

The background image shows a large-scale industrial facility, likely a bioethanol plant, situated in a rural landscape. In the foreground, there are rows of sugarcane plants. A dirt road leads from the left towards the plant. Several trucks are visible, including one carrying a large cylindrical tank. The plant itself features tall distillation columns, storage silos, and complex piping. The sky is overcast.

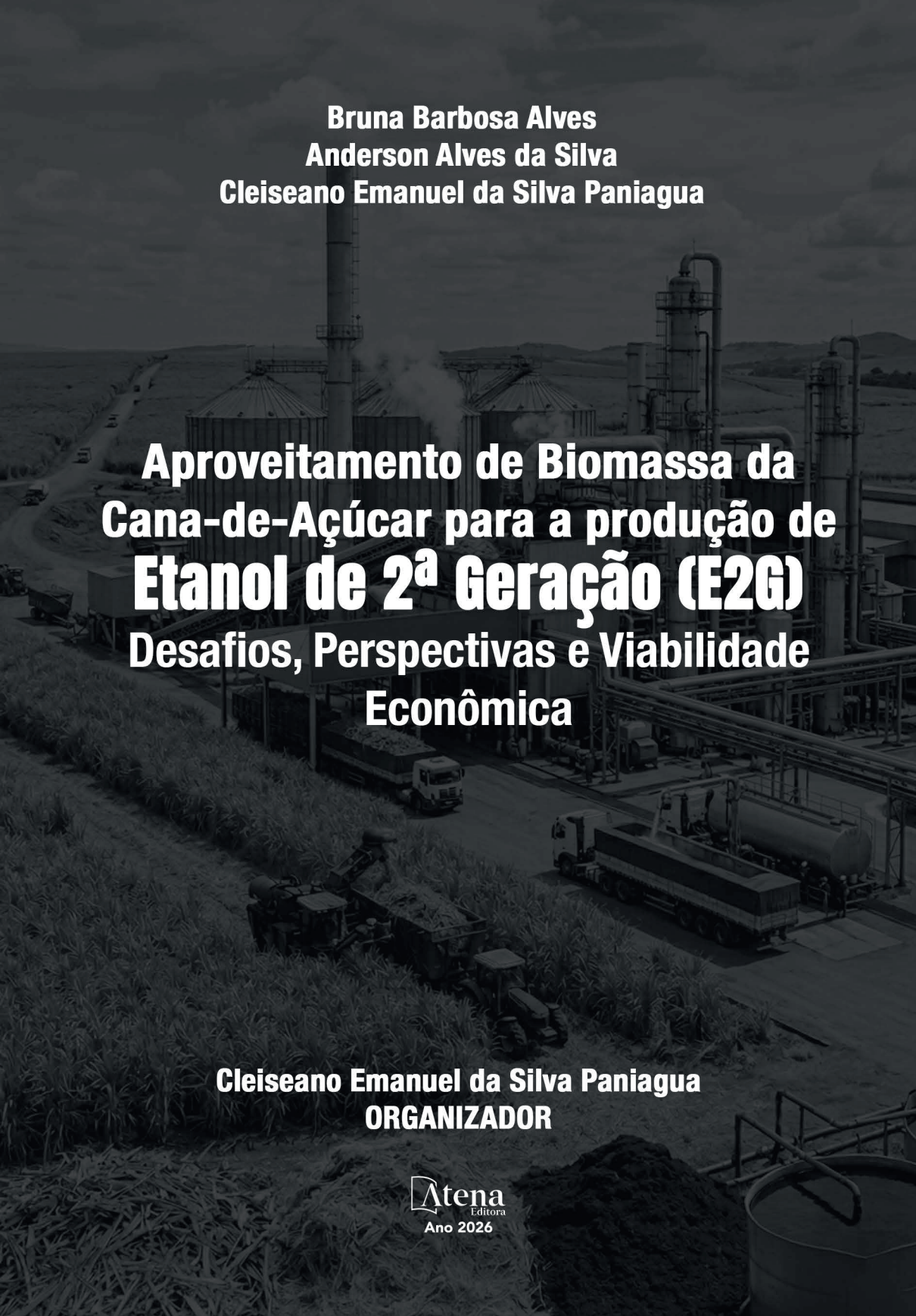
Bruna Barbosa Alves
Anderson Alves da Silva
Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua

Aproveitamento de Biomassa da Cana-de-Açúcar para a produção de Etanol de 2ª Geração (E2G)

Desafios, Perspectivas e Viabilidade Econômica

Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua
ORGANIZADOR

 **Atena**
Editora
Ano 2026



Bruna Barbosa Alves
Anderson Alves da Silva
Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua

Aproveitamento de Biomassa da Cana-de-Açúcar para a produção de Etanol de 2ª Geração (E2G)

Desafios, Perspectivas e Viabilidade Econômica

Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua
ORGANIZADOR

**Atena**
Editora
Ano 2026

2025 by Atena Editora

Copyright © 2025 Atena Editora

Copyright do texto © 2025, o autor

Copyright da edição © 2025, Atena Editora

Os direitos desta edição foram cedidos à Atena Editora pelo autor.

Open access publication by Atena Editora

Editora chefe

Prof^a Dr^a Antonella Carvalho de Oliveira

Editora executiva

Natalia Oliveira Scheffer

Imagens da capa

iStock

Edição de arte

Yago Raphael Massuqueto Rocha



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob a Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

A Atena Editora tem um compromisso sério com a transparência e a qualidade em todo o processo de publicação. Trabalhamos para garantir que tudo seja feito de forma ética, evitando problemas como plágio, manipulação de informações ou qualquer interferência externa que possa comprometer o trabalho.

Se surgir qualquer suspeita de irregularidade, ela será analisada com atenção e tratada com responsabilidade.

O conteúdo do livro, textos, dados e informações, é de responsabilidade total do autor e não representa necessariamente a opinião da Atena Editora. A obra pode ser baixada, compartilhada, adaptada ou reutilizada livremente, desde que o autor e a editora sejam mencionados, conforme a Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

Cada trabalho recebeu a atenção de especialistas antes da publicação. A equipe editorial da Atena avaliou as produções nacionais, e revisores externos analisaram os materiais de autores internacionais.

Todos os textos foram aprovados com base em critérios de imparcialidade e responsabilidade.

Aproveitamento de Biomassa da Cana-de-Açúcar para a produção de Etanol de 2ª Geração (E2G): Desafios, Perspectivas e Viabilidade Econômica

| Autores:

Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua - organizador

Bruna Barbosa Alves

Anderson Alves da Silva

| Revisão:

Os autores

| Diagramação:

Nataly Gayde

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

A654 Aproveitamento de biomassa da cana-de-açúcar para a produção de etanol de 2ª geração (E2G): desafios, perspectivas e viabilidade econômica / Organizador Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2026.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-258-3895-3

DOI <https://doi.org/10.22533/at.ed.953260303>

1. Biomassa. 2. Cana-de-açúcar. 3. Produção de etanol de segunda geração. 4. Bioenergia. I. Paniagua, Cleiseano Emanuel da Silva (Organizador). II. Título.
CDD 662.88

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora

+55 (42) 3323-5493

+55 (42) 99955-2866

www.atenaeditora.com.br

contato@atenaeditora.com.br

CONSELHO EDITORIAL

CONSELHO EDITORIAL

Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano
Profª Drª Amanda Vasconcelos Guimarães – Universidade Federal de Lavras
Prof. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás
Profª Drª Ariadna Faria Vieira – Universidade Estadual do Piauí
Prof. Dr. Arinaldo Pereira da Silva – Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará
Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás
Prof. Dr. Cirênio de Almeida Barbosa – Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. Dr. Cláudio José de Souza – Universidade Federal Fluminense
Profª Drª Daniela Reis Joaquim de Freitas – Universidade Federal do Piauí
Profª Drª. Dayane de Melo Barros – Universidade Federal de Pernambuco
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Prof. Dr. Fabrício Moraes de Almeida – Universidade Federal de Rondônia
Profª Drª Glécilla Colombelli de Souza Nunes – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Dr. Humberto Costa – Universidade Federal do Paraná
Prof. Dr. Joachin de Melo Azevedo Sobrinho Neto – Universidade de Pernambuco
Prof. Dr. João Paulo Roberti Junior – Universidade Federal de Santa Catarina
Profª Drª Juliana Abonizio – Universidade Federal de Mato Grosso
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Profª Drª Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná
Profª Drª Miranilde Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará
Prof. Dr. Sérgio Nunes de Jesus – Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia
Profª Drª Talita de Santos Matos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Tiago da Silva Teófilo – Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

PREFÁCIO

PREFÁCIO

Nas últimas décadas, o mundo tem testemunhado uma transformação profunda nas formas de produzir e consumir energia. A urgência climática, somada à necessidade de modelos econômicos mais limpos e sustentáveis, tem conduzido pesquisadores, governos e indústrias à busca por alternativas capazes de conciliar desenvolvimento e preservação ambiental. Nesse cenário, o Brasil desponta como protagonista ao unir duas das suas maiores riquezas: a vocação agrícola e a força da bioenergia. O etanol derivado da cana-de-açúcar já consolidou o país no mercado internacional de biocombustíveis. Contudo, o que este livro nos apresenta é um passo além — um olhar atento e investigativo sobre o futuro da matriz energética renovável por meio do Etanol de Segunda Geração (E2G), que representa uma resposta às tensões entre economia e ecologia, mostrando que os resíduos da própria produção podem se transformar em fonte energética de alto valor.

A partir de uma pesquisa rigorosa, fundamentada em estudos publicados entre 2018 e 2025, a obra percorre questões técnicas, ambientais, sociais e políticas que moldam o setor sucroenergético. Ao analisar 81 artigos, dos quais 56 selecionados por sua relevância científica, o trabalho evidencia tanto os avanços quanto os entraves que permeiam a produção do E2G no Brasil. Apresenta, de forma clara e crítica, os desafios relacionados ao alto custo tecnológico, às exigências de infraestrutura e à necessidade de investimento contínuo em pesquisa e inovação. Ao mesmo tempo, revela que o setor sucroalcooleiro não é estático: práticas sustentáveis vêm ganhando espaço, como a reutilização da água, o uso agrícola da vinhaça, a eliminação gradativa das queimadas e o aumento do aproveitamento energético da biomassa residual.

Este livro, portanto, convida o leitor a enxergar o E2G não apenas como um recurso alternativo, mas como uma estratégia essencial para o futuro energético e ambiental do país. Ao trazer uma análise profunda, atualizada e multidisciplinar, a obra se torna uma leitura fundamental para estudantes, pesquisadores, profissionais do setor e todos aqueles comprometidos com o desenvolvimento sustentável. Mais do que informar, este trabalho inspira. Ele nos lembra que os resíduos de hoje podem ser a energia de amanhã.

Os autores

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

COP-21 - Acordo do Clima de Paris

BCA - Bagaço de Cana-de-Açúcar

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento

DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio

EIA - Estudo de Impacto Ambiental

RIMA - Relatório de Impacto Ambiental

E2G - Etanol de Segunda Geração

CO₂ - Gás carbônico

GEE - Gases de Efeito Estufa

PIB - Produto Interno Bruto

PNPB - Programa Nacional de Produção e uso do Biodiesel - PNPB

Proálcool – Programa Nacional do Alcool

VANT - Veículos Aéreos Não Tripuláveis

SUMÁRIO

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REFERENCIAL TEÓRICO	3
2.1 Histórico da cana-de-açúcar e produção do etanol no Brasil.....	3
2.2 Composição química da biomassa lignocelulósica	5
2.2.1 Celulose.....	7
2.2.2 Hemicelulose.....	8
2.2.3 Lignina	9
2.3 Evolução dos processos de cultivo da cana-de-açúcar.....	11
2.3.1 Programa Nacional do Álcool (Proálcool)	11
2.3.2 Aumento da área cultivada e da produção de etanol	11
2.3.3 Mecanização, automação e agricultura de precisão	11
2.4 Etapas de processamento e beneficiamento na usina sucroalcooleira ..	13
2.4.1 Pesagem, amostragem e lavagem da cana-de-açúcar	13
2.4.2 Moagem da cana-de-açúcar	15
2.4.3 Tratamento do caldo de cana	15
2.4.4 Produção de açúcar	16
2.5 Etapas de produção do Etanol de Segunda Geração (E2G).....	17
2.5.1 Pré-tratamento	18
2.5.2 Hidrólise	19
2.5.3 Fermentação	21
2.6 Impacto ambientais gerados no setor sucroalcooleiro	22
2.7 Resíduos gerados e as respectivas formas de reaproveitamento	22
3. METODOLOGIA	25
4. RESULTADOS.....	27

SUMÁRIO

SUMÁRIO

4.1 Impactos socioambientais ocasionados pela indústria sucroalcooleira..	27
4.2 Políticas governamentais para a indústria sucroalcooleira	29
4.3 Produção de Etanol de Segunda Geração (E2G)	31
4.4 Aproveitamento de resíduos gerados no setor sucroalcooleiro.....	33
4.5 Eficiência das diferentes etapas do processo de produção do etanol...	35
4.6 Utilização de tecnologias para a geração de etanol	37
5. DISCUSSÕES.....	40
5.1 Impactos socioambientais ocasionados pela indústria sucroalcooleira..	40
5.2 Políticas governamentais para a indústria sucroalcooleira	42
5.3 Produção de Etanol de Segunda Geração (E2G)	42
5.4 Aproveitamento de resíduos gerados no setor sucroalcooleiro.....	43
5.5 Eficiência das diferentes etapas do processo de produção do etanol...	44
5.6 Utilização de tecnologias para a geração de etanol	45
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	48
REFERÊNCIAS	49
ÍNDICE REMISSIVO.....	58
AUTORES.....	63



1. INTRODUÇÃO

O atual cenário mundial demanda uma quantidade cada vez maior de combustíveis provenientes de fontes de energias renováveis e capazes de reduzir a emissão de gases que contribuem para o efeito estufa e variações climáticas, que vem influenciando a natureza e suas inter-relações com os inúmeros seres vivos que nela habitam. Diante disso, inúmeras fontes de energias renováveis vêm ganhando destaque, entre as quais o hidrogênio verde e as diferentes fontes de energia elétrica mais limpas (hidrelétrica, eólica, solar entre outras), capazes de promover uma maior segurança energética e, conseqüentemente, maior desenvolvimento econômico e sustentável (COELHO; BRAGAGNOLO, 2022; DUARTE et al., 2022; TEIXEIRA et al., 2019; VICENTE et al., 2024).

Dentre as possibilidades para se obter biocombustíveis se encontra o etanol que pode ser produzido, a partir da biomassa de cana-de-açúcar (Brasil), milho e beterraba (Estados Unidos) dentre outras fontes. O Brasil detém a tecnologia no processo de produção de etanol a partir da cana-de-açúcar, ocasionando a geração de uma grande quantidade de biomassa residual proveniente das diferentes etapas dos processos industriais empregados no segmento sucroalcooleiro e que apresenta baixo valor agregado (MENEZES et al., 2024; SILVA; QUEIROZ, 2022; TEIXEIRA et al., 2019; ULIANA et al., 2024; VASI; KNEZ; LEITGEB, 2021). Neste contexto, emergem-se inúmeras pesquisas e o desenvolvimento de tecnologias que passam a propor a obtenção de etanol a partir da biomassa residual gerada na produção do combustível de primeira geração, frente a redução do impacto socioambiental e a possibilidade de proporcionar uma redução significativa em relação as fontes de combustíveis fósseis. Além disso, contribui com a redução da taxa de emissão de gás carbônico, oferece melhor aproveitamento dos recursos naturais e agrega maior produtividade para as usinas (GUIDUCCI et al., 2021; LORENZI; ANDRADE, 2019; SILVA; QUEIROZ, 2022; VICENTE et al., 2024).

O Brasil é o segundo maior produtor de etanol do mundo, se constituindo em uma das principais *commodity* de exportação do agronegócio brasileiro. Neste contexto, o país se destaca nos aspectos de avanços tecnológicos que proporcionam aumento

na eficiência produtiva e nas questões ambientais. Entretanto, a subutilização dos resíduos gerados na produção se constitui em uma lacuna que impede o melhor aproveitamento desta biomassa e, conseqüentemente, aumento na produtividade do biocombustível. Neste cenário, a produção de Etanol de Segunda Geração (E2G) se apresenta como uma alternativa promissora e viável, mas que possui um elevado custo de produção, o que dificulta a sua maior competitividade em relação a produção do Etanol de Primeira Geração (E1G) e combustíveis provenientes de outras fontes (BORGES; NUNES; SOUSA, 2020; LORENZI; ANDRADE, 2019; SANTOS; CASTILLO, 2020; SOARES; JUNIOR, 2021; VICENTE et al., 2024). Esse custo se deve à maior complexidade dos processos tecnológicos envolvidos e ao investimento em maior infraestrutura e pesquisa, o que melhoraria tanto a viabilidade comercial quanto a sua produção em maior escala.

O presente trabalho visa investigar os desafios, as perspectivas e a viabilidade econômica para a produção de E2G, a partir da biomassa residual obtida no processo de produção do etanol proveniente da cana-de-açúcar. Para que o objetivo possa ser alcançado, adotar-se-á os seguintes passos: i) conceituar o significado de E2G e as principais diferenças em relação ao obtido na primeira geração; ii) destacar a importância do biocombustível para a obtenção de uma maior sustentabilidade nos processos de produção desenvolvidos no segmento sucroalcooleiro; iii) estipular a origem dos principais constituintes da biomassa residual; iv) apresentar os diferentes processos industriais envolvidos na produção do E2G; v) identificar os principais custos econômicos/financeiros envolvidos na produção do E2G e; vi) avaliar os impactos ambientais e socioeconômicos envolvidos na produção do biocombustível de segunda geração.



2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Histórico da cana-de-açúcar e produção do etanol no Brasil

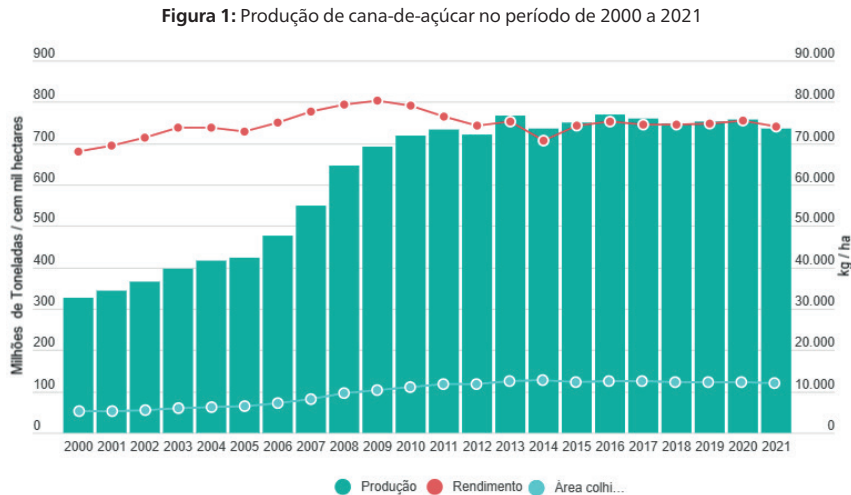
A cana-de-açúcar adentrou no Brasil logo após o descobrimento do país, passando a ser cultivada e apresentando importância econômica entre os séculos XVI e XVII, constituindo-se na principal riqueza gerada neste mesmo período. As primeiras mudas a serem plantadas eram provenientes da Ilha da Madeira/Portugal e o início do cultivo datam de 1532, na capitânia de São Vicente na atual Baixada Santista, no Estado de São Paulo. Entretanto, os primeiros engenhos começaram a operar no Nordeste Brasileiro, nos atuais estados de: Alagoas, Bahia, Paraíba, Pernambuco e Sergipe. O cultivo da cana-de-açúcar encontrou um clima (tropical quente e úmido), solo fértil e, infelizmente, a mão-de-obra escrava proveniente do continente africano, consolidando-se em uma produção canavieira no Brasil voltada, inicialmente, para a produção de açúcar que originou um importante ciclo econômico no país colônia de Portugal (ARAÚJO; FILHO; COLIN, 2019; BRITO; MATAI; SANTOS, 2024; MEDEIROS, 2024).

Em função da grande dependência do petróleo e as constantes oscilações no preço do combustível fóssil, houve um grande incentivo e estímulo para expandir o setor sucroalcooleiro no país, a partir de 1970 com a criação do Programa Nacional do Alcool (Proálcool). Entretanto, com a estabilização do preço do petróleo no mercado internacional, associado a falta e má gestão das usinas e a retirada de incentivos e subsídios por parte do governo, levou muitas usinas a falência e, consequentemente, interrupção do Proálcool (BARCELOS, 2021; MATOS; MARAFON, 2020; SANTOS; CASTILHO, 2020; SILVA; POLLI, 2020).

Outrossim, a partir do ano de 2000 iniciou um avanço da canavicultura impulsionada em função do surgimento do primeiro motor *flex-fuel* (gasolina e álcool) por uma empresa alemã que passou a produzir em série veículos automotores, resultando no crescimento da frota de veículos movidos a motor *flex*, que passou a representar 16% de toda a nova frota vendidas no Brasil em março de 2004. Dois anos depois, este percentual saltou para 76,6%, atingindo 92% em 2010. Em função do aumento da demanda por etanol, ocorreu a expansão da área destinada

ao plantio da cana-de-açúcar e, consequentemente, a ampliação do número de usinas sucroalcooleiras no território brasileiro, passando a contar com 418 unidades distribuídas pelo território brasileiro até o ano de 2020, da seguinte forma: região Sudeste com 235; o Centro-Oeste com 81; Nordeste com 73; Sul com 34 e a Região Norte conta 5 unidades sucroalcooleiras (ALVES et al., 2021; BARCELOS, 2021; MEDEIROS, 2024; NOVACANA, 2021; SANTOS; CASTILHO, 2020).

Neste contexto, a canavicultura vem se consagrando como uma das culturas mais importantes do agronegócio brasileiro, sendo responsável por 2% do Produto Interno Bruto (PIB) gerando emprego, renda e novos empreendimentos em todo o território nacional. Atualmente, o Brasil se constitui no maior produtor de cana-de-açúcar e exportador de açúcar do mundo e ocupa o segundo lugar como maior produtor de etanol, ficando atrás somente dos Estados Unidos. Além disso, a produção de etanol reduz não só a dependência por fontes de combustíveis fósseis, mas sobretudo a possibilidade de redução na emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) e a pegada de carbono (ARAÚJO; FILHO; COLIN, 2019; BRITO; MATAI; SANTOS, 2024; CARVALHO; PEREIRA, 2024; COELHO; BRAGAGNOL, 2022), conforme definido pelo Acordo do Clima de Paris (COP-21), o que vem contribuindo para a expansão do cultivo anualmente, conforme apresentado pelo gráfico na Figura 1.



Fonte: IBGE (2021).

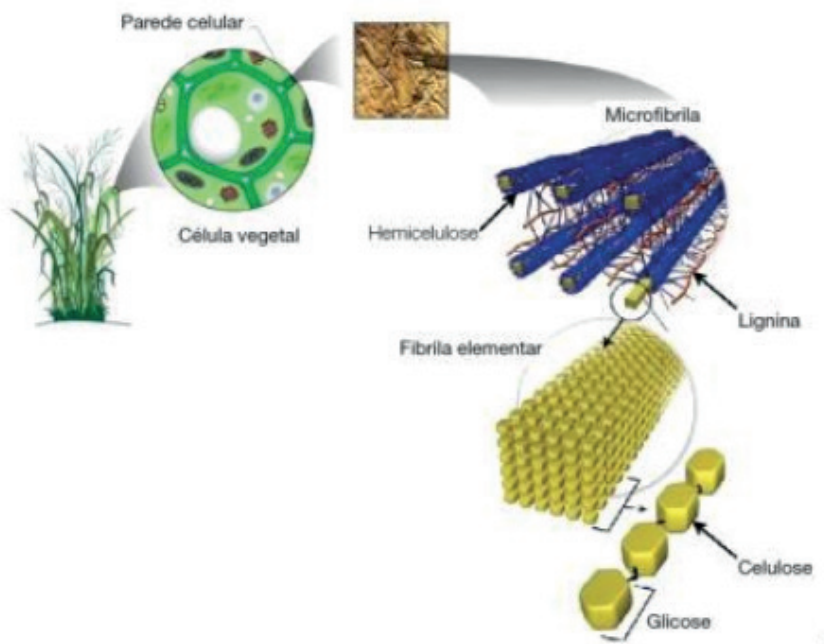
A partir do gráfico, observa-se que no período de 2000 a 2021, a maior produção de cana-de-açúcar ocorreu nos anos de 2013 e 2016, apresentando queda a partir do ano de 2021 que fechou a produção em 578 milhões de toneladas de cana-de-açúcar cultivada em uma área de 9,75 milhões de hectares, conforme informou a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). Já a safra referente ao ciclo de 2022/2023 apresentou um aumento de 13,6% em relação a 2021/2023 e uma redução de 3,3% registrado no ciclo de 2023/2024, o que representa 654 milhões de toneladas de cana-de-açúcar produzida, a queda na safra atual em relação à anterior foi ocasionada em função do baixo índice pluviométrico associado a altas temperaturas registradas na região Centro-Sul (D'ALESSANDRO; CAVICHOLI, 2024; DIAS, 2021; EMBRAPA, 2024; MORETTI; CAMPOS; MADER, 2024).

2.2 Composição química da biomassa lignocelulósica

O termo biomassa pode ser designado como todo recurso proveniente de matéria orgânica de origem vegetal, que possui energia e que ao ser processada irá fornecer diferentes formas de bioenergia mais elaboradas e adequadas para determinado uso. A natureza dispõe de milhares de fontes capazes de fornecer biomassa, tais como: a madeira, os resíduos de serrarias, carvão vegetal, biogás (proveniente da decomposição do lixo orgânico e resíduos agropecuários), biocombustíveis entre tantos outros (BORGES; GIGLIOLLI, 2020; SILVA; SILVA, 2021; VIANA; SANTOS, 2023). A parede das células vegetais são constituídas por uma diversidade de substâncias, entre as quais: polissacarídeos, proteínas, fenóis, sais minerais entre tantas outras. Os polissacarídeos celulose, hemicelulose e pectina representam cerca de 90% de toda o peso seco da parede vegetal. Em geral, a biomassa é constituída em média por: i) 43% de celulose; ii) 23% de hemicelulose e; iii) 24% de lignina. Possuindo grande visibilidade no mercado mundial em função de seu enorme potencial para ampliar a matriz energética proveniente de fontes renováveis (BRODA; YELLE; SERWANSKA, 2022; GROTTTO et al., 2021; PONTE et al., 2019).

As células vegetais apresentam inúmeras estruturas, entre as quais: membrana plasmática, lamela média e parede celular, sendo que nesta última se encontra a maior parte do material lignocelulósico, sendo constituída por: i) **microfibrilas** que se encontram em forma de espirais, conferindo força e flexibilidade ao material, entrelaçadas por fios de hemicelulose, cuja função é atuar como um elo químico entre a celulose e a lignina constituindo assim a rede fibrosa; ii) **lamela média e a membrana plasmática** são encontradas na composição da lignina, cuja função é proporcionar maior resistência da estrutura a ataques químicos e enzimáticos, conforme esquematizado na Figura 2.

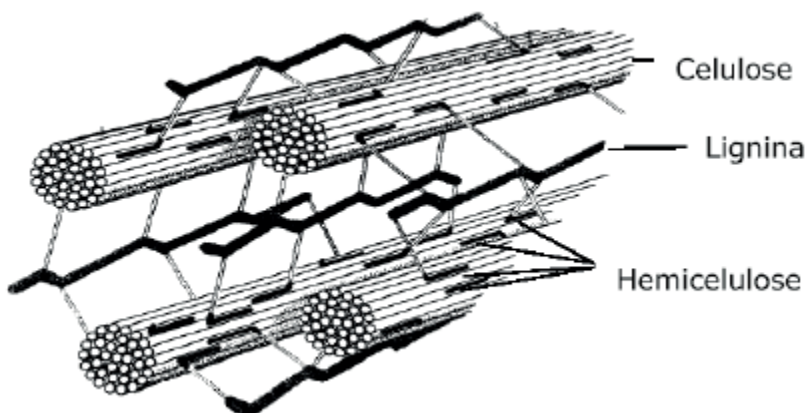
Figura 2: Estrutura da parede celular do combo da cana-de-açúcar



Fonte: Ponte et al., (2019).

Em função do grande percentual de lignina presente na composição da estrutura da celulose, conferindo maior proteção e resistência dos polissacarídeos ao processo de hidrólise e com posterior fermentação, faz com que a obtenção de E2G seja mais complexa e que exija tecnologias mais sofisticadas e com custo mais elevado, tais como elementos ácidos e/ou enzimáticos com o objetivo de desagregar os açúcares e aumentar a capacidade de remoção de lignina. Em relação a composição química elementar, o resíduo lignocelulósico é constituído por: 44,6% de carbono; 44,5% de oxigênio; 5,8% de hidrogênio; 0,6% de nitrogênio; 0,1% de enxofre e 4,4% de outros elementos químicos. Em termos de ligações químicas, prevalece a ligação de hidrogênio e covalente nas estruturas da celulose, hemicelulose e lignina (BASERA; CHAKRABORTY; SHARMA, 2024; COSTA et al., 2020; GROTTTO et al., 2021), conforme apresentada na Figura 3.

Figura 3: Polímeros constituintes dos materiais lignocelulósicos



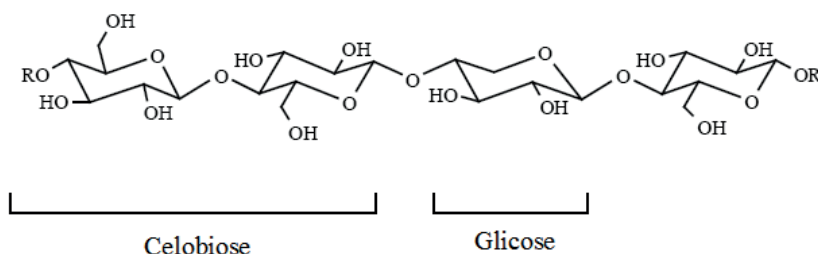
Fonte: Ponte et al., (2019).

Entretanto, cabe ressaltar a importância de se conhecer melhor tanto a estrutura quanto a composição química dos três maiores constituintes da biomassa vegetal, a saber: celulose, hemicelulose e lignina.

2.2.1 Celulose

Consiste em um polissacarídeo constituído por um único tipo de unidade de açúcar e com uma estrutura relativamente simples, sendo considerado um polímero, no qual a microfibrila é formada por centenas de monômeros (glicose e celobiose) unidas por ligações glicosídicas β -1,4 (COSTA et al., 2020; GROTTTO et al., 2021; VASI; KNEZ; LEITGEB, 2021), conforme apresentado na Figura 4.

Figura 4: Estrutura da celulose, a partir de unidade de celobiose e glicose

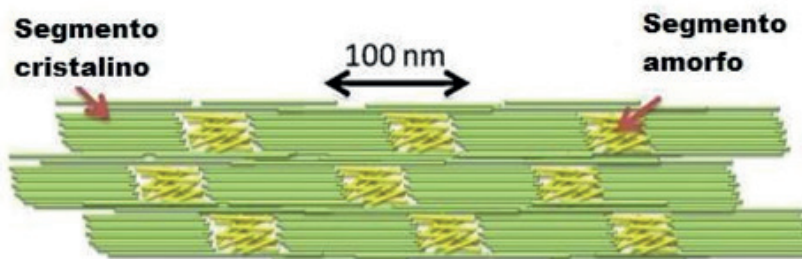


Fonte: Hoffmann et al (2021).

Além disso, a celulose é encontrada na forma de microfibrilas apresentando uma região bem estruturada denominada região cristalina e uma menos organizada chamada de amorfa, conforme apresentado na Figura 5.

Figura 5: Diferentes formas de visualizar o modo de distribuição da celulose cristalina e amorfa na microfibrila

a) Feixe de Celulose



b) Celulose nanoestruturada



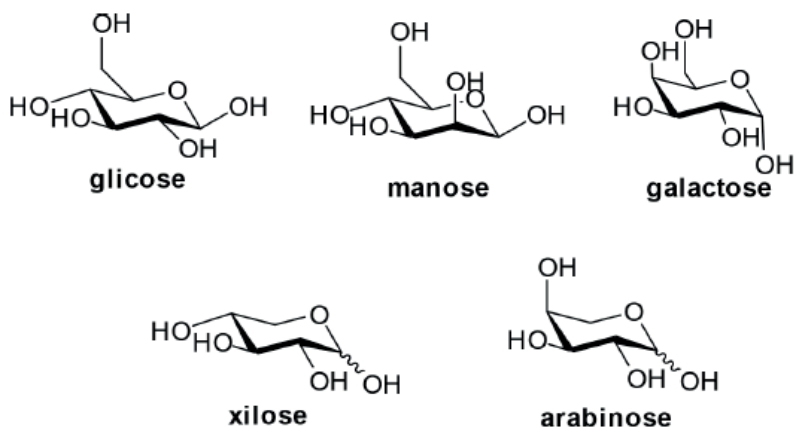
Fonte: Hoffmann et al (2021).

Por apresentarem ligações mais fortes, tais estruturas são mais rígidas e, consequentemente, apresentam maior resistência a degradação química e biológica do que a hemicelulose.

2.2.2 Hemicelulose

Se constituem em macromoléculas formadas por estruturas de carboidratos poliméricos, de natureza mais curta e ramificada, que não apresentam regiões cristalinas. Estas estruturas poliméricas são constituídas em grande parte por várias unidades de açúcares do tipo pentoses (glicose, manose, galactose, xilose e arabinose), conforme apresentado pela Figura 6.

Figura 6: Exemplos de monossacarídeos que compõem a hemicelulose



Fonte: Scopel (2019).

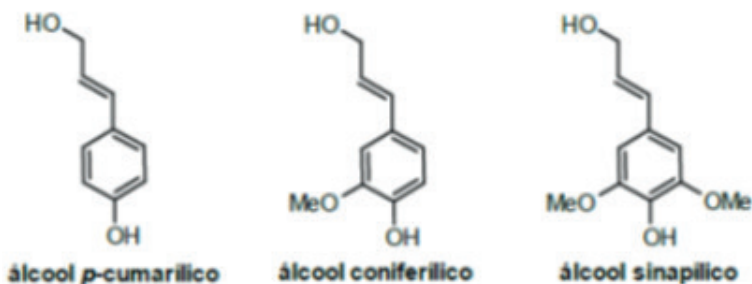
Além disso, a hemicelulose é composta por ácidos urônicos (galactourônico e glucurônico). Em função de não possuírem uma estrutura cristalina, são moléculas mais susceptíveis a sofrer o processo de hidrólise química em condições mais brandas, visto que a diversidade de ligações e ramificações associado a presença de diferentes unidades monoméricas contribuem para que a hemicelulose possua uma estrutura que seja mais fácil de romper as ligações químicas (COSTA et al., 2021; HOFFMANN et al., 2021; SUDHAKAR; NAIK, 2022).

2.2.3 Lignina

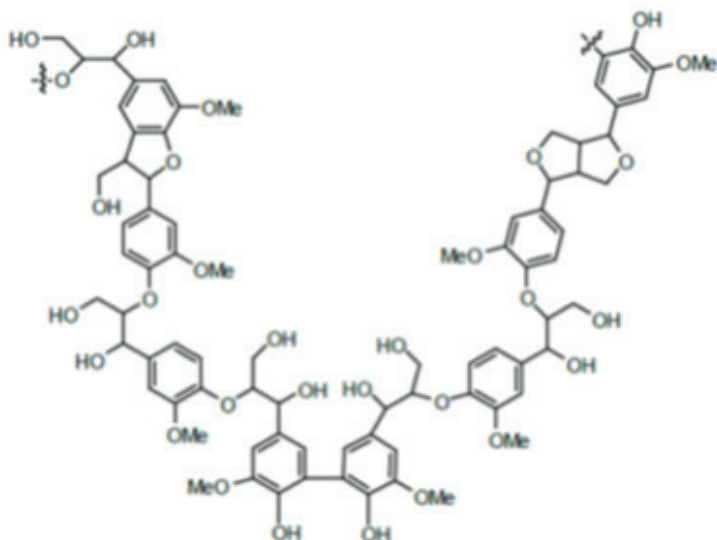
Consiste em um polímero bastante importante e presente nas plantas, ficando atrás somente da celulose em termos de abundância. É uma macromolécula que apresenta uma forma tridimensional, ramificada e composta por unidade de p-propilfenol, não apresentando estrutura cristalina e, consequentemente, sendo considerada um polímero amorfo, proveniente da polimerização de três monômeros que se diferem pela substituição que apresentam no anel aromático, sendo eles: o álcool cumárilico, álcool coniferílico e o álcool sinapílico (COSTA et al., 2020; GROTTTO et al., 2021; VASI; KNEZ; LEITGEB, 2021), conforme apresentado na Figura 7.

Figura 7: (a) álcoois formadores da molécula de lignina,
(b) estrutura proposta para a lignina

a)



b)



Fonte: Siqueira (2020).

A presença da lignina é capaz de promover maior rigidez nas fibras de celulose, conferindo a planta maior resistência ao ataque de micro-organismos e a degradação da celulose e hemicelulose. Em função disso, a lignina se constitui em uma barreira de proteção contra a ação das enzimas celulasas e hemicelulasas (HOFFMANN et al., 2021; SUDHAKAR; NAIK, 2022; VASI; KNEZ; LEITGEB, 2021).

2.3 Evolução dos processos de cultivo da cana-de-açúcar

2.3.1 Programa Nacional do Álcool (Proálcool)

No ano de 1975, foi instituído o Proálcool que tinha por objetivo garantir o fornecimento de combustíveis renováveis, bem como apoiar e estimular a indústria açucareira frente a queda de preço do açúcar no ano anterior, bem como a crise de petróleo iniciada em 1973 e que se estenderia por cerca de 20 anos. O Proálcool foi dividido em três fases, sendo: **i) primeira fase:** compreende os anos de 1975 a 1978, logo após a crise do petróleo que elevou o preço do barril de US\$1,90 para US\$11,20; **ii) segunda fase:** as metas passaram a se constituir na adição de etanol na gasolina e na produção de etanol hidratado, a fim de se utilizar em veículos automotores movidos exclusivamente a álcool; **iii) terceira fase:** se inicia em 1986 e se estende até o ano de 2003, marcada pelo processo de desregulamentação do Programa em 1990, a partir do aumento do preço do açúcar e, conseqüentemente, sua liberação para a exportação, o que resultou na redução do processo de produção do etanol e das vendas de veículos movidos a álcool, sendo extinta a produção de automotores nos anos de 1990 (BARCELOS, 2021; STARLING; BORGES; SQUEFF, 2025; STOLF; OLIVEIRA, 2020).

2.3.2 Aumento da área cultivada e da produção de etanol

A partir da criação do motor *flex-fuel* (gasolina e álcool) no ano de 2002, os consumidores passaram a optar pelo abastecimento de um ou dos dois combustíveis a depender da variação do preço dos combustíveis no mercado. De 2004 a 2010, a produção de carros *flex-fuel* saltou de 16 para 92%, exigindo a expansão da área destinada a cultura da cana-de-açúcar e, conseqüentemente, o aumento de usinas canavieiras no território nacional, alcançando a marca de 418 usinas sucroalcooleiras no ano de 2021 (ALVES et al., 2021; AMORIM; SILVA; IZEPPE, 2024). Na safra de 2023/2024, o Brasil contava com 446 usinas sucroalcooleiras com capacidade para produzir 35,4 bilhões de litros de etanol e 680 milhões de toneladas de açúcar, cuja área cultivada foi de cerca de 8,8 milhões de hectares em todo o território nacional, cuja produtividade média por hectare foi estimada em 75.451 kg (AMORIM; SILVA; IZEPPE, 2024; BRITO; MATAI; SANTOS, 2024).

2.3.3 Mecanização, automação e agricultura de precisão

A mecanização agrícola na canavicultura envolve as etapas de preparo do solo, o plantio, o trato e a colheita. O aumento de colheitadeiras nos canaviais vem crescendo exponencialmente, sendo que no período de 2008 até 2017, houve um aumento de 1095 para 5891, que corresponde a 310%, segundo informações da CONAB. Exemplos de colheitadeiras são apresentadas na imagem da Figura 8.

Figura 8: Colheitadeiras em uso nas lavouras de cana-de-açúcar



Fonte: Acervo dos autores (2025).

O estado de São Paulo concentrava 67% de todas as colheitadeiras em uso no país, visto que o setor sucroalcooleiro paulista assinou um Protocolo Agroambiental, a fim de colocar fim nas queimadas que eram realizadas nos canaviais. Este aumento de colheitadeiras se espalhou por todo o território nacional, ocasionando a redução da mão-de obra braçal durante o período de colheita da cana-de-açúcar (LIMA; CARVALHO, 2023; LIMA; RUMIN, 2023; MELLO; SANTOS; DUTRA, 2025).

Outro avanço tecnológico no setor canavieiro está relacionado ao uso de Drones e Veículos Aéreos Não Tripuláveis (VANT) em inúmeras atividades, tais como: mapeamento de áreas, aplicação de agrotóxicos, levantamento de áreas com erosões dentre outros, conforme imagens na Figura 9.

Figura 9: VANT's em uso na canavicultura



Fonte: Acervo dos autores (2025).

A aplicação de tais tecnologias permitem obter informações em tempo real, diminuem o uso de planilhas manuais e como consequência a redução de erros e atrasos na entrega de dados, reduzindo os custos na produção e, consequentemente, o aumento na rentabilidade financeira (ASSAIANTE, CAVICHIOLI, 2020; LANÇONI et al., 2020; RODRIGUES; GERON, 2023).

Entretanto, há de se destacar que o processo de mecanização e automação na canavieira ainda que gerasse novas oportunidades de emprego, ocasionou um desemprego em massa dos trabalhadores que atuavam no corte manual da cana-de-açúcar, contribuindo com o aumento de problemas sociais nas regiões onde se desenvolve a canavieira (FELTRE; TULON, 2023).

2.4 Etapas de processamento e beneficiamento na usina sucroalcooleira

A produção de açúcar e álcool na indústria sucroalcooleira envolve inúmeras etapas, que vão desde o preparo e plantio do canavieiro até a obtenção do açúcar e etanol. Dentre as inúmeras operações unitárias, será apresentado e discutido as seguintes etapas: pesagem, lavagem, moagem, extração do caldo, cozimento, cristalização, secagem e estocagem do açúcar (ELIHIMAS; SPIGOLON, 2022; LIMA; CASTRO; ROCHA, 2022; RODRIGUES; HERCULANI, 2020; SILVA; ARANTES, 2023).

2.4.1 Pesagem, amostragem e lavagem da cana-de-açúcar

O processo de pesagem da cana-de-açúcar é de extrema importância para o controle da produção e da produtividade. Além disso, nesta etapa é realizada a amostragem da cana, a fim de controlar e realizar o pagamento aos fornecedores e aos prestadores de serviço de transporte (ELIHIMAS; SPIGOLON, 222; LIMA; CASTRO; ROCHA, 2022; RODRIGUES; HERCULANI, 2020), conforme apresentado na Figura 10.

Figura 10: Processo de pesagem de caminhões na entrada da usina sucroalcooleira



Fonte: Acervo dos autores (2025).

Nesta etapa, é de fundamental importância realizar o investimento em melhorias na infraestrutura de pesagem de caminhões, com o intuito de aumentar a velocidade de pesagem e recebimento de caminhões cada vez mais longos e pesados. A etapa de amostragem é realizada a partir da retirada de uma pequena quantidade de amostra de cana-de-açúcar em caminhões previamente sorteados no processo de

pesagem. Tal amostra passa por uma forrageira e uma prensa hidráulica que irá separar o caldo da cana-de-açúcar, a fim de que se possa determinar os parâmetros que identificam a qualidade da cana, tais como o Brix e Pol (ELIHIMAS; SPIGOLON, 2022; LIMA; CASTRO; ROCHA, 2022;), conforme imagem apresentada na Figura 11 abaixo.

Figura 11: Amostragem da cana-de-açúcar para pagamento da carga



Fonte: Acervo dos autores (2025).

Entretanto, a sonda horizontal vem sendo substituída por sondas amostradoras do tipo oblíqua que possibilita obter uma amostra mais representativa no processo de amostragem. Após tal etapa, inicia-se o processo de descarregamento da cana na qual é lavada por meio de um sistema de circuito fechado de água, semelhante a uma piscina de concreto para decantação de impurezas mineral presentes na planta (LIMA; CASTRO; ROCHA, 2022; RODRIGUES; HERCULANI, 2020 SILVA; ARANTES, 2023), conforme imagens da Figura 12.

Figura 12: Processo de lavagem da cana-de-açúcar



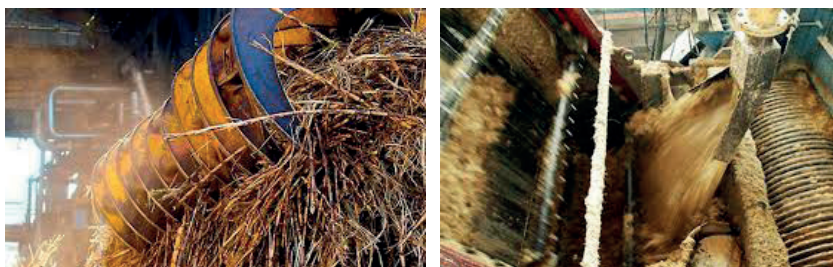
Fonte: Acervo dos autores (2025).

No entanto, surgiram sistemas de lavagem e limpeza da cana a seco por ventilação que permite boa eficiência para remoção da palha, mas não para impurezas inorgânicas. A próxima etapa consiste na quebra dos colmos e o rompimento da estrutura da cana, a fim de se realizar a extração do caldo contido nos colmos e facilitar o processo de moagem.

2.4.2 Moagem da cana-de-açúcar

Nesta etapa exige-se 88% da quebra de colmos e o rompimento da estrutura da cana-de-açúcar. A preparação se utiliza de um nivelador, um picador e um desfibrador pesado que são acionados por turbinas a vapor, constituído por rotor giratório com lâminas afiadas que giram e cortam os colmos da cana. Posteriormente, ocorre o lançamento da cana desfibrada em um espalhador que é transportada por uma esteira a uma velocidade de 100 m/min e que possui um eletroímã suspenso, a fim de reter materiais ferrosos (LIMA; CASTRO; ROCHA, 2022; RODRIGUES; HERCULANI, 2020; SILVA; ARANTES, 2023), conforme apresentado na Figura 13.

Figura 13: Moagem da cana-de-açúcar



Fonte: Acervo dos autores (2025).

Posteriormente a esta etapa, inicia-se o processo de tratamento do caldo de cana, que será apresentado no próximo tópico.

2.4.3 Tratamento do caldo de cana

O tratamento do caldo tanto para a produção de álcool quanto para o açúcar envolve inúmeros processos, tais como: peneiramento, calagem, aquecimento, decantação, concentração e resfriamento. Nesta etapa é de suma importância que o processo de limpeza da cana tenha sido realizado com êxito nas etapas anteriores. Posteriormente, ocorre o processo de peneiramento que leva a redução das partículas leves das pesadas, sendo utilizado peneiras e hidrociclones (CASADO; BARBOSA, 2023;

SERAPIÃO et al., 2025; SILVA; RODOLPHO, 2022). Em seguida, o caldo é submetido ao contato com o leite de cal, que promove a floculação e, consequentemente, a decantação das impurezas e a proteção dos equipamentos contra a corrosão. Além disso, visa alcançar um pH próximo de 7,0, visto que neste ponto ocorre a maior remoção de nutrientes do caldo. Já o pH do caldo decantado deve estar na faixa de 5,6 a 5,9, visto que reduz a remoção de nutrientes, ação corrosiva do caldo sobre os equipamentos e leva a redução de micro-organismos com capacidade de contaminar o caldo (OLIVEIRA; MADALENO, 2023; SERAPIÃO et al., 2025; SILVA; RODOLPHO, 2022), parte das operações unitárias ocorrem nos equipamentos apresentados nas imagens contidas na Figura 14.

Figura 14: Decantadores utilizados no tratamento do caldo



Fonte: Acervo dos autores (2025).

O caldo é concentrado para posterior produção e armazenamento do xarope que terá a elevação do teor de açúcar total no mosto, bem como o aumento do teor alcoólico para a produção do etanol.

2.4.4 Produção de açúcar

Inicia-se após as etapas de extração e tratamento do caldo, na qual ocorre a evaporação da água em processo de múltiplo efeito. Entretanto, a cristalização da sacarose não é aconselhável em função de ordens técnicas e econômicas: maior consumo de vapor; dificuldade de manuseio da massa cozida; necessidade de maior número de equipamentos e de operadores. O processo de evaporação compreende a concentração do caldo clarificado até a obtenção de um líquido denso, de cor marrom ou caramelo, sem sinal de sacarose cristalizado, denominado xarope, que posteriormente serão bombeados a tachos de cozimento, a fim de obter o açúcar cristalizado (OLIVEIRA; MADALENO, 2023; SERAPIÃO et al., 2025; SILVA; RODOLPHO, 2022), conforme apresentado pela Figura 15.

Figura 15: Clarificação e envasamento do açúcar cristalizado



Fonte: Acervo dos autores (2025).

2.5 Etapas de produção do Etanol de Segunda Geração (E2G)

O E2G consiste em um biocombustível produzido a partir de biomassa lignocelulósica, que é gerado por intermédio de métodos químicos ou utilizando-se técnicas avançadas, a fim de promover a quebra das moléculas de celulose em açúcares que serão utilizados no processo de fermentação. Diante disso, faz-se necessário submeter a biomassa a diferentes etapas de tratamento físico e/ou químicos antes de promover o processo de hidrólise, a fim de se obter o etanol (ALMEIDA; NASCIMENTO, 2021; BARBOSA et al., 2020; MARINHO et al., 2020; OLIVEIRA; NUNES; SOUSA, 2020). Entre as principais etapas de tratamento para a produção do E2G, se destacam: o pré-tratamento, hidrólise e a fermentação, conforme representadas pelo esquema da Figura 16.

Figura 16: Representação esquemática da produção de E2G a partir da biomassa lignocelulósica



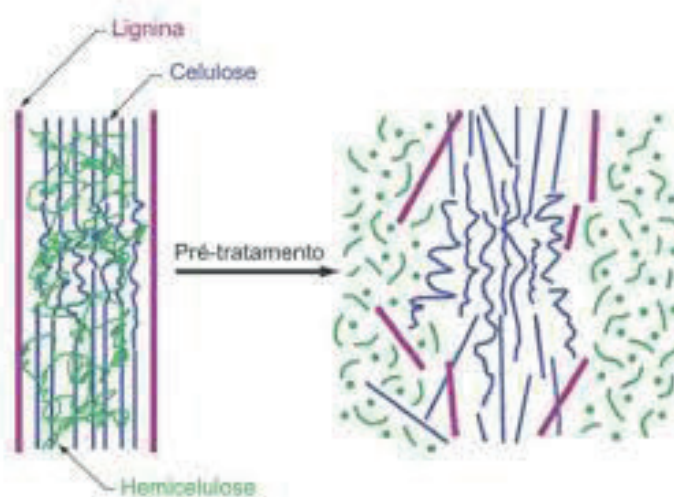
Fonte: Adaptado de Elrayies (2018).

As principais etapas do processo de produção do E2G são pré-tratamento, hidrólise e a fermentação que serão apresentadas e discutidas nos subtópicos a seguir.

2.5.1 Pré-tratamento

Nesta etapa ocorre tanto a quebra da estrutura cristalina da celulose quanto a remoção/alteração da lignina e da hemicelulose, a fim de promover maior efetividade de ação das enzimas (celulase e hemicelulase) sobre a fibra da biomassa lignocelulósica, aumentando a eficiência do processo de hidrólise que ocorre posteriormente a presente etapa. Entre os diferentes métodos de pré-tratamento, podem ser citados: i) os físicos (redução do tamanho das partículas); ii) químicos (utilização de álcalis, ácidos, solventes dentre outros) e; iii) biológicos (emprego de enzimas e/ou fungos) bem como a combinação de todos estes. Entretanto, os métodos que vem despertando maior atenção e estudo da comunidade científica são os químicos e os combinados, visto que estes conseguem remover a lignina sem degradar a celulose (SANT'ANNA; TABAI; MALDONADO, 2019; SANTOS et al., 2021; RUIZ, 2021), conforme apresentado na Figura 17.

Figura 17: Pré-tratamento da biomassa lignocelulósica



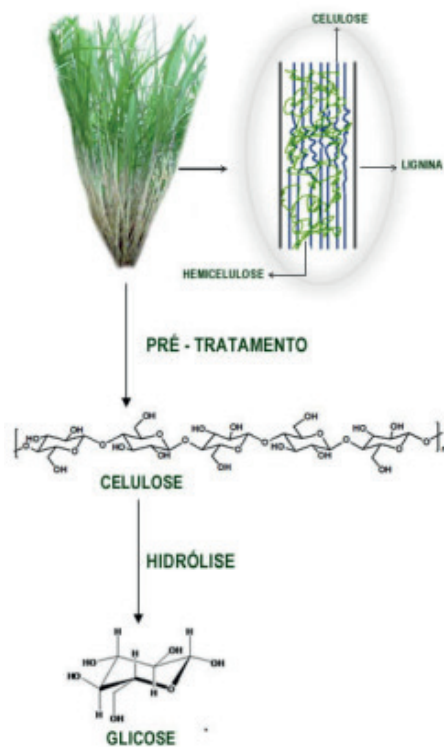
Fonte: Gunes et al., (2019).

Tal etapa é de suma importância para que o processo de hidrólise possa ser bem sucedido, conforme será apresentado no próximo tópico.

2.5.2 Hidrólise

Nesta etapa, o bagaço de cana-de-açúcar entra em contato com vapor saturado em contrafluxo que passa pela prensa de rosca e chega até o reator, mantendo-se certa temperatura e pressão com o auxílio da ação de ácidos. Logo, a biomassa já acidificada realiza a hidrólise da celulose e hemicelulose em açúcares fermentáveis, que serão convertidos na produção de etanol. O processo de hidrólise pode ser realizado de duas formas, a saber: tratamento com ácido diluído à alta temperatura ou pelo uso do ácido concentrado à baixa temperatura (BARBOSA et al., 2020; BORGES; GIGLIOLLI, 2020; MARINHO et al., 2020), conforme apresentado pelo esquema da Figura 18.

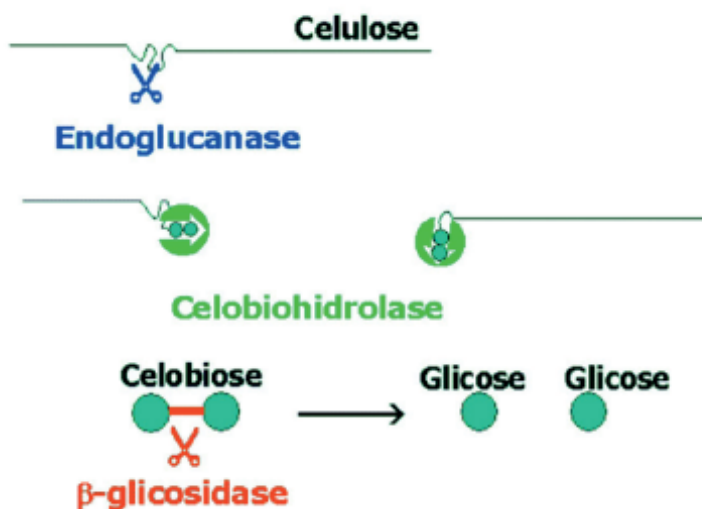
Figura 18: Representação esquemática do processo de hidrólise ácida



Fonte: Gunes et al., (2019).

A hidrólise enzimática, apesar de apresentar custos mais elevados, possui rendimentos mais efetivos, visto que não leva a geração de inibidores e é ambientalmente mais vantajosa. Neste processo, pode ser utilizado a adição de β -glicosidades ou mesmo a remoção de açúcares durante tal processo, podendo ser aprimorado em função da adição de surfactantes tensoativos. Além disso, nesta etapa ocorre o processo de hidrólise da celulose por meio da enzima celulase que apresenta baixo rendimento em função da alta estrutura cristalina da celulose (BARBOSA et al., 2020; BORGES; GIGLIOLLI, 2020; MARINHO et al., 2020), conforme apresentado pelo esquema da Figura 19.

Figura 19: Representação esquemática da ação catalítica do complexo enzimático (celulase) sobre celulose com geração de glicose



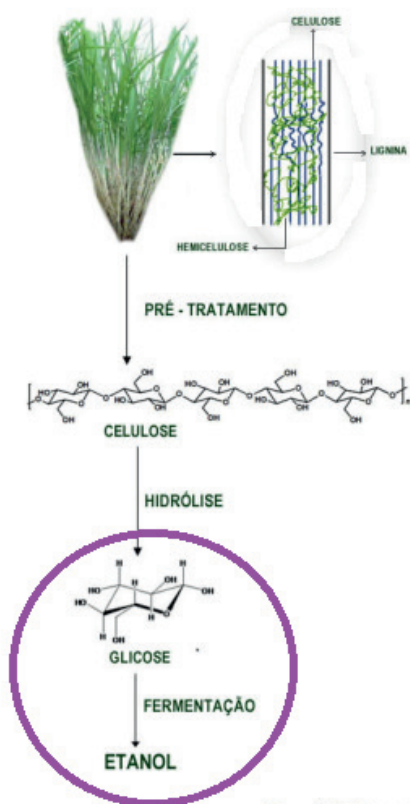
Fonte: Acervo dos autores (2025).

Na hidrólise enzimática, o rendimento de açúcares é inferior a 20%, enquanto nos processos de produção de etanol, no qual se utiliza etapas de pré-tratamento, o percentual alcança 90% (BARBOSA et al., 2020; BORGES; GIGLIOLLI, 2020; MARINHO et al., 2020).

2.5.3 Fermentação

O processo de fermentação ocorre após a etapa de hidrólise e é realizado por micro-organismos como a levedura *Saccharomyces cerevisiae*, que atua nos açúcares passíveis de fermentação em uma solução, levando a produção de etanol e gás carbônico. Além disso, a levedura é responsável por produzir a enzima invertase, que hidrolisa o dissacarídeo sacarose ($C_{12}H_{22}O_{11}$) em duas moléculas de monossacarídeos (D-glicose e D-frutose), convertendo-as em etanol. A partir da molécula de glicose, o processo de fermentação alcoólica resulta na formação de duas moléculas de ácido pirúvico ($C_3H_4O_3$) que são convertidas em duas moléculas de etanal (C_2H_4O) e duas moléculas de gás carbônico (CO_2). Posteriormente, as moléculas de etanal são reduzidas a duas moléculas de etanol, a partir da atuação de moléculas de NADH, podendo ser apresentado pelo esquema da Figura 20.

Figura 20: Representação esquemática da produção de etanol a partir de biomassa lignocelulósica da cana-de-açúcar



Fonte: Adaptado de Gunes et al., (2019).

2.6 Impacto ambientais gerados no setor sucroalcooleiro

A canavieicultura vem buscando cada vez mais práticas sustentáveis em todo o seu ciclo de produção. Entretanto, o aumento de áreas destinadas a produção de cana-de-açúcar vem apresentando um crescimento, implicando em inúmeros impactos ambientais que interferem na qualidade do ar, no aquecimento global, na compactação e perda nutricional do solo, na qualidade e quantidade dos recursos hídricos e no aumento de agrotóxicos e fertilizantes (BRITO; MATAL; SANTOS, 2023; DOMINGUES et al., 2025; NOVAIS et al., 2021; OLIVEIRA et al., 2022).

Em relação ao uso do solo, destacam-se os seguintes impactos ambientais: i) supressão da vegetação natural; ii) degradação do solo nas áreas de cultivo em função do aumento de agrotóxicos e fertilizantes; iii) alteração da microbiota do solo, ocasionando a redução e até a extinção de polinizadores e de organismos que atuam diretamente no controle populacional de pragas; iv) aumento dos processos erosivos do solo em função da maior quantidade de adubos e corretivos minerais (BRITO; MATAL; SANTOS, 2023; CORDEIRO et al., 2020; NOVAIS et al., 2021).

Os principais impactos ambientais para os recursos hídricos são: i) eutrofização de corpos aquáticos em função do aumento do uso de fertilizantes e adubos químicos; ii) aumento do consumo de água nos processos de irrigação dos canaviais, podendo ser substituído pelo processo de “irrigação de salvamento”, na qual se utiliza água residuária proveniente das próprias usinas, o que reduz o consumo de água (CORREA; FEIL, 2021; DOMINGUES et al., 2025; NOVAIS et al., 2021; OLIVEIRA et al., 2022).

Por fim, a poluição atmosférica se encontra relacionada as seguintes práticas: i) queimadas nas lavouras de cana-de-açúcar, com a finalidade de aumentar a evaporação da água e, conseqüentemente, o aumento do teor de sacarose; ii) aumento da emissão de gás carbônico (CO₂) para a atmosfera; iii) mudança climática ocasionado pelo aumento de gases que contribuem para o efeito estufa (BRITO; MATAL; SANTOS, 2023; DOMINGUES et al., 2025; NOVAIS et al., 2021; OLIVEIRA et al., 2022).

2.7 Resíduos gerados e as respectivas formas de reaproveitamento

O cultivo da cana-de-açúcar para a produção de açúcar e álcool, gera uma grande quantidade de biomassa que representa cerca de 28% de cada tonelada processada, da qual 30% é destinada a queima e autossuficiência energética das usinas e destilarias. Entre os diferentes tipos de resíduos gerados no complexo sucroalcooleiro, destacam-se: a vinhaça, o bagaço, torta de filtro, fuligem da queima da palha dentre outros (BRITO; MATAI; SANTOS, 2024; CARVALHO; PEREIRA, 2024; DIAS, 2021; GOLDONI et al., 2022).

A vinhaça se constitui na maior fração de resíduo gerado na indústria sucroalcooleira, apresentando elevadas concentrações de nitrato, potássio e matéria orgânica. Em função disso, possui um elevado potencial de poluição se for lançado em corpos aquáticos ocasionando a eutrofização dos recursos hídricos, visto que apresenta uma alta Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO). Atualmente, a vinhaça vem sendo utilizada como fertilizante e contribui para aumentar a concentração de matéria orgânica e umidade do solo, reduzindo custos com a aquisição de fertilizantes (CASADO; BARBOSA, 2024; SILVA; BORGES; JARDIM, 2025; SILVA et al., 2023), conforme apresentado na Figura 21.

Figura 21: geração e aplicação da vinhaça no cultivo da cana-de-açúcar



Fonte: Acervo dos autores (2025).

O bagaço de cana-de-açúcar é constituído por fibras e água, sendo reutilizado como matéria-prima para a cogeração de energia elétrica, produção de adubo a ser utilizado na lavoura e produção de ração animal. Em função de ser um material rico em matéria orgânica (celulose, lignina e hemicelulose) pode apresentar um elevado grau de poluição dos recursos hídricos em função do aumento da DBO. A queima do bagaço resulta nas cinzas, que possui alto teor de sílica (SiO_2), apresentando um grande potencial para ser utilizado como aditivo mineral, sendo reaproveitado também como matéria-prima na produção de cimento no Brasil (AREIAS, 2020; LIMA, 2024; OLIVEIRA; CAVICHIOLI, 2024; RODRIGUES et al., 2024), conforme Figura 22.

Figura 22: Bagaço de cana-de-açúcar



Fonte: Acervo dos autores (2025).

A torta de filtro consiste em um subproduto gerado após a filtração do caldo de cana, sendo constituído por diferentes elementos, entre os quais: matéria orgânica, nitrogênio, fósforo, potássio dentre outros. Neste contexto, a torta vem sendo reutilizada no plantio da cana-de-açúcar, reduzindo o uso de fertilizantes, bem como a contaminação do solo e da água. Entretanto, este resíduo não possui todos os nutrientes que são necessários para o desenvolvimento e crescimento da planta. Além disso, a torta contribui para melhorar a porosidade do solo, aumentando a retenção de água e reduzindo os processos erosivos no solo, estimulando o desenvolvimento das raízes da cana-de-açúcar (FREHNER et al., 2024; OLIVEIRA; CAVICHIOLI, 2024; RODRIGUES et al., 2024), conforme apresentado pela Figura 23.

Figura 23: torta de filtro obtida como resíduo e sua aplicação no canavial



Fonte: Acervo dos autores (2025).

Além dos resíduos já mencionados e descritos acima existem outros provenientes de: i) efluentes do tratamento de gases de combustão; ii) levedura seca; iii) Phlegmasse; iv) óleo fusel; v) óleos lubrificantes da unidade de produção; vi) efluentes provenientes de lavagem de tanques, pisos e equipamentos; vii) resíduos de laboratório; viii) lâmpadas queimadas; ix) sucata de metal e baterias (FREHNER et al., 2024; OLIVEIRA; CAVICHIOLI, 2024; RODRIGUES et al., 2024).



3. METODOLOGIA

O presente trabalho caracteriza-se como uma pesquisa do tipo qualitativa, exploratória e descritiva realizada por meio de revisão bibliográfica. A escolha do tema justifica-se pela necessidade de se investigar os desafios, as perspectivas e a viabilidade econômica para se produzir o E2G, a partir da biomassa residual obtida no processo de produção do etanol de primeira geração proveniente da cana-de-açúcar. A fim dê-se alcançar tal objetivo, o trabalho foi dividido em seis partes, a saber: i) conceituação do significado de E2G; ii) a importância do biocombustível para a obtenção de uma maior sustentabilidade nos processos de produção; iii) origem dos principais constituintes da biomassa residual; iv) os diferentes processos industriais envolvidos na produção do E2G; v) principais custos econômicos/financeiros envolvidos na produção do E2G e; vi) avaliação dos principais impactos ambientais e socioeconômicos envolvidos na produção do E2G.

A busca por trabalhos ocorreu pelas principais bases de dados científicas nacionais e internacionais de acesso gratuito, tais como: *Web of Science*, *Science Direct*, *Scielo*, Google Acadêmico e Portal de Periódicos da CAPES. A complementação foi realizada a partir da consulta a documentos técnicos e relatórios de instituições relevantes, entre os quais: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), Empresa de Pesquisa Energética (EPE), União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA) e Empresa de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). Com o intuito de se obter trabalhos mais específicos, utilizou-se os seguintes descritores em português e inglês, tais como: "etanol de segunda geração", "etanol lignocelulósico", "bioetanol", "bagaço de cana-de-açúcar", "palha de cana", "biomassa sucroalcooleira", "diferentes etapas do processo de produção do açúcar e álcool"; "aproveitamento da biomassa gerada na produção de etanol de primeira geração"; "principais impactos ambientais ocasionados no processo de produção do álcool"; "processos de mitigação e aproveitamento de resíduos gerados nas usinas sucroalcooleiras" dentre outros.

Como critérios de inclusão, foram selecionados trabalhos publicados nos últimos sete anos, entre 2018 e 2025, que abordassem direta e especificadamente a produção de E2G a partir da biomassa da cana-de-açúcar. Foram escolhidos somente artigos publicados em periódicos nacionais e internacionais, resultando em 123 trabalhos

que passaram por quatro etapas de seleção, a saber: (i) levantamento inicial por meio das palavras-chave; (ii) triagem de títulos, resumos e palavras-chave; (iii) leitura integral dos estudos considerados relevantes; e (iv) organização e categorização dos trabalhos de acordo com eixos temáticos. A análise dos dados obtidos ocorreu de forma **qualitativa e comparativa**, destacando pontos de convergência e divergência entre os autores. As informações foram organizadas em seis categorias temáticas, abrangendo: (a) impactos socioambientais ocasionados pela indústria sucroalcooleira; (b) políticas governamentais para a indústria sucroalcooleira; (c) produção de E2G; (d) aproveitamento de resíduos gerados no setor sucroalcooleiro; (e) eficiência das diferentes etapas do processo de produção do etanol e; (f) utilização de tecnologias para a produção de etanol. Ao final da análise, foram escolhidos 81 artigos para o desenvolvimento de todo o trabalho, dos quais 56 foram selecionados para fundamentar o referencial teórico e que terão seus principais resultados apresentados no próximo tópico.



4. RESULTADOS

Neste tópico será apresentado os principais resultados encontrados nos 56 artigos selecionados entre o período de 2018 até o presente ano. Os dados serão apresentados em forma de tabelas contendo três informações, a saber: o título do trabalho, os principais resultados obtidos e os autores com o respectivo ano de publicação do trabalho. Esta sessão será dividida em seis tópicos, conforme apresentado a seguir.

4.1 Impactos socioambientais ocasionados pela indústria sucroalcooleira

O segmento sucroalcooleiro apresenta uma enorme capacidade e diversidade de impactos ambientais, entre os quais: mudança na fauna e flora, contaminação de recursos hídricos e do solo, poluição atmosférica e prevalência da monocultura em detrimento de outras culturas. Além disso, a falta de efetividade no cumprimento de legislações ambientais por parte dos órgãos de controle e fiscalização contribuem para a manutenção de inúmeros problemas, conforme será apresentado na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1: Principais trabalhos sobre impactos socioambientais publicados no período de 2018 até 2025

Título	Principais resultados	Autor(es)/Ano
Análise da sustentabilidade ambiental em uma agroindústria sucroalcooleira	O cumprimento da legislação ambiental faz-se necessário, a fim de garantir a preservação dos habitats e da diversidade biológica. Além disso, a implementação de técnicas de irrigação, reuso de água, redução da quantidade de insumos químicos são necessárias para aumentar a sustentabilidade ambiental.	[Silva; Borges; Jardim, 2025]
Determinação socioambiental da saúde em territórios produtores de cana-de-açúcar em Pernambuco	O estudo demonstrou a necessidade de se construir políticas públicas, tais como: equidade, proteção e reparação da saúde ecossocial das áreas utilizadas para o cultivo de cana-de-açúcar, redução do uso de agrotóxicos, erradicação das práticas de queimadas e exploração da mão-de-obra trabalhadora.	[Domingues et al., 2025]

Impacto econômico , social e político da transição energética no Brasil	O Brasil avançou significativamente em relação a sua diversificação da matriz energética, baseada em fontes renováveis. Tal diversidade se fundamenta em quatro aspectos: político, econômico, social e ambiental. O país deve contribuir para criar um mercado mundial disruptivo até 2030, visto que o Brasil se destaca mundialmente pela sua grande capacidade e diversidade de fontes renováveis de energia.	[Carvalho; Pereira, 2024]
Avaliação dos impactos físicos, bióticos e antrópicos de Usinas Sucroenergéticas de Minas Gerais	A contaminação dos recursos hídricos, lesões dos animais, e liberação de partículas sólidas, gases e vapores na atmosfera são apontados como os principais impactos negativos em termos de aspectos físicos e bióticos e que se encontram vinculados a etapa de plantio e da colheita da cana-de-açúcar. Já os aspectos positivos se encontram vinculados a geração de novos postos de trabalhos, tecnologias que causam menor impacto ambiental, aprimoramento das técnicas de colheita e dos processos de produção no segmento sucroenergético. Tais aspectos contribuem para a melhoria da qualidade de vida tanto dos trabalhadores quanto da população que vive nas proximidades das lavouras e das usinas.	[Correa; Feil, 2023]
Produção de etanol da cana-de-açúcar associadas às práticas de ESG	Verificou-se uma relação direta entre a produção de cana-de-açúcar e etanol com as práticas de ESG. Os impactos ambientais da cultura/produção, redução nas emissões de gases que contribuem para o efeito estufa, redução do uso de fertilizantes, geração de emprego e renda, planejamento e uso adequado de equipamentos durante a colheita da cana-de-açúcar e dentro da usina sucroalcooleira.	[Brito; Matai; Santos, 2023]
Produção de etanol e seus impactos ambientais na indústria alcooleira de Alagoas	O setor sucroalcooleiro no estado de Alagoas, apresenta inúmeras vantagens em relação as questões ambientais, visto que a matéria-prima é proveniente de fonte renovável e a vinhaça (resíduo) é aplicada nos canaviais. Já as destilarias se encontram em constante aprimoramento de suas tecnologias, reduzindo a geração de resíduos e, conseqüentemente, os impactos ambientais.	[Novais et al., 2021]
Gestão dos resíduos poluentes das indústrias sucroenergéticas no estado de Alagoas	As usinas sucroalcooleiras localizadas no estado de Alagoas, produzem produtos que são comercializados (açúcar e etanol), mas apresentam elevado potencial para impacto ambiental. Entretanto, as usinas vêm adotando práticas inovadoras em relação a gestão e geração de resíduos.	[Novais et al., 2021]

Dinâmica territorial do setor sucroenergético em Santa Vitória, Minas Gerais	O setor sucroenergético vem sendo o grande responsável pela redução de outras culturas na região do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, visto que os donos das propriedades rurais vêm arrendando suas terras para a canavieira, ocasionando uma vulnerabilidade do território e relação de subordinação dos donos de terra, afetando a soberania alimentar da região. Além disso, a monocultura estabelecida pela canavieira vem aumentando os impactos ambientais em função do maior uso de agrotóxicos, desmatamento e a poluição do ar.	[Matos; Marafon, 2020]
Gestão de resíduos agrícolas como forma de redução dos impactos ambientais	A gestão de resíduos se constitui em um procedimento de suma importância, visto que contribui para a redução de impactos ambientais ocasionados pela geração e descarte inadequado de resíduos. Além disso, possibilita agregar valor ao processo de produção, colaborando com a sustentabilidade, aspectos sociais e econômicos.	[Cordeiro et al., 2020]
Aspectos político-econômicos, sociais e ambientais do uso da biomassa de cana-de-açúcar para geração de energia elétrica	O aproveitamento da biomassa da cana-de-açúcar é de extrema importância para a geração de energia elétrica e combustível para o setor de transporte.	[Areias, 2020]

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Os resultados apresentados demonstram que o setor sucroenergético vem buscando inúmeras alternativas para minimizar os mais diversos impactos ambientais, entre os quais: maior aproveitamento dos inúmeros resíduos (palha, bagaço-de-açúcar, torta, vinhaça entre outros), contribuindo para a redução do uso de fertilizantes e agrotóxicos, reutilização de água dentre outros. O segmento possui inúmeros desafios a serem superados, mas que exigem esforço do poder público em relação a políticas que estimulem/incentivem o crescimento e desenvolvimento do setor, contribuindo para a sua maior competitividade associada a redução dos impactos ambientais.

4.2 Políticas governamentais para a indústria sucroalcooleira

As políticas governamentais no Brasil não favorecem o incentivo, crescimento e competitividade do setor sucroenergético no mercado interno e externo. Além disso, a influência do governo no mercado tanto de matéria-prima quanto dos produtos finais de uma usina sucroalcooleira, retardam o potencial de crescimento e em muitos casos contribuem diretamente para a redução da produção em função do fechamento de muitas usinas, a falta de estratégia do poder público para uma política contínua de crescimento e desenvolvimento do segmento sucroalcooleiro entre outros, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2: Principais trabalhos sobre políticas governamentais publicados no período de 2018 até 2025

Título	Principais resultados	Autor(es)/Ano
Transformações na regulação dos Biocombustíveis no Brasil: Percurso Histórico-Institucional e Perspectivas Sustentáveis	A efetividade da regulação dos biocombustíveis no Brasil depende da consolidação de um arcabouço institucional que combine três aspectos: segurança jurídica, capacidade técnica e compromisso com a sustentabilidade. Entretanto, inúmeros fatores contribuíram para o crescimento pouco expressivo do setor, em função: da fragilidade dos órgãos ambientais, pressões econômicas em função das normativas e o desafio frente as inovações tecnológicas.	[Starling; Borges; Squeff, 2025]
Biocombustíveis: uma revisão sobre o panorama histórico, produção e aplicações do biodiesel	A valorização dos coprodutos da produção de biodiesel contribui significativamente para a sustentabilidade da sua geração, ocasionando um maior aproveitamento do processo. Desta forma é possível reaproveitar o que seria tratado como resíduo para produzir energia e reduzir os custos dos biocombustíveis.	[Duarte et al., 2022]
O Brasil como grande <i>player</i> no mercado mundial de etanol	O etanol brasileiro se consolidou no mercado internacional em função da adoção de políticas públicas de incentivo no setor associado a uma demanda cada vez maior de fontes renováveis de energia. Inúmeras facetas (mercadológica, regulatória, ambiental e social) geram o debate em torno do biocombustível.	[Soares; Junior, 2021]
O programa nacional de produção e uso do biodiesel - PNPB e a atuação da agricultura familiar	O PNPB apresenta algumas contradições. Em termos positivos, possibilita a geração de renda para inúmeras famílias pertencentes a agricultura familiar e a redução da emissão dos gases de efeito estufa. Por outro lado, provoca inúmeros danos ambientais: expansão da agricultura em detrimentos dos diferentes biomas, aumento do uso de insumos químicos e contaminação do solo e dos recursos hídricos.	[Silva; Polli, 2020]
Vulnerabilidade territorial do agronegócio globalizado no Brasil: crise do setor sucroenergético e implicações locais	A disparidade econômica entre os grupos sucroenergéticos e as unidades menos eficientes (baixo capital, capacidade de produção e localizadas em lugares de menor produtividade) contribuiu para o acirramento do oligopólio do mercado, levando inúmeros usineiros a desestabilizarem a geração de emprego, renda, o comércio e a arrecadação fiscal dos municípios, o que contribuiu para a redução do dinamismo urbano-industrial.	[Santos; Castillo, 2020]
As relações entre as políticas governamentais e o setor sucroenergético	O setor sucroenergético é de grande importância para impulsionar o crescimento do segmento. Entretanto, as políticas governamentais não estimulam o aumento da eficiência e, consequentemente, eleva os custos de produção e acaba por reduzir a competitividade do setor. Logo, as políticas públicas devem interferir o mínimo possível e ofertar o desenvolvimento da economia nacional.	[Araújo; Filho; Colin, 2019]

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Os poucos trabalhos reportados pela literatura evidenciam as maiores barreiras a serem superadas pelo segmento sucroenergético, pois dificultam o crescimento e o desenvolvimento do setor. Frente aos inúmeros desafios se encontra a capacidade de aumentar o valor agregado aos resíduos gerados durante o processamento da cana-de-açúcar, gerando maior rentabilidade financeira e a possibilidade de produção do E2G, conforme apresentado no próximo tópico.

4.3 Produção de Etanol de Segunda Geração (E2G)

A obtenção de E2G a partir dos resíduos gerados na produção do etanol de primeira geração se constitui em grande desafio, visto que os processos tecnológicos necessários para a sua implementação, apresentam um elevado custo de produção. Por outro lado, o maior aproveitamento dos resíduos e, consequentemente, o aumento do valor agregado a biomassa, aumenta as expectativas e estimula o desenvolvimento e aprimoramento de novas técnicas e tecnologias para a produção de E2G, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3: Principais trabalhos sobre produção de Etanol de Segunda Geração (E2G) no período de 2018 até 2025

Título	Principais resultados	Autor(es)/Ano
Resíduos agroindustriais utilizados para a fabricação de Etanol de Segunda Geração	A utilização de resíduos agroindustriais para a obtenção do E2G, demonstra-se economicamente viável e ambientalmente correta. Entretanto, inúmeros desafios precisam ser superados nos processos de pré-tratamento, na hidrólise enzimática, na redução de inibidores de fermentação e na maior produção de bioetanol. Além disso, existe a possibilidade de se utilizar um único método de produção associando diferentes matérias-primas, bem como a possibilidade de coprodução de outros biocombustíveis.	[Vicente et al., 2024]
Maximizando o Etanol de Segunda Geração a partir de biomassa	A implementação de micro-ondas e água ou solução ácida 0,1 mol/L no pré-tratamento físico-químico levaram a produção de mosto com maiores teores de açúcares e, consequentemente, destilados com maior teor de álcool. Já o tratamento que utilizou ultrassom com água e soluções ácidas, não apresentaram melhorias na eficiência.	[Uliana et al., 2024]
Agroindústria canavieira e a economia circular: um estudo de caso na usina de Bandeirantes (Paraná)	A Usina de Bandeirantes (Usiban) reutiliza os subprodutos do processo de produção (vinhaça e bagaço) no próprio setor sucroalcooleiro, mas outros não são produzidos em função do elevado custo, tais como a produção de E2G.	[Frehner et al., 2024]

Impactos econômicos e ambientais da produção do Etanol de Segunda Geração no Brasil	Os impactos econômicos e ambientais gerados pela produção de E2G, são em sua grande maioria positivos, entre os quais: redução do custo de produção a médio e longo prazo, redução dos impactos ambientais e maior viabilidade econômica.	[Silva; Queiroz, 2022]
Análise dos efeitos totais, diretos, indiretos e de transbordamento na economia brasileira mediante o aumento na produção de Etanol via etano de Segunda Geração: A luz da análise de insumo-produto	Os resultados evidenciaram que os efeitos de transbordamento na economia, a partir da produção de E2G foram observados nos setores de fornecimento de insumos diretos e fabricação, visto que sofrem com maiores efeitos de transbordamentos em função da demanda do setor.	[Ruiz, 2021]
Pré-tratamento ácido da palha de cana-de-açúcar visando a produção de etanol de segunda geração	A otimização de diferentes fatores (concentração de H_2SO_4 , tempo e temperatura) no pré-tratamento da palha de cana-de-açúcar influenciou diretamente na maior liberação de açúcares redutores e na solubilização dos componentes macromoleculares da biomassa, chegando a um percentual de remoção de 30% dos componentes macromoleculares da palha com uma liberação de 15,90 g/L de açúcares indicando melhorias na eficiência do pré-tratamento da palha, implicando na maior eficiência da hidrólise enzimática e aumento da produção do E2G.	[Marinho et al., 2020]
O etanol de segunda geração no Brasil: Políticas e redes sociotécnicas	As expectativas e promessas em relação a produção de E2G no Brasil se demonstraram precipitadas, podendo se tornar um paradigma a partir de 2030, com a eliminação dos problemas da atualidade. Além disso, o desenvolvimento científico e tecnológico dos processos de produção, matéria-prima, catalisadores biológicos e melhorias no processo de financiamento pelo poder público são lacunas a serem preenchidas.	[Lorenzi; Andrade, 2019]

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

A quantidade de trabalhos encontrados demonstram as inúmeras barreiras a serem superadas para a efetivação da produção de E2G pelo segmento sucroenergético no Brasil. Além de aspectos técnicos e tecnológicos, o país precisa superar inúmeros outras limitações que dificultam o crescimento e desenvolvimento do setor sucroenergético no território nacional. Entretanto, o próprio setor vem tendo a iniciativa de buscar novas alternativas, a fim de obter um maior aproveitamento dos resíduos gerados, conforme será apresentado e discutido no próximo tópico.

4.4 Aproveitamento de resíduos gerados no setor sucroalcooleiro

O segmento sucroalcooleiro é bastante difundido e conhecido em função da grande quantidade de resíduos que são gerados e que, em passado recente, se constituíam em elevados volumes de passivo ambiental. Entretanto, com o aprimoramento das etapas de produção e implementação do reaproveitamento de seus resíduos para inúmeras finalidades, agregou valores a estes que contribuíram para a redução de custos de produção (energia elétrica, fertilizantes, insumos químicos entre outros), conforme será apresentado nos trabalhos presentes na Tabela 4 abaixo.

Tabela 4: Principais trabalhos sobre aproveitamento de resíduos gerados no setor sucroalcooleiro no período de 2018 até 2025

Título	Principais resultados	Autor(es)/Ano
Uso de torta de filtro na cultura da cana-de-açúcar	A utilização da torta de filtro como fertilizante nas lavouras de cana-de-açúcar, resulta na redução dos custos com fertilizantes e, consequentemente, minimização dos impactos ambientais provenientes da canavieira. Logo, o uso da torta de filtro se constitui em inúmeras vantagens e benefícios para o agricultor, a sociedade, a geração de emprego e renda e maior sustentabilidade da canavieira.	[Oliveira; Cavicholi, 2024]
Reutilização da palha da cana-de-açúcar como fonte de biomassa para cogeração de energia: uma revisão sistemática da literatura	Em recente revisão da literatura, inúmeros autores apontam que o reaproveitamento da palha da cana-de-açúcar como biomassa para a geração de energia elétrica, por meio do Ciclo de Rankine. Além disso, apresenta viabilidade econômica em função do poder calorífico da palha, reduzindo os custos com energia elétrica na usina.	[Viana; Santos, 2023]
Uso de vinhaça concentrada e enriquecida como biofertilizante na cana-de-açúcar: Uma revisão	A utilização da vinhaça concentrada e enriquecida na lavoura de cana-de-açúcar, contribui para: reduzir os custos com fertilizantes e os inúmeros impactos ambientais da canavieira e elevação da renda do agricultor. Além disso, inúmeros estudos apontam para o aumento da produtividade do canavieiro.	[Silva et al., 2023]
Aproveitamento de palha de cana-de-açúcar para o incremento de geração de energia elétrica: revisão sistemática da literatura	O processo de mecanização do corte possibilitou a maior geração de palha que é convertida em energia elétrica para ser utilizada na usina ou vendida para a concessionária. Além disso, a palha melhora a capacidade de retenção de umidade em diferentes tipos de solo e pode aumentar a produção de etanol a partir do seu reaproveitamento na geração de E2G na usina.	[Goldoni et al., 2022]

Geração de energia elétrica a partir da biomassa: uma aplicação do bagaço da cana-de-açúcar	O bagaço da cana-de-açúcar se constitui em uma excelente fonte de biomassa residual que pode ser reutilizada tanto para a produção de energia elétrica quanto para a obtenção de E2G na usina. Além disso, sua utilização reduz o impacto ambiental e a redução de gases do efeito estufa. A transição energética para fontes renováveis de energia, vem colocando o Brasil como referência em termos de diversificação de fontes de energia mais sustentáveis.	[Silva; Silva, 2021]
Caracterização da biomassa de bagaço de cana-de-açúcar com vistas energéticas	A partir de análises químicas, observou-se que o bagaço da cana-de-açúcar apresentou um potencial energético superior a 4309,50 kcal/kg e baixos teores de cinzas (0,95%). O que pode ser utilizado para explicar a crescente demanda de uso da biomassa para a geração de energia elétrica.	[Grotto et al., 2021]
Caracterização física, química e mecânica de <i>Pellets</i> de Bagaço de Cana-de-Açúcar	A análise de amostras de <i>pellets</i> demonstraram que tal material apresenta: baixo teor de umidade, maior durabilidade mecânica e maior poder calorífico. Tais resultados demonstram que os <i>pellets</i> podem ser considerados como biocombustíveis renováveis tanto para fins industriais quanto para uso doméstico.	[Costa et al., 2020]
Pré-Tratamento Químico e Caracterização do Bagaço da Cana: uma Perspectiva para Produção de Etanol a partir de Resíduos Agroindustriais	A análise química do bagaço da parte interna do colmo da cana apresentou um considerável teor de hemicelulose na sua composição, representando 46,88% da massa. Além disso, o pré-tratamento básico possibilitou uma remoção mais significativa de lignina, mantendo-se a hemicelulose com elevado grau de pureza, o que favorece as etapas subsequentes (hidrólise e fermentação dos açúcares) aumentando o rendimento da produção de etanol.	[Oliveira; Nunes; Sousa, 2020]
Pré-Tratamento Químico e Caracterização do Bagaço da Cana: uma Perspectiva para Produção de Etanol a partir de Resíduos Agroindustriais	A análise química do bagaço da parte interna do colmo da cana apresentou um considerável teor de hemicelulose na sua composição, representando 46,88% da massa. Além disso, o pré-tratamento básico possibilitou uma remoção mais significativa de lignina, mantendo-se a hemicelulose com elevado grau de pureza, o que favorece as etapas subsequentes (hidrólise e fermentação dos açúcares) aumentando o rendimento da produção de etanol.	[Oliveira; Nunes; Sousa, 2020]
Blendas de bagaço de cana-de-açúcar, podas de mangueira e cajueiro: caracterização das propriedades e investigação de seus potenciais energéticos	A produção de blendas provenientes de fontes diferentes de biomassa apresentou aumento no poder calorífico e redução no teor de cinzas. Os briquetes apresentaram elevado aumento da densidade energética, sendo de 955% para aqueles obtidos do bagaço de cana. No entanto, a combinação de resíduos de podas de mangueira e cajueiro associado ao de cana-de-açúcar, elevaram a densidade energética para 658 e 547% respectivamente. Podendo se constituir em uma enorme fonte alternativa para a obtenção de biocombustíveis.	[Ponte et al., 2019]

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Os resultados apresentados pela Tabela 4 indicam que o segmento sucroalcooleiro vem aprimorando a reutilização de seus resíduos gerados, contribuindo para a redução de despesas com fertilizantes, energia elétrica e atribuindo valor financeiro a resíduos que em um passado recente eram verdadeiros passivos ambientais. Os desafios para melhorar o aproveitamento dos resíduos ainda demanda tempo, investimento e dedicação em P&D, a fim de melhorar as técnicas existentes e incrementar novas tecnologias em todas as etapas envolvidas desde o plantio da cana-de-açúcar até a obtenção do açúcar e etanol ao final do processo.

4.5 Eficiência das diferentes etapas do processo de produção do etanol

O incentivo a P&D, bem como a inovação tecnológica que demandam a destinação de recursos financeiros, vem se destacando com uma das principais barreiras a serem superadas pelo segmento sucroenergético brasileiro. O aumento da capacidade de produção e competitividade do setor passam pelo desenvolvimento de novos processos físicos, químicos e biológicos, sendo que o último se constitui no maior desafio na atualidade seguido de outros que serão apresentados, na Tabela 5.

Tabela 5: Principais trabalhos sobre a eficiência das diferentes etapas do processo de produção de etanol publicados no período de 2018 até 2025

Título	Principais resultados	Autor(es)/Ano
Avaliação da eficiência energética nos processos de queima do bagaço da cana-de-açúcar em usinas sucroalcooleiras	As usinas sucroenergéticas se constituem em um importante segmento que contribui para a matriz energética brasileira. A utilização de biomassa na geração de energia elétrica contribui para aumentar a sustentabilidade e, consequentemente, minimizar os impactos ambientais. Além disso, por ser proveniente de uma fonte de energia renovável, contribui para a redução de combustíveis fósseis e podem vir a aumentar a eficiência energética a partir do desenvolvimento de pesquisas e tecnologias que promovam melhorias no processo de geração de energia.	[Casado; Barbosa, 2024]
Lignocellulosic biomass: insights into enzymatic hydrolysis, influential factors, and economic viability	As enzimas celulasas e hemicelulasas possuem uma função crucial no processo de quebra de polissacarídeos complexos em açúcares fermentáveis. Entretanto, a eficiência desse processo é dependente de vários fatores considerados críticos, a saber: escolha de cepas microbianas, características do substrato e métodos de pré-tratamento. Além disso, a viabilidade econômica continua sendo uma grande barreira, sendo necessário investir em pesquisas futuras que concentrem o seu foco na obtenção de novas fontes microbianas e na otimização dos sistemas enzimáticos, o que resultará em biocombustíveis mais eficientes e com maior viabilidade econômica.	[Basera; Chakraborty; Sharma, 2024]

Pretreatment, Hydrolysis and Fermentation of Lignocellulosic Biomass for Bioethanol	A ausência do pré-tratamento no processo de biorrefinaria lignocelulósica o tornaria difícil e até mesmo inviável. Além disso, existe a necessidade de investimento em pesquisas que resultem em técnicas inovadoras que levem a redução de custos no pré-tratamento e na geração de compostos menos nocivos, maior rendimento de obtenção de açúcar e dos subprodutos obtidos.	[Sudhakar; Naik, 2022]
Bioethanol Production by Enzymatic Hydrolysis from Different Lignocellulosic Sources	O aumento pela demanda de energia, eleva a busca por fontes de energias renováveis e sustentáveis. Neste contexto, o processo de hidrólise enzimática se constitui em uma etapa importante e crucial na obtenção do biocombustível. Inúmeros trabalhos vêm apontando uma diversidade cada vez maior de fonte de enzimas, entre as quais: biomassas, madeira, resíduos agrícolas diversos e algas marinhas vêm sendo utilizados como substrato para uma produção mais eficiente de bioetanol.	[Vasi; Knez; Leitgeb, 2021]
Desempenho da produção da cultura de cana-de-açúcar nos principais estados produtores	No ano de 2010, a frota de veículos com tecnologia <i>flex-fuel</i> já representava 92% da frota nacional. A produção de cana-de-açúcar no país foi estimulada por políticas públicas de incentivos e investimentos, desenvolvimento tecnológico, aporte à produção e exportação que contribuíram para o desenvolvimento do agronegócio nacional.	[Alves et al., 2021]
Revisão: leveduras utilizadas na produção de Etanol de Segunda Geração	A busca por novos micro-organismos que possam ser utilizados nos processos de fermentação de pentoses, possibilita a abertura de novos caminhos, bem como diferentes alternativas, a fim de alcançar maior produtividade de etanol proveniente de material lignocelulósico. Além disso, o investimento em Ciência e Tecnologia possibilitam a produção de novas linhagens de micro-organismos que sejam mais eficientes, resistentes a condições estressantes e que apresentem maior viabilidade econômica, possibilitando a produção de E2G e, consequentemente, menores impactos ambientais em função da redução de gases que contribuem para o efeito estufa.	[Almeida; Nascimento, 2021]
Pré-tratamento de Explosão a Vapor, Caracterização Química e Morfológica do Bagaço da Cana-de-Açúcar Usado para Produção de Etanol 2G	O pré-tratamento do bagaço de cana-de-açúcar (BCA) reduziu o percentual de celulose, hemicelulose e lignina, implicando em desestruturação das fibras e, consequentemente, o aumento de sua cristalinidade. As análises espectroscópicas demonstraram diferenças entre as amostras tratadas e não-tratadas. O presente processo é capaz de melhorar a eficiência da sacarificação em resíduos lignocelulósicos que possam ser empregados na produção de E2G.	[Barbosa et al., 2020]

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Os resultados apresentados na Tabela 5, demonstram o interesse do segmento sucroalcooleiro em melhorias e aprimoramentos nas diferentes etapas de produção do etanol, que vão desde a implementação de novas fontes de matérias-primas e/ou

melhorias e aprimoramento das diferentes técnicas utilizadas em todo o processo, desde o plantio até a obtenção do produto final (etanol e açúcar). Entretanto, a fim de se alcançar tais objetivos, torna-se imprescindível a utilização de novas tecnologias que facilitem o controle de informações e o tempo necessário para se processar dados que contribuam diretamente com o processo de produção, conforme será apresentado e discutido no tópico 4.6.

4.6 Utilização de tecnologias para a geração de etanol

As diferentes etapas do processo de produção do etanol carecem de melhorias e aprimoramento que demandam investimento em pesquisa e desenvolvimento, a fim de aumentar a eficiência de todos os processos envolvidos na produção de açúcar e álcool, conforme será apresentado na Tabela 6 abaixo.

Tabela 6: Principais trabalhos sobre a utilização de tecnologias mais eficientes para a geração de etanol, publicados no período de 2018 até 2025

Título	Principais resultados	Autor(es)/Ano
Projeto no aperfeiçoamento da clarificação do caldo na Usina Sucroalcooleira	A substituição das malhas das peneiras estáticas promoveram ganho significativo na qualidade da sacarose produzida pela usina sucroalcooleira. Além disso, promoveram ganhos operacionais e sustentáveis. Tais avanços reafirmam a importância e necessidade em investimentos e em tecnologias que sejam mais acessíveis e sustentáveis que possibilitem maiores ganhos operacionais.	[Serapião et al., 2025]
O processo de inovação tecnológica no CCT logístico da cana-de-açúcar	O setor canavieiro emprega inúmeras tecnologias que teve início com o uso de equipamentos de comando microeletrônico e softwares utilizados na produção. Nos processos industriais ocorreram inúmeros avanços, tais como: a ultrafiltração, circuladores mecânicos, velocidade da colheita, melhoramento genético de espécies de cana-de-açúcar, sistema de monitoramento, automação dentre outros. Tais inovações possibilitaram o aumento de produção e o melhoramento da qualidade dos produtos obtidos na indústria sucroalcooleira.	[Mello; Santos; Dutra, 2025]
Inovação e a produção do etanol de cana-de-açúcar	O setor sucroenergético se beneficiou de forma significativa a partir da colaboração com os centros de pesquisa do país. Entretanto, apresenta maior rigidez para a inovação, visto que as políticas públicas implementadas afetaram a P&D pelo setor privado, a inexistência de políticas governamentais que estabeleçam preços sobre a produção de álcool a custos reduzidos, aumento da dívida elevada e perda de valor intangível em função do desmatamento. Frente a isso, o setor demanda o aumento de estudos técnicos-econômicos e ambientais, promovendo maior viabilidade dos processos de produção dos biocombustíveis.	[Brito; Matai; Santos, 2024]

Procedimento operacional padrão no setor de recepção e preparo da cana-de- açúcar de uma empresa sucroalcooleira	Existe a necessidade de desenvolver novas pesquisas que possam agregar maior valor econômico a vinhaça, bem como sua maior utilização como biofertilizantes na canavieira, aumentando a sua produtividade e agregando maior qualidade a matéria-prima e, consequentemente, reduzindo os custos de produção do etanol.	[Silva; Arantes, 2023]
Agricultura de Precisão: sistema Autopilot sintetizado com a automação do maquinário agrícola na plantação de cana-de-açúcar	A utilização do sistema de Autopilot associado com as tecnologias de automação, possibilitaram mais tempo e atenção na análise das informações geradas durante as etapas de plantação da cana-de-açúcar, diminuindo esforços físicos e aumento da segurança e precisão na coleta e gestão dos dados obtidos, gerando maior sustentabilidade e lucratividade.	[Rodrigues; Geron, 2023]
Controle do processo de cozimento na produção de açúcar	O processo de cozimento leva a produção de cristais com tamanho adequado e com baixa cor. Além disso, o processo conta com inúmeros componentes principais, entre os quais: sensores de sensibilidade, redes neurais, análise de imagem e uso do instrumento SeedMaster.	[Oliveira; Madaleno, 2023]
Sistema Operacional de uma Usina de Etanol do Pontal do Triângulo Mineiro para Produção de Energia Renovável	A eficiência de produção se encontra diretamente ligado e correlacionado a cadeia de produção do álcool que passam pelo processo de plantio, colheita, recepção, tratamento do caldo, eficiência do processo de decantação e os demais processos que se sucedem até a obtenção do produto final. Além disso, é importante destacar a escolha da variedade de cana-de-açúcar, preparo do solo, profissionais capacitados/qualificados dentre outros aspectos.	[Lima; Castro; Rocha, 2022]
Principais Tecnologias para Produção de Etanol Anidro no Brasil	O processo de destilação azeotrópica utilizando o ciclohexano como solvente se constitui na tecnologia mais convencional e difundida para obtenção de etanol anidro, ocasionando a geração de um resíduo tóxico que inviabiliza a sua comercialização para indústrias finas. Já a destilação extrativa e o processo de adsorção por peneiras moleculares apresenta um custo mais elevado, mas a etapa de recuperação do solvente é facilitada em função da baixa volatilidade do adsorvente, diminuindo a quantidade de insumos que são necessários para separar o solvente da água.	[Santos et al., 2021]
Avaliação de impacto ex ante da adoção do ativo tecnológico 'Cana Flex' para produção de Etanol de Segunda Geração	A implantação da tecnologia 'Cana Flex' possui grande potencial para colaborar com as metas do Brasil em relação a redução de emissão de Gases do Efeito Estufa. Além disso, possibilita a geração de ganhos econômicos que são importantes para o setor sucroenergético. Espera-se que no futuro, a 'Cana Flex' possa contribuir de forma decisiva para a viabilidade econômica da produção de E2G, colaborando para consolidar o Brasil como um líder global de produção de biocombustível.	[Guiducci et al., 2021]
Simulação em software Arena para entrada de cana-de-açúcar	O software ARENA possibilita otimizar o processo de filas nos setores do furador e da mesa de descarregamento, contribuindo para o aumento da produção e, consequentemente, na maior rentabilidade para o segmento sucroalcooleiro.	[Rodrigues; Herculani, 2020]

Efeito da Aplicação de um Sistema de Automação Agrícola em Colheita Mecanizada de Cana-de-Açúcar como Ferramenta de Gestão e Controle de Custo Operacional	O processo de mecanização de corte e colheita vêm possibilitando a redução de custos no processo de obtenção de álcool e açúcar. Além disso, possibilita agilidade nos processos gerenciais para obtenção de informações, implicando na redução do tempo, erros, atrasos, tomadas de decisão e economia de material.	[Lançoni et al., 2020]
A utilização de veículos aéreos não tripulados (VANT) na cultura da cana-de-açúcar	O uso de VANTs se constitui em uma enorme ferramenta que possibilita maior precisão na canavicultura. Apesar dos elevados gastos iniciais para a sua implementação, os benefícios recuperam o investimento em pouco tempo, pois: melhora os processos de produção, segurança na tomada de decisão, redução de gastos com insumos dentre outros.	[Assaiante; Cavichioli, 2020]

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Os resultados apresentados na Tabela 6 confirmam o esforço para o desenvolvimento científico e tecnológico, com vistas a aumentar a eficiência na produção de etanol, redução de custos com matérias-primas utilizadas desde o plantio até a obtenção do produto final dentre outros aspectos que possam ser customizados.



5. DISCUSSÕES

Este tópico discute os principais resultados encontrados no estudo de revisão de literatura sobre os desafios, as perspectivas e a viabilidade econômica para a produção de E2G, a partir da biomassa residual obtida no processo de produção de etanol proveniente da cana-de-açúcar como matéria-prima. A partir de trabalhos publicados em artigos periódicos nacionais e internacionais, no período compreendido entre o ano de 2018 até o ano corrente. A discussão dos resultados apresentados a partir do levantamento da literatura, será apresentado na forma de tópicos, conforme abaixo.

5.1 Impactos socioambientais ocasionados pela indústria sucroalcooleira

A indústria sucroalcooleira é reconhecidamente uma atividade que causa inúmeros impactos ambientais, sendo necessário a realização de Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e, consequentemente, a geração do Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) como um dos requisitos para a implantação de uma usina sucroalcooleira. Silva, Borges e Jardim (2025) defendem a necessidade de maior cumprimento da legislação vigente no país, como condição necessária para garantir a preservação dos inúmeros biomas e habitats da fauna e flora, sendo que tais ideias são reforçadas pelo trabalho de Correa e Feil (2023). Além disso, o segmento sucroalcooleiro é responsável por demandar grande quantidade de recursos hídricos, insumos químicos, geração de gases que contribuem para o efeito estufa, utilização de práticas de queimadas e o aumento do desmatamento de áreas que colaboram para inúmeros impactos ambientais, conforme apontado pelos trabalhos de Silva, Borges e Jardim (2025), Domingos e colaboradores (2025), Brito, Matai e Santos (2023). Entretanto, a canavieira vem aprimorando técnicas e implementando tecnologias que minimizam inúmeros impactos ambientais, entre os quais: o reuso de água (BRITO; MATAI; SANTOS, 2023; SILVA; BORGES; JARDIM, 2025), redução do uso de fertilizantes e agrotóxicos nas lavouras (MATOS; MARAFON, 2020; NOVAIS et al., 2021), erradicação das práticas de queimadas (DOMINGOS et al., 2025), destinação adequada e correta dos inúmeros resíduos gerados (MATOS; MARAFON, 2020; NOVAIS et al., 2021; OLIVEIRA et al., 2022), aproveitamento de biomassa residual na geração de energia elétrica (AREIAS et al., 2020; NOVAIS et al., 2021) para a usina

e aplicação de vinhaça (NOVAIS et al.,2021) como fertilizante na canavieicultura são alguns exemplos de ações realizadas para a redução e mitigação dos inúmeros impactos ambientais.

Neste contexto, o setor sucroalcooleiro contribui de forma significativa para a diversificação da matriz energética brasileira e de fontes renováveis, geração de combustível para grande parcela de veículos automotores, geração de alimento e/ou matéria-prima no caso do açúcar, geração de energia elétrica para o autoconsumo dentro da usina dentre outros, conforme apontado pelos trabalhos de Areias e colaboradores (2020), Carvalho e Pereira (2024), Cordeiro e colaboradores (2021) e D'Alessandro e Cavichioli (2024). Já Oliveira e colaboradores (2023) defendem que o setor sucroenergético precisa estabelecer parcerias com o setor público e privado, com o intuito de obter recursos financeiros para subsidiar pesquisas que possam resultar tanto em novas tecnologias quanto em técnicas que contribuam com a redução de consumo e melhorias na eficiência das diferentes etapas do processo de produção.

Os aspectos sociais se constituem em outro ponto importante da discussão em relação a canavieicultura e as usinas sucroalcooleiras, constituindo-se de aspectos positivos e negativos que dividem opiniões entre os autores. Domingos e colaboradores (2025) afirmam existir uma exploração do trabalho na canavieicultura, visto que existe uma desvalorização da remuneração do trabalho braçal, a ausência de condições mais adequadas e a presença de fatores que reduzem o bem-estar e a qualidade de vida dos trabalhadores (ausência de equipamentos de proteção individual, longa exposição diária a radiação solar, riscos de acidentes com os instrumentos de trabalho dentre outros), o que contradiz com as afirmações de Brito, Matai e Santos (2023) que afirmam existir planejamento e capacitação para o uso adequado de equipamentos tanto na fase de colheita quanto no interior da usina sucroalcooleira. Por outro lado, D'Alessandro e Cavichioli (2024) apontam que apesar dos avanços tecnológicos e melhorias implementadas no setor sucroenergético, ainda existem inúmeras lacunas a serem preenchidas em relação aos aspectos sociais. Por outro lado, Matos e Marafon (2020) realizaram um estudo de caso na região do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, sendo observado inúmeros problemas sociais, entre os quais: redução de outras culturas na região que colabora com a redução da soberania alimentar, aumento da vulnerabilidade dos pequenos agricultores e redução de inúmeros postos de trabalho nas pequenas e médias propriedades que passaram a arrendar suas terras para a canavieicultura. Fazendo-se necessário a implementação de políticas governamentais para setor sucroalcooleiro.

5.2 Políticas governamentais para a indústria sucroalcooleira

A criação de políticas governamentais para o segmento sucroalcooleiro é de extrema importância para que o setor possa expandir, aumentar sua competitividade no cenário internacional e inovar em tecnologias que visem melhorar os diferentes processos químicos e que sejam ambientalmente mais seguros e corretos (ARAÚJO; FILHO; COLIN, 2019, STARLING; BORGES; SQUEFF, 2025). Entretanto, inúmeros fatores contribuem para o baixo crescimento do setor sucroalcooleiro, entre os quais: fragilidade dos órgãos ambientais fiscalizadores, pressões econômicas em função das normativas e o desafio frente as inovações tecnológicas associado a pouca presença de recursos públicos e privados no setor (SOARES; JUNIOR, 2021; STARLING; BORGES; SQUEFF, 2025). Além disso, as poucas políticas públicas existentes interferem negativamente no segmento sucroalcooleiro, elevando os custos de produção e redução da capacidade de competitividade, o que na prática se constitui no fechamento de muitas usinas de menor porte e eficiência, gerando inúmeros prejuízos para a sociedade, entre os quais: redução de postos de trabalho, diminuição da renda, redução do comércio e arrecadação fiscal, ocasionando a redução do dinamismo urbano-industrial de acordo com os trabalhos de Araújo, Filho e Colin (2019) e Santos e Castilho (2020).

Neste sentido, algumas políticas públicas foram criadas como o Programa Nacional de Produção e uso do Biodiesel (PNPB) que apresenta aspectos positivos e negativos. Entre os pontos positivos se destaca a geração de emprego e renda para inúmeras famílias que se configuram na condição de agricultura familiar, contribuindo para a redução de emissão de gases do efeito estufa. Já os aspectos negativos destacam-se: o detrimento de inúmeros biomas, maior poluição de solos e recursos hídricos ocasionados pelo aumento de insumos químicos, conforme apontado no estudo de Silva e Polli (2020). Entretanto, mesmo diante desta inúmera diversidade de problemas e falta de políticas públicas eficientes, o setor sucroalcooleiro vem buscando melhorias que associe maior produtividade ao menor impacto ambiental, entre os quais: aproveitamento de biomassa tanto para a geração de energia elétrica quanto para a produção de E2G; aplicação de vinhaça nas lavouras de cana-de-açúcar e, conseqüentemente, redução de insumos químicos dentre outros (DUARTE et al., 2022). A produção de E2G se constitui em uma forma de agregar maior valor na biomassa residual e, conseqüentemente, aumentar a produção de bioetanol, conforme será apresentado no próximo tópico.

5.3 Produção de Etanol de Segunda Geração (E2G)

As expectativas e promessas em relação a produção de E2G no Brasil foram precipitadas, mas que podem vir a se tornar um paradigma a partir de 2030, caso

o país apresente solução para os inúmeros problemas da atualidade em relação a produção do biocombustível de segunda geração (LORENZI; ANDRADE, 2019). Soma-se a isso a necessidade de se investir em Ciência e Tecnologia para o desenvolvimento de melhorias nos processos de produção, da matéria-prima, catalisadores biológicos de menor custo e o aumento da parceria público-privado se constituem em alguns pontos a serem melhorados e solucionados (LORENZI; ANDRADE, 2019; VICENTE et al., 2024). Vicente e colaboradores (2024) apontam que os principais desafios a serem superados se encontram: i) nos processos de pré-tratamento; ii) hidrólise enzimática; iii) redução de inibidores de fermentação e; iv) na maior produção do bioetanol. Além disso, os autores destacam a possibilidade de se utilizar o mesmo método de produção a partir da associação de diferentes matérias-primas, o que pode viabilizar a coprodução de outros biocombustíveis. Já Marinho e colaboradores (2020) realizaram a otimização de fatores (concentração de H_2SO_4 , tempo e temperatura) no processo de pré-tratamento da palha de cana-de-açúcar, sendo observado maior formação de açúcares redutores e solubilização dos componentes macromoleculares da biomassa, obtendo-se uma remoção de 30% dos componentes da palha, ocasionando uma maior produção de E2G. Por outro lado, Uliana e colaboradores (2024) implementaram o uso de micro-ondas e água ou solução ácida no processo de pré-tratamento físico-químico da biomassa, evidenciando que o mosto apresenta maiores teores de açúcares, o que possibilita a obtenção de destilados com maior concentração de álcool, o que pode elevar a produção de E2G. Por fim, o trabalho de Ruiz (2021) evidencia o aspecto econômico para obtenção do E2G, visto que os maiores efeitos de custos se encontram no processo de obtenção de insumos e na produção do biocombustível. Dentre as melhorias a serem implementadas nos diferentes processos químicos, se encontram o aproveitamento dos diferentes resíduos gerados que será tratado no próximo tópico.

5.4 Aproveitamento de resíduos gerados no setor sucroalcooleiro

O processo de produção de açúcar e etanol na usina sucroalcooleira leva a formação de uma diversidade de resíduos que em outros tempos eram fonte de descarte inadequado e, consequentemente, geravam inúmeros impactos ambientais como a contaminação do solo e de recursos hídricos. Entretanto, na atualidade estes mesmos resíduos se constituem em fontes que podem reduzir custos com energia elétrica, insumos químicos e aumentar a produção de etanol, a partir da obtenção de E2G (OLIVEIRA; CAVICHIOLI, 2024; SILVA et al., 2023; VIANA; SANTOS, 2023).

O processo de mecanização do corte na lavoura de cana-de-açúcar possibilitou a geração de maior quantidade de palha como resíduo tanto para melhorar a capacidade de retenção de umidade no solo, quanto o aumento da geração de

energia elétrica que, consequentemente, reduz os custos com energia e possibilita a venda do excedente para a concessionária autorizada de cada estado brasileiro, ocasionando a maior geração de renda e lucro para a usina (GOLDONI et al., 2022; VIANA; SANTOS, 2023). Já a torta de filtro e a vinhaça que antes se constituíam em enormes passivos ambientais, hoje se apresentam como alternativas para substituir fertilizantes que são aplicados na canavicultura, contribuindo para a redução de insumos químicos e o aumento da rentabilidade e sustentabilidade da produção de cana-de-açúcar (OLIVEIRA; CAVICHIOLI, 2024; SILVA et al., 2023).

Outrossim, a produção de *pellets* e blendas provenientes tanto do bagaço de cana-de-açúcar quanto de outras fontes de resíduos agroindustriais se apresentam como excelentes fontes de energia para fins industriais ou como fonte de biocombustíveis, conforme apontado nos trabalhos de Costa e colaboradores (2020) e Ponte e colaboradores (2019). Por outro lado, a maior obtenção de bagaço de cana-de-açúcar possibilita maior produção de energia elétrica em função da alta eficiência energética do bagaço de cana-de-açúcar apontado pelos trabalhos de Grotto e colaboradores (2021) e Oliveira, Nunes e Sousa (2020). Já a obtenção de E2G contribui tanto para a maior produção de biocombustível quanto para a redução dos impactos ambientais, conforme apontado por Silva e Silva (2021).

5.5 Eficiência das diferentes etapas do processo de produção do etanol

As usinas sucroenergéticas se constituem em um importante segmento que contribui para a diversificação da matriz energética brasileira proveniente de fontes renováveis de energia. Para se ter uma ideia, em 2010 a frota de veículos com tecnologia *flex-fuel* já representava 92% da frota nacional (ALVES et al., 2021; CASADO; BARBOSA, 2024). Além disso, o setor sucroalcooleiro vem buscando a inovação tecnológica em relação as diferentes etapas do processo de produção de açúcar e álcool, bem como a reutilização de diferentes biomassas residuais (palha, bagaço de cana-de-açúcar, torta e vinhaça) que contribuem para a redução dos diferentes impactos ambientais ocasionados pelas atividades do setor (BASERA; CHAKRABORTY; SHARMA, 2024; CASADO; BARBOSA, 2024).

Diante disso, todas as etapas do processo de produção do bioetanol apresentam limitações que devem ter atenção e foco, a fim de que se possa investir no desenvolvimento de pesquisas que busquem aprimorar os processos já existentes e alinhados com o menor custo de produção. Dentre as diversas etapas de tratamento, a literatura atual reporta trabalhos que envolveram as etapas de pré-tratamento e a hidrólise enzimática (BASERA; CHAKRABORTY; SHARMA, 2024; SUDHAKAR; NAIK, 2022). O estudo conduzido por Sudhakar e Naik (2022) aponta que a ausência do

pré-tratamento no processo de biorrefinaria lignocelulósica torna difícil e até mesmo inviável para ser realizado, sendo necessário investimento em pesquisas que resultem em técnicas que possibilitem a redução de custos no pré-tratamento e a geração de compostos menos nocivos à saúde humana e do meio ambiente. Já Barbosa e colaboradores (2020) apresentaram um estudo no qual se realizou o pré-tratamento do bagaço de cana-de-açúcar que reduziu o percentual de celulose, hemicelulose e lignina o que resultou na desestruturação das fibras e, por consequência, o aumento de sua cristalinidade, comprovado por análises espectroscópicas, melhorando a eficiência da sacarificação dos resíduos lignocelulósicos que podem aumentar a produção de E2G.

O processo de hidrólise enzimática se constitui em um dos maiores desafios para o segmento sucroalcooleiro, visto que as fontes de micro-organismos são escassas e de elevado custo, contribuindo para a alta do produto no mercado. Entretanto, inúmeras pesquisas vêm apontando para uma diversidade cada vez maior de fontes de enzimas provenientes de diversos resíduos agrícolas e algas marinhas, conforme apontado no trabalho de Vazi, Knez e Leitgeb (2021). Já Almeida e Nascimento (2021) defendem que o investimento no desenvolvimento de pesquisas se constitui na “chave” para abrir novos caminhos em relação a diversificação de novos micro-organismos que sejam mais eficientes, resistentes as condições estressantes e que apresentem menor custo financeiro, o que irá possibilitar tanto a maior produção de E2G quanto a redução de inúmeros impactos ambientais.

5.6 Utilização de tecnologias para a geração de etanol

O setor sucroalcooleiro emprega inúmeras tecnologias desde o plantio até a obtenção do etanol e o açúcar. Neste contexto, inúmeros processos industriais avançaram, entre os quais: a ultrafiltração, circuladores mecânicos, velocidade da colheita, melhoramento genético de espécies de cana-de-açúcar, sistemas de monitoramento, automação dentre outros (BRITO; MATAI; SANTOS, 2024; LIMA; CASTRO; ROCHA, 2022), que possibilita a redução nos custos de produção e as perdas nas diferentes etapas do processo (GUIDUCCI et al., 2021; MELLO; SANTOS; DUTRA, 2025; SILVA; ARANTES, 2023).

No processo de plantio da cana-de-açúcar já existem sistemas Autopilot capazes de analisar uma maior quantidade de informações em tempo real reduzindo o esforço físico de trabalhadores, bem como o aumento da segurança e precisão na coleta dos dados e o seu respectivo tratamento, conforme apontado no trabalho de Rodrigues e Geron (2023). Já Assaiane e Cavichioli (2020) abordam a utilização de VANTs que possuem a vantagem de fornecer informações com maior precisão, possibilitando melhorias no processo de produção, maior segurança na tomada de

decisão, redução de gastos com insumos dentre outros. Entretanto, demanda um elevado custo inicial para ser implementado, mas tal investimento é recuperado em pouco tempo.

Na etapa de corte e colheita ocorreu o processo de mecanização, possibilitando a redução de custos em todo o processo de obtenção do biocombustível e do açúcar. Além disso, possibilitou a agilidade dos diferentes processos gerenciais para obtenção de informações, reduzindo o tempo, erros, atrasos, tomadas de decisão e economia de material (LANÇONI et al., 2020). Entretanto, no trabalho de Lima (2021) o mesmo confirma tais benefícios, mas apresenta como aspecto negativo a redução de postos de trabalho, constantes crises no setor e a influência de áreas com topografias não planas. Já o processo de transporte da cana-de-açúcar até a usina sucroalcooleira se constitui na operação mais cara de todo o processo de produção, mas a utilização do sistema de transporte bate e volta apresenta redução significativa do custo operacional, conforme apresentado no trabalho de Elihimas e Spigolon (2022).

No setor do furador e da mesa de descarregamento, se encontram os processos mais morosos dentro da usina, visto que ocorre a formação de longas filas de espera. O trabalho de Rodrigues e Herculani (2021) apresentam resultados satisfatórios a partir do uso do *software* ARENA que contribui para a agilidade no processo de descarga da matéria-prima e, conseqüentemente, em maior rentabilidade para o usineiro. Já o processo de cozimento leva a produção de cristais com tamanho adequado e com baixa cor, sendo necessário um controle muito rigoroso de todo o processo que pode ser auxiliado por inúmeras tecnologias, entre as quais: sensores de sensibilidade, redes neurais, análise de imagem e uso do instrumento SeedMaster, conforme apontado no trabalho de Oliveira e Madaleno (2023).

No processo de peneiramento e homogeneização, a substituição da malha das peneiras estáticas são capazes de promover ganho significativo na qualidade da sacarose produzida na usina em um processo mais sustentável do ponto de vista ambiental, conforme apontado pelo estudo de Serapião e colaboradores (2025). Já Silva e Rodolpho (2022) reforçam a necessidade de empregar o homogeneizador de polímero, visto que o mesmo resultou em inúmeros benefícios entre os quais: redução na oscilação da cor do açúcar, economia com custos do processo de produção e diminuição da quantidade de polímero que alcançou 58% em valores mensais, sendo que tal investimento foi recuperado em oito meses. Por fim, o processo de destilação extrativa associado ao processo de adsorção com o uso de peneiras moleculares apresentaram maior capacidade de recuperação do solvente, visto que ocorreu o abaixamento da volatilidade do adsorvente o que implica na redução de custos com insumos. Entretanto, apresenta um elevado custo para a implementação da tecnologia, conforme apresentado por Santos e colaboradores (2021).

A discussão dos resultados possibilitaram compreender melhor o atual cenário do setor sucroenergético brasileiro, bem como os desafios a serem superados nos próximos anos. Em termos ambientais, inúmeros estudos apontam significativas mudanças em relação ao melhor aproveitamento de resíduos que já foram verdadeiros passivos ambientais e que possuíam valores insignificantes para o próprio segmento sucroalcooleiro. Na atualidade, os resíduos de palha de cana-de-açúcar são utilizados na própria lavoura para aumentar a capacidade de retenção de umidade ou utilizados na queima para a produção de energia elétrica para ser consumida dentro do complexo industrial. Já o bagaço de cana-de-açúcar é bastante utilizada para a geração de energia elétrica, enquanto outra parte vem sendo testada para a produção de E2G, a fim de aumentar a produtividade do biocombustível na unidade fabril. Por outro lado, a torta e a vinhaça vêm apresentando resultados significativos em relação ao uso como fertilizante nas lavouras, reduzindo os gastos com fertilizantes e promovendo maior ganho para o canavicultor.

Os aspectos políticos são marcados por legislações ambientais que não são colocadas em prática em função da falta de fiscalização. Já as políticas públicas voltadas para o desenvolvimento do setor são extremamente engessadas, reduzindo a competitividade do segmento no mercado nacional e internacional, minimizando a eficiência energética que o segmento pode apresentar a médio e longo prazo. O segmento necessita, urgentemente, de políticas públicas que favoreçam a parceria público-privada, bem como linhas de crédito que possibilitem as usinas acompanharem o avanço tecnológico do setor, implementando as inúmeras tecnologias que possam contribuir para aumentar a produção e competitividade do setor. Soma-se a isso a necessidade de investimento e P&D, a fim de obter técnicas e processos que reduzam o custo de produção alinhado ao aumento da produtividade e a maior sustentabilidade ambiental do segmento sucroenergético. Por fim, a produção de E2G se encontra diretamente associada aos inúmeros pontos elencados, no qual o Brasil caminha a curtos passos para superar tais barreiras e investir no maior aproveitamento de resíduos lignocelulósicos para a produção de E2G.



6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho possibilitou uma maior compreensão do atual cenário em que se insere o setor sucroenergético brasileiro, demonstrando inúmeros avanços em relação a questão de sustentabilidade, ainda que necessite resolver inúmeros outros problemas que se encontram relacionados a questões de ordem tecnológica, econômica e política. Ao se analisar os aspectos socioambientais, observa-se a adoção de inúmeras práticas mais sustentáveis, tais como: o reuso de água, a utilização de torta e vinhaça como fertilizantes nas lavouras, a manutenção de parte da palha no solo do canavial, o melhor aproveitamento do bagaço de cana-de-açúcar para a geração de energia elétrica com possibilidade de produzir E2G.

Em termos de questão política, exige-se uma maior fiscalização ambiental por parte dos órgãos regulatórios e normativos. Além disso, a escassez de políticas públicas que estimulem o investimento financeiro em projetos de P&D, modernização das usinas em relação aos melhores recursos tecnológicos existentes na atualidade e a menor influência do poder público em relação aos custos de produção são alguns paradigmas a serem superados neste quesito.

Portanto, o Brasil possui grande potencial para ampliar a produção de E2G, em virtude da disponibilidade de matéria-prima e da estrutura consolidada do setor sucroalcooleiro, desde que supere as limitações já apresentadas e discutidas anteriormente. Dessa forma, o país poderá consolidar-se como referência mundial na produção de biocombustíveis sustentáveis, contribuindo para a diversificação da matriz energética e para a redução dos impactos ambientais.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, S. C.; NASCIMENTO, D. D. Revisão: leveduras utilizadas na produção de Etanol de Segunda Geração. **Bioenergia em revista: diálogos**, Piracicaba, v.11, n.1, p.99-119, jan./jun. 2021. <http://fatecpiracicaba.edu.br/revista/index.php/bioenergiaemrevista/article/view/414/373802>

ALVES, L. Q. et al. Performance of Sugarcane culture production in the main producing states. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, Tupã, v. 15, n. 2, p.303-317, fev./jul. 2021. <http://dx.doi.org/10.18011/bioeng2021v15n2p303-317>

AMORIM, F. R.; SILVA, S. A.; IZEPPE, F. R. Tendências de custos com insumos na produção de cana-de-açúcar: uma abordagem através da Simulação de Monte Carlo. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente – RAMA**, Maringá, v.17, n.4, p.24-40, 2024. <http://dx.doi.org/10.17765/2176-9168.2024v17n4e10997>

ARAÚJO, G. J. F.; FILHO, A. R.; COLIN, N. M. As relações entre as políticas governamentais e o setor sucroenergético. **Conjunto & Planejamento**, Salvador, n. 196, p.53-67, jan./jun. 2019. https://www.researchgate.net/publication/339831362_AS_RELACOES_ENTRE_AS_POLITICAS_GOVERNAMENTAIS_E_O_SETOR_SUCROENERGETICO

AREIAS, A. Aspectos político-econômicos, sociais e ambientais do uso da biomassa de cana-de-açúcar para geração de energia elétrica. **Scientific Eletronic Archives**, São Carlos, v. 13, n.3, p.77-80, jan./jun.2020. <http://dx.doi.org/10.36560/1332020826>

ASSAIANTE, B. A. S.; CAVICHIOLO, F. A. A utilização de veículos aéreos não tripulados (VANT) na cultura da cana-de-açúcar. **Revista Interface Tecnológica**, Taguaritinga, v. 17, n.1, p.445-455, jul./dez. 2020. <https://doi.org/10.31510/infa.v17i1.804>

BARCELOS, M. Políticas de biocombustíveis no Brasil: uma análise da agenda do álcool combustível com base no papel das ideias e dos agentes. **Campos Neutrais - Revista Latino-Americana de Relações Internacionais**, Rio Grande, v. 3, n. 1, p.12–26, 2021. <https://doi.org/10.14295/cn.v3i1.13065>

BASERA, P.; CHAKRABORTY, S.; SHARMA, N. Lignocellulosic biomass: insights into enzymatic hydrolysis, influential factors, and economic viability. **Discover Sustainability**, v.5, n. 311, p.1-16, jun./out. 2024. <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00543-5>

- BORGES, C. P.; GIGLIOLLI, A. A. S. Avaliação do acervo de informações de teores de celulose, hemicelulose e lignina na biomassa do bagaço de cana-de-açúcar. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v.6, n.9, p.71782-71791, jun./out. 2020. <https://doi.org/10.34117/bjd-v6n9-574>
- BRITO, J. L. R.; MATAI, P. H. I. S.; SANTOS, M. R. Inovação e a produção do etanol de cana-de-açúcar. **Revista de Gestão e Secretariado – GeSec**, São José dos Pinhais, v. 15, n. 3, p.01-25, 2024. <http://doi.org/10.7769/gesec.v15i3.3537>
- BRITO, J. L. R.; MATAI, P. H. I. S.; SANTOS, M. R. Ethanol production from sugarcane associated with ESG practices. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v.9, n.10, p. 28507-28518, 2023. <http://dx.doi.org/10.34117/bjdv9n10-068>
- BRODA, M.; YELLE, D.; SERWANSKA, K. Bioethanol Production from Lignocellulosic Biomass—Challenges and Solutions. **Molecules**, v.27, n.8717, p.1-27, jul./dez. 2022. <https://doi.org/10.3390/molecules27248717>
- CARVALHO, I. V. M.; PEREIRA, R. M. Impacto Econômico, social e político da transição energética no Brasil. **Revista Ibero- Americana de Humanidades, Ciências e Educação- REASE**, São Paulo, v.10, n.06, p.715-736, jan./jun. 2024. <https://doi.org/10.51891/rease.v10i6.14325>
- CASADO, L. D.; BARBOSA, A. T. R. Evaluation of energy efficiency in sugar cane bass burning processes in sugar and alcoholic plants. **Journal of Engineering and Exact Sciences**, Viçosa, v. 10, n. 02, p.1-7, jan./jun. 2024. <https://doi.org/10.18540/jcecvl10iss2pp16962>
- COELHO, L. F.; BRAGAGNOLO, C. Eficiência técnica na produção de etanol: uma abordagem regional. **Textos de Economia**, Florianópolis, v. 24, n. 2, p.01-26, jul./dez. 2022. <https://doi.org/10.5007/2175-8085.2021.e83560>
- CORDEIRO, N. K. et al. Gestão de resíduos agrícolas como forma de redução dos impactos ambientais. **Revista de Ciências Ambientais**, Canoas, v. 14, n. 2, p. 23-34, jul./dez. 2020. <http://dx.doi.org/10.18316/rca.v14i.5593>
- CORREA, W.; FEIL, A. A. Avaliação dos impactos físicos, bióticos e antrópicos de Usinas Sucroenergéticas de Minas Gerais. **Revista Destaques Acadêmicos**, Lajeado, v. 15, n. 1, p. 53-74, out./dez. 2023. <https://doi.org/10.22410/issn.2176-3070.v15i1a2023.3315>
- COSTA, A. C. L. A. et al. Caracterização física, química e mecânica de Pellets de Bagaço de Cana-de-Açúcar. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 35, n. 1, p. 38-45, jan./mar. 2020. <http://dx.doi.org/10.17224/EnergAgric.2020v35n1p38-45>

COSTA, B. E. B. Comparação entre a Hidrólise Química e Enzimática da Biomassa Lignocelulósica para a Produção de Bioetanol: uma Revisão. **Revista Virtual de Química**, São Paulo, v.13, n.1, p.1-19, jan./fev.2021. <https://doi.org/10.21577/1984-6835.20200140>>

D'ALESSANDRO, V. R.; CAVICHIOLI, F. A. A importância do Setor sucroalcooleiro na economia brasileira. **Interface Tecnológica**, São Paulo, v. 21 n. 1, p.666-680, abr./jun. 2024. https://revista.fatectq.edu.br/interfacetecnologica/pt_BR/article/view/1922/1066

DIAS, F. M. F. Alguns elementos sobre a cadeia produtiva da cana-de-açúcar no Brasil. **Geosul**, Florianópolis, v. 36, n. 79, p.116-142, mai./ago. 2021. <https://doi.org/10.5007/2177-5230.2021.e73805>

DOMINGUES, R. C. et al. Determinação socioambiental da saúde em territórios produtores de cana-de-açúcar em Pernambuco. **Ciência & Saúde Coletiva**, São Paulo, v. 30, p.1-11, jan./mar. 2025. <http://dx.doi.org/10.1590/1413-81232025301.077.12023>

DUARTE, V. H. et al. Biocombustíveis: uma revisão sobre o panorama histórico, produção e aplicações do biodiesel. **Meio Ambiente**, São Paulo, v. 4, n.2, p.50-68, jun./jul. 2022. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7325287>

ELIHIMAS, L. B.; SPIGOLON, L. M. G. A importância do conjunto reserva na logística do transporte de cana-de-açúcar. **Logística e Operações Globais Sustentáveis**, São Paulo, v. 4, n. 1, p.36-53, jan./fev. 2022. <https://doi.org/10.5935/2674-7928/LOGS.v4n1p36-53>

ELRAYIES, G. M. Microalgas: Perspectivas para edifícios mais verdes no futuro. **Análises de Energia Renovável e Sustentável**, v.81, n.1, p.1175-1191, jan./fev.2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.032>

FREHNER, A. L. et al. Agroindústria canavieira e a economia circular: um estudo de caso na usina de Bandeirantes (Paraná). **Revista Desenvolvimento, Fronteiras & Cidadania**, Ponta Porã, v.8, n. 1, p.1-19, mai./jul. 2024. <https://periodicosonline.uems.br/fronteriacidadania/article/view/9276>

GOLDONI, E. L. et al. Aproveitamento de palha de cana-de-açúcar para o incremento de geração de energia elétrica: revisão sistemática da literatura. **Research, Society and Development**, Vargem Grande Paulista, v. 11, n. 12, p.1-10, jan. 2022. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i12.34232>

GROTTO, C. G. L. et al. Caracterização da biomassa de bagaço de cana-de-açúcar com vistas energéticas. **ForScience**, Formiga, v. 9, n. 1, p.1-16, jan./jun. 2021. <https://doi.org/10.29069/forscience.2021v9n1.e928>

GUIDUCCI, R. C. N. et al. Avaliação de impacto *ex ante* da adoção do ativo tecnológico 'Cana Flex' para produção de Etanol de Segunda Geração. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, Brasília, v. 38, n. 3, p.1-14, jan./nov. 2021. <https://doi.org/10.35977/0104-1096.cct2021.v38.26882>

GUNES, B. et al. Pré-tratamentos para melhorar o rendimento e a qualidade do biogás a partir da digestão anaeróbica de resíduos de destilarias e cervejarias de uísque: uma revisão. **Análises de Energia Renovável e Sustentável**, v.113, n.1, 109281,out. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109281>

HOFFMANN, L. P. M. et al. Comportamento térmico de lignina residual de pré-tratamento de Biomassa Lignocelulósica. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.12, n.4, p.353-363, abr./2021. <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.004.0028>

KLEDSON, L. B. et al. Pré-tratamento de Explosão a Vapor, Caracterização Química e Morfológica do Bagaço da Cana-de-Açúcar Usado para Produção de Etanol 2G. **Revista Virtual de Química**, São Paulo, v. 12, n.1, p.63-74, dez. 2020. <https://doi.org/10.21577/1984-6835.20200007>

LANÇONI, A. A. et al. Efeito da Aplicação de um Sistema de Automação Agrícola em Colheita Mecanizada de Cana-de-Açúcar como Ferramenta de Gestão e Controle de Custo Operacional. **Ensaio**, v. 24, n. 2, p.146-152, fev./mar. 2020. <https://doi.org/10.17921/1415-6938.2020v24n2p146-152>

LIMA, R. R. F. Produtos ecológicos para a Indústria da Construção Civil. **Cerâmica Industrial**, São Cristóvão, v. 29, p.1-10, jan./fev. 2024. <https://doi.org/10.4322/cerind.2024.042>

LIMA, J. R.; CASTRO, R. B. R.; ROCHA, E. M. F. Sistema Operacional de uma Usina de Etanol do Pontal do Triângulo Mineiro para Produção de Energia Renovável. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v.8, n.1, p.5268-5277, jan. 2022. <https://doi.org/10.34117/bjdv8n1-352>

LIMA, J. R. T. Colheita mecanizada da cana-de-açúcar: o que nos revelam os especialistas do setor sobre as motivações e impeditivos da sua adoção na realidade canavieira de Alagoas? **Estudos Sociedade e Agricultura**, Rio de Janeiro, v. 29, n. 1, p.219-246, fev./mai. 2021. <https://doi.org/10.36920/esa-v29n1-12>

LIMA, J. R. T.; CARVALHO, C. P. Mecanização da produção canavieira brasileira e suas alterações para o mercado de trabalho no período de 2008 a 2018. **Revista Pegada**, Presidente Prudente, v. 24, n.1, p.195-228, mar./mai. 2023. <https://doi.org/10.33026/peg.v24i1.9205>

- LIMA, J. R. T.; RUMIN, C. R. Menos acidentes, mais mortes. A mecanização agrícola nos canaviais brasileiros e seus reflexos sobre os trabalhadores, no período de 2012 a 2020. **Saúde e Sociedade**, São Paulo, v.32, n.4, p.1-13, mai./jul. 2023. <https://doi.org/10.1590/S0104-12902023230603pt>
- LORENZI, B. R.; ANDRADE, T. H. N. O etanol de segunda geração no Brasil: Políticas e redes sociotécnicas. **Revista Brasileira de Ciências Sociais**, São Paulo, v.34, n. 100, p.1-19, jun./out. 2019. <https://doi.org/10.1590/3410014/2019>
- MARINHO, C. C. P. et al. Pré-tratamento ácido da palha de cana-de-açúcar visando a produção de etanol de segunda geração. **Revista Tecnologia e Sociedade**, Curitiba, v.16, n.41, p.1-14, jan./mar. 2020. <https://doi.org/10.3895/rts.v16n41.11804>
- MATOS, P. F.; MARAFON, G. J. Dinâmica territorial do setor sucroenergético em Santa Vitória, Minas Gerais. **Revista Campo-Terrório**, Uberlândia, v. 15, n. 37, p.01–18, jul./ago. 2020. <https://doi.org/10.14393/RCT153701>
- MEDEIROS, J. K. Cana-de-açúcar no Brasil. **Revista de Educação a Distância do IFSC**, Florianópolis, v.1, n.5, p.40-54, jul./ago. 2024. https://scholar.google.com/scholar?hl=pt-BR&as_sdt=0%2C5&q=MEDEIROS%2C+J.+K.+Cana-dea%C3%A7%C3%BACar+no+Brasil.+Revista+de+Educa%C3%A7%C3%A3o+a+Dist%C3%A2ncia+do+IFSC%2C+v.1%2C+n.5%2C+p.40-54%2C+2024.&btnG=
- MELLO, I. P.; SANTOS, V. S.; DUTRA, J. A. A. O processo de inovação tecnológica no CCT logístico da cana-de-açúcar. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v.11, n.1, p.01-17, nov./dez. 2024. <https://doi.org/10.34117/bjdv11n1-031>
- MENEZES, R. et al. Biomassa, energia e desenvolvimento na região Nordeste do Brasil: Histórico e Perspectivas. **Revista Inovação e Desenvolvimento**, Recife, v.1, n.9, p.18-25, jan./abr. 2024. <https://revistainovacao.facepe.br/index.php/revistaFacepe/article/view/93>
- MORETTI, E. C.; CAMPOS, B. F.; MADER, A. M. P. Mundo da sustentabilidade e a produção da natureza no Brasil. **Revista Territorial**, Goiás, v.13, n.2, p.66-95, jul./dez. 2024. <https://www.revista.ueg.br/index.php/territorial/article/view/16012>
- MEDEIROS, Jucelio Kulmann de. Cana-de-açúcar no Brasil. **Revista de Educação a Distância do IFSC**, Florianópolis, v.1, n.5, p.40-54, jul. 2024. <https://ojs.ifsc.edu.br/index.php/eadifsc/article/view/3783>
- NOVACANA. **As usinas de Açúcar e Etanol do Brasil**. 2021. Disponível em: https://www.novacana.com/usinas_brasil/estados

NOVAIS, R. C. et al. Ethanol production and its environmental impacts in the alcoholic industry of Alagoas, Brazil. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Pombal, v. 16, n. 3, p.98–306, jun./jul. 2021. <https://www.gvaa.com.br/revista/index.php/RVADS/article/view/8616>

NOVAIS, R. C. et al. Management of polluting waste from sugarcane industries in the state of Alagoas, Brazil. **Green Journal of Agroecology and Sustainable Development**, Pombal, v. 16, n.4, p.408-412, jul./set. 2021. <http://dx.doi.org/10.18378/rvads.v16i4.9248>

OLIVEIRA, G. F.; CAVICHIOLI, F. A. Uso de Torta de filtro na cultura da cana-de-açúcar. **Revista Interface Tecnológica**, Taquaritinga, v. 21, n. 1, p.597–607, jan./fev. 2025. <https://revista.fatectq.edu.br/interfacetecnologica/article/view/1889>

OLIVEIRA, M. P.; MADALENO, L. L. Controle do processo de cozimento na produção de açúcar. **Ciência & Tecnologia**, Jaboticabal, v. 15, n. 1, p.1-21, fev./mai. 2023. <https://publicacoes.fatec-jaboticabal.edu.br/citec/article/view/272>

OLIVEIRA, M. R. et al. Os impactos ambientais do setor sucroenergético e o uso de indicadores de sustentabilidade. **Revista de Desenvolvimento Econômico – RDE**, v.2, n.52, p.315-341, mar./mai. 2022. <http://dx.doi.org/10.36810/rde.v2i52.7910>

OLIVEIRA, R. M. M.; NUNES, M. T. A. S.; SOUSA, R. M. S. Pré-Tratamento Químico e Caracterização do Bagaço da Cana: uma Perspectiva para Produção de Etanol a partir de Resíduos Agroindustriais. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v.6, n.11, p.87865-87879, out./nov. 2020. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n11-273>

PONTE, M. R. et al. Blendas de bagaço de cana-de-açúcar, podas de mangueira e cajueiro: caracterização das propriedades e investigação de seus potenciais energéticos. **Revista Matéria**, São Paulo, v.24, n.2, p.1-12, jun./out. 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/S1517-707620190002.0687>

RODRIGUES, G. J. et al. Análise do ciclo de vida do concreto autoadensável com e sem adição de cinza de bagaço de cana-de-açúcar. **Revista Caderno Pedagógico**, Curitiba, v. 21, n.12, p.1-20, out./nov. 2024. <https://doi.org/10.54033/cadpedv21n12-216>

RODRIGUES, M. A.; GERON, L. C. Agricultura de Precisão: sistema Autopilot sintetizado com a automação do maquinário agrícola na plantação de cana-de-açúcar. **Simpósio de Tecnologia (Sitefa)**, v. 6, n. 1, p.1-9, 2023. <https://publicacoes.fatecsertaozinho.edu.br/sitefa/article/view/258/183>

RODRIGUES, V. A. R.; HERCULANI, R. Simulação em software arena para entrada de cana-de-açúcar. **Interface Tecnológica**, Taquaritinga, v. 17 n. 1, p.303-317, fev./mar. 2020. <https://doi.org/10.31510/inf.v17i1.735>

RUIZ, S. C. M. Análise dos efeitos totais, diretos, indiretos e de transbordamento na economia brasileira mediante o aumento na produção de Etanol via etano de Segunda Geração: A luz da análise de insumo-produto. **Revista de Economia Regional Urbana e do Trabalho**, v 10, n. 2, p.65-87, fev./nov. 2021. <https://periodicos.ufrn.br/rerut/article/view/24036/15032>

SANT'ANNA, A. C. M.; TABAI, L.; MALDONADO, R. R. Pré-tratamento ácido e básico de resíduos agroindustriais para obtenção de Etanol de Segunda Geração. **Revista Hipótese**, Itapetinga, v. 6, n.1, p.211-226, 2019. <https://revistahipotese.editoraiberoamericana.com/revista/article/view/71/65>

SANTOS, H. F.; CASTILLO, R. Territorial vulnerability of globalized agribusiness in Brazil: crisis in the sugar-energy sector and the local implications. **Geousp – Espaço e Tempo**, Santa Cruz do Sul, v. 24, n. 3, p.508-532, mar./nov. 2020. <https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geousp.2020.166602>

SANTOS, M. C. et al. Principais Tecnologias para Produção de Etanol Anidro no Brasil. **Revista Virtual de Química**, São Paulo, v.1, n.12, p.1-13, mar./abr. 2021. <https://dx.doi.org/10.21577/1984-6835.20210076>

SCOPEL, E. **Aproveitamento integral do capim elefante na produção de etanol celulósico**. 2019. 130 f. Dissertação (Mestrado em Química), Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2019. <https://doi.org/10.47749/T/UNICAMP.2019.1093569>

SERAPIÃO, C. S. et al. Projeto no aperfeiçoamento da clarificação do caldo na Usina Sucroalcooleira. **Revista de Engenharia, TI e Inovação**, Uberaba, v.2, n.1, p.1-7, jul. 2025. <https://doi.org/10.31496/retii.v2i1.1900>

SILVA, A. B. L.; QUEIROZ, E. S. Impactos econômicos e ambientais da produção do Etanol de Segunda Geração no Brasil. **Engineering Sciences**, v.10, n.2, p.31-38, jun./dez. 2022. <http://doi.org/10.6008/CBPC2318-3055.2022.002.0004>

SILVA, C. Paz; ARANTES, F. P. Operacional padrão no setor de recepção e preparo da cana-de-açúcar de uma empresa sucroalcooleira. **Revista Produção Online**, Florianópolis, v. 23, n. 4, p.1-21, dez.2023. <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v23i4.5123>

SILVA, C. C.; POLLI, S. A. A. O programa nacional de produção e uso do biodiesel - PNPB e a atuação da agricultura familiar. **Brazilian Journal of Health Review**, Curitiba, v. 3, n. 2, p.3542-3555, mar./abr. 2020. <https://doi.org/10.34119/bjhrv3n2-184>

SILVA, D. G.; RODOLPHO, D. Proposta de melhoria no processo de decantação no tratamento de caldo de uma usina de açúcar e etanol. **Revista Interface Tecnológica**, Taquaritinga, v. 19, n.2, p.734-746, set./dez. 2022. https://revista.fatectq.edu.br/interfacetecnologica/pt_BR/article/view/1504/847

SILVA, J. H. B. et al. Uso de vinhaça concentrada e enriquecida como biofertilizante na cana-de-açúcar: Uma revisão. **Scientific Electronic Archives**, Rondonópolis, v. 16, n.2, p.1-8, fev. 2023. <https://doi.org/10.36560/16220231651>

SILVA, J. M.; BORGES, F. F.; JARDIM, C. A. Análise da sustentabilidade ambiental em uma agroindústria sucroalcooleira. **Ciência & Tecnologia: Fatec Nilo De Stefani**, Jaboticabal, v. 17, n. 1, p.1-12, abr. 2025. <https://doi.org/10.52138/citec.v17i01.393>

SILVA, M. D. I.; SILVA, J. M. P. Geração de energia elétrica a partir da biomassa: uma aplicação do bagaço da cana-de-açúcar. **Revista Multidisciplinar do Sertão**, Recife, v. 3, n.3, p.313-322, abr./jun. 2021. <https://doi.org/10.37115/rms.v3i3.357>

SOARES, A. A.; JUNIOR, J. C. Z. O Brasil como grande *player* no mercado mundial de etanol. **Revista Política Agrícola**, Brasília, v.2, n.3, p.57-71, jul./set. 2021. <https://rpa.sede.embrapa.br/RPA/article/view/1649>

SOARES, M. S. S. et al. Estudo do processo evaporativo em Indústria Sucroalcooleira no Município de Sirinhaém em Pernambuco. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n.6, p.34163-34177, mai./jun. 2020. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n6-096>

STARLING, E. T.; BORGES, A. W.; SQUEFF, T. A. Transformações na regulação dos Biocombustíveis no Brasil: Percurso Histórico-Institucional e Perspectivas Sustentáveis. **Revista Aracê**, São José dos Pinhais, v.7, n.6, p.29124-29137, mai./jun. 2025. <https://doi.org/10.56238/arev7n6-006>

STOLF, R.; OLIVEIRA, A. P. R. The sucesso of the Brazilian Alcohol Program (PROÁLCOOL) – A decadeby- decade brief history of Ethanol in Brasil. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.40, n.2, p.243-248, mar./abr. 2020. <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v40n2p243-248/2020>

SUDHAKAR, V; NAIK, S. S. Pretreatment, Hydrolysis and Fermentation of Lignocellulosic Biomass for Bioethanol. **Current World Environment**, v.7, n.1. p.113-121, ago./dez. 2022. <http://dx.doi.org/10.12944/CWE.17.1.10>

TEIXEIRA, D. A. Produção de Etanol de Segunda Geração a partir de Agupapé: Uma Revisão. **Revista Virtual Química**, São Paulo, v. 11, n.1, p.1-17, mar./abr. 2019. <http://rvq.sbq.org.br>

ULIANA, M. R. et al. Maximizando o Etanol de Segunda Geração a partir de biomassa. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente – RAMA**, Maringá, v.17, p.1-13, mar./set. 2024. <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2024v17n.Especial.e12577>

VASI, K.; KNEZ, Z.; LEITGEB, M. Bioethanol Production by Enzymatic Hydrolysis from Different Lignocellulosic Sources. **Molecules**, v.26, n.753, p.1-23, jan./fev.2021. <https://doi.org/10.3390/molecules26030753>

VIANA, A. M. L.; SANTOS, P. S. B. Reutilização da palha da cana-de-açúcar como fonte de biomassa para cogeração de energia: uma revisão sistemática da literatura. **Revista Científica Multidisciplinar-RECIMA21**, São Paulo, v.4, n.11, p.1-25, nov./dez. 2023. <https://doi.org/10.47820/recima21.v4i11.4351>

VICENTE, M. S. et al. Resíduos agroindustriais utilizados para a fabricação de Etanol de Segunda Geração. **Ciência & Tecnologia: FATEC-JB**, Jaboticabal, v. 16, n. 1, p.1-16, out./nov. 2024. <https://doi.org/10.52138/citec.v16i1.394>

ÍNDICE REMISSIVO

A

Açúcar 4, 6, 7, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 19, 21, 22, 23, 24, 25, 27, 28, 29, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57

Agronegócio brasileiro 1, 4

Agrotóxicos 12, 22, 27, 29, 40

Amostragem 13, 14

B

Biocombustíveis 6, 1, 5, 25, 30, 31, 34, 35, 37, 43, 44, 48, 49, 51, 56

Biodiesel 7, 30, 42, 51, 55

Bioenergia 6, 5, 49

Bioetanol 25, 31, 36, 42, 43, 44, 51

Biomassas 30, 40, 42

Biomassa 4, 6, 1, 2, 5, 7, 17, 18, 19, 21, 22, 25, 29, 31, 32, 33, 34, 35, 40, 42, 43, 49, 50, 51, 52, 53, 56, 57

C

Calagem 15

Cana-de-açúcar 6, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 11, 12, 13, 14, 15, 19, 21, 22, 23, 24, 25, 27, 28, 29, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57

Canaviais 11, 12, 22, 28, 53

Canavicultura 3, 4, 11, 12, 13, 22, 29, 33, 38, 39, 40, 41, 44

Celobiose 7

Celulase 18, 20

Células vegetais 5

Celulose 5, 6, 7, 8, 9, 10, 17, 18, 19, 20, 23, 36, 45, 50

Colheitadeiras 11, 12

Combustíveis fósseis 1, 4, 35

D

Decantadores 16

Demanda Bioquímica de Oxigênio 7, 23

Desenvolvimento científico e tecnológico 32, 39

E

Efeito estufa 1, 22, 28, 30, 34, 36, 40

Energia elétrica 1, 23, 29, 33, 34, 35, 40, 41, 42, 43, 44, 47, 48, 49, 51, 56

Energias renováveis 1, 36

Enzimas 10, 18, 35, 36, 45

Etanol 4, 6, 7, 1, 2, 3, 4, 11, 13, 16, 17, 19, 20, 21, 25, 26, 28, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 42, 43, 44, 45, 49, 50, 52, 53, 54, 55, 56, 57

Etanol de Segunda Geração (E2G) 6, 2, 17, 31, 42

Eutrofização 22, 23

F

Fauna 27, 40

Fermentação 6, 17, 18, 21, 31, 34, 36, 43

Fertilizantes 22, 23, 24, 28, 29, 33, 35, 40, 44, 47, 48

Flex-fuel 3, 11, 36, 44

Flora 27, 40

Fontes renováveis 5, 28, 30, 34, 41, 44

G

Gás carbônico 7, 1, 21, 22

Gases de efeito estufa 7, 4, 30

Glicose 7, 8, 20, 21

H

Hemicelulose 5, 6, 7, 8, 9, 10, 18, 19, 23, 34, 36, 45, 50

Hidrogênio verde 1

Hidrólise 6, 9, 17, 18, 19, 20, 21, 31, 34, 36, 44, 45, 51

I

Impactos ambientais 2, 22, 25, 27, 28, 29, 32, 33, 35, 36, 40, 41, 43, 44, 45, 48, 50, 54

Impacto socioambiental 1

Inovação tecnológica 35, 37, 44, 53

L

Lignina 5, 6, 7, 9, 10, 18, 23, 34, 36, 45, 50, 52

Lignocelulósico 5, 6, 7, 25, 36

M

Macromoléculas 8

Matérias-primas 31, 36, 39, 43

Matriz energética 6, 5, 28, 35, 41, 44, 48

Mecanização 11, 13, 33, 39, 43, 46, 52, 53

Micro-organismos 10, 16, 21, 36, 45

Moagem 13, 15

Monocultura 27, 29

Mosto 16, 31, 43

Motor flex-fuel 3, 11

N

natureza 1, 5, 8, 53

P

Palha 15, 22, 25, 29, 32, 33, 43, 44, 47, 48, 51, 53, 57

Parede celular 5, 6

Pegada de carbono 4

Peneiramento 15, 46

Pesagem 13, 14

Polímero 7, 9, 46

Polissacarídeos 5, 6, 35

Políticas governamentais 26, 29, 30, 37, 41, 42, 49

Poluição atmosférica 22, 27

Proálcool 7, 3, 11

Processos industriais 1, 2, 25, 37, 45

R

recursos hídricos 22, 23, 27, 28, 30, 40, 42, 43

recursos naturais 1

resíduo 6, 23, 24, 28, 30, 38, 43

reuso de água 27, 40, 48

reutilização 6, 29, 35, 44

Reutilização 33, 57

S

segmento sucroalcooleiro 1, 2, 27, 29, 33, 35, 36, 38, 40, 42, 45, 47

segurança energética 1

software 38, 46, 55

sustentabilidade ambiental 27, 47, 56

T

Torta de filtro 22, 24, 33, 44, 54

Tratamento do caldo 15, 16, 38

U

Usinas sucroalcooleiras 4, 11, 25, 28, 35, 41

V

Vinhaça 6, 22, 23, 28, 29, 31, 33, 38, 41, 42, 44, 47, 48, 56

X

Xarope 16, 60

AUTORES

BRUNA BARBOSA ALVES – Bacharel em Engenharia Química pela Universidade Santo Amaro (UNISA). Atuou como Técnica de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) Analítico - Prati Donaduzzi - Indústria Farmacêutica. Técnica da Qualidade- Sealed Air Corporation. Analista de Projetos e Processos - Rei da Abundância.

ANDERSON ALVES DA SILVA – Técnico em Química pelo Centro Federal de Educação Tecnológica (CEFET - MG), Bacharel em Engenharia Química e em Engenharia Ambiental pela Universidade Santo Amaro (UNISA), Bacharel em Engenharia de Produção pela Universidade de Uberaba (UNIUBE), Especialista em Segurança dos Alimentos pelo Serviço Nacional do Comércio (SENAC), Especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho pela Pontifícia Universidade Católica (PUC – Minas), Especialista em Engenharia Sanitária pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Auditor Líder da ABQUIM (Associação Brasileira da Indústria Química), Consultor e Auditor Líder em Qualidade, Meio Ambiente, Saúde e Segurança do Bureau Veritas (BVQI) há mais de 20 anos. Consultor em empresas de diversos segmentos: Alimentos, Química, Mineração, Automobilística, Têxtil, Energia Elétrica, Petróleo e Gás, Construção Civil, Siderurgia e Metalurgia dentre outros.

CLEISEANO EMANUEL DA SILVA PANIAGUA - Técnico em Química pelo Colégio Profissional de Uberlândia (2008), Bacharel em Química pela Universidade Federal de Uberlândia (2010), Licenciado em Química (2011) e Bacharel em Química Industrial (2023) pela Universidade de Uberaba (UNIUBE) e Bacharel em Engenharia Química (2025) pela Universidade Santo Amaro (UNISA). Especialista em Química Analítica (2024) e em Gestão e Produtividade (2024) ambas pela Faculdade Metropolitana do Estado de São Paulo (FAMEESP). Mestre (2015) e Doutor (2018) em Química Analítica pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU), com estágio Pós-doutoral em Química (2020-2023) pela UFU. Atuou como Químico no Instituto Federal de Goiás (2010-2022), químico e responsável técnico pelos laboratórios da Unicesumar/Polo Patrocínio e professor do SENAI de Minas Gerais e Goiás. Atualmente é professor de química do Colégio Militar do Tocantins em Araguaína/TO. Possui interesse nas seguintes linhas de pesquisa: (i) desenvolvimento de novas metodologias para tratamento e recuperação de resíduos químicos gerados em laboratórios de instituições de ensino e pesquisa; (ii) estudos de monitoramento de Contaminantes de Preocupação Emergente (CPE); (iii) Desenvolvimento de novas tecnologias avançadas para remoção de CPE em diferentes matrizes aquáticas; (iv) Aplicação de processos oxidativos avançados (H_2O_2 /UV C, TiO_2 /UV-A e foto-Fenton e outros) para remoção de CPE em efluentes de estação de tratamento de efluentes para reuso; (v) Estudo e desenvolvimento de novos bioadsorventes para remediação ambiental de CPE em diferentes matrizes aquáticas e (vi) Educação Ambiental.



Aproveitamento de Biomassa da Cana-de-Açúcar para a produção de Etanol de 2ª Geração (E2G)

Desafios, Perspectivas e Viabilidade Econômica



www.atenaeditora.com.br



contato@atenaeditora.com.br



[@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)



www.facebook.com/atenaeditora.com.br



Aproveitamento de Biomassa da Cana-de-Açúcar para a produção de Etanol de 2ª Geração (E2G)

Desafios, Perspectivas e Viabilidade Econômica



www.atenaeditora.com.br



contato@atenaeditora.com.br



[@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)



www.facebook.com/atenaeditora.com.br