução percentual da matéria-prima utilizada na produção dos dois principais tipos de etanol: anidro e hidratado. Conforme demonstra a imagem a seguir, extraída do Relatório Síntese 2024 da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), entre os anos de 2021 e 2023, houve um aumento significativo da proporção do etanol produzido a partir do milho. No caso do etanol anidro, que é adicionado à gasolina, a participação do milho cresceu de 7,8% em 2021 para 15,7% em 2023. Já no etanol hidratado, usado diretamente como combustível nos veículos flex, o avanço foi de 13,1% para 15,8% no mesmo período. Esses dados revelam uma tendência de diversificação da base produtiva do biocombustível no país, reforçando a consolidação do milho como alternativa complementar à tradicional produção a partir da cana-de-açúcar, como pode ser observado na Figura 4.

Figura 4: Participação do milho na produção de etanol



Fonte: EPE (2024)

O etanol de milho começou a ganhar relevância no Brasil na última década, como resposta à necessidade de diversificação da matriz energética e à expansão limitada do etanol de cana. No início da produção comercial, em 2017, a empresa FS inaugurou a primeira unidade dedicada exclusivamente ao milho, em Lucas do Rio Verde (MT), e logo ampliou suas operações para Sorriso e Primavera do Leste, todas no estado do Mato Grosso. Essas três plantas somam capacidade para processar aproximadamente 4,9 milhões de toneladas de milho, produzindo anualmente cerca de 2,3 bilhões de litros de etanol, 80 mil toneladas de óleo de milho e 1,8 milhão de toneladas de farelo (DDGS - Grãos Secos de Destilaria com Solúveis, em inglês, Dried Distillers Grains with Solubles), além de gerar 650 GWh de energia elétrica a partir da biomassa do grão, o que demonstra o seu potencial de integração vertical e inovação tecnológica (FS, 2024; REVISTA OE, 2024).

A unidade da FS representa apenas parte do movimento nacional: entre 2018 e 2023, a produção de etanol de milho no Mato Grosso cresceu 483%, passando de 775 milhões para mais de 4,5 bilhões de litros anuais (IMEA, 2023). Esse crescimento expressivo motivou investimentos em infraestrutura, mão de obra especializada e tecnologia agrícola, transformando a região em polo estratégico para esse novo biocombustível (PLANT PROJECT, 2024).

Ainda assim, é a Inpasa quem lidera o setor. Em 2024, a empresa foi reconhecida com o prêmio MasterCana pela “Performance de Produção de Etanol”. Sua usina de Sinop (MT) é considerada a maior biorrefinaria de etanol de milho do mundo, com capacidade para processar 4,6 milhões de toneladas de milho e produzir 2,1 bilhões de litros de etanol por ano — após investimento de R\$ 4,1 bilhões que a tornou operacional em 2024 (FORBES, 2024; JORNALCANA, 2025).

A Inpasa responde por cerca de 48% de todo o etanol de milho produzido no país, totalizando 3,7 bilhões de litros em 2024, além de gerar 1,9 milhão de toneladas de DDGS e 195 mil toneladas de óleo vegetal (JORNALCANA, 2025; FE COMBUSTÍVEIS, 2025). Sua atuação vem sendo ampliada em outras regiões, em 2025, a empresa está investindo um total de R\$ 1,2 bilhão em uma nova planta na Bahia (usina em Luís Eduardo Magalhães) com capacidade para processar 1 milhão de toneladas de grãos ao ano, gerando até 460 milhões de litros de etanol, 230 mil toneladas de DDGS, 23 mil toneladas de óleo e 200 GWh de bioeletricidade (FORBES, 2024).

Esses investimentos refletem não apenas o aumento da produção mas também a modernização tecnológica. Em 2024 a produção de etanol de milho chegou a antingir o recorde nacional de 7,7 bilhões de litros no Brasil, com crescimento anual de 32,8% e representando cerca de 21% do total (UNICA, 2025; JORNALCANA, 2025).

A Inpasa adotou a tecnologia “multicereal”, integrando sorgo e milho em seu processamento, além de utilizar fontes renováveis na cogeração de energia, incluindo bioeletricidade e painéis solares com consumo estimado em 18 GWh por ano (JORNALCANA, 2025). A empresa afirma que, em 2024, evitou emissões equivalentes a 15 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>, confirmando o alcance de seus objetivos ambientais por meio do programa RenovaBio, que gerou 1,3 milhão de créditos de descarbonização (CBIOs) naquele ano (JORNALCANA, 2025).

No Mato Grosso, por exemplo, usinas de etanol de milho obtêm rendimentos médios de 447,7 l/t de milho processado, enquanto nos EUA esse índice varia entre 420 e 430 l/t, o que salienta a eficiência da tecnologia nacional e a modernização do parque fabril (PLANT PROJECT, 2024).

Diante desse crescimento e da consolidação do milho como uma alternativa para a produção de biocombustíveis no Brasil, torna-se fundamental analisar como esse movimento se insere no contexto mais amplo do planejamento energético nacional. A expansão do etanol de milho, acompanhada por investimentos em tecnologia, infraestrutura e sustentabilidade, exige projeções e diretrizes que orientem seu desenvolvimento em consonância com as metas energéticas e ambientais do país. É nesse cenário que o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) ganha relevância, pois oferece uma visão integrada e prospectiva sobre o papel dos biocombustíveis, incluindo o etanol de milho, na matriz energética brasileira nos próximos anos (EPE, 2023).

O mapa a seguir ilustra a distribuição das unidades industriais dedicadas à produção de etanol de milho no território brasileiro. Observa-se uma forte concentração no Centro-Oeste, especialmente nos estados de Mato Grosso, Goiás e Mato Grosso do Sul, que juntos respondem pela maior parte da produção nacional, devido à ampla disponibilidade de matéria-prima e infraestrutura logística voltada ao agronegócio. Nota-se, entretanto, uma tendência recente de expansão para outras regiões, como o Sudeste, o Nordeste e o Norte, impulsionada pela busca de diversificação produtiva, interiorização de investimentos e aproveitamento de novas fronteiras agrícolas. Essa configuração espacial reflete tanto o estágio atual de consolidação do setor quanto seu potencial de crescimento e descentralização nos próximos anos.

Figura 5: Distribuição geográfica das usinas de etanol de milho no Brasil



Fonte: UNEM (2023)

O Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) é um instrumento de planejamento elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), em parceria com o Ministério de Minas e Energia (MME), com o objetivo de orientar o desenvolvimento do setor energético brasileiro a médio e longo prazo. Publicado anualmente, o plano apresenta as projeções e diretrizes para a expansão da oferta e da demanda de energia no país ao longo de um horizonte de dez anos, considerando variáveis econômicas, ambientais, tecnológicas e regulatórias (EPE, 2023).

A elaboração do PDE é baseada em estudos técnicos e consultas públicas, sendo uma ferramenta estratégica que subsidia a formulação de políticas públicas, a tomada de decisão por agentes do setor e o direcionamento de investimentos públicos e privados. O documento aborda de forma integrada os diversos segmentos do setor energético, como eletricidade, petróleo, gás natural, biocombustíveis e energias renováveis, e apresenta cenários futuros, metas de expansão e avaliação dos impactos sociais e ambientais das projeções (EPE, 2023).

Além disso, o PDE contribui para o cumprimento das metas nacionais de descarbonização e segurança energética, ao incorporar diretrizes do Plano Nacional de Energia (PNE), do Plano Nacional de Energia Elétrica (PNEE) e das políticas climáticas assumidas pelo Brasil em acordos internacionais. No caso dos

biocombustíveis, como o etanol de milho, o PDE apresenta estimativas de crescimento, necessidades de infraestrutura e oportunidades de expansão dentro da matriz energética nacional até 2031 (EPE, 2023).

Os cenários projetados no Plano Decenal de Energia (PDE) da EPE, indicam continuidade do crescimento do etanol de milho, especialmente se forem mantidos os níveis de investimento observados. O PDE considera que, com incentivos regulatórios e ampliação de capacidade instalada, o setor poderá produzir entre 15 e 20 bilhões de litros até 2031, absorvendo até 25% da demanda nacional de etanol (EPE, 2023). Esse cenário está alinhado às metas de descarbonização brasileira e reforça o caráter complementar entre a cadeia cana-milho, promovendo segurança energética e sustentabilidade econômica.

O projeto da Inpasa para a Bahia, o avanço da FS e a crescente adoção de tecnologias como a separação de fibras (*fiber separation technology*) indicam o potencial transformador do etanol de milho no Brasil. Além disso, a expansão estimada para o Centro-Oeste e Norte demonstra que a produção de biocombustíveis está se descentralizando, gerando empregos e renda em regiões com menor presença do setor sucroalcooleiro tradicional.

No setor de transportes, o etanol de milho vem sendo gradualmente incorporado, sobretudo via mistura obrigatória com a gasolina (percentuais que podem subir de 10% para 25%) e em iniciativas de produção de gasolina de aviação sustentável (SAF - Combustível de Aviação Sustentável, do inglês, Sustainable Aviation Fuel). Em 2024, o Governo Federal discutiu a adoção do E30 (mistura de 30% de etanol na gasolina), o que poderia aumentar a demanda de etanol, especialmente pela complementaridade entre etanol de cana e de milho, reduzindo importações e atendendo exigências ambientais internacionais (FE COMBUSTÍVEIS, 2025).

Portanto, o Brasil emergiu nos últimos cinco anos como protagonista global na produção de etanol de milho, combinando capacidade industrial robusta, inovações tecnológicas, competitividade agrícola e apoio regulatório estruturado. A combinação dessas características reforça o papel do País como agente de transformação energética, em consonância com o PDE 2031, e aponta para uma transição energética sustentável e economicamente viável, através da coexistência



estratégica entre cana e milho como matrizes complementares na produção de biocombustíveis.

Paralelamente ao desenvolvimento do etanol de primeira geração, as pesquisas sobre etanol de segunda geração avançaram no Brasil a partir dos anos 2000. Conforme destacam Santos *et al.* (2012), as primeiras iniciativas comerciais de produção de E2G no país foram baseadas no bagaço e na palha da cana-de-açúcar, com a inauguração de plantas-piloto e, posteriormente, unidades comerciais, como a da Raízen em Piracicaba (SP) e a da GranBio em São Miguel dos Campos (AL).

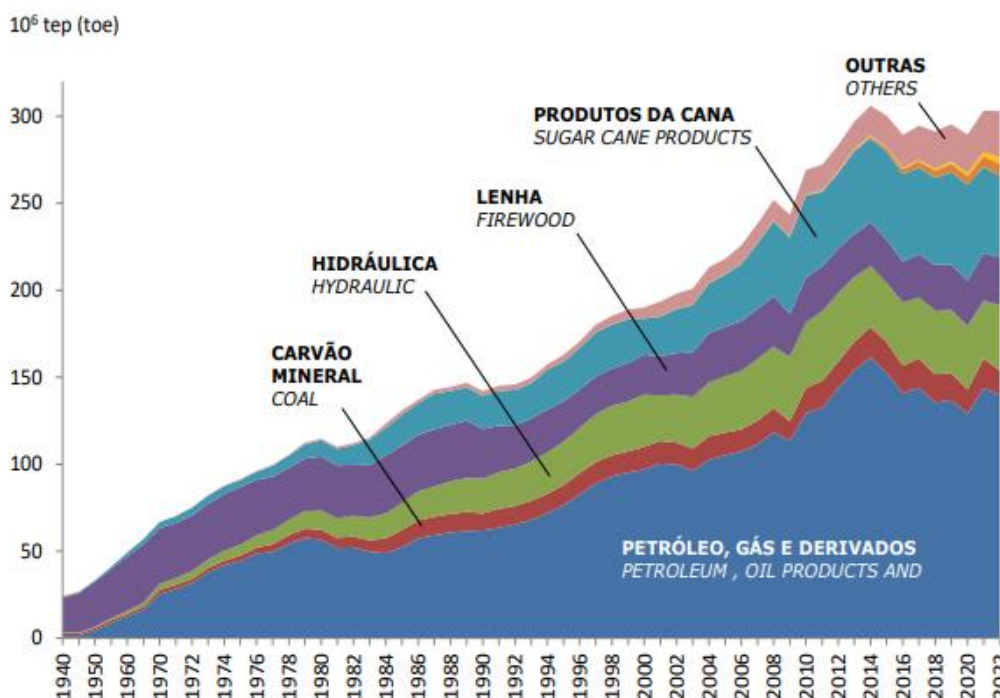
A produção de etanol de milho de segunda geração, embora ainda incipiente no Brasil, representa uma fronteira tecnológica com grande potencial de expansão, especialmente considerando o crescimento da produção de milho no país e a disponibilidade de resíduos agrícolas dessa cultura (EPE, 2023).

### **3.3 Balanço da Exportação e Importação do Etanol no Brasil**

Embora o Brasil possua uma matriz energética diversificada, com grande participação de fontes renováveis, como os produtos da cana-de-açúcar, o gráfico da Oferta Interna de Energia (OIE) revela que, mesmo com o crescimento expressivo dessas fontes nas últimas décadas, a dependência de petróleo, gás e derivados ainda é predominante.

Observa-se que, apesar do aumento da contribuição dos derivados da cana, especialmente após os anos 2000, a produção interna de energia renovável ainda não é suficiente para suprir toda a demanda nacional. Essa limitação de oferta frente ao consumo crescente exige estratégias complementares, como a importação de etanol para atender à demanda interna e garantir o abastecimento. Ao mesmo tempo, o Brasil mantém grandes volumes de exportação, evidenciando a complexidade do balanço energético do país e a necessidade de políticas que ampliem a autossuficiência na produção de biocombustíveis, conforme demonstra a Figura 5.

Figura 6: Oferta Interna de Energia (OIE)



Fonte: EPE (2024)

O Brasil é o segundo maior produtor mundial de etanol, destacando-se na comercialização internacional, especialmente de etanol de cana-de-açúcar. Paradoxalmente, o País também importa grandes volumes, especialmente de etanol de milho dos Estados Unidos, para suprir necessidades de consumo interno, sobretudo em regiões como Norte e Nordeste, onde a cana enfrenta desafios logísticos e climáticos. Essa dualidade exprime a robustez da cadeia produtiva nacional, mas também sua vulnerabilidade a fatores externos como entressafra e preços internacionais.

A suspensão da tarifa *antidumping* de US\$ 0,54 por galão pelo Congresso americano, que estava vigente desde os anos 1980, e o fim do crédito fiscal nos EUA, em 2011, marcaram o início de uma nova fase nas relações comerciais entre os dois maiores exportadores do mundo. A partir daí, observa-se uma crescente entrada de etanol de milho americano no Brasil, o que alterou de maneira impactante o saldo comercial, de exportador líquido até 2010, para importador líquido nos anos seguintes (EPE, 2024).

A Figura 6, extraída do Balanço Energético Nacional (BEN) 2023, elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), apresenta dados consolidados sobre

a produção, importação, exportação e consumo total de álcool etílico no Brasil entre os anos de 2013 e 2022. Todos os volumes são expressos em  $10^3 \text{ m}^3$ . Observa-se que as importações de álcool etílico apresentaram variações significativas ao longo do período. Após registrar um volume de aproximadamente 0,835 milhões de  $\text{m}^3$  em 2016, as importações de etanol atingiram seu pico em 2017, com cerca de 1,826 milhões de  $\text{m}^3$ , mantendo-se em patamares elevados nos anos seguintes: 1,775 milhões de  $\text{m}^3$  em 2018 e 1,437 milhões de  $\text{m}^3$  em 2019. Contudo, em 2021 e 2022, houve uma queda acentuada, com volumes de 0,432 milhões de  $\text{m}^3$  e 0,099 milhões de  $\text{m}^3$ , respectivamente, sendo este último o menor registrado no período analisado. respectivamente, sendo o volume de 2022 o menor do período analisado.

Por outro lado, as exportações brasileiras de álcool etílico iniciaram o período em um patamar de  $2.940 \times 10^3 \text{ m}^3$  em 2013. Após flutuações, as exportações registraram  $1.682 \times 10^3 \text{ m}^3$  em 2018, e subsequentemente aumentaram para  $2.026 \times 10^3 \text{ m}^3$  em 2020 e  $2.358 \times 10^3 \text{ m}^3$  em 2022. Este cenário evidencia uma dinâmica do comércio exterior de álcool etílico no Brasil com padrões de importação e exportação distintos ao longo da década analisada (EPE, 2023).

Figura 7: Evolução da produção, importação e exportação de etanol no Brasil (2013–2022)

FLUXO	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	FLOW
PRODUÇÃO	27.608	28.526	30.249	28.276	27.694	33.198	35.156	32.599	29.898	32.485	PRODUCTION
IMPORTAÇÃO	132	984	828	835	1.826	1.775	1.437	958	432	99	IMPORT
EXPORTAÇÃO	-2.940	-1.469	-2.121	-1.789	-1.380	-1.682	-1.933	-2.026	-1.868	-2.358	EXPORT
VARIAÇÃO DE ESTOQUES, PERDAS E AJUSTES	-629	-1.898	1.750	249	-581	-1.857	255	-470	1.502	204	STOCK VARIATIONS, LOSSES AND ADJUSTMENTS
CONSUMO TOTAL	24.171	26.142	30.705	27.572	27.559	31.434	34.915	31.061	29.964	30.430	TOTAL CONSUMPTION
CONSUMO FINAL	24.171	26.142	30.705	27.572	27.559	31.434	34.915	31.061	29.964	30.430	FINAL CONSUMPTION
CONSUMO FINAL NÃO-ENERGÉTICO	1.294	1.132	952	860	956	1.079	1.097	1.430	1.368	1.268	FINAL NON-ENERGY CONSUMPTION
CONSUMO FINAL ENERGÉTICO	22.877	25.010	29.754	26.711	26.603	30.355	33.817	29.630	28.595	29.161	FINAL ENERGY CONSUMPTION
AGROPECUÁRIO <sup>2</sup>	21	22	25	17	17	17	17	18	17	19	AGRICULTURE AND LIVESTOCK <sup>2</sup>
TRANSPORTES	22.856	24.988	29.729	26.694	26.586	30.338	33.800	29.613	28.578	29.142	TRANSPORTATION
RODOVIÁRIO	22.856	24.988	29.729	26.694	26.586	30.338	33.800	29.613	28.578	29.142	HIGHWAYS

<sup>1</sup> Inclui metanol/ methanol included.

<sup>2</sup> Utilizado como combustível em pequenas aeronaves agrícolas, para a atividade de fertilização./ <sup>1</sup> Used as fuel in small agricultural aircraft, for the activity of fertilization.

Fonte: EPE (2024)

O Brasil, mesmo mantendo volumes elevados de exportação, cerca de 2 bilhões de litros em 2023, passou a importar quantidades não desprezíveis, cerca de

180 milhões de litros, predominantemente etanol de milho, com destaque para o ciclo 2022/23 (EPE, 2024). O ingresso de etanol americano no mercado nacional foi acelerado principalmente pela competitividade de preço frente ao etanol canavieiro, especialmente em épocas de entressafra ou escassez hídrica.

Na análise de políticas comerciais, a discrepância tarifária se destaca: enquanto o Brasil aplica uma alíquota de cerca de 18% sobre o etanol importado dos EUA, os Estados Unidos mantêm apenas 2,5% sobre o etanol brasileiro (EPE, 2024; Pro Famer, setembro 2024). Além disso, durante o primeiro semestre de 2022, o governo brasileiro zerou temporariamente a tarifa de importação para conter a inflação dos combustíveis, medida revertida em fevereiro de 2023, quando a alíquota de 18% foi restabelecida (CAMEX, nov. 2020). Isso sugere que o preço interno dos combustíveis também impacta diretamente as decisões de importação.

Estudos acadêmicos como o de Devadoss e Kuffel (2010) mostram que o modelo de comércio de etanol entre Brasil e EUA foi amplamente pautado por políticas públicas protecionistas, com o uso de tarifas e subsídios ao longo das últimas décadas, evidenciando uma desigualdade sistêmica no acesso a mercados. Esse desnível pode influenciar tanto a estabilidade do mercado interno quanto a competitividade internacional do etanol brasileiro.

A coexistência de exportações e importações também aponta para importantes aspectos logísticos: o Brasil utiliza sua capacidade comercial externa para alavancar preços e receitas nos períodos de safra, direcionando volumes para mercados como os Países Baixos, Coreia do Sul e EUA (SP Global Ratings, 2022). Já as importações ocorrem principalmente por via marítima, aproveitando-se das margens menores do milho americano e dos menores custos de logística no mercado internacional.

O Plano Decenal de Energia (PDE) da EPE, de horizonte até 2031, reforça a necessidade de investimento em infraestrutura, como ampliação de terminais de etanol e modernização portuária, para reduzir dependência externa. O PDE identifica a importância de aumentar oferta interna de milho e expandir a produção nacional de etanol de milho, visando reduzir as importações e estimular cadeias produtivas locais.

O balanço exportador-importador de etanol revela, portanto, uma realidade dual: o Brasil consolida-se como potência na produção e exportação de etanol de

cana-de-açúcar, mas ainda depende de volumes importados de etanol de milho para atender demandas específicas. As relações comerciais são marcadas por políticas tarifárias assimétricas e dinâmicas logísticas sazonais. O caminho para ampliar a autossuficiência envolve investimentos em infraestrutura, harmonização de tarifas com patamares internacionais e estímulo à produção de milho e etanol doméstico, conforme preconiza o PDE 2031.

### **3.4 Possibilidade de Expansão da Produção de Etanol de Milho de Segunda Geração**

A possibilidade de expansão da produção de etanol de milho de segunda geração representa uma oportunidade estratégica para o Brasil ampliar sua produção de biocombustíveis sem necessariamente aumentar a área plantada, maximizando o aproveitamento da biomassa já disponível e contribuindo para a descarbonização da matriz energética nacional. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2023), a produção de etanol de segunda geração poderá atingir 1 bilhão de litros até 2033 no cenário de crescimento médio, evidenciando o potencial desse segmento.

Segundo Neves *et al.* (2021), o processo de produção de etanol de milho de primeira geração envolve basicamente as etapas de moagem do grão, liquefação do amido, sacarificação (conversão do amido em açúcares fermentescíveis), fermentação, destilação e desidratação. Esse processo resulta não apenas em etanol, mas também em subprodutos de alto valor agregado, como os grãos secos de destilaria com solúveis (DDGS) e óleo de milho.

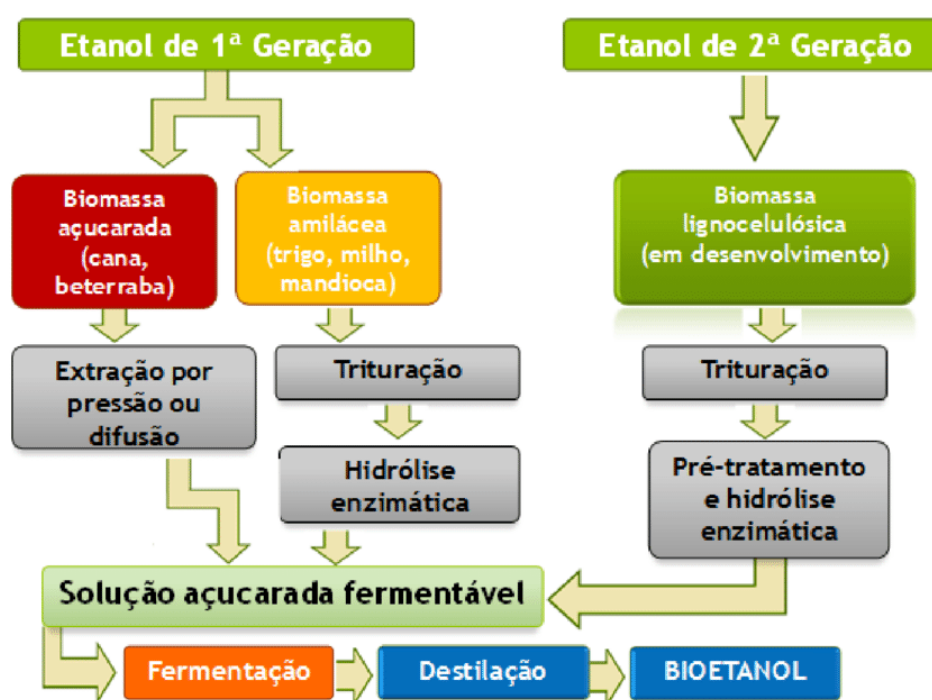
Já o etanol de segunda geração (E2G), também conhecido como etanol lignocelulósico, é produzido a partir da biomassa lignocelulósica, composta principalmente por celulose, hemicelulose e lignina. Essas matérias-primas incluem resíduos agrícolas (palha, bagaço, sabugo), resíduos florestais, gramíneas e culturas energéticas não alimentares. A produção de E2G envolve processos mais complexos, que incluem pré-tratamento da biomassa, hidrólise (enzimática ou ácida) para liberação dos açúcares, fermentação e destilação (SANTOS *et al.*, 2012).

O fluxograma apresentado na figura 7 ilustra, de forma didática, as principais etapas envolvidas nesse processo, desde o recebimento da biomassa até a

obtenção final do bioetanol por meio de técnicas de pré-tratamento, hidrólise, fermentação e destilação.

Os resíduos do milho provenientes da produção do etanol convencional, como sabugo, a palha, entre outros, passam por um tratamento que quebra suas moléculas e libera açúcares que são transformados em etanol. Esse processo envolve a ação de enzimas que convertem esses açúcares em combustível. Por conta disso, o processo produtivo do E2G é mais complexo em comparação ao E1G, como pode ser observado na Figura 7.

Figura 8: Fluxograma das rotas para obtenção de bioetanol de primeira e segunda geração



Fonte: CORDEIRO, 2016.

De acordo com a Embrapa (2021), a principal vantagem do etanol de segunda geração é a possibilidade de aumentar a produção de biocombustíveis sem necessariamente expandir a área cultivada, aproveitando resíduos que, de outra forma, teriam baixo valor econômico. No caso específico do milho, o E2G pode ser produzido a partir do sabugo, da palha e de outros resíduos da cultura, complementando a produção de etanol a partir do grão.

Em termos de balanço energético, estudos comparativos entre o etanol de primeira e segunda geração apresentam resultados variáveis, dependendo das tecnologias e matérias-primas consideradas. Segundo a EPE (2023), o etanol de

milho de segunda geração pode apresentar um balanço energético mais favorável do que o de primeira geração, especialmente quando integrado a sistemas de biorrefinaria que aproveitam múltiplos produtos e subprodutos.

Quanto às emissões de gases de efeito estufa, o etanol de segunda geração tende a apresentar melhor desempenho, com reduções mais expressivas em comparação aos combustíveis fósseis. De acordo com Neves *et al.* (2021), enquanto o etanol de milho de primeira geração pode reduzir as emissões em aproximadamente 30-40% em relação à gasolina, o etanol de segunda geração pode alcançar reduções superiores a 80%, dependendo da matéria-prima e do processo produtivo.

A integração do etanol de milho de segunda geração com outras fontes renováveis de energia representa uma tendência importante para o futuro, alinhada com os conceitos de bioeconomia circular e sistemas energéticos integrados. Segundo a EPE (2023), essa integração pode ocorrer em diferentes níveis, desde a complementaridade entre diferentes biocombustíveis até a sinergia com fontes renováveis não biológicas, como solar e eólica.

No contexto dos biocombustíveis, a integração entre etanol de cana-de-açúcar, etanol de milho (primeira e segunda geração) e biodiesel pode criar um sistema mais resiliente e adaptado às diferentes condições regionais e sazonais do Brasil. Conforme destacam Silva *et al.* (2020), enquanto o etanol de cana-de-açúcar tem produção concentrada nas regiões Sudeste e Centro-Sul e apresenta sazonalidade marcada pela safra da cana, o etanol de milho pode ser produzido em diferentes regiões e períodos, complementando a oferta nacional de biocombustíveis.

Em um contexto mais amplo, a integração do etanol com outras fontes renováveis, como solar e eólica, pode criar sinergias importantes. Segundo a Embrapa (2021), o etanol pode desempenhar um papel complementar a essas fontes intermitentes, atuando como forma de armazenamento de energia (através de células a combustível ou geração termelétrica) ou como combustível para transporte em períodos e regiões onde a eletrificação não é viável. O conceito de biorrefinaria integrada representa uma evolução dessa tendência, combinando a produção de biocombustíveis, produtos químicos, materiais e energia a partir de diferentes matérias-primas e processos.

De acordo com Santos *et al.* (2012), as biorrefinarias do futuro poderão processar múltiplas biomassas (cana-de-açúcar, milho, resíduos agrícolas e florestais) e utilizar diferentes rotas tecnológicas (bioquímicas, termoquímicas, híbridas) de forma integrada e flexível, maximizando o aproveitamento de recursos e a geração de valor.

Por outro lado, a produção de etanol de segunda geração enfrenta desafios tecnológicos e econômicos consideráveis. Conforme destacam Milanez *et al.* (2014), os processos de pré-tratamento e hidrólise da biomassa lignocelulósica são mais complexos e custosos do que a conversão do amido em açúcares fermentescíveis. A recalcitrância da lignina, que dificulta o acesso às frações de celulose e hemicelulose, representa um dos principais obstáculos técnicos a serem superados.

O desenvolvimento tecnológico é um fator determinante para o futuro da produção de etanol de milho de segunda geração. Diversas tendências tecnológicas emergentes têm potencial para superar os desafios atuais e melhorar a viabilidade técnica e econômica desse biocombustível. Segundo Santos *et al.* (2012), uma das tendências mais promissoras é o desenvolvimento de enzimas mais eficientes e de menor custo para a hidrólise da biomassa lignocelulósica. Avanços em engenharia genética, biologia sintética e bioinformática têm permitido o *design* racional de enzimas com maior atividade, estabilidade e especificidade, reduzindo a quantidade necessária e, consequentemente, o custo do processo.

De acordo com a Embrapa (2021), outra tendência importante é o desenvolvimento de microrganismos geneticamente modificados capazes de fermentar eficientemente tanto hexoses quanto pentoses, e resistentes a inibidores presentes no hidrolisado lignocelulósico. Leveduras e bactérias que tiveram seu material genético modificado artificialmente por meio da engenharia genética, com essas características podem aumentar muito o rendimento de etanol e a robustez do processo fermentativo.

No campo dos processos de pré-tratamento, novas tecnologias têm sido desenvolvidas para aumentar a eficiência e reduzir os impactos ambientais. Conforme destacam Milanez *et al.* (2014), métodos como o pré-tratamento com líquidos iônicos, o uso de solventes eutéticos profundos (*DES - Deep Eutectic Solvents*) e processos assistidos por micro-ondas ou ultrassom têm mostrado resultados promissores em escala laboratorial e piloto.



A integração de processos e o conceito de biorrefinaria também representam tendências importantes para o futuro do etanol de milho de segunda geração. Segundo a EPE (2023), a produção integrada de biocombustíveis, produtos químicos, materiais e energia a partir da biomassa pode melhorar a viabilidade econômica e ambiental do processo. Nesse contexto, o aproveitamento da lignina para produção de materiais avançados e produtos químicos de alto valor agregado tem recebido atenção crescente.

Avanços em tecnologias de automação, monitoramento e controle, impulsionados pela Indústria 4.0 e pela Internet das Coisas (IoT), também têm potencial para melhorar a eficiência e reduzir os custos operacionais da produção de etanol de segunda geração. De acordo com Neves *et al.* (2021), a implementação de sistemas de controle avançado, análise de *big data* e inteligência artificial pode otimizar parâmetros operacionais, prever e prevenir falhas, e melhorar a qualidade do produto final.

A expansão futura da produção de etanol de milho de segunda geração no Brasil dependerá de diversos fatores, incluindo avanços tecnológicos, políticas públicas, dinâmicas de mercado e disponibilidade de matéria-prima. Com base nesses fatores, é possível delinear diferentes cenários de expansão para as próximas décadas. Segundo a EPE (2023), no cenário de crescimento baixo, caracterizado por avanços tecnológicos limitados, políticas públicas inconsistentes e baixos preços de combustíveis fósseis, a produção de etanol de milho de segunda geração no Brasil permaneceria em níveis modestos, atingindo aproximadamente 50-100 milhões de litros até 2033. Nesse cenário, a tecnologia seria implementada principalmente em projetos piloto e de demonstração, sem alcançar escala comercial.

No cenário de crescimento médio (referência), com avanços tecnológicos moderados, políticas públicas estáveis e preços de combustíveis fósseis em níveis intermediários, a produção poderia atingir 200-300 milhões de litros até 2033. Nesse cenário, a tecnologia seria implementada comercialmente em algumas usinas, principalmente no modelo "*bolt-on*" integrado à produção de etanol de primeira geração.

Já no cenário de crescimento alto, caracterizado por grandes avanços tecnológicos, políticas públicas robustas de incentivo e altos preços de combustíveis fósseis, a produção poderia alcançar 500-750 milhões de litros até 2033. Nesse

cenário, a tecnologia seria amplamente adotada, tanto no modelo "*bolt-on*" quanto em plantas dedicadas, especialmente nas regiões produtoras de milho.

Neves *et al.* (2021) apresentam uma visão mais otimista para horizontes mais longos, sugerindo que a produção de etanol de milho no Brasil (considerando primeira e segunda geração) poderia atingir 20-25 bilhões de litros até 2040, representando aproximadamente 35-40% da produção total de etanol no país. Desse total, estima-se que 15-20% poderiam ser provenientes de tecnologias de segunda geração, o que representaria 3-5 bilhões de litros. É importante ressaltar que esses cenários estão sujeitos a incertezas e dependem de diversos fatores, como o desenvolvimento e a difusão de tecnologias, a implementação de políticas de incentivo, a evolução dos preços de combustíveis e a disponibilidade de matéria-prima.

No longo prazo, o etanol de milho de segunda geração pode fazer parte de um sistema energético mais integrado e sustentável, em linha com as tendências globais de transição energética. De acordo com a Embrapa (2021), esse biocombustível pode ser utilizado não apenas como combustível para transporte, mas também como matériaprima para a indústria química (etanol verde), fonte de hidrogênio renovável e componente de sistemas de armazenamento de energia.

## **4 ANÁLISE SWOT PARA O CENÁRIO ENERGÉTICO BRASILEIRO CONSIDERANDO A EXPANSÃO DA PRODUÇÃO DE ETANOL DE MILHO**

No presente capítulo, será aplicada uma Análise *SWOT* (sigla em inglês para *Strengths, Weaknesses, Opportunities e Threats*, ou Forças, Fraquezas, Oportunidades e Ameaças, em português) ao cenário energético brasileiro, com ênfase na expansão da produção de etanol de milho. A Análise *SWOT* é uma ferramenta estratégica utilizada no planejamento e na avaliação de cenários, tanto no contexto empresarial quanto em estudos de políticas públicas, que permite sistematizar os elementos internos, como capacidades produtivas e limitações estruturais, bem como os fatores externos, como tendências de mercado e pressões regulatórias. (HOFRICHTER, 2017).

A literatura especializada já aponta para a eficácia dessa abordagem em contextos energéticos renováveis. Por exemplo, um estudo publicado na Revista Competitividade e Sustentabilidade analisou a biomassa como fonte de energia no Brasil a partir de uma matriz *SWOT*, identificando que o país apresenta mais pontos fortes do que fracos, mas que ainda há necessidade de reorganização para alavancar o potencial da biomassa na matriz energética (SOUSA *et al.*, 2018). Outro estudo comparativo entre projetos de etanol de milho e de cana utilizou a mesma metodologia para evidenciar diferenças entre as oportunidades e desafios de cada modelo produtivo, considerando fatores internos de operação e externos de mercado e regulação (MARCHETTI, 2023).

Neste capítulo, a Análise *SWOT* será conduzida com base na literatura acadêmica, relatórios oficiais (como os da EPE, UNICA e Embrapa) e dados setoriais recentes. Serão identificadas as principais forças internas (como a disponibilidade de milho, infraestrutura logística, tecnologias já consolidadas e capacidade industrial em expansão); as fraquezas (como os altos investimentos iniciais, custos operacionais e limitações regulatórias); bem como as oportunidades (incluindo demanda crescente por biocombustíveis, metas de descarbonização e mercados externos) e as ameaças (como variações de preço do milho, incertezas políticas, e concorrência externa). Ao cruzar esses elementos, será possível delinear estratégias que maximizem pontos fortes e oportunidades, ao mesmo tempo em que minimizam fragilidades e enfrentam ameaças, contribuindo para o planejamento energético nacional no horizonte de médio e longo prazo.

Quadro 1: Análise SWOT – Expansão da Produção de Etanol de Milho no Brasil

Análise interna	Forças (Strengths)	Fraquezas (Weaknesses)
	- Grande disponibilidade de milho no Brasil, especialmente no Centro-Oeste (IMEA, 2023).	- Elevado custo de investimento inicial em plantas industriais dedicadas ao etanol de milho (FS, 2024).
	- Capacidade de armazenamento do milho, permitindo produção contínua ao longo do ano (UNEM, 2023).	- Baixa diversificação regional: concentração das usinas em poucos estados (EPE, 2024).
	- Alta produtividade industrial: rendimento superior ao dos EUA (PLANT PROJECT, 2024).	- Dependência de políticas públicas e incentivos fiscais como o RenovaBio para garantir competitividade (JORNALCANA, 2025).
	- Produção integrada: geração de DDGS, óleo de milho e bioeletricidade, agregando valor ao processo (FORBES, 2024).	- Logística ainda limitada para distribuição em regiões mais afastadas (JORNALCANA, 2025).
	- Redução expressiva de emissões de CO <sub>2</sub> com comprovação via CBIOs (JORNALCANA, 2025).	- Necessidade de mão de obra especializada e qualificada para operar tecnologias avançadas (FS, 2024).
Análise externa	Oportunidades (Opportunities)	Ameaças (Threats)
	- Crescente demanda nacional e internacional por biocombustíveis de menor pegada de carbono (EPE, 2024).	- Concorrência com o etanol de cana e outros combustíveis, inclusive com o milho importado dos EUA (UNICA, 2025).
	- Expansão de programas ambientais como o RenovaBio e metas de descarbonização até 2035 (MME, 2023).	- Volatilidade dos preços do milho no mercado internacional (FE COMBUSTÍVEIS, 2025).
	- Potencial de interiorização das usinas em novas regiões produtoras, como Norte e Nordeste (FORBES, 2024).	- Instabilidade político-econômica que pode afetar investimentos e regulamentações do setor (EPE, 2023).
	- Avanços na tecnologia de segunda geração (E2G), permitindo maior aproveitamento da biomassa (CAMILI, 2010).	- Percepção ambiental negativa em casos de uso extensivo de recursos hídricos ou impactos ao uso da terra (PLANT PROJECT, 2024).

Fonte: Elaborado pela autora.

Como forças é importante observar que no contexto brasileiro, a produção de etanol de milho apresenta um conjunto de vantagens competitivas que consolidam seu potencial de crescimento no setor energético. A ampla disponibilidade de milho, especialmente no Centro-Oeste, região responsável por grande parte da produção nacional (IMEA, 2023), garante a oferta contínua de matéria-prima e reduz a vulnerabilidade do setor a oscilações sazonais. Esse fator é potencializado pela elevada capacidade de armazenamento do grão, que possibilita a operação das plantas industriais durante todo o ano, diferentemente da cana-de-açúcar, cuja safra é limitada a determinados meses (UNEM, 2023).

Além disso, o rendimento industrial brasileiro supera referências internacionais, como o obtido nos Estados Unidos, alcançando índices médios de 447,7 litros por tonelada de milho processado, contra 420 a 430 litros por tonelada nos EUA (PLANT PROJECT, 2024). Outro diferencial é a integração produtiva nas usinas, que aproveitam ao máximo o potencial do grão, gerando coprodutos como DDGS, óleo de milho e bioeletricidade, agregando valor e diversificando as fontes de receita (FORBES, 2024). Por fim, destaca-se o impacto ambiental positivo, com redução expressiva das emissões de CO<sub>2</sub> comprovada por meio da emissão de créditos de descarbonização (CBIOs), alinhando o setor às metas do programa RenovaBio e fortalecendo sua imagem como alternativa energética sustentável (JORNALCANA, 2025).

Apesar do forte potencial de expansão, a cadeia produtiva do etanol de milho no Brasil enfrenta desafios estruturais que podem limitar seu crescimento no curto e médio prazos. Um dos principais entraves é o elevado custo de investimento inicial necessário para implantação de plantas industriais dedicadas, que demandam tecnologias de processamento avançadas e grande escala de produção para garantir viabilidade econômica (FS, 2024).

Outro ponto crítico é a baixa diversificação geográfica, já que a maior parte das usinas encontra-se concentrada em poucos estados, principalmente no Centro-Oeste, o que restringe o alcance logístico e limita a capacidade de atendimento a mercados mais distantes (EPE, 2024). A competitividade do setor também é fortemente dependente de políticas públicas e incentivos fiscais, como os mecanismos do RenovaBio, que, embora eficazes, podem sofrer alterações em função de mudanças no cenário político e regulatório (JORNALCANA, 2025).

Além disso, a infraestrutura logística para escoamento e distribuição do produto ainda apresenta gargalos, especialmente em regiões mais afastadas dos grandes centros consumidores, encarecendo o transporte e reduzindo margens (JORNALCANA, 2025). Por fim, a operação de plantas de etanol de milho requer mão de obra altamente qualificada para lidar com processos industriais e sistemas tecnológicos complexos, o que pode representar um desafio para regiões com menor disponibilidade de profissionais especializados (FS, 2024).

O cenário atual oferece oportunidades para o fortalecimento e expansão da produção de etanol de milho no Brasil. A crescente demanda nacional e internacional por biocombustíveis com menor pegada de carbono, impulsionada por políticas ambientais e compromissos climáticos, amplia o espaço de mercado e favorece a inserção competitiva do produto brasileiro (EPE, 2024).

Nesse contexto, a continuidade e a ampliação de programas como o RenovaBio, aliados às metas de descarbonização estabelecidas pelo governo para 2035, representam um estímulo direto à expansão da capacidade produtiva e à atração de novos investimentos (MME, 2023). Há também potencial para a interiorização das usinas, especialmente em regiões produtoras emergentes no Norte e Nordeste, que podem se beneficiar tanto da disponibilidade de grãos quanto da geração de empregos e do desenvolvimento de cadeias logísticas locais (FORBES, 2024).

Além disso, os avanços tecnológicos no campo do etanol de segunda geração (E2G) abrem espaço para o aumento da eficiência produtiva, permitindo o aproveitamento integral da biomassa e agregando maior valor à cadeia, reforçando a sustentabilidade ambiental e econômica do setor (CAMILI, 2010).

Apesar das perspectivas promissoras, a produção de etanol de milho no Brasil enfrenta algumas ameaças que podem comprometer sua competitividade e sustentabilidade a longo prazo. A concorrência direta com o etanol de cana-de-açúcar e outros combustíveis, incluindo a possibilidade de importação de etanol de milho dos Estados Unidos a preços competitivos, impõe pressões sobre margens e participação de mercado (UNICA, 2025). A volatilidade dos preços do milho no mercado internacional também representa um desafio, pois oscilações podem impactar a previsibilidade de custos e o planejamento de produção (FE COMBUSTÍVEIS, 2025). Soma-se a isso a instabilidade político-econômica do país,

que pode afetar o fluxo de investimentos e gerar mudanças abruptas nas regulamentações e nos incentivos fiscais voltados ao setor (EPE, 2023).

Além disso, existe o risco de percepção ambiental negativa em contextos de uso intensivo de recursos hídricos ou quando houver impactos relevantes sobre o uso da terra, o que pode gerar resistência social e barreiras comerciais, especialmente em mercados com exigências ambientais mais rigorosas (PLANT PROJECT, 2024).

As análises desenvolvidas ao longo deste trabalho possibilitaram uma compreensão mais ampla sobre a expansão da produção de etanol de milho no Brasil, suas implicações econômicas, sociais e ambientais, bem como os desafios e oportunidades associados a esse setor em crescimento. Nesta seção, apresentam-se as conclusões e considerações finais do estudo, buscando sintetizar os principais resultados obtidos, destacar as contribuições para a literatura e apontar limitações e recomendações para futuras pesquisas.

Quadro 2: Quadro de Cruzamento da Análise SWOT – Etanol de Milho no Brasil

Dimensão	Relação Estratégica	Descrição
<b>SO</b> (Forças + Oportunidades)	<b>Aproveitar a abundância de milho e a alta eficiência industrial para atender à crescente demanda nacional e internacional por biocombustíveis de baixo carbono.</b>	A disponibilidade contínua de milho e a capacidade de agregar valor com coprodutos fortalecem a competitividade frente às metas ambientais globais e ao RenovaBio.
	<b>Explorar a integração da produção de etanol com tecnologias de segunda geração (E2G).</b>	A alta produtividade e o uso de resíduos podem ampliar ainda mais o potencial sustentável e abrir novos mercados.
<b>WO</b> (Fraquezas + Oportunidades)	<b>Reduzir a concentração regional e expandir a produção para Norte e Nordeste.</b>	A baixa diversificação geográfica pode ser compensada com a interiorização de usinas em novas regiões produtoras.
	<b>Apoiar-se em políticas públicas para superar altos custos de investimento inicial.</b>	Incentivos como o RenovaBio podem mitigar a dificuldade de entrada de novas plantas industriais.
<b>ST</b> (Forças + Ameaças)	<b>Usar a elevada eficiência produtiva e a geração de coprodutos como vantagem competitiva contra o etanol de cana e o milho importado.</b>	O diferencial tecnológico e de sustentabilidade pode proteger contra a concorrência externa e interna.
	<b>Reduzir emissões certificadas como forma de enfrentar críticas ambientais.</b>	A comprovação de redução de CO <sub>2</sub> via CBIOS fortalece a imagem do etanol de milho frente às preocupações com uso da terra e água.
<b>WT</b> (Fraquezas + Ameaças)	<b>Minimizar riscos logísticos e de concentração geográfica para evitar impactos da volatilidade do milho.</b>	A dependência de poucas regiões aumenta a vulnerabilidade a choques de preço e problemas de infraestrutura.
	<b>Diminuir a dependência de incentivos governamentais para reduzir exposição à instabilidade político-econômica.</b>	Estratégias de diversificação de receitas e maior inserção internacional podem reduzir o risco regulatório.

Fonte: Elaborado pela autora.



A análise *SWOT* demonstra que o Brasil possui um ambiente promissor para o crescimento da produção de etanol de milho, especialmente pelo seu potencial agrícola, capacidade tecnológica e metas ambientais estabelecidas. No entanto, para que essa expansão seja sustentável, é necessário enfrentar as fragilidades estruturais e minimizar as ameaças externas e regulatórias. A criação de políticas públicas estáveis, o fortalecimento da infraestrutura logística e o estímulo à interiorização da produção são caminhos que podem consolidar o etanol de milho como uma peça central da matriz energética renovável brasileira.

## 5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo analisou de forma abrangente a expansão da produção de etanol de milho no Brasil, contextualizando-a no cenário energético nacional e destacando sua relevância para a diversificação da matriz de biocombustíveis. A partir da revisão bibliográfica, análise de dados recentes e elaboração de uma análise *SWOT*, foi possível identificar não apenas os fatores que impulsionam o crescimento do setor, mas também os desafios e oportunidades que moldarão sua trajetória nos próximos anos.

Os resultados apontam que o etanol de milho consolidou-se como um importante vetor de expansão da indústria de biocombustíveis no país, sobretudo na região Centro-Oeste, onde a abundância da matéria-prima, a capacidade de armazenamento e a operação contínua ao longo do ano oferecem vantagens estratégicas. O modelo industrial integrado, que agrega valor por meio da produção de coprodutos como DDGS, óleo vegetal e bioeletricidade, confere maior eficiência e competitividade às usinas, além de contribuir para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa, com comprovação por créditos de descarbonização (CBIOS) no âmbito do RenovaBio.

Entretanto, a análise também revelou limitações importantes, como a concentração geográfica da produção em poucos estados, o elevado custo inicial para implantação de plantas dedicadas, a dependência de políticas públicas para viabilizar a competitividade e os gargalos logísticos em determinadas regiões. Tais fatores indicam que, para manter a trajetória de crescimento, será necessário avançar em estratégias de descentralização, modernização logística e diversificação regional, especialmente explorando potenciais produtivos em áreas como o Norte e o Nordeste.

Um questionamento recorrente acerca da expansão do etanol de milho refere-se ao possível impacto sobre a oferta de grãos destinados à alimentação humana e animal. No entanto, as evidências atuais indicam que, no contexto brasileiro, a produção de etanol de milho tem ocorrido de forma complementar, e não competitiva, à cadeia alimentar. Isso porque grande parte do milho utilizado nas usinas provém de excedentes safrinhas e de regiões com elevada produtividade, o que reduz a pressão sobre o abastecimento interno. Além disso, o processo industrial do etanol

de milho gera coprodutos valiosos, como o DDGS (*Dried Distillers Grains with Solubles*), utilizado na alimentação animal, especialmente de bovinos, suínos e aves, compensando parte da destinação do grão ao biocombustível. Assim, longe de comprometer a segurança alimentar, a expansão desse setor pode fortalecer a cadeia agroindustrial ao agregar valor ao milho e diversificar o uso de seus derivados.

Quando comparados os custos de produção entre o etanol de cana-de-açúcar e o de milho, observa-se que cada modelo apresenta particularidades econômicas e estruturais. Em média, um hectare de cana-de-açúcar pode produzir entre 6 mil e 7 mil litros de etanol por safra, com custo de produção inferior, em torno de R\$ 2,00 por litro, em razão da estrutura consolidada do setor sucroenergético e da menor necessidade de processamento complementar. Já o milho, embora apresente um custo mais elevado, próximo de R\$ 2,50 por litro, compensa pela flexibilidade produtiva e pelo aproveitamento de coprodutos, como DDGS, óleo de milho e energia elétrica. Além disso, enquanto a cana é uma cultura semiperene com colheita anual, o milho permite até duas safras por ano e maior previsibilidade de oferta, especialmente no Centro-Oeste, o que confere estabilidade operacional às usinas flex. Assim, o etanol de milho não substitui o de cana, mas surge como alternativa economicamente viável e estratégica para reduzir a sazonalidade da produção nacional.

Outro fator que representa ameaça ao setor é a instabilidade nas políticas comerciais internacionais, exemplificada pelo chamado “tarifaço” imposto pelo governo dos Estados Unidos durante a gestão Trump. Em 2025, o setor sucroenergético brasileiro enfrentou uma nova medida tarifária por parte de Donald Trump nos Estados Unidos, que anunciou a imposição de tarifas de até 50% sobre importações de produtos brasileiros, incluindo a categoria de etanol, como parte de uma política comercial mais ampla. Essa ação representa uma ameaça direta para o etanol brasileiro, uma vez que poderia reduzir o acesso a mercados externos ou gerar retaliações que afetem a competitividade do biocombustível nacional. No contexto do etanol de milho, que ainda depende da atração de demanda externa e de cadeias agregadas de valor, esse “tarifaço” amplia o risco de instabilidade comercial e exige que o setor fortaleça sua base interna, diversifique mercados e garanta maior resiliência frente a possíveis choques regulatórios ou tarifários.

No contexto de oportunidades, destaca-se a crescente demanda nacional e internacional por biocombustíveis de menor pegada de carbono, estimulada por metas ambientais e compromissos de descarbonização firmados pelo Brasil para até 2035. Programas como o RenovaBio, aliados ao avanço de tecnologias de segunda geração (E2G), podem ampliar a competitividade do setor e reduzir a pressão sobre áreas agrícolas dedicadas exclusivamente à produção de grãos. Esse movimento tende a se intensificar diante da adoção global de políticas de transição energética e da busca por alternativas sustentáveis aos combustíveis fósseis.

Por outro lado, ameaças externas como a volatilidade dos preços internacionais do milho, a competição com o etanol de cana e com o produto importado, bem como possíveis críticas ambientais relacionadas ao uso intensivo de recursos hídricos ou impactos no uso da terra, podem afetar a imagem e a viabilidade econômica do setor. A instabilidade político-econômica interna também se apresenta como fator de risco, podendo comprometer investimentos e alterar o ambiente regulatório.

De forma geral, a análise *SWOT* demonstrou que a produção de etanol de milho no Brasil possui fundamentos sólidos para sustentar seu crescimento, desde que sejam implementadas estratégias que maximizem seus pontos fortes, aproveitem as oportunidades de mercado e mitiguem os riscos associados às ameaças e fraquezas identificadas. Nesse sentido, políticas públicas consistentes, investimentos em inovação tecnológica e integração de cadeias produtivas surgem como elementos essenciais para consolidar a posição do Brasil como líder na produção de biocombustíveis sustentáveis.

Recomendações para trabalhos futuros incluem aprofundar o estudo do etanol de segunda geração (E2G) a partir de milho e resíduos agrícolas, explorando não apenas os aspectos técnicos e econômicos, mas também as sinergias possíveis com a produção de etanol de primeira geração. Um ponto de destaque é o potencial de aplicação de inteligência artificial (IA) no setor, com uso de algoritmos para otimização de processos industriais, previsão de rendimentos, monitoramento de qualidade em tempo real e gestão preditiva de manutenção de equipamentos. Além disso, sistemas de IA podem auxiliar na modelagem de cadeias logísticas, reduzindo custos e impactos ambientais, e até no mapeamento de biomassa disponível para E2G, permitindo maior eficiência e aproveitamento de recursos. Dessa forma, a

integração entre biotecnologia, automação e inteligência artificial poderá representar um salto qualitativo para a produção sustentável de etanol no Brasil, abrindo novas fronteiras de competitividade e inovação para o setor.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMORIM, H. V. et al. Scientific challenges of bioethanol production in Brazil. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 91, p. 1267–1275, 2011.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS [ANP]. **São Paulo lidera produção de etanol no país**. 2020. Disponível em: <<https://informa.seade.gov.br/sao-paulo-lidera-producao-de-etanol-no-pais>> Acesso em: 28 jan. 2025.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL [BNDES]. BNDES aprova R\$ 1 bilhão para Raízen produzir etanol de segunda geração. **Agência de Notícias do BNDES**, 2024. Disponível em: <https://agenciadenoticias.bndes.gov.br>. Acesso em: 30 jun. 2025.

CAMILI, E. A. **Parâmetros operacionais do processo de produção de etanol a partir de polpa de mandioca**. 148p. 2010. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Agronomia)–Faculdade de Ciências Agrônômicas, UNESP, Botucatu, SP. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/83fb0f0a-8b81-44f9-b4cc-f257bedafaeb>. Acesso em: 30 jun. 2025.

CORDEIRO, M. A. **Estudo da hidrólise enzimática do caroço de açaí (euterpe oleraceae mart) para a produção de etanol**. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2016.

DIAS, J. M. C.de S. **O uso do etanol como combustível no Brasil vai completar um século!** Brasília: Agroenergia em Revista, 2012. Disponível em: <https://www.sidalc.net/search/Record/dig-infoteca-e-doc-952636/Description>. Acesso em: 30 jun. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA [EPE]. **Matriz Energética e Elétrica**. 2024. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>> Acesso em: 27 jan. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA [EPE]. **Plano Decenal de Energia 2022-2031**. Rio de Janeiro: EPE, 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2031>. Acessado em: 27 jan. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA [EPE]. **Principal fonte primária de energia renovável, cana-de-açúcar supera sozinha média mundial de renovabilidade na matriz energética**. 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/principal-fonte-primaria-de-energia-renovavel-cana-de-acucar-supera-sozinha-media-mundial-de-renovabilidade-na-matriz-energetica>> Acesso em: 27 jan. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA [EPE]. **Relatório Síntese**. 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados->

[abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-715/BEN\\_S%C3%ADntese\\_2024\\_PT.pdf](abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-715/BEN_S%C3%ADntese_2024_PT.pdf). Acesso em: 11 fev. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA [EPE]. **Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional 2024: ano base 2023**. Rio de Janeiro: EPE, 2024.

FE COMBUSTÍVEIS – Federação Nacional do Comércio de Combustíveis e Lubrificantes. **Inpasa responde por quase 50% do etanol de milho produzido no Brasil. 2025**. Disponível em: <https://www.fecombustiveis.org.br>. Acesso em: 30 jun. 2025.

FORBES AGRO. **Inpasa começa operar em Mato Grosso a maior usina de etanol do mundo**. Forbes, 2024. Disponível em: <https://forbes.com.br>. Acesso em: 30 jun. 2025.

FUELING SUSTAINABILITY [FS]. *Relatório de Sustentabilidade 2024/2025*. Disponível em: <https://www.fs.agr.br/sustentabilidade/relatorios-de-sustentabilidade/>. Acesso em: 30 jun. 2025.

HOFRICHTER, Markus. **Análise SWOT: Quando usar e como fazer**. Simplíssimo, 2017. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=yXEEDgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT11&dq=An%C3%A1lise+SWOT:+Quando+usar+e+como+fazer&ots=PR6KdP4AWW&sig=4UFR0gx1JEuT0lixqiXMK0XPQ5E#v=onepage&q=An%C3%A1lise%20SWOT%3A%20Quando%20usar%20e%20como%20fazer&f=false>. Acesso em: 30 jun. 2025.

INSTITUTO MATO-GROSSENSE DE ECONOMIA AGROPECUÁRIA [IMEA]. **Relatório de produção de etanol de milho no Mato Grosso (2018-2023)**. 2023.

JORNALCANA. **Inpasa consolida liderança global na produção de etanol de milho**. 2025. Disponível em: <https://jornalcana.com.br>. Acesso em: 30 jun. 2025.

MARCHETTI, Leonardo Schirrmeister. **Análise comparativa de uma planta de etanol de milho e de cana-de-açúcar**. Trabalho de Conclusão de Curso, UFSCar, 2023.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA [MME]. **Boletim de Combustíveis Renováveis – março 2024**. Disponível em: <https://www.gov.br/mme>. Acesso em: 30 jun. 2025.

MORAES, M. L. de; BACCHI, M. R. P. **Etanol do início às fases atuais de produção**. São Paulo: Revista de Política Agrícola, 2014.

PACHECO, T. F. **Produção de Etanol: Primeira ou Segunda Geração?** Brasília: Circular Técnica 04, 2011. Disponível em: <https://agris.fao.org/search/en/providers/122419/records/647355e22c1d629bc97a0c58>. Acesso em: 30 jun. 2025.

PLANT PROJECT. **O combustível que impulsiona a reindustrialização**. 2024. Disponível em: <https://plantproject.com.br>. Acesso em: 30 jun. 2025.

PORTAL ONSV – OBSERVATÓRIO NACIONAL DE SEGURANÇA VIÁRIA. **Etanol e sustentabilidade**. Disponível em: <https://www.onsv.org.br>. Acesso em: 30 jun. 2025.

REVISTA O E. **Etanol de milho: empresas ampliam e diversificam produção**. 2024. Disponível em: <https://revistaoe.info>. Acesso em: 30 jun. 2025.

SOUSA, L. T.; CHAVES, M. F. de C.; TANNÚS, S. P.; ESPINOSA, J. W. M. Estudo da biomassa como energia renovável no Brasil a partir da matriz SWOT. **Revista Competitividade e Sustentabilidade**, v. 5, n. 1, p. 34–44, 2018.

Unem. **Etanol de milho no Brasil: 3 razões que impulsionam o crescimento**. 2023. Disponível em: <<https://agroadvance.com.br/blog-etanol-de-milho-no-brasil-crescimento>> Acesso em: 28 jan. 2025.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR [UNICA]. **Produção de etanol: ciclo 2024/25**. Disponível em: <https://www.unica.com.br>. Acesso em: 30 jun. 2025.