



INSTITUTO FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS PENEDO
CURSO TÉCNICO SUBSEQUENTE EM QUÍMICA

EMERSON DA SILVA RODRIGUES

DA CANA AO COMBUSTÍVEL: UM ESTUDO SOBRE O PROCESSO PRODUTIVO E A
COMERCIALIZAÇÃO DO ETANOL NO BRASIL

PENEDO, AL
2025

EMERSON DA SILVA RODRIGUES

DA CANA AO COMBUSTÍVEL: UM ESTUDO SOBRE O PROCESSO PRODUTIVO E A
COMERCIALIZAÇÃO DO ETANOL NO BRASIL

Trabalho de conclusão de curso apresentado
ao Curso Subsequente de Química do
Instituto Federal de Alagoas, *campus*
Penedo, como requisito parcial para a
obtenção do grau de Técnico em Química.

Orientadora: Marina de Magalhães Silva

PENEDO, AL
2025



Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal de Alagoas
Campus Penedo
Biblioteca

R696d

Rodrigues, Emerson da Silva.

Da cana ao combustível: um estudo sobre o processo produtivo e a comercialização do etanol no Brasil / Emerson da Silva Rodrigues. – 2025.

18f.; il.

Orientação: Prof.^a Marina de Magalhães Silva.

Trabalho de Conclusão de Curso (Técnico de Nível Médio Subsequente em Química) – Instituto Federal de Alagoas, *Campus Penedo*, Penedo, 2025.

Trabalho acadêmico em versão digital.

1. Etanol. 2. Biocombustíveis. 3. Cana-de-açúcar. 4. Processos industriais - Etanol. I. Silva, Marina de Magalhães. II. Título.

CDD: 662

Maria Luzia Alexandre de Oliveira
Bibliotecária/Documentalista
CRB-4/2159

EMERSON DA SILVA RODRIGUES

DA CANA AO COMBUSTÍVEL: UM ESTUDO SOBRE O PROCESSO PRODUTIVO E A
COMERCIALIZAÇÃO DO ETANOL NO BRASIL

Trabalho de Conclusão de curso apresentado
ao Curso Subsequente em Química do
Instituto Federal de Alagoas, *campus*
Penedo, como requisito parcial para a
obtenção do grau de Técnico em Química.

APROVADO (A) EM: 14/11/2025.

BANCA EXAMINADORA

Marina de Magalhães Silva

Prof^ª. Dr^ª. Marina de Magalhães Silva
Instituto Federal de Alagoas - IFAL

Amaury Franklin Benvindo Barbosa

Prof. Dr. Amaury Franklin Benvindo Barbosa
Instituto Federal de Alagoas – IFAL

Mirelle Márcio Santos Cabral

Prof. Dr. Mirelle Márcio Santos Cabral
Instituto Federal de Alagoas - IFAL

DA CANA AO COMBUSTÍVEL: UM ESTUDO SOBRE O PROCESSO PRODUTIVO E A COMERCIALIZAÇÃO DO ETANOL NO BRASIL

FROM SUGARCANE TO FUEL: A STUDY ON THE PRODUCTION PROCESS AND MARKETING OF ETHANOL IN BRAZIL

Emerson da Silva Rodrigues¹
Marina de Magalhães Silva²

RESUMO

O etanol proveniente da cana-de-açúcar destaca-se como um dos biocombustíveis mais promissores, devido à sua versatilidade, eficiência e viabilidade técnica, econômica e ambiental. Diante disso, este trabalho tem como objetivo apresentar uma análise do processo produtivo do etanol a partir da cana-de-açúcar, abordando suas etapas industriais, sua relevância na matriz energética e os impactos comerciais e ambientais associados. A pesquisa foi desenvolvida com abordagem qualitativa, de caráter exploratório e natureza bibliográfica, fundamentada em fontes científicas obtidas em livros, artigos e bases de dados como Google Acadêmico, SciELO e periódicos da CAPES. Os resultados evidenciam que o etanol de cana-de-açúcar não apenas contribui para a diversificação energética, mas também se consolida como alternativa sustentável frente aos combustíveis fósseis, reforçando o papel do Brasil como líder mundial na produção e comercialização de biocombustíveis.

Palavras-chave: Etanol; Cana-de-açúcar; Biocombustíveis; Sustentabilidade; Setor sucroenergético.

ABSTRACT

Ethanol derived from sugarcane stands out as one of the most promising biofuels due to its versatility, efficiency, and technical, economic, and environmental viability. In this context, this study aims to analyze the production process of sugarcane ethanol, addressing its industrial stages, relevance in the energy matrix, and related commercial and environmental impacts. The research was conducted using a qualitative approach, with an exploratory and bibliographic character, based on scientific sources collected from books, articles, and academic databases such as Google Scholar, SciELO, and CAPES journals. The results demonstrate that sugarcane ethanol not only contributes to energy diversification but also consolidates itself as a sustainable alternative to fossil fuels, reinforcing Brazil's role as a global leader in the production and commercialization of biofuels.

Keywords: Ethanol; Sugarcane; Biofuels; Sustainability; Sugar-energy sector.

¹ Discente do Curso Técnico Subsequente em Química/IFAL. E-mail: esr13@aluno.ifal.edu.br.

² Docente orientadora do Curso Técnico Subsequente em Química. E-mail: marina.magalhaes@ifal.edu.br.

1 INTRODUÇÃO

A adoção de fontes de energia limpa tem se destacado no cenário global em resposta à crescente preocupação com as mudanças climáticas, decorrentes dos elevados níveis de emissão de gases do efeito estufa. Nesse contexto, os biocombustíveis configuram-se como uma alternativa sustentável e economicamente viável para a matriz energética. Dentre eles, o etanol obtido a partir do processo fermentativo da cana-de-açúcar apresenta-se como uma opção promissora, em virtude de seu elevado rendimento, baixo custo de produção e características ambientalmente favoráveis (MAIA *et al.*, 2024).

O Programa Nacional do Álcool (Proálcool), criado em 1975 pelo Governo Federal, foi uma das iniciativas mais importantes da história energética brasileira, impulsionando a produção e o uso do etanol como alternativa estratégica aos combustíveis fósseis. Desenvolvido em resposta à crise do petróleo, o programa estimulou a expansão do cultivo de cana-de-açúcar, financiou usinas produtoras de etanol hidratado e anidro e promoveu a adaptação da indústria automobilística para o uso do combustível renovável. O Proálcool não apenas reduziu a dependência do petróleo importado, mas também consolidou o Brasil como líder mundial em biocombustíveis, estabelecendo as bases tecnológicas, agrícolas e industriais que permitiram o avanço do setor sucroenergético e da atual matriz energética renovável (BRASIL, 1975).

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum L.*) é considerada uma das culturas agrícolas mais eficientes na conversão de biomassa em energia, sendo assim a principal matéria-prima na utilização da produção de etanol no Brasil, uma vez que é uma planta que apresenta um teor de sacarose elevado, possui rápido crescimento, alta produtividade e adapta-se facilmente ao clima e mudanças climáticas, sendo assim uma cultura que se sobressai como fonte de biocombustível, tal qual o milho e a beterraba (BRAGA JÚNIOR *et al.*, 2021).

Os Estados Unidos são o maior produtor mundial de etanol (produzido majoritariamente a partir do milho), seguidos pelo Brasil, que produziu cerca de 36,83 bilhões de litros em 2024, um aumento de 4,4% em comparação com o ano de 2023, segundo dados divulgados pela UNICA (União da Indústria de Cana-de-Açúcar e Bioenergia). A cultura da cana-de-açúcar tem ocupado uma área superior a 10 milhões de hectares, sendo a maior concentração na região Centro-Sul, apresentando uma produção média de 76,13 toneladas por hectare, a qual é considerada elevada entre as culturas energéticas (GRAVINA *et al.*, 2022).

Atualmente, 85% da produção nacional é feita através de colheita mecanizada, o que contribui para a redução de CO₂ e favorece o reaproveitamento dos resíduos, tais como a palha e o bagaço, que são utilizados como fonte de energia (MAIA *et al.*, 2024). Esses resíduos são

utilizados para geração de bioeletricidade, de modo que permite às usinas que operem com autonomia de energia, de modo que algumas chegam a exportar excedentes para a rede pública (BORDIGNON *et al.*, 2022).

A fermentação etanólica é feita principalmente com leveduras da espécie *Saccharomyces cerevisiae*, que do ponto de vista industrial é altamente adaptada às condições de estresse pelos quais passa o processo. O desenvolvimento de cepas modificadas tem ganhado ênfase no cenário agroindustrial com base nos avanços da engenharia genética, de modo que essas cepas que passam pelo processo de melhoramento e seleção podem possuir tanto melhor tolerância a álcoois quanto melhor conversão de açúcares (WU *et al.*, 2020).

Segundo o Balanço Energético Nacional (BEN), elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) em parceria com o Ministério de Minas e Energia (MME), apresenta anualmente um panorama detalhado da oferta e do consumo de energia no Brasil, desde a extração de recursos energéticos primários até seu uso final nas diferentes atividades econômicas. Em 2024, o relatório revela que o país avançou ainda mais na participação de fontes renováveis em sua matriz elétrica: cerca de 88,2% da eletricidade gerada veio de fontes limpas (tais como hidrelétrica, eólica, solar e biomassa) consolidando o Brasil como referência em geração sustentável. Além disso, o BEN aponta que a diversificação energética também se estende aos biocombustíveis: a produção de etanol cresceu e sua participação no consumo de energia do setor de transportes aumentou, reforçando a relevância da produção de álcool no balanço energético nacional. Por isso, ao se estudar a produção de álcool no Brasil, o BEN fornece dados fundamentais para compreender como esse biocombustível contribui para a matriz energética, tanto na substituição de combustíveis fósseis quanto na promoção de uma energia mais limpa e renovável (EPE, 2025; BRASIL, 2025).

Dessa forma, considerando a versatilidade e a eficiência do etanol de cana-de-açúcar, reconhecido como um dos biocombustíveis mais viáveis do ponto de vista técnico, econômico e ambiental, justifica-se seu destaque na matriz energética brasileira e mundial. Assim, este trabalho tem como objetivo, com base em literatura científica, apresentar uma abordagem sobre o processo produtivo do etanol a partir da cana-de-açúcar, bem como analisar sua viabilidade comercial e os impactos decorrentes no mercado energético. Para tanto, empregou-se como metodologia uma pesquisa de abordagem qualitativa, de caráter exploratório quanto ao objetivo e bibliográfica quanto ao procedimento técnico. A coleta de materiais foi realizada em livros e bases de dados acadêmicas, como Google Acadêmico, SciELO e periódicos da CAPES.

2 CANA-DE-AÇÚCAR

A cana-de-açúcar *Saccharum spp.* pertencente à família *Poaceae*, grupo de plantas conhecidas como gramíneas, seu gênero inclui várias espécies de híbridos que possuem alto rendimento e que são utilizados na produção de etanol e açúcar e diversos outros produtos. As espécies mais conhecidas desse grupo de plantas são *Saccharum officinarum*, *Saccharum spontaneum*, *Saccharum barberi*, *Saccharum sinense* e *Saccharum robustum*, variedades que são comercializadas e cultivadas e resultam de melhoramentos genéticos, os quais buscam maior produtividade, resistência a pragas e doenças, adaptação a diferentes condições climáticas e diferentes tipos de solos (BRAGA JÚNIOR *et al.*, 2021).

As variedades mais utilizadas no país resultam de programas de melhoramentos da RIDESA (Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroenergético) em conjunto ao IAC (Instituto Agrônomo de Campinas), sendo as principais culturas RB867515, RB966928, RB92579 e IACSP95-5000 devido ao alto teor de sacarose, vigor vegetativo e adaptabilidade de clima e solo (CURSI *et al.*, 2022).

Além da clássica produção de açúcar e etanol a cana-de-açúcar também é utilizada como biomassa para a produção de bioeletricidade, bioplástico, biofertilizantes, etanol de segunda geração, e a palha pode ser utilizada como substrato lignocelulósico (BORDIGNON *et al.*, 2022). Essa planta também contribui para práticas sustentáveis na agricultura, uma vez que os subprodutos com a vinhaça e o bagaço podem ser reaproveitados como adubo orgânico ou insumos energéticos, diminuindo assim o uso de insumos químicos e a dependência de fontes fósseis (GURGEL *et al.* 2015).

Gravina *et al.* (2022) descreve que o Brasil possui uma produtividade média de 76 toneladas por hectare, mas podendo superar 100 t/ha em regiões que utilizam alta tecnologia de manejo e que o clima seja favorável. O ciclo da cana pode variar de 12 a 18 meses, com cortes que permitem sua exploração por até 5 ou 6 anos a depender da variedade e do cultivo. Para Maia *et al.* (2024) o plantio mecanizado e a colheita sem queima têm se tornado relevante no cenário sucroalcooleiro por reduzir os impactos ambientais, bem como a emissão de carbono.

Com papel central no setor energético, na bioeconomia e na mitigação das mudanças climáticas, a cana-de-açúcar se consolida como uma cultura estratégica e multifuncional, dada sua elevada eficiência na conversão de energia solar em biomassa e as aplicações industriais.

2.1 PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR NO BRASIL: CULTIVO E PROCESSAMENTO INDUSTRIAL

No Brasil o cultivo da cana-de-açúcar é marcado por práticas agrícolas que buscam maximizar a produtividade e a sustentabilidade do sistema produtivo. A depender da região, o plantio pode ser realizado entre os meses de fevereiro a maio, com colheita entre abril e dezembro, ou com plantio entre junho e agosto para colheita entre setembro e março do ano seguinte. A propagação das mudas costuma ser realizada através da extração de colmos saudáveis (Figura 1), porém a densidade do plantio é definida pela variedade com que se trabalha e o sistema de colheita que será adotado (GRAVINA *et al.*, 2022).

Figura 1 – Colmos de *Saccharum spp* para o plantio da cultura.



Fonte: Cesnik, R.; Miocque, J., 2004.

O manejo do solo é um processo de extrema importância, uma vez que pode garantir a longevidade dos canaviais. Algumas das técnicas recomendadas para a preservação do solo e que podem garantir a eficiência na absorção de nutrientes são: rotação de culturas, preparo mínimo do solo, correção da acidez e adubação verde (MAIA *et al.*, 2024). A mecanização do plantio e da colheita podem reduzir a dependência de mão de obra e os impactos ambientais. Atualmente o centro-sul realiza 95% de sua colheita de forma mecânica, reduzindo os gases de efeito estufa e utilizando a palha como biomassa (CONAB, 2022).

Após o processo de colheita, a cana-de-açúcar é transportada para a indústria por caminhões-canavieiros, que podem carregar cana inteira (proveniente da colheita manual) ou cana picada (resultante da colheita mecanizada). Ao chegar à usina, os caminhões são pesados em balança rodoviária para determinar a quantidade de toneladas transportadas. Em seguida, é retirada uma amostra da carga por meio de um equipamento chamado sonda, que permitirá a realização de diversas análises laboratoriais, tais como: Pol, Brix, bolo úmido, fibra (F), pureza, açúcares redutores (AR), Açúcar Total Recuperável (ATR) e impurezas minerais e vegetais.

Após essa etapa, a cana segue para a mesa alimentadora, onde ocorre a lavagem para remoção de impurezas como areia, pedras e resíduos vegetais. Em seguida, a matéria-prima é encaminhada aos picadores e desfibradores (Figura 2), responsáveis por triturar a cana em pedaços menores e desfibrá-la, facilitando a extração do caldo. Antes de chegar às moendas, a cana passa por um eletroímã, que remove partículas metálicas que possam ter sido transportadas junto ao material e não foram eliminadas na lavagem. Concluídas essas operações, a cana segue para a moenda, equipamento responsável pela extração do caldo, que será posteriormente submetido aos processos físico-químicos de clarificação e tratamento. O bagaço resultante da moagem é direcionado à caldeira, onde é utilizado como combustível para geração de energia térmica na própria usina (BRAGA JÚNIOR *et al.*, 2021).

Figura 2 – Processo de moagem de cana-de-açúcar para obtenção de caldo.



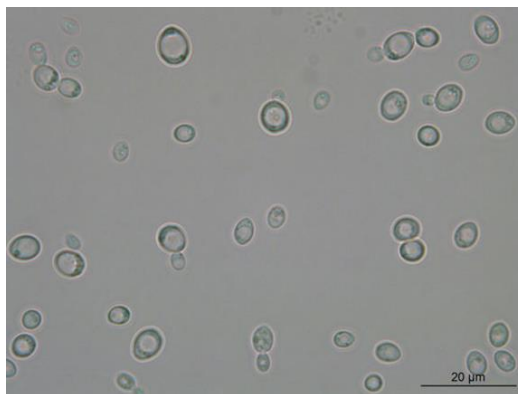
Fonte: Revista Rural, 2019.

Atualmente para a bioeconomia, a produção de etanol está sendo integrado com tecnologias de segunda geração, que utilizam resíduos lignocelulósicos (bagaço e palha) na intenção de aumentar o rendimento da produção alcoólica e diversificar os produtos da biorrefinaria (BORDIGNON *et al.*, 2022). Essa abordagem marca a evolução do modelo tradicional de usina, tornando o setor sucoenergético mais competitivo e sustentável.

2.2 FERMENTAÇÃO ETANÓLICA

A produção do etanol a partir da cana de açúcar ocorre a partir da conversão dos açúcares do caldo da cana (principalmente sacarose) em etanol e dióxido de carbono (CO₂), esse processo ocorre a partir de fermentação com a atuação de leveduras, predominantemente realizada pela espécie *Saccharomyces cerevisiae* (Figura 3). Esse processo ocorre de forma anaeróbica (sem a presença de oxigênio) e pode converter até 90-95% dos açúcares fermentáveis em etanol (BI *et al.*, 2024; WU *et al.*, 2020).

Figura 3 – Levedura *Saccharomyces cerevisiae*, a mais utilizada no processo fermentativo do etanol.



Fonte: EMBRAPA, 2023.

A reação bioquímica principal pode ser representada pela seguinte equação global:



A glicose sofre o processo de glicólise, no qual é degradada a piruvato. Este, por sua vez, é convertido em etanol e dióxido de carbono (CO_2) por meio da ação das enzimas piruvato descarboxilase e álcool desidrogenase. Embora a fermentação alcoólica seja energeticamente pouco eficiente para a célula, produzindo apenas 2 mols de ATP por mol de glicose, ela é ideal para a produção industrial de etanol, pois maximiza o rendimento do produto final (WU *et al.*, 2020).

O processo de fermentação ocorre em tanques conhecidos como “dornas” que são feitos de aço carbono, podendo ser em sistemas contínuos ou em batelada. No Brasil, o mais comumente utilizado é o sistema de batelada, onde as células de leveduras são reutilizadas e a biomassa de leveduras é separada no final da fermentação, tratada e reintroduzida no ciclo (BI *et al.*, 2024).

Para esse processo é importante manter a temperatura entre 30 a 35 °C e o pH entre 4,0 e 5,0 de modo a evitar a contaminação bacteriana, e garantir a viabilidade das leveduras. A fermentação pode durar de 6 a 12 horas, ao final do processo é obtido um líquido residual chamado de vinhaça (BRAGA JÚNIOR *et al.*, 2021).

As pesquisas recentes revelam que uma das estratégias para aumentar o rendimento alcoólico bem como a tolerância a inibidores é a modificação genética de cepas de *Saccharomyces cerevisiae* (WU *et al.*, 2020). Além disso, a adição de íons de K^+ e Ca^{2+} pode melhorar a integridade celular e a estabilidade metabólica durante fermentação (BI *et al.*, 2024).

Na bioindústria o processo fermentativo é um dos mais avançados em questão de tecnologia, e representa o coração da cadeia produtiva do etanol, devido a sua eficiência, escalabilidade e flexibilidade frente a diferentes substratos.

2.3 DESTILAÇÃO E DESIDRATAÇÃO

Após o processo fermentativo, a etapa seguinte é a destilação, na qual ocorre a separação do etanol presente no vinho fermentado (MULLER *et al.*, 2023). O princípio físico-químico envolvido baseia-se na diferença entre os pontos de ebulição do etanol (78,37 °C) e da água (100 °C) (WU *et al.*, 2020).

No Brasil, o processo utiliza colunas de destilação contínuas em aço inoxidável, equipadas com pratos ou recheios que maximizam o contato líquido-vapor, garantindo maior eficiência energética. Nessa etapa, o etanol pode atingir um teor máximo de 92,6% (em massa), sendo denominado etanol hidratado (BI *et al.*, 2024).

Para que seja produzido o etanol anidro (99,3%), o qual costuma ser misturado com a gasolina, o etanol hidratado é submetido a processos de desidratação que podem ser realizado absorção em peneiras moleculares, extração com solventes ou azeotrópica. Esses métodos quebram o azeótropo e permitem atingir as especificações exigidas pelo mercado de combustíveis (SANTOS *et al.*, 2021).

No Brasil, as destilarias também são autossuficientes em energia, uma vez que a utilização do bagaço em caldeiras fornece o vapor necessário para o aquecimento das colunas. Esse ponto do processo além de reduzir custos reforça a sustentabilidade do processo (AGUILERA *et al.*, 2017).

No cenário sucroenergético brasileiro, predomina o sistema contínuo de destilação (Figura 4), no qual a coluna A constitui a primeira etapa da produção de etanol. Essa coluna é dividida nas seções A, A1 e D, cada uma com funções específicas para auxiliar na separação dos componentes do vinho proveniente da fermentação. A seção A possui entre 18 e 24 bandejas e, em sua base, ocorre a retirada da vinhaça, subproduto rico em potássio utilizado na fertirrigação. Industrialmente, esse subproduto é tolerado até 0,03% GL. No topo da coluna A é obtido o flegma, principal produto dessa etapa da destilação. Na seção A1, localizada na parte superior, é retirado o vinho fermentado, geralmente com teor alcoólico entre 6% e 12% GL. Essa seção também é responsável pelo aquecimento inicial do vinho e pela concentração, em forma de vapor, dos componentes mais voláteis (SANTOS *et al.*, 2021).

A seção D concentra, na fase líquida, os contaminantes do processo, gerando o chamado “álcool de segunda”. Os vapores provenientes dessa seção são condensados nos trocadores de calor R e R1, por troca térmica com água de resfriamento, possibilitando a remoção das substâncias mais voláteis. Parte do condensado retorna para a própria seção D, enquanto outra fração é retirada como álcool de segunda. Na base dessa seção é obtido o flegma líquido, que

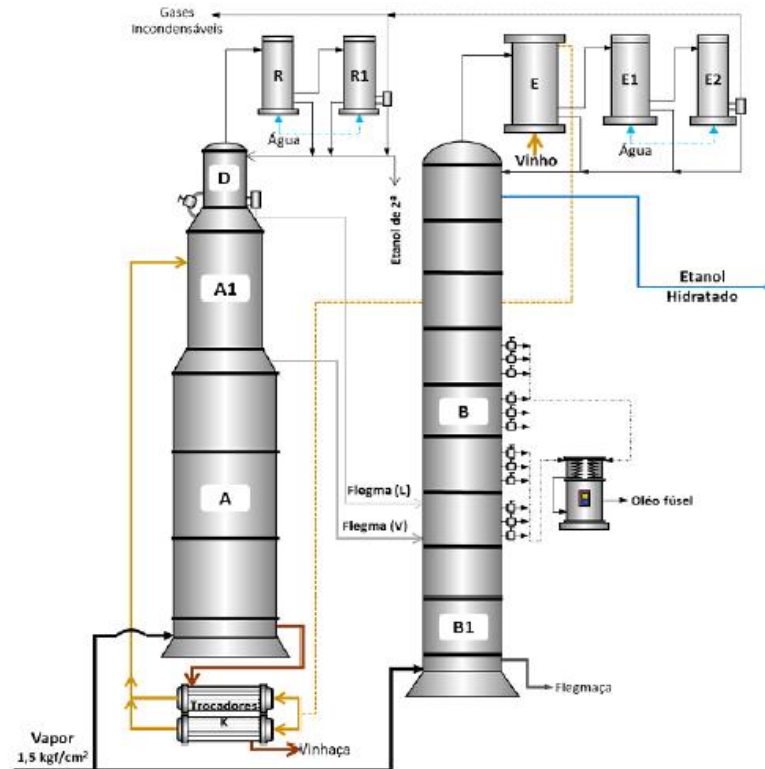
segue juntamente com o flegma vaporizado da seção A para a coluna de retificação. A coluna B, ou coluna de retificação, realiza uma nova destilação para promover a purificação complexa e o aumento da concentração de etanol. Essa coluna é dividida nas seções B e B1. A seção B1, contendo entre 13 e 18 bandejas, é responsável pelo esgotamento do flegma, processo conhecido como formação da “flegmaça”, na qual ainda ocorre enriquecimento em etanol; esse subproduto pode ser reutilizado no processo. Já a seção B possui 43 bandejas ou mais, sendo responsável por concentrar o flegma desde a base até o topo da coluna. A condensação ocorre nos trocadores de calor E1 e E2, alimentados com água de resfriamento, enquanto o condensador E troca calor com o vinho proveniente da dorna volante. O vinho é pré-aquecido e completa seu aquecimento nos trocadores K, atingindo temperaturas iguais ou superiores a 90 °C, o que garante ganho energético antes de sua alimentação na seção A (BATISTA *et al.*, 2012).

Na seção B ocorre o acúmulo de impurezas de acordo com as temperaturas internas, como os óleos fússeis, que devem ser removidos para não prejudicar o funcionamento da coluna e a qualidade do etanol hidratado. O aquecimento da coluna de retificação é proveniente dos vapores da coluna A, exigindo controle rigoroso para evitar excesso de vapor, o que impediria a entrada do flegma e comprometeria o processo. Ao final, no topo da coluna B, obtém-se o etanol hidratado, que pode ser comercializado desde que atenda aos requisitos de qualidade da ANP (SANTOS *et al.*, 2021).

Para a obtenção do etanol anidro, as indústrias partem obrigatoriamente do etanol hidratado. Nesse ponto, ocorre o fenômeno do azeótropo, no qual a composição do vapor é igual à do líquido, impedindo a purificação por destilação simples. Por isso, aplica-se a destilação azeotrópica, que consiste na adição de um agente desidratante que forma uma mistura ternária com ponto de ebulição inferior ao da água e do etanol. No Brasil, o ciclohexano é o principal desidratante utilizado. A produção de etanol anidro envolve a coluna C (coluna de desidratação), com 42 bandejas, e a coluna P (coluna recuperadora), com 20 bandejas. O etanol hidratado é introduzido na coluna C abaixo do decantador, juntamente com o ciclohexano. O aquecimento é realizado por um refeedor, pois a injeção direta de vapor adicionaria água ao produto desejado. A coluna C possui dois condensadores, H e H1, responsáveis por manter o refluxo da mistura ternária e o equilíbrio da destilação. Na base da coluna C é retirado o etanol anidro, enquanto nas regiões intermediárias e no topo é formada a mistura ternária (etanol–água–desidratante), que é resfriada nos condensadores H e H1 e retorna ao decantador. Nesse decantador, forma-se uma mistura bifásica: a fase leve, rica em desidratante, é reciclada para a coluna C; a fase pesada, rica em água, etanol e ciclohexano, segue para a coluna P (LIAPOSHCHENKO, 2021).

Na coluna P, ocorre a recuperação do desidratante e do etanol por destilação simples. Os vapores do desidratante são condensados nos trocadores I e II, parte retornando como refluxo e parte sendo recirculada ao decantador da coluna C, garantindo a eficiência do processo. Na base da coluna P é retirada predominantemente água, podendo conter traços de etanol; por isso, essa corrente líquida pode ser reintroduzida na coluna de retificação para evitar perdas do produto (BORGES FILHO, 2025).

Figura 4 – Esquema da torre de destilação.



Fonte: Santos *et al.*, 2021.

2.4 SUBPRODUTOS DA PRODUÇÃO DE ETANOL

Durante o processo de fermentação etanólica, além da produção de etanol e da liberação de dióxido de carbono, ocorre a formação de diversos subprodutos de relevância tecnológica, agrícola, econômica e ambiental. A composição e a quantidade dessas substâncias variam conforme a matéria-prima utilizada, a cepa de levedura empregada e a presença de contaminantes (MASSA *et al.*, 2023; BI *et al.*, 2024).

Um dos principais subprodutos é o óleo fúsel, uma mistura de álcoois superiores, como isoamílico, isobutílico e n-propílico. Embora seja considerado um contaminante quando presente em excesso no etanol combustível, possui alto valor na indústria química e

farmacêutica, além de poder ser utilizado como aditivo energético devido ao seu elevado poder calorífico (MASSA *et al.*, 2023).

Outro composto relevante é o glicerol, originado de reações de oxirredução das leveduras, especialmente sob condições de estresse osmótico ou na presença de inibidores. Devido às suas propriedades físico-químicas, o glicerol apresenta aplicações nas indústrias de cosméticos, alimentos e fármacos, sendo objeto de estudos voltados à sua recuperação em biorefinarias integradas (BORDIGNON *et al.*, 2022).

A fermentação também gera ácidos orgânicos, como os ácidos acético, succínico e láctico, resultantes do metabolismo da *Saccharomyces cerevisiae* e de bactérias contaminantes, como as do gênero *Lactobacillus*. O acúmulo excessivo desses ácidos pode reduzir o rendimento fermentativo, tornando essencial o monitoramento e o controle de sua formação (MULLER *et al.*, 2023).

O dióxido de carbono (CO₂) produzido durante a fermentação, frequentemente liberado na atmosfera, pode ser capturado e purificado para uso industrial em bebidas, alimentos e soldagem. Além disso, vem sendo estudado como insumo na fixação química e na produção de biocombustíveis avançados. Estima-se que, para cada litro de etanol, sejam gerados de 0,75 a 0,90 kg de CO₂ (BRAGA JÚNIOR *et al.*, 2021).

Na etapa de destilação, formam-se também as cabeças e caudas, frações diretamente influenciadas pelos subprodutos fermentativos. As cabeças concentram compostos voláteis, como aldeídos e ésteres, enquanto as caudas acumulam substâncias de maior peso molecular, incluindo álcoois superiores e ácidos graxos de cadeia longa. A destinação adequada dessas correntes pode representar ganhos econômicos e ambientais para as usinas (FRANÇA JÚNIOR, 2008).

Outro importante resíduo do processo é a vinhaça, caracterizada por sua elevada carga orgânica e alto teor de potássio. Gerada diretamente após a destilação, é amplamente utilizada na fertirrigação, servindo como fonte de nutrientes para o solo (BORDIGNON *et al.*, 2022).

Já a levedura, após vários ciclos fermentativos, perde viabilidade celular e pode ser submetida à autólise, originando um produto aproveitado na formulação de rações animais, agregando valor nutricional (MULLER *et al.*, 2023).

De modo geral, subprodutos antes considerados indesejáveis vêm sendo progressivamente incorporados aos processos industriais, contribuindo para a ampliação da sustentabilidade e da eficiência do setor sucroenergético.

2.5 ARMAZENAMENTO E COMERCIALIZAÇÃO

A comercialização do etanol no Brasil ocorre em um ambiente regulado e competitivo, envolvendo usinas produtoras, distribuidoras de combustíveis e o varejo em postos. Após a produção, o etanol é armazenado em tanques apropriados antes de ser destinado à distribuição e comercialização no mercado interno ou à exportação. As usinas podem vender o etanol hidratado diretamente às distribuidoras ou a consumidores industriais. Já o etanol anidro deve, obrigatoriamente, ser comercializado com as distribuidoras, que realizam sua mistura com a gasolina nas proporções definidas pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), atualmente fixadas em 27% (ANP, 2024). O sistema de comercialização é influenciado por contratos de fornecimento e pela bolsa de valores (B3) que disponibiliza contratos futuros de etanol hidratado que permite que os agentes do setor se protejam contra as oscilações de preço e risco de mercado (UNICA, 2023).

A logística tem grande relevância no setor, uma vez que o etanol é transportado principalmente por caminhões-tanque nas rodovias, e, em algumas regiões estratégicas, por ferrovias ou dutos. Um exemplo é o Etanolduto, sistema que interliga os estados de Goiás, Minas Gerais e São Paulo ao Porto de Santos. Essa infraestrutura busca reduzir os custos de transporte e ampliar a competitividade do produto (MAPA, 2022).

Segundo dados publicados no G1 O Brasil corresponde ao segundo maior exportador mundial de etanol, atrás apenas dos Estados Unidos. Os principais destinos são Estados Unidos, União Europeia, Japão e Coreia do Sul, que utilizam tanto como combustível como para aplicações industriais. A competitividade do produto está ligada a disponibilidade das safras da cana-de-açúcar, ao câmbio e às políticas internacionais de incentivo ao biocombustível (MOURA, 2022).

A Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), instituída em 2017, criou os Créditos de Descarbonização (CBIOS), ativos financeiros negociados em bolsa que recompensam os produtores mais eficientes em termos de emissões de gases de efeito estufa. Esse mecanismo fortaleceu a posição do etanol como combustível de baixa intensidade de carbono e gerou uma nova fonte de receita para as usinas certificadas (ANP, 2024).

No Brasil, a comercialização de etanol combina aspectos do setor sucroenergético com uma dinâmica que equilibra a demanda interna, as exportações estratégicas e as políticas ambientais, tornando o país uma referência mundial na produção e comercialização desse biocombustível. Segundo a UNICA (2024), o país atingiu sua maior oferta histórica de etanol, com 36,83 bilhões de litros produzidos, um aumento de 4,4% em relação a 2023. O mercado

interno consumiu 29,92 bilhões de litros, representando um crescimento de 14% em comparação ao ano anterior, o que reduziu a necessidade de importação de gasolina.

Na safra 2023/2024, as vendas de etanol hidratado no mercado interno chegaram a 18,65 bilhões de litros, um aumento de 20,65% em relação à safra anterior. Já o etanol anidro, essencial para a mistura com gasolina, totalizou 11,67 bilhões de litros vendidos, correspondendo a um crescimento de 5,73% (UNICA, 2024)

Segundo a UDOP (União Nacional da Bioenergia, 2024), o estado de Alagoas destacou-se como o maior produtor do Nordeste em 2023, com 512 milhões de litros de etanol, ocupando a sétima posição no ranking nacional da ANP. Na safra de 2024, o estado processou aproximadamente 19,3 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, resultando na produção de 454 milhões de litros de etanol.

3 CONCLUSÃO

De acordo com o que foi exposto, pode-se perceber que a produção de etanol a partir da cana-de-açúcar consolidou-se como uma das principais atividades do setor sucroenergético brasileiro, unindo tradição agrícola, inovação e tecnologia. A análise das etapas produtivas, desde o cultivo da matéria-prima, a fermentação e a destilação, até o aproveitamento dos subprodutos, evidenciam a multifuncionalidade e a relevância dessa indústria.

A fermentação, majoritariamente conduzida pela *Saccharomyces cerevisiae*, demonstra ser um processo eficiente e de grande importância industrial no Brasil, onde as técnicas aplicadas garantem alta produtividade e competitividade em nível global.

No âmbito da comercialização, os dados mostram que o Brasil, especialmente o estado de Alagoas, desempenha papel central na expansão da produção e no abastecimento do mercado nacional, com consumo interno crescente e preços competitivos em relação à gasolina.

Além disso, programas como o RenovaBio valorizam os créditos de descarbonização (CBIOs), reforçando a sustentabilidade econômica e ambiental do setor e impulsionando o mercado de biocombustíveis.

Desse modo, o etanol de cana-de-açúcar não é apenas um combustível renovável, mas também um produto de grande importância socioeconômica e estratégica, com elevado potencial de expansão. A continuidade dos investimentos em pesquisa, infraestrutura, logística e políticas de incentivo será fundamental para consolidar o papel do Brasil como líder mundial na produção de etanol.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Anuário estatístico de combustíveis renováveis 2024**. Brasília: ANP, 2024.

AGUILERA, Rogério; DA SILVA, Erika Cristina; MARTINS, Rhodiney Vaz; JUNGER, Alex Paubel; GUY GUERRA, Sinclair Mallet; DOS SANTOS, Jadir Perpétuo. **Bagaço de cana-de-açúcar como fonte energética**. Revista de Casos e Consultoria, v. 8, n. 3, p. e833, 2017.

BATISTA, F. R. M.; FOLLEGATTI-ROMERO, L. A.; BESSA, L. C. B. A.; MEIRELLES, A. J. A. **Computational simulation applied to the investigation of industrial plants for bioethanol distillation**. Computers and Chemical Engineering 2012, 46, 1.

BI, Y. *et al.* **Papel fundamental do K⁺ e Ca²⁺ na produção de etanol de alto rendimento por *Saccharomyces cerevisiae* a partir de melão de cana-de-açúcar concentrado**. Microbial Cell Factories, v. 23, n. 1, p. 1–12, 2024.

BORDIGNON, S. E. *et al.* **Pré-tratamento combinado da cana-de-açúcar para geração de etanol e produtos de valor agregado**. Frontiers in Energy Research, v. 10, p. 1–14, 2022.

BRAGA JÚNIOR, R. A. *et al.* **História e situação atual do melhoramento genético, produção e indústria da cana-de-açúcar no Brasil**. Sugar Tech, v. 23, p. 1054–1066, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12355-021-00951-1>. Acesso em: 17 jul. 2025.

BRASIL. Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar: região Centro-Sul – safra 2022/23**, Terceiro levantamento. Brasília: CONAB, dez. 2022. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-brasileira-de-cana-de-acucar/item/download/45671_7a038e9b1579f67261d6351884075e. Acesso em: 01 set. 2025.

BRASIL. Ministério da Indústria e Comércio. **Programa Nacional do Alcool – Proálcool**. Brasília, 1975. Disponível em: <https://www.gov.br>. Acesso em: 20 nov. 2025.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Brasil gera 88% da sua energia elétrica a partir de fontes renováveis**. Brasília, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/brasil-gera-88-da-sua-energia-eletrica-a-partir-de-fontes-renovaveis>. Acesso em: 20 nov. 2025.

CESNIK, R.; MIOCQUE, J. **Melhoramento da cana-de-açúcar**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004.

CURSI, D. E.; HOFFMANN, H. P.; BARBOSA, G. V. S.; BRESSIANI, J. A.; GAZAFFI, R.; CHAPOLA, R. G.; *et al.* **History and Current Status of Sugarcane Breeding, Germplasm Development and Molecular Genetics in Brazil**. Sugar Tech, v. 24, n. 1, p. 112-133, 2022. DOI: 10.1007/s12355-021-00951-1.

EMBRAPA. **Cana-de-açúcar**. Embrapa, 2013. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-imagens/-/midia/734002/cana-de-acucar>. Acesso em: 24 ago. 2025.

EMBRAPA. **Microscopia óptica da levedura *Saccharomyces cerevisiae***. Embrapa, 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-imagens/-/midia/6568004/microscopia-optica-da-levedura-saccharomyces-cerevisiae-embrapa-91b84-brm-025697>. Acesso em: 27 ago. 2025.

EPE; MME. **Balanco Energético Nacional 2025: Relatório Síntese (ano-base 2024)**. Brasília: Empresa de Pesquisa Energética, Ministério de Minas e Energia, 2025. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>. Acesso em: 20 nov. 2025.

FRANÇA Júnior, Adalcino. **Influência do fracionamento no destilado para a otimização da produção da cachaça de alambique: uma prática pedagógica no processo produtivo**. 2008. 123 f. Dissertação (Mestrado em Educação Agrícola) — Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica - RJ.

GRAVINA, G. A. *et al.* **Produtividade da cana-de-açúcar e viabilidade econômica em resposta à densidade de plantio**. Brazilian Journal of Biology, v. 82, e245070, 2022.

GURGEL, Marcilio N. do A.; CORRÊA, Simone T. R.; DOURADO NETO, Durval; DE PAULA JÚNIOR, Durval R. **Tecnologia para aproveitamento de resíduos da agroindústria sucroalcooleira como biofertilizante organomineral granulado**. Engenharia Agrícola, v. 35, n. 1, p. 63-75, jan-fev 2015. DOI: 10.1590/1809-4430-eagri-35-1-0063.

INTECHOPEN. **A sustentabilidade do etanol de cana-de-açúcar no Brasil: perspectivas e desafios**. In: Série de Livros sobre Energia Sustentável. IntechOpen, 2024.

MAIA, S. M. F. *et al.* **Sistemas de colheita de cana-de-açúcar no Brasil: efeitos nos estoques de carbono orgânico do solo e nas emissões de gases de efeito estufa**. European Journal of Soil Science, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/ejss.13580>. Acesso em: 17 jul. 2025.

MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Logística do etanol no Brasil: desafios e perspectivas**. Brasília: MAPA, 2022.

MASSA, T. B. *et al.* **Fusel oil: chemical composition and an overview of its potential application**. Journal of the Brazilian Chemical Society, v. 34, n. 8, p. 1041–1059, 2023.

MOURA, Fernanda Veronez Galdiano. **A importância do etanol brasileiro no contexto de mitigação das mudanças climáticas**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Econômicas): Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022.

MULLER, G. *et al.* Processos fermentativos aprimorados baseados em cana-de-açúcar por cepas industriais de levedura para etanol combustível. Journal of Fungi, v. 9, n. 8, art., 2023.

REVISTA RURAL. **Moagem no Centro-Sul atinge 1,59 milhão de toneladas na primeira quinzena de março**. Revista Rural, 26 mar. 2019. Disponível em: <https://www.revistarural.com.br/2019/03/26/moagem-no-centro-sul-atinge-159-milhao-de-toneladas-na-primeira-quinzena-de-marco/>. Acesso em: 24 ago. 2025.

SANTOS, M. C.; ALBUQUERQUE, A. A.; SOLETTI, J. I. *et al.* **Principais tecnologias para produção de etanol anidro no Brasil**. Revista Virtual de Química, v. 13, n. 6, p. 1228-1240, 2021. DOI:10.21577/1984-6835.20210076.

UDOP – União dos Distribuidores de Orgânicos e Petroquímicos. **Alagoas se consolida como maior produtor de etanol do Nordeste.** [S.l.], 22 jul. 2024. Disponível em: <https://www.udop.com.br/noticia/2024/07/22/alagoas-se-consolida-como-maior-produtor-de-etanol-do-nordeste.html>. Acesso em: 10 de out. 2025.

UNICA. **Safra 2023/2024 termina como a maior da história. 12 abr. 2024.** Disponível em: <https://unica.com.br/noticias/safra-2023-2024-termina-como-a-maior-da-historia/>. Acesso em: 01 de out. 2025.

WU, R. et al. **Produção aprimorada de etanol a partir de melão de cana-de-açúcar por *Saccharomyces cerevisiae* industrialmente modificada via substituição do gene PHO4.** RSC Advances, v. 10, p. 2267–2276, 2020.

ZHANG, R. *et al.* **Systematic study of energy-saving bioethanol distillation processes.** Energy Conversion and Management, v. 285, p. 116–125, 2023.