

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA GOIANO – CAMPUS RIO VERDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
APLICADA E SUSTENTABILIDADE**

**SUSTENTABILIDADE E INOVAÇÃO NA CADEIA DE
CANA-DE-AÇÚCAR: UMA ABORDAGEM INTEGRAL
PARA DIVERSIFICAÇÃO DE FONTES E
APROVEITAMENTO EFICIENTE DE RESÍDUOS**

**Mestrando: Ludovico Larsen Filho
Orientador: Dr. Geraldo Andrade de Oliveira
Coorientador: Dr. João Areis Ferreira Barbosa Júnior
Coorientador: Dr. Leonardo Garcia Marques**

**RIO VERDE- GO
JUNHO - 2024**

LUDOVICO LARSEN FILHO

**SUSTENTABILIDADE E INOVAÇÃO NA CADEIA DE CANA-
DE-AÇÚCAR: UMA ABORDAGEM INTEGRAL PARA
DIVERSIFICAÇÃO DE FONTES E APROVEITAMENTO
EFICIENTE DE RESÍDUOS**

Dissertação apresentada à banca examinadora como parte das exigências para obtenção do título de MESTRE em ENGENHARIA APLICADA E SUSTENTABILIDADE, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde - Área de concentração Engenharia Aplicada e Sustentabilidade.

Orientador: Dr. Geraldo Andrade de Oliveira

Coorientador: Dr. João Areis Ferreira Barbosa Júnior

Coorientador: Dr. Leonardo Garcia Marques

RIO VERDE - GO

JUNHO – 2024

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano

Larsen Filho, Ludovico

LL334s SUSTENTABILIDADE E INOVAÇÃO NA CADEIA DE CANA-DE-
AÇÚCAR: UMA ABORDAGEM INTEGRAL PARA DIVERSIFICAÇÃO DE
FONTES E APROVEITAMENTO EFICIENTE DE RESÍDUOS /

Ludovico Larsen Filho; orientador Geraldo Andrade de
Oliveira; co-orientador João Areis Ferreira Barbosa
Júnior. -- Rio Verde, 2024.

98 p.

Dissertação (Mestrado em Mestrado em Programa de
Pós Graduação em Engenharia Aplicada e
Sustentabilidade) -- Instituto Federal Goiano,
Campus Rio Verde, 2024.

1. biogás. 2. economia circular. 3. energia
renovável. 4. sustentabilidade. I. Oliveira, Geraldo
Andrade de, orient. II. Barbosa Júnior, João Areis
Ferreira, co-orient. III. Título.



TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese (doutorado) | <input type="checkbox"/> Artigo científico |
| <input checked="" type="checkbox"/> Dissertação (mestrado) | <input type="checkbox"/> Capítulo de livro |
| <input type="checkbox"/> Monografia (especialização) | <input type="checkbox"/> Livro |
| <input type="checkbox"/> TCC (graduação) | <input type="checkbox"/> Trabalho apresentado em evento |

Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Ludovico Larsen Filho

Matrícula:

2022202331440003

Título do trabalho:

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: Não Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 09 / 07 / 2024

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Brasília, DF

09 / 07 / 2024

Local

Data

gov.br
Documento assinado digitalmente
LUDOVICO LARSEN FILHO
Data: 09/07/2024 09:20:03:00
verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinat

gov.br

Documento assinado digitalmente
GERALDO ANDRADE DE OLIVEIRA
Data: 09/07/2024 11:10:02-0300
verifique em <https://validar.iti.gov.br>

; autorais

Ciente e de acordo:

Assinatura do(a) orientador(a)



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 55/2024 - SREPG/CMPR/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO

ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Unidade do IF Goiano:	Campus Rio Verde	
Programa de Pós-Graduação:	Engenharia Aplicada e Sustentabilidade	
Defesa de:	Dissertação	Defesa de número: 77
Data: 14/06/2024	Hora de início: 14:00h	Hora de encerramento: 18:00h
Matrícula do discente:	2022202331440003	
Nome do discente:	Ludovico Larsen Filho	
Título do trabalho:	SUSTENTABILIDADE E INOVAÇÃO NA CADEIA DE CANA-DE-AÇÚCAR: UMA ABORDAGEM INTEGRAL PARA DIVERSIFICAÇÃO DE FONTES E APROVEITAMENTO EFICIENTE DE RESÍDUOS	
Orientador:	Geraldo Andrade de Oliveira	
Área de concentração:	Engenharia Aplicada e Sustentabilidade	
Linha de Pesquisa:	Gestão e Tecnologias Ambientais	
Projeto de pesquisa de vinculação	SUSTENTABILIDADE E INOVAÇÃO NA CADEIA DE CANA-DE-AÇÚCAR: UMA ABORDAGEM INTEGRAL PARA DIVERSIFICAÇÃO DE FONTES E APROVEITAMENTO EFICIENTE DE RESÍDUOS	
Titulação:	Mestre em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade	

Nesta data, reuniram-se os componentes da Banca Examinadora, Prof. Dr. Geraldo Andrade de Oliveira (Presidente da banca), Prof. Dr. Édio Danásio da Silva Júnior (Avaliador Interno), Prof. Dr. Alan Carlos da Costa (Avaliador Externo), Prof. Dr. Osvaldo Resende (Avaliador Externo) e Prof. Dr. Leonardo Garcia Marques (Avaliador Externo) sob a presidência do primeiro, em sessão pública realizada de forma online, para procederem a avaliação da defesa de dissertação, em nível de Mestrado, de autoria de LUDOVICO LARSEN FILHO, discente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade do Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde. A sessão foi aberta pelo presidente da Banca Examinadora, Geraldo Andrade de Oliveira, que fez a apresentação formal dos membros da Banca. A palavra, a seguir, foi concedida o(a) autor (a) da dissertação para, em 40 min., proceder à apresentação de seu trabalho. Terminada a apresentação, cada membro da banca arguiu o(a) examinado(a), tendo-se adotado o sistema de diálogo sequencial. Terminada a fase de arguição, procedeu-se a avaliação da defesa. Tendo-se em vista as normas que regulamentam o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, e procedidas às correções recomendadas, a dissertação foi APROVADA, considerando-se integralmente cumprido este requisito para fins de obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA APLICADA E SUSTENTABILIDADE. A conclusão do curso dar-se-á quando da entrega na secretaria do PPGEAS da versão definitiva da dissertação, com as devidas correções. Assim sendo, esta ata perderá a validade se não cumprida essa condição, em até 60 (sessenta) dias da sua ocorrência. A Banca Examinadora recomendou a publicação dos artigos científicos oriundos dessa Tese em periódicos de circulação nacional e/ou internacional, após procedida as modificações sugeridas. Cumpridas as formalidades da pauta, a presidência da mesa encerrou esta sessão de defesa de dissertação de mestrado, e foi lavrada a presente Ata, que, após lida e achada conforme, será assinada pelos membros da Banca Examinadora.

Decisão da banca: Aprovada

Esta defesa é parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna do IFGoiano.

Documento assinado eletronicamente por:

- Alan Carlos da Costa, PRO-REITOR(A) - CD0002 - PROPPI-REI, em 14/06/2024 17:35:39.
- Edio Damasio da Silva Junior, COORDENADOR(A) DE CURSO - FUC1 - CCMEAS-RV, em 14/06/2024 17:35:16.
- Leonardo Garcia Marques, Leonardo Garcia Marques - Professor Avaliador de Banca - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - Ifg (1), em 14/06/2024 17:15:49.
- Osvaldo Resende, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 14/06/2024 17:12:45.
- Geraldo Andrade de Oliveira, Geraldo Andrade de Oliveira - Professor Avaliador de Banca - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - Ifg (1), em 14/06/2024 17:08:11.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 03/06/2024. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 604545
Código de Autenticação: 75c219267a



INSTITUTO FEDERAL GOIANO

Campus Rio Verde

Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, 01, Zona Rural, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970

(64) 3624-1000



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Documentos 36/2024 - SREPG/CMPR/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

SUSTENTABILIDADE E INOVAÇÃO NA CADEIA DE CANA-DE-AÇÚCAR: UMA ABORDAGEM INTEGRAL PARA DIVERSIFICAÇÃO DE FONTES E APROVEITAMENTO EFICIENTE DE RESÍDUOS

Autor: Ludovico Larsen Filho

Orientador: Prof. Dr. Geraldo Andrade de Oliveira

TITULAÇÃO: Mestre em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade - Área de Concentração Engenharia Aplicada e Sustentabilidade

APROVADO em 14 de junho de 2024.

Prof. Dr. Alan Carlos da Costa
Avaliador Externo - IFGOIANO / Rio Verde

Prof. Dr. Édio Danásio da Silva
Júnior
Avaliador Interno - IFGOIANO / Rio Verde

Prof. Dr. Osvaldo Resende
Avaliador Externo - IFGOIANO / Rio Verde

Prof. Dr. Leonardo Garcia Marques
Avaliador Externo - IFG

Prof. Dr. Geraldo Andrade de Oliveira
Presidente da banca - IFGOIANO / Rio Verde

Documento assinado eletronicamente por:

- Alan Carlos da Costa, PRO-REITOR(A) - CD0002 - PROPI-REI, em 14/06/2024 17:35:57.
- Edio Damasio da Silva Junior, COORDENADOR(A) DE CURSO - FUC1 - CCMEAS-RV, em 14/06/2024 17:34:49.
- Leonardo Garcia Marques, Leonardo Garcia Marques - Professor Avaliador de Banca - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - Ifg (1), em 14/06/2024 17:16:35.
- Osvaldo Resende, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 14/06/2024 17:15:21.
- Geraldo Andrade de Oliveira, Geraldo Andrade de Oliveira - Professor Avaliador de Banca - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - Ifg (1), em 14/06/2024 17:11:56.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 03/06/2024. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 604546
Código de Autenticação: 3a172a4048



INSTITUTO FEDERAL GOIANO

Campus Rio Verde

Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, 01, Zona Rural, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970

(64) 3624-1000

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação a Deus, fonte suprema de sabedoria, força e orientação. A todos os meus familiares, professores, colegas e amigos que estiveram a meu lado, obrigado por compartilharem esta jornada comigo. Que esta dissertação seja uma homenagem à presença divina em minha vida e ao apoio inestimável daqueles que amo.

AGRADECIMENTOS

Com imensa gratidão, expresso meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a conclusão desta jornada acadêmica e pessoal.

Primeiramente, agradeço a Deus, fonte de luz, sabedoria e força, que me acompanhou e me deu ânimo nos momentos desafiadores ao longo deste percurso.

Ao Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, e a seus dedicados professores, manifesto minha gratidão pela excelência do ensino oferecido, pelo apoio constante e pela oportunidade de crescimento acadêmico.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, agradeço a estrutura e os recursos disponibilizados, fundamentais para a realização desta pesquisa, e principalmente, ao coordenador do programa, Professor Dr. Edio Damasio da Silva Junior, e a todos os professores das disciplinas e à equipe de secretaria e apoio do IFGoiano, Campus Rio Verde.

Ao meu orientador, Dr. Geraldo Andrade de Oliveira, e aos meus coorientadores, Dr. João Areis Ferreira Barbosa Júnior e Dr. Leonardo Garcia Marques, meu profundo agradecimento por sua orientação, conhecimento compartilhado e incentivo durante todo o processo deste estudo.

Não posso deixar de expressar minha gratidão ao meu colega e amigo Leonardo Araújo Amorin, cujas parceria e troca de ideias foram inestimáveis para o progresso deste trabalho.

Aos meus queridos irmãos, Luis Alberto, Leonice Maria, Luciano e Cristiano, e suas respectivas famílias, agradeço pelo apoio incondicional e pelo incentivo constante ao longo desta jornada.

À memória do meu amado pai, Ludovico Larsen, e à minha mãe, Irene Regina, dedico minha mais profunda gratidão. Foi através do amor, apoio e valores transmitidos por eles que tive a oportunidade de trilhar este caminho acadêmico.

Às minhas amadas filhas Débora, Daniela, Maria Luiza e Regina Maria e à minha netinha Katarina, expresso meu amor e gratidão por serem minha fonte de inspiração e motivação.

E, finalmente, à minha amada esposa, Katienne, agradeço por sua paciência, compreensão, apoio incansável e por ser minha maior incentivadora nessa nova jornada. Sua

presença foi fundamental para que eu alcançasse este importante marco em minha vida acadêmica e profissional.

A todos os mencionados e àqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para este momento, meu mais profundo obrigado. Cada gesto de apoio foi fundamental para o sucesso desta conquista. Estou eternamente grato por fazerem parte desta trajetória significativa em minha vida.

RESUMO

A indústria brasileira da cana-de-açúcar é fundamental para o crescimento agrícola do país, sendo também líder na geração de energia renovável. Este estudo revisou a literatura para avaliar o potencial de utilização de subprodutos, destacando aspectos econômicos e ambientais. O objetivo foi promover a eficiência e a diversificação das fontes de receita, bem como a sustentabilidade no setor. Utilizando uma revisão bibliográfica sistemática, investigamos o potencial da vinhaça na geração de biogás e hidrogênio verde. Os resultados indicaram que a vinhaça e o bagaço de cana são fontes valiosas de energia renovável, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa. A pesquisa sugeriu a necessidade de investimentos em novas tecnologias e políticas públicas para maximizar o aproveitamento dos resíduos, destacando a importância da mecanização da colheita e a eliminação da queima da palhada. Concluímos que o futuro do setor depende de uma abordagem integrada que combine inovação tecnológica, políticas eficazes e investimentos em energias renováveis, garantindo um desenvolvimento sustentável e responsável.

Palavras-chave: biogás, economia circular, energia renovável, sustentabilidade.

ABSTRACT

LUDOVICO LARSEN FILHO. Goiano Federal Institute of Education, Science, and Technology, Rio Verde Campus, June 2024. **Sustainability and innovation in the sugarcane chain: an integral approach to source diversification and efficient use of waste.** Advisor: Prof. Dr. Oliveira, Geraldo Andrade de. Co-advisors: Prof. Dr. Barbosa Júnior, João Areis Ferreira; e Prof. Dr. Marques, Leonardo Garcia.

The Brazilian sugarcane industry is fundamental for the country's agricultural growth and a leader in renewable energy generation. This paper carried out a literature review to assess the potential utilization of by-products, emphasizing economic and environmental aspects. It aimed to enhance efficiency and the diversification of revenue sources and promote the sector sustainability. The potential of vinasse in the generation of biogas and green hydrogen was investigated with a systematic literature review. The results indicated that vinasse and sugarcane bagasse are valuable renewable energy sources, contributing to the reduction of greenhouse gas emissions. The research suggests the need to invest in new technologies and public policies to maximize the waste utilization, emphasizing the importance of mechanized harvesting and the elimination of straw burning. It was concluded that the future of the sector depends on an integrated approach combining technological innovation, effective policies, and investments in renewable energy to ensure sustainable and responsible development.

Keywords: Biogas. Circular economy. Renewable energy. Sustainability.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 JUSTIFICATIVA	1
1.2 REVISÃO DE LITERATURA	3
1.2.1 Parque sucroalcooleiro do Brasil	3
1.2.2 Matriz Energética e Elétrica: Desafios e Direcionamentos na Era da Sustentabilidade	8
1.2.3 Comparativo das Matrizes Energética e Elétrica do Brasil e Mundial	11
1.2.4 Processo de Industrialização e produção.....	13
1.2.5 Resíduos gerados pela indústria sucroalcooleira.....	15
1.2.6 Sustentabilidade e meio ambiente.....	29
2. OBJETIVOS	32
2.1 Objetivo geral	33
2.2 Objetivos específicos	33
3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33
4 CAPÍTULO 1 - ARTIGO 01	40
5 CAPÍTULO 2 - ARTIGO 02	60
6 CAPÍTULO 3 - ARTIGO 03	78
7. CONCLUSÃO	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Panorama do Parque Industrial Sucroalcooleiro por Produto.....	4
Tabela 2: ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO DA INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA – Safra 2023/24.....	4
Tabela 3: Estimativa da Área Cultivada, Produtividade e Produção por Região.....	5
Tabela 4: Comparativo de Características e Preço Médio de Mercado.....	20
Tabela 5: Características da Queima de Briquetes em Diferentes Biomassas.....	22
Tabela 6: Características e Preço Médio de Venda.....	23
Tabela 7: Evolução da Colheita Mecanizada de Cana-deAçúcar.....	31

CAPÍTULO 1

Tabela 1: Safras 2022/23 e 2023/24, Estimativa da área, produtividade e produção.....	44
Tabela 2: Parque Industrial Sucroalcooleiro por Produto e por Regiões Geográficas.....	45
Tabela 3: Estimativa Da Indústria Sucroalcooleira - Safra 2023/24.....	48
Tabela 4: Comparativos energético e comercial entre a biomassa, briquetes, pellets e lenha.....	51
Tabela 5: Comparativo entre Colheita Mecanizada e Manual nas Safras de 2007/08 e 2023/24.....	52

CAPÍTULO 2

Tabela 1: Estimativa de produtos da indústria sucroalcooleira - safra 2023/24.....	64
Tabela 2: Estimativa da geração de vinhaça de cana-de-açúcar - safra 2023/2024.....	65
Tabela 3: Características do vinhoto* resultante de mostos de melaço, de caldo de cana e mistos.....	67

CAPÍTULO 3

Tabela 1: Estimativa de Geração de Vinhaça, com Base na Produção de Etanol Total	85
Tabela 2: Eficiência da Produção de Hidrogênio Verde a partir da Vinhaça.....	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Usina mista de produção de Etanol e Açúcar.....	3
Figura 2: Produção de açúcar, etanol, bioeletricidade e resíduos.....	14
Figura 3: Compostagem da torta de filtro.....	16
Figura 4: Aplicação da torta de filtro no canavial.....	16
Figura 5: Cinza de cana-de-açúcar na produção de concreto.....	18
Figura 6: Depósito de Bagaço de cana-de-açúcar.....	19
Figura 7: Pellets*.....	23
Figura 8: Briquetes*.....	23
Figura 9: Processo de produção de briquetes.....	25
Figura 10: Tanque de tratamento de vinhaça ou vinhoto.....	27
Figura 11: Aplicação da vinhaça no cultivo	29
Figura 12: Principais benefícios sustentáveis gerados pelo uso da vinhaça.....	30

CAPÍTULO 3

Figura 1: Hierarquia de Gestão de Resíduos.....	83
Figura 2: Matriz Energética Brasileira 2022.....	84

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Série Histórica da Área Colhida de Cana.....	7
Gráfico 2: Representação da Matriz Energética Brasileira.....	9
Gráfico 3: Matriz Elétrica Brasileira.....	10
Gráfico 4: Comparação da matriz energética por fontes renováveis.....	11
Gráfico 5: Comparação da Matriz Elétrica por fontes renováveis.....	12

CAPÍTULO 3

Gráfico 1: Proporção de geração de Vinhaça em relação à produção de Etanol Total.....	85
Gráfico 2: Redução de Emissões de GEE com Produção de Hidrogênio Verde a partir da Vinhaça.....	91

LISTA DE SIGLAS

ABNT	– Associação Brasileira de Normas Técnicas
ATR	– Açúcar Total Recuperável ou Retido
CNPEM	– Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais
DCAA	– Departamento de Cana-de-Açúcar e Agroenergia
EPE	– Empresa de Pesquisa Energética
IBGE	– Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LNBio	– Laboratório Nacional de Biociências
MAPA	– Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MME	– Ministério de Minas e Energia
OIE	– Oferta Interna de Energia
TEP	– Tonelada Equivalente de Petróleo
UNICA	– União da Indústria de Cana-de-Açúcar

1 INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa

A indústria da cana-de-açúcar se destaca no mercado brasileiro e se consolida como um dos principais responsáveis pelo crescimento dos índices de produtividade agrícola do país (CONAB, 2023), além de contribuir na geração de energia renovável, sendo referência no aproveitamento das biomassas advindas do plantio e do processo de industrialização da cana-de-açúcar (EPE, 2023). O ritmo de produção de bens e serviços é acentuado e crescente, e as demandas aumentam em escala exponencial. As novas tecnologias buscam suprir essas demandas desenfreadas por bens e serviços, pois as necessidades humanas são crescentes; no entanto, os recursos naturais são finitos e reduzidos (TROMBETA et al., 2017).

A energia, força motriz desse processo, provém majoritariamente de combustíveis fósseis como petróleo e seus derivados, gás natural e carvão, que, além de finitos, geram resíduos altamente poluentes. A dependência dessas fontes energéticas e suas limitações, incluindo impactos ambientais e crises energéticas, reforçam a necessidade urgente de alternativas sustentáveis. Diversas regiões enfrentam crises energéticas em razão da dependência de combustíveis fósseis, como a Europa, que vive uma de suas maiores crises históricas, e a China, que depende do carvão mineral para sua intensa produção manufatureira (MORAES, 2018; OLIVEIRA, 2015). O Brasil, em 2001, sentiu o impacto da falta de energia, cuja fonte principal não eram os combustíveis fósseis, mas, sim, a energia hidráulica, e a escassez de chuvas e a falta de investimentos e políticas públicas no setor deram causa (GRÜN, 2005). Os Estados Unidos da América, embora sejam autossuficientes na geração de energia, sofrem impactos e crises no setor, pois 79,4% de sua Matriz Energética vem de fontes não renováveis, sendo os combustíveis fósseis responsáveis por 59,9% e a energia nuclear, por 19,5%, sendo que o desafio está em investir na geração de energia limpa e renovável (DADOSMUNDIAIS, 2023).

As Fontes Energéticas brasileiras derivam 65,8% da Energia Hidrelétrica, 9,2% da Biomassa, 9,2% da Energia Eólica e 1,7% da Energia Solar, sendo que as fontes de Energias Fósseis participam com 11,8% e Energia nuclear com 2,3% da matriz (DADOSMUNDIAIS, 2023). Entretanto, mesmo com esses indicadores posicionando o Brasil na vanguarda da geração de energia renovável, o país está distante de ser autossustentável, pois ainda depende dos combustíveis fósseis. Contudo, analisando as principais fontes energéticas renováveis, o setor sucroenergético brasileiro utiliza apenas 15% do potencial de geração de energia

elétrica. A modernização do setor elétrico e a valorização nos mercados e leilões podem incentivar investimentos nesse modelo de geração de energia (ÚNICA, 2020).

Existe uma lacuna significativa na literatura em relação ao uso de subprodutos da cana-de-açúcar, como a vinhaça, para a geração de biogás e hidrogênio verde. A vinhaça, principal subproduto das destilarias de etanol, apresenta desafios ambientais em razão da sua alta demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e da sua resistência aos métodos convencionais de tratamento de resíduos (SZMRECSÁNYI et al., 2008). Este estudo visa a avaliar o potencial de crescimento do setor sucroalcooleiro para a geração de energia limpa pela otimização de recursos produtivos e do aproveitamento de resíduos. Propõe-se analisar a utilização da vinhaça para a produção de biogás e hidrogênio verde, destacando as boas práticas de tratamento e destinação desse resíduo.

A pesquisa contribui teoricamente para o conhecimento sobre o aproveitamento de subprodutos da cana-de-açúcar e oferece aplicações práticas ao sugerir métodos eficientes para a geração de energia renovável. A análise de boas práticas e de tecnologias que agregam valor aos resíduos pode promover a sustentabilidade econômica e ambiental do setor. A utilização eficiente dos resíduos da cana-de-açúcar pode reduzir a dependência de combustíveis fósseis, diminuir as emissões de gases de efeito estufa e promover a sustentabilidade ambiental. Além disso, a valorização dos subprodutos pode gerar novas fontes de receita e emprego. Os resultados da pesquisa podem incentivar investimentos em novas tecnologias, promover políticas públicas favoráveis ao setor e contribuir para a sustentabilidade econômica, ambiental e social.

Esta pesquisa resultou em três produtos principais, cada um contribuindo significativamente para o entendimento e o aprimoramento das práticas do setor. O primeiro produto, o artigo "Panorama do Setor Sucroalcooleiro Brasileiro: da Produção ao Processamento dos Resíduos Associados à Cadeia de Cana-de-Açúcar," promove uma revisão abrangente da literatura para avaliar o potencial de aproveitamento de resíduos, mostrar o crescimento do setor e suas práticas sustentáveis. Em seguida, o artigo "Potencial da Vinhaça como Fonte de Geração de Energia Renovável do Tipo Biogás" investiga e documenta o potencial da vinhaça como fonte de energia renovável, destacando a necessidade de uma investigação mais aprofundada e de mais investimentos. O terceiro artigo, "Explorando o Potencial da Vinhaça na Produção de Hidrogênio Verde: Desafios e Oportunidades para o Brasil," identifica desafios e oportunidades, avaliando a viabilidade econômica e ambiental da vinhaça na produção de hidrogênio verde. Esses produtos fornecem uma base sólida para

políticas públicas, investimentos em tecnologias limpas e práticas sustentáveis, promovendo a sustentabilidade econômica, ambiental e social no setor sucroalcooleiro.

1.2 Revisão de literatura

1.2.1 Parque sucroalcooleiro do Brasil

O Brasil destaca-se como um dos líderes globais na produção de cana-de-açúcar, exercendo papel fundamental na economia do país. Englobando uma cadeia produtiva ampla, desde o cultivo até a distribuição de produtos e subprodutos, o parque sucroalcooleiro nacional inclui fazendas, usinas de açúcar e álcool e destilarias de etanol, concentrando-se principalmente na região Centro-Sul, que oferece condições climáticas e infraestrutura favoráveis. Este setor é marcado pela produção de açúcar e etanol, produtos de grande relevância tanto no mercado interno quanto para exportação. Contudo, enfrenta desafios como a volatilidade de preços e questões ambientais. Investimentos em tecnologias e práticas sustentáveis visam a aumentar a eficiência e a reduzir impactos ambientais (VIEIRA FILHO et al., 2019). A Figura 1 mostra uma usina de produção mista.

Figura 1. – Usina mista de produção de etanol e açúcar.



Fonte: https://www.novacana.com/usinas_brasil

A maioria da produção de cana-de-açúcar está concentrada na região Centro-Sul, especialmente em São Paulo, Minas Gerais e Goiás, em razão das condições climáticas favoráveis e da avançada infraestrutura agroindustrial.

A Tabela 1 mostra a distribuição das usinas por produto e região, ilustrando a predominância da região Sudeste na produção da cana-de-açúcar e na concentração de usinas.

Tabela 1 – Panorama do Parque Industrial Sucroalcooleiro por Produto e por Região

REGIÃO	Etanol		Açúcar		Mista		Total Brasil	% / UF
	Quantidade de usinas	% / UF	Quantidade de usinas	% / UF	Quantidade de usinas	% / UF		
NORTE	1	0,25%		0,00%	3	0,76%	4	1,02%
NORDESTE	25	6,36%	7	1,78%	41	10,43%	73	18,58%
CENTRO-OESTE	40	10,18%		0,00%	33	8,40%	73	18,58%
SUDESTE	44	11,20%	9	2,29%	158	40,20%	211	53,69%
SUL	9	2,29%		0,00%	23	5,85%	32	8,14%
BRASIL	119	30,28%	16	4,07%	258	65,65%	393	100,00%

Fonte: Adaptado DCAA/SPAE/MAPA (2022).

A Tabela 1 apresenta o demonstrativo do parque industrial sucroalcooleiro no Brasil, discriminando as usinas por produto e região, revela a predominância da região Sudeste na produção mista de açúcar e etanol, enquanto o Nordeste se destaca na produção de açúcar. A maior parte da produção de etanol está concentrada no Centro-Sul, indicando a importância estratégica dessa região para o setor (CONAB, 2023).

A indústria sucroalcooleira brasileira também é reconhecida pela sua contribuição à matriz energética por meio do etanol, um biocombustível que reduz emissões de gases de efeito estufa e diversifica as fontes energéticas do país. Políticas de incentivo, como o Proálcool, foram fundamentais para o crescimento deste setor, que utiliza o etanol como combustível veicular e aditivo à gasolina (EMBRAPA, 2022).

Produção– safra 2023/24

A Tabela 2 apresenta uma estimativa da produção dos principais produtos da indústria sucroalcooleira para a safra 2023/24, distribuída por região do Brasil, com foco em açúcar e etanol total (etanol anidro e etanol hidratado).

Tabela 2: Estimativa de produção da indústria sucroalcooleira - Safra 2023/24

Região	Açúcar (mil t)	Etanol Total (Em mil m ³)	Etanol Anidro (Em mil m ³)	Etanol Hidratado (Em mil m ³)
Norte	99,1	249.471,00	145.207,00	104.264,00
Nordeste	3.559,90	2.020.283,40	1.097.392,40	922.891,00
Centro-Oeste	5.215,60	8.842.200,20	2.539.185,40	6.303.014,80

Sudeste	35.448,70	15.653.120,40	7.484.434,20	8.168.686,30
Sul	2.557,40	1.221.365,50	682.093,20	539.272,30
Brasil	46.880,70	27.986.440,50	11.948.312,10	16.038.128,40

Fonte: Adaptado CONAB (2023). Nota: Estimativa em novembro/2023.

Além da significativa produção de açúcar, o etanol desempenha papel fundamental na indústria sucroalcooleira brasileira, consolidando o Brasil como líder mundial na sua produção. Esse biocombustível não apenas ganhou destaque no mercado interno, mas também nas exportações, evidenciando seu papel preponderante.

As vantagens incontestáveis do etanol como combustível destacam-se principalmente na redução das emissões de gases poluentes e na contribuição para mitigar o efeito estufa. Obtido principalmente da cana-de-açúcar, o etanol emerge como uma alternativa notavelmente mais sustentável quando comparado aos combustíveis fósseis, tornando-se uma peça-chave para a diversificação da matriz energética brasileira.

Produção e Produtividade – Safra 2023/24

A análise da área cultivada, da produtividade e da produção de cana-de-açúcar nas safras 2022/23 e 2023/24 apresentada na Tabela 3 mostra um aumento geral na produtividade e na produção total, apesar de algumas variações regionais. Esse aumento na produtividade reflete o emprego de técnicas agrícolas avançadas e práticas sustentáveis, que contribuem para o crescimento eficiente e responsável do setor.

Tabela 3: Estimativa da Área Cultivada, Produtividade e Produção por Região

Região	ÁREA (Em mil ha)			PRODUTIVIDADE (Em kg/ha)			PRODUÇÃO (Em mil t)		
	Safra 2022/23	Safra 2023/24	VAR. %	Safra 2022/23	Safra 2023/24	VAR. %	Safra 2022/23	Safra 2023/24	VAR. %
Norte	47,3	48,4	2,3	80.862,0	81.992,0	1,4	3.823,0	3.967,0	3,8
Nordeste	875,5	913,2	4,3	64.950,0	65.220,0	0,4	56.866,5	59.556,2	4,7
Centro-Oeste	1.767,5	1.788,1	1,2	74.347,0	80.409,0	8,2	131.406,8	143.775,2	9,4
Sudeste	5.127,1	5.114,7	- 0,2	75.629,0	85.046,0	12,5	387.755,3	434.981,4	12,2
Sul	475,4	487,9	2,6	65.115,0	72.399,0	11,2	30.953,1	35.322,3	14,1
Brasil	8.292,7	8.352,1	0,7	73.655,0	81.129,0	10,1	610.804,8	677.602,1	10,9

Fonte: Adaptado CONAB (2023). Nota: Estimativa em novembro/2023.

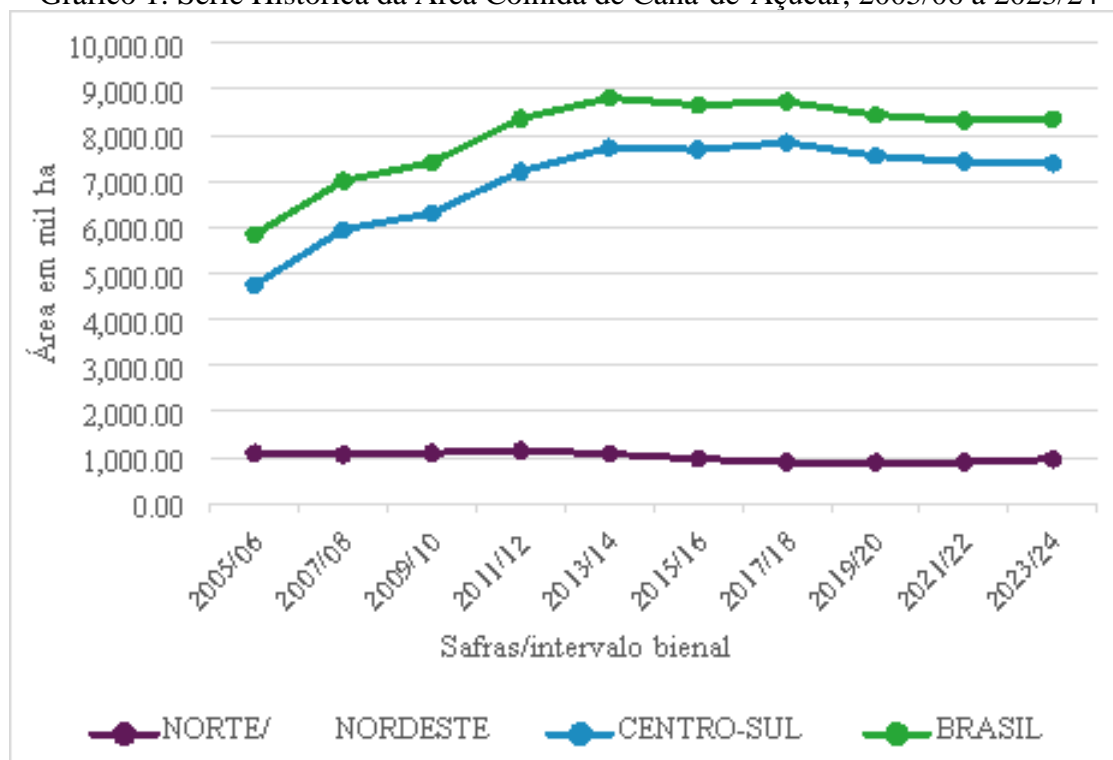
Os dados evidenciam que a produção de cana-de-açúcar no Brasil mantém sua robustez, apesar de algumas variações regionais. Enquanto as regiões Norte e Nordeste testemunharam um aumento na produção principalmente pelo aumento na área cultivada, o Centro-Sul conseguiu ampliar significativamente a produtividade e conseqüentemente a produção, compensando a pequena redução na área cultivada na região Sudeste. A tendência geral de aumento da produtividade indica um esforço contínuo dos produtores para aprimorar a eficiência e a sustentabilidade do setor sucroalcooleiro brasileiro.

Série Histórica e Tendências na Cultura da Cana-de-Açúcar no Brasil

Ao explorar a evolução do cultivo de cana-de-açúcar no Brasil, uma análise detalhada da série histórica de 2005/06 a 2023/24 revela tendências significativas na gestão das áreas cultivadas. Durante o período inicial, até 2014, registrou-se incremento na área colhida, refletindo o dinamismo e a expansão do setor sucroalcooleiro. Contudo, a partir de então, observa-se uma estabilização, seguida por uma tendência de leve declínio. Este padrão sugere uma transição para práticas de cultivo mais eficientes e sustentáveis, marcadas por uma intensificação da produção que não depende da expansão das áreas cultivadas, mas, sim, do aprimoramento das técnicas agrícolas e da gestão dos recursos (CONAB, 2023).

Com base na análise do Gráfico 1, fica evidente a mudança de paradigma no cultivo da cana-de-açúcar no Brasil. A fase de expansão até 2014 sugere uma resposta às demandas crescentes por produtos derivados da cana, como açúcar e etanol. No entanto, a subsequente estabilização e a leve redução na área colhida refletem um enfoque maior na sustentabilidade e na eficiência produtiva. Estes ajustes estão alinhados com uma estratégia agrícola que visa a aumentar a produtividade por hectare, reduzindo a necessidade de novas áreas de cultivo, minimizando os impactos ambientais associados à expansão agrícola (CONAB, 2023).

Gráfico 1: Série Histórica da Área Colhida de Cana-de-Açúcar, 2005/06 a 2023/24



Evolução da área colhida em milhares de hectares, ilustrando as mudanças ao longo do tempo.

Fonte: Adaptado de CONAB (2023).

Calculando a variação percentual da área colhida entre as safras de 2014/2015 e 2023/2024, constata-se uma redução aproximada de 7,25%. Esse decréscimo na área colhida não implica necessariamente uma redução na produção total, mas indica um movimento em direção à otimização do uso das áreas já estabelecidas para o cultivo. Essa tendência é um indicativo positivo do compromisso do setor com práticas mais eficientes e responsáveis, buscando harmonizar a produção agrícola com a preservação dos recursos naturais.

A série histórica da área colhida de cana-de-açúcar no Brasil destaca uma importante transição para uma agricultura mais intensiva e sustentável. As tendências observadas apontam para uma indústria que, consciente dos desafios ambientais e econômicos contemporâneos, adapta-se para produzir mais com menos, alinhando-se com os princípios de sustentabilidade e eficiência produtiva. Esse cenário reflete o compromisso do Brasil em manter sua liderança no setor sucroalcooleiro, ao mesmo tempo em que fortalece suas práticas agrícolas para um futuro mais sustentável (UNICA, 2023).

A análise do parque sucroalcooleiro brasileiro revela um setor dinâmico, capaz de se adaptar às flutuações do mercado e às exigências de sustentabilidade ambiental. A liderança do Brasil na produção de cana-de-açúcar, açúcar e etanol reflete não apenas a capacidade

produtiva do país, mas também seu compromisso com práticas agrícolas eficientes e responsáveis.

1.2.2 Matriz Energética e Elétrica: Desafios e Direcionamentos na Era da Sustentabilidade

A demanda por energia no mundo moderno é intensa e em constante crescimento, impulsionada pela evolução tecnológica, pelo aumento no consumo de produtos eletrônicos, pela expansão das atividades industriais e de serviços e pela busca por conforto e conveniências modernas no cotidiano. Este cenário reflete uma interação complexa entre avanços tecnológicos e expectativas de consumo, culminando em um desafio significativo para o equilíbrio entre disponibilidade e demanda energética.

A Lei da Escassez e sua Implicação na Economia Energética

Um princípio econômico que exemplifica esses desafios é a "lei da escassez", que destaca a limitação dos recursos disponíveis frente às necessidades e desejos humanos praticamente ilimitados. Essa lei não é apenas uma regra física, mas um conceito econômico que enfatiza a finitude dos recursos naturais, como minerais, água e capacidade produtiva humana. A escassez obriga as sociedades, as empresas e os governos a fazer escolhas críticas sobre como alocar esses recursos de forma a maximizar o bem-estar coletivo, envolvendo processos decisórios que incluem avaliação de custos de oportunidade e trade-offs (compensação) (PEREIRA & MARIN, 2016).

Transição para Fontes de Energia Sustentáveis

Atualmente, a matriz energética global ainda é dominada pelos combustíveis fósseis — petróleo, carvão e gás natural. No entanto, a crescente conscientização sobre as mudanças climáticas e a necessidade de um desenvolvimento sustentável têm impulsionado a busca por alternativas mais limpas e renováveis. O movimento em direção à sustentabilidade é multidimensional, abrangendo aspectos econômicos, sociais, ambientais e comportamentais.

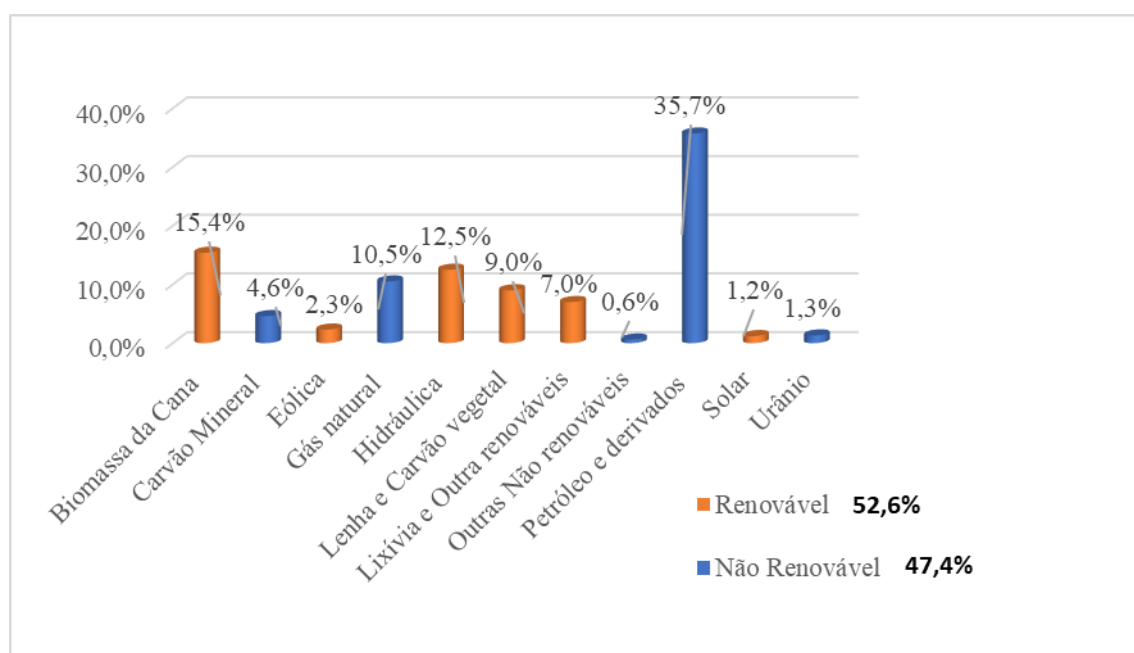
Esta transição é evidenciada pelo investimento crescente em tecnologias limpas, que incluem a energia solar, eólica, hidrelétrica e, até mais recentemente, formas inovadoras como a energia maremotriz e geotérmica. A diversificação da matriz energética não apenas responde à escassez de recursos fósseis, mas também representa um componente crítico no combate às emissões de gases de efeito estufa (EPE, 2023).

1.2.2.1 Matriz Energética Brasileira

A matriz energética é o conjunto das fontes de energia disponíveis utilizadas dentro de um país ou região, incluindo petróleo, gás natural, carvão, energia nuclear, hidráulica, eólica, solar e biomassa. Essas fontes são fundamentais não apenas para a produção de eletricidade, mas também para a geração de calor e combustíveis, influenciando diretamente o desenvolvimento econômico e a sustentabilidade ambiental de uma nação (EPE, 2023).

Este mosaico energético, representado no Gráfico 2, oferece uma visão do papel de cada fonte na produção energética total, bem como do consumo energético nos setores de transporte, indústria, residencial e comercial. Compreender a composição da matriz energética é vital para assegurar a segurança energética, a sustentabilidade ambiental e a diversificação no uso das fontes de energia.

Gráfico 2: Representação da Matriz Energética Brasileira



Fonte: Elaborado pelo autor

A representação atual da matriz energética do Brasil indica uma transição para um perfil energético mais sustentável. As fontes renováveis compõem 47,4% da matriz, comprovando o empenho do país em promover fontes limpas de energia. O destaque é para a biomassa da cana, que reflete o papel significativo da indústria do etanol. Outras fontes renováveis, como hidráulica, eólica, lenha e carvão vegetal e solar, contribuem para a diversificação e a sustentabilidade da matriz.

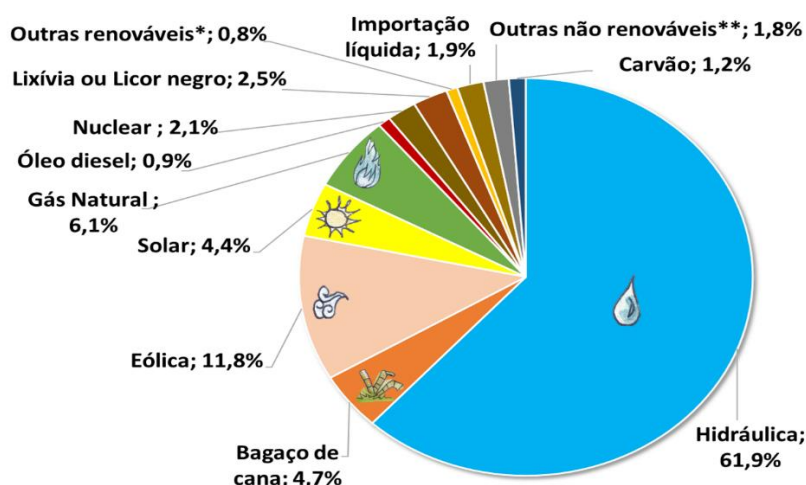
No entanto, as fontes não renováveis ainda representam 52,6% do total, com petróleo e derivados sendo a maior fatia. Este fato aponta para a necessidade contínua de diversificação e inovação para reduzir a dependência do Brasil dos combustíveis fósseis e avançar rumo a um futuro energético mais resiliente e sustentável (EPE, 2023).

1.2.2.2 Matriz Elétrica Brasileira

Já a matriz elétrica brasileira se concentra nas fontes de energia específicas para a produção de eletricidade. Detalha as origens da geração elétrica, como usinas termelétricas e hidrelétricas, e contempla fontes emergentes como a solar e a eólica. Essa matriz engloba também dados sobre a produção de cada usina e o sistema de transmissão e distribuição elétrica.

A análise da matriz elétrica é essencial para entender a diversificação energética e assegurar a confiabilidade no fornecimento de energia elétrica, além de ser um indicativo dos impactos ambientais relacionados à geração de energia e das tendências em direção a um modelo energético mais sustentável e renovável (EPE, 2023). O Gráfico 3 traz uma representação visual dessa matriz elétrica, oferecendo insights importantes sobre a composição e a evolução do setor energético.

Gráfico 3: Matriz Elétrica Brasileira



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2023)

A matriz elétrica do país no ano de 2022 mostra forte inclinação para as fontes renováveis, característica notável diante de um contexto global ainda fortemente dependente

de fontes não renováveis. Hidráulica, solar fotovoltaica, eólica, biomassa e biogás juntas compõem a maior parte da matriz, sendo a hidráulica a mais significativa. Este perfil reforça o papel do Brasil como líder em energias renováveis e sublinha seu compromisso com a sustentabilidade e com a redução das emissões de carbono (EPE, 2023).

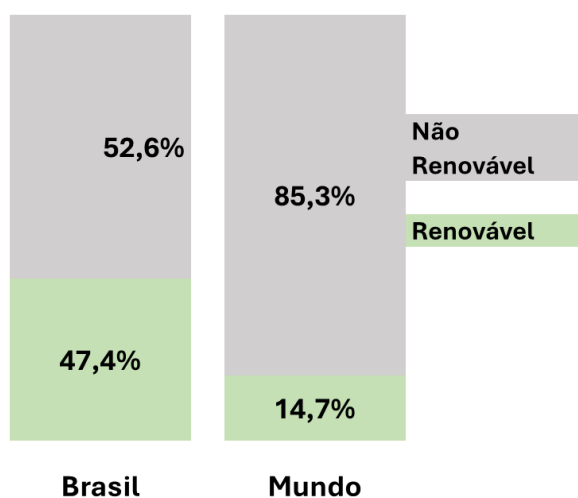
Ainda assim, fontes não renováveis como gás natural, petróleo e carvão, seguidas pela energia nuclear, compõem uma parte essencial para a segurança energética e a estabilidade da rede elétrica do país. O desafio reside em gerenciar a transição para uma dependência cada vez menor dessas fontes e em minimizar seus impactos ambientais.

Portanto, a matriz elétrica do Brasil em 2022 não apenas ressalta o comprometimento com energias renováveis, mas também reflete uma estratégia nacional que visa a promover a sustentabilidade ambiental e a atender aos compromissos globais, navegando pelos desafios impostos pelas mudanças climáticas e pelas demandas de um desenvolvimento sustentável e inclusivo.

1.2.3 Comparativo das Matrizes Energética e Elétrica do Brasil e Mundial

A matriz energética e elétrica de uma nação reflete sua estrutura de desenvolvimento e compromisso com a sustentabilidade. Ao proceder a um comparativo entre as matrizes do Brasil e do mundo, Gráfico 4, vislumbra-se o papel pioneiro do Brasil na transição para fontes de energia mais limpas e renováveis.

Gráfico 4: Comparação da matriz energética por fontes renováveis e não renováveis no Brasil e no Mundo.

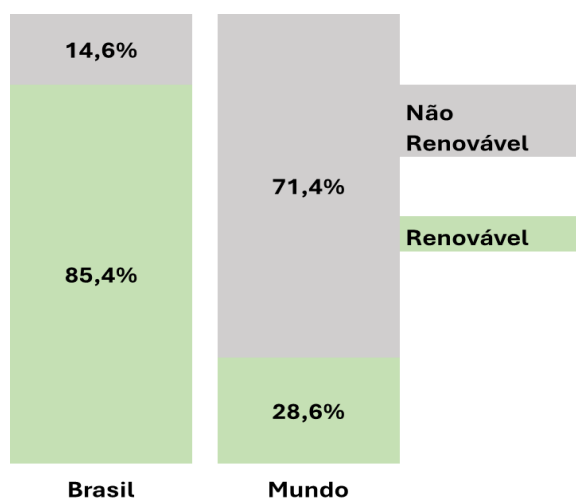


Fonte: Elaborado pelo autor. EPE (2022); IEA (2021).

A matriz energética global ainda é dominada por fontes não renováveis, com combustíveis fósseis como carvão, petróleo e gás natural correspondendo a 85,3% do total. Em contraste, o Brasil se destaca com 47,4% de sua matriz composta por energias renováveis, refletindo a abundância de recursos naturais e as políticas voltadas para a energia limpa (EPE, 2023).

No setor elétrico, essa diferença é ainda mais acentuada. Globalmente, 71,4% da energia elétrica é gerada por fontes não renováveis, enquanto no Brasil as fontes renováveis, lideradas pela hidroeletricidade e a eólica representam 85,4% da matriz elétrica(Gráfico 5). Este perfil mostra o compromisso do Brasil com o desenvolvimento sustentável e a redução de emissões de gases de efeito estufa.

Gráfico 5: Comparação da Matriz Elétrica por fontes renováveis e não renováveis no Brasil e no Mundo.



Fonte: Elaborado pelo autor. EPE (2022); IEA (2021).

A utilização de biomassa, particularmente da cana-de-açúcar, tem colocado o Brasil na vanguarda da geração de energia renovável. A biomassa sólida, incluindo resíduos da cana, contribui significativamente para a geração de bioeletricidade, com 67,3% do total nacional proveniente deste recurso em 2019. Comparado à média mundial de 2,1%, o Brasil destaca-se com 8,4% de sua eletricidade gerada por bioeletricidade (UNICA, 2020).

A estratégia brasileira na utilização de biomassa para a geração de energia elétrica não apenas posiciona o país como líder em energia renovável, mas também exemplifica o potencial subutilizado da bioeletricidade. Enquanto o setor sucroenergético brasileiro utiliza apenas 15% de sua capacidade energética, há um grande potencial para a expansão da

bioeletricidade, contribuindo ainda mais para uma matriz energética sustentável e diversificada (UNICA, 2020).

O Brasil mostra crescimento acentuado na redução da dependência de fontes não renováveis e na utilização de biomassa para a geração de energia, reafirmando seu papel como líder global no caminho para um futuro energético sustentável. Este comparativo sublinha a importância de continuar investindo em inovação, otimização dos recursos e tecnologias renováveis para fortalecer ainda mais a posição do Brasil na produção de energia limpa e na luta contra as mudanças climáticas.

1.2.4 Processo de Industrialização e produção.

No cenário agroindustrial, o setor sucroalcooleiro do Brasil é notável, posicionando-se como um dos líderes globais em produção. A safra 2023/24, estimada em 677,6 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, destaca-se historicamente por seu volume expressivo (CONAB, 2023). Paralelamente à elevada produção, é gerado um volume substancial de resíduos, demandando estratégias de gestão adequadas. Entre os principais resíduos, estão o bagaço, a torta de filtro, a vinhaça, as cinzas e a fuligem, todos requerendo tratamento e destinação específicos que atendam a critérios de sustentabilidade e eficiência.

A Figura 2 mostra uma visão geral da produção de açúcar, etanol, bioeletricidade e resíduos no contexto do setor sucroalcooleiro, evidenciando a importância de adotar práticas sustentáveis de gerenciamento desses subprodutos.

Figura 2: Produção de açúcar, etanol, bioeletricidade e resíduos



Fonte: Gurgel (2012)

O fluxograma ilustrado destaca as interconexões entre as diversas etapas de produção do setor sucroalcooleiro e a geração de resíduos, exemplificando como subprodutos podem ser convertidos em insumos para outros processos industriais ou agrícolas.

Recepção, Limpeza e Preparo da Cana-de-Açúcar - o ciclo produtivo tem início com a recepção da matéria-prima, seguida de sua limpeza para remover detritos, e posterior preparo, que envolve a moagem para facilitar a extração do caldo.

Extração do Caldo - o caldo é extraído da cana preparada, sendo destinado à fabricação de açúcar e etanol. O bagaço resultante é direcionado para a geração de energia ou outras aplicações valiosas.

Produção de Açúcar e Etanol - mediante processos de purificação, evaporação e fermentação, o caldo é transformado em açúcar e etanol. Nessa fase, são gerados subprodutos como a torta de filtro e a vinhaça.

Geração de Vapor e Eletricidade – o bagaço serve como combustível para caldeiras, criando vapor que aciona turbinas para a produção de eletricidade. A bioeletricidade gerada pode suprir as necessidades da usina e o excedente pode ser comercializado.

Utilização dos Resíduos - os resíduos são aproveitados de múltiplas maneiras:

- **Bagaço:** pode ser utilizado na alimentação animal, na produção de papel, xilitol e bioplásticos, ou como biomassa para geração de energia.
- **Torta de Filtro:** usada como biofertilizante ou para a geração de biogás.

- **Vinhaça:** empregada como fertilizante líquido, rico em potássio, ou na produção de biogás.
- **Cinzas e Fuligem:** utilizadas como correção de solo na agricultura, agregando minerais essenciais.

Este modelo de produção da indústria sucroalcooleira, ilustrado pelo fluxograma, reflete um sistema de economia circular que integra a reutilização de resíduos como componente chave para a sustentabilidade e eficiência energética do setor. A transformação de resíduos em recursos de valor agregado reforça o compromisso do setor com as práticas de produção sustentável e alinha a indústria sucroalcooleira às metas globais de desenvolvimento sustentável e de transição para uma matriz energética mais limpa (BONASSA et al., 2015).

1.2.5 Resíduos gerados pela indústria sucroalcooleira

A indústria sucroalcooleira gera uma diversidade de resíduos, como torta de filtro, fuligem e cinzas de caldeira, bagaço e vinhaça, muitos dos quais são reintegrados ao ciclo produtivo, comprovando o potencial para práticas de economia circular. O bagaço, resultante da moagem da cana, é amplamente utilizado, desde a cogeração de energia até aplicações na indústria de papel, construção civil e cosméticos (SOUZA et al., 2007). A vinhaça, subproduto da produção de etanol, é primariamente empregada na fertirrigação, enriquecendo o solo com nutrientes essenciais.

Contudo, bagaço e vinhaça, os resíduos mais volumosos do processo, apresentam desafios específicos. A vinhaça, em particular, tem alta carga poluente, mas é rica em nutrientes valiosos para a agricultura. A gestão desses resíduos é essencial para mitigar impactos ambientais e maximizar seu valor (EMBRAPA, 2023).

O aproveitamento do bagaço para produção de xilitol é um exemplo de valorização de resíduos, contribuindo para a sustentabilidade do setor (MONTEIRO et al., 2022). A crescente demanda por biocombustíveis e o desenvolvimento de novas técnicas para tratamento de resíduos refletem a busca por soluções que agreguem valor econômico, social e ambiental.

A tecnologia de briquetagem e peletização transforma resíduos sólidos em biocombustíveis com maior poder calorífico, aumentando o potencial de receita (ABIPEL, 2019). Além disso, a utilização de biodigestores para produção de biogás a partir de resíduos orgânicos não apenas reduz os poluentes, mas também gera energia elétrica, com possibilidade de comercialização do excedente (NOGUEIRA, 2014).

Essas iniciativas mostram o compromisso da indústria sucroalcooleira com a sustentabilidade ao implementar práticas inovadoras que otimizam o uso de resíduos, reduzem o impacto ambiental e promovem a geração de energia renovável. A integração dessas tecnologias e práticas sustentáveis é fundamental para o futuro da indústria e para o atendimento aos princípios da sustentabilidade.

1.2.5.1 Torta de Filtro, destinação e aplicação

Dentro do complexo cenário da indústria sucroalcooleira, um dos subprodutos relevantes é a torta de filtro. Proveniente da clarificação do caldo de cana, essa substância resulta do processo de filtragem a vácuo, oportunidade em que os resíduos solúveis e insolúveis são separados do caldo. Tal procedimento é fundamental para a purificação do açúcar e a geração dessa matéria residual, a qual consiste numa proporção que varia de 1% a 4% da massa da cana processada. Isso corresponde, em média, a 40 quilos por tonelada de cana-de-açúcar, evidenciando a significativa quantidade de resíduo gerado pela indústria (GURGEL, 2012).

A composição da torta de filtro, rica em matéria orgânica e elementos minerais como fósforo, potássio, cálcio e magnésio, é uma fonte de geração de biogás e um excelente adubo orgânico para o solo, promovendo retenção de água e nutrição das plantações. Com aproximadamente 70% a 75% de umidade e 25% a 30% de matéria orgânica, essa torta pode ser utilizada de forma benéfica na agricultura, melhorando a fertilidade do solo e contribuindo para um desenvolvimento mais saudável das culturas. As Figuras 3 e 4 ilustram, respectivamente, o processo de compostagem da torta de filtro e sua aplicação no canavial, mostrando as práticas agrícolas relacionadas ao aproveitamento desse subproduto na agricultura.

Fig. 03: Compostagem da torta de filtro



Fonte: CanaOnline

Fig. 04: Aplicação da torta de filtro no canavial



Fonte: CanaOnline

A integração da torta de filtro como um recurso valioso para a agricultura reflete um avanço na gestão de resíduos da indústria sucroalcooleira, transformando o que outrora era descartado em um componente vital para o fechamento do ciclo de nutrientes (GURGEL, 2012). Essa prática não só minimiza o impacto ambiental associado ao descarte de resíduos, mas também reforça o compromisso com a sustentabilidade agrícola, alinhando-se aos princípios da economia circular, destacando a capacidade da indústria de inovar em direção a um futuro mais sustentável.

1.2.5.2 Fuligem e Cinzas de caldeiras, destinação e aplicação

As usinas sucroalcooleiras desempenham papel relevante na produção de açúcar e etanol, utilizando a cana-de-açúcar como matéria-prima. Durante este processo, o bagaço da cana é queimado em caldeiras para gerar vapor, essencial tanto para a produção de energia elétrica quanto para o aquecimento dos processos industriais. Como consequência dessa combustão, são gerados resíduos como fuligem e cinzas, que demandam gestão adequada por causa de seus potenciais impactos ambientais e de saúde.

A fuligem, um resíduo sólido composto por partículas finas de carvão e outros compostos orgânicos, resulta da combustão incompleta do bagaço. A emissão dessas partículas pode variar de 4.000 a 6.000 mg Nm³, conforme indicado por Gurgel(2012). As emissões de fuligem podem contribuir para a poluição do ar e, se depositadas, podem afetar negativamente a qualidade do solo e da água. Por isso, é fundamental que as usinas adotem tecnologias para minimizar essas emissões, como os equipamentos lavadores de gases, que capturam a fuligem em um líquido, permitindo seu tratamento posterior em decantadores.

Já as cinzas, formadas pelos resíduos inorgânicos da combustão do bagaço, são produzidas em quantidades que variam de 15 a 25 kg por tonelada de bagaço. Essas cinzas podem ser divididas em cinzas volantes, partículas finas carregadas pelo ar, e cinzas de fundo, partículas maiores que se depositam no fundo das caldeiras e fornalhas. As cinzas contêm uma série de elementos úteis, como óxidos de silício, alumínio, ferro, entre outros, e podem ser aplicadas de diversas formas, como fertilizantes, na produção de cimento ou na construção civil, de acordo com Rezende (2016).

Para gerenciar efetivamente a fuligem e as cinzas, as usinas necessitam implementar práticas sólidas de gestão de resíduos, adotando sistemas de controle de emissões e

tecnologias de tratamento específicas para esses subprodutos. Análises laboratoriais são recomendadas para assegurar que a utilização das cinzas seja segura e sustentável.

Enquanto a fuligem e as cinzas são subprodutos desafiadores gerados pela queima do bagaço de cana nas usinas sucroalcooleiras, abordagens inovadoras e sustentáveis podem transformar esses resíduos em recursos valiosos. Isso não só ajuda a mitigar seus impactos ambientais e de saúde, mas também contribui para a economia circular, promovendo o uso eficiente dos recursos disponíveis. A Figura 5 ilustra o uso da cinza de cana-de-açúcar na produção de concreto, destacando uma das possíveis aplicações desse resíduo na indústria da construção civil.

Figura 05: Cinza de cana-de-açúcar na produção de concreto.



Fonte: Renato Assada - faumack309.wordpress.com

A gestão responsável da fuligem e das cinzas provenientes da queima do bagaço de cana nas usinas sucroalcooleiras é essencial para mitigar os impactos ambientais e de saúde, associados a esses subprodutos. A implementação de práticas sólidas de gestão de resíduos, aliada ao uso de tecnologias de controle de emissões e tratamento específicas, é um passo imprescindível rumo à sustentabilidade nesse setor. Ao transformar esses resíduos em recursos valiosos por meio de abordagens inovadoras e sustentáveis, as usinas contribuem não apenas para a preservação do meio ambiente, mas também para a promoção da economia circular e o uso eficiente dos recursos disponíveis.

1.2.5.3 Bagaço da cana-de-açúcar, destinação e aplicação

O bagaço da cana-de-açúcar, um subproduto da indústria sucroalcooleira, vem ganhando importância no cenário energético brasileiro. Antes visto como um resíduo, esse material fibroso é agora uma fonte de energia sustentável. Composto por cerca de 46% de fibras e 50% de água, o bagaço resulta em aproximadamente 280 quilos por tonelada de cana processada. É essencial na cogeração de energia, posto que seu uso em caldeiras gera vapor

que aciona turbinas para produção de eletricidade. Esta eletricidade não só supre as necessidades da própria indústria, mas também é comercializada, contribuindo para a diversificação da matriz energética nacional (EMBRAPA, 2023). A Figura 6 mostra um depósito de bagaço de cana-de-açúcar, ilustrando a importância desse recurso na produção de energia.

Figura 06: Depósito de Bagaço de cana-de-açúcar



Fonte: CanaOnline

Além do setor energético, o bagaço tem aplicações variadas, incluindo a fabricação do xilitol pela indústria alimentícia e como suplemento alimentar para gado, especialmente útil durante períodos de seca. Na indústria, é utilizado na produção de papel, plástico sustentável, briquetes, pellets e combustíveis sólidos de alto valor calorífico com demanda crescente no mercado (CANAONLINE, 2023).

Contudo, o aproveitamento do bagaço enfrenta desafios ambientais significativos. A queima em caldeiras pode emitir poluentes como dióxido de enxofre e material particulado, afetando a qualidade do ar, contribuindo para o aquecimento global. A gestão inadequada desse resíduo também pode resultar em acumulação e liberação de gases de efeito estufa durante sua decomposição. Assim, práticas sustentáveis como compostagem, reciclagem e reutilização são essenciais para minimizar impactos ambientais.

1.2.5.3.1 Briquetes & Pellets

A valorização do bagaço de cana-de-açúcar é eficientemente alcançada pela briquetagem e peletização, transformando o resíduo em formatos densos e manejáveis. Os

pellets têm diâmetro entre 6 mm e 16 mm e comprimento de 25 a 30 mm, enquanto os briquetes têm diâmetro aproximado de 60 mm e comprimento de 25 a 300 mm, otimizando o transporte e armazenamento, tornando-os comercialmente atrativos para geração de energia calorífica (MFRURAL, 2023).

Em razão do poder calorífico superior ao do material original, briquetes e pellets são ideais para aplicações de aquecimento e geração de energia. Os briquetes resultam da compactação de resíduos lignocelulósicos e têm densidade de 650-1200 kg/m³, diâmetro de aproximadamente 60 mm, comprimento de 25 a 300 mm, PCS na faixa de 16.92 a 17.64 MJ/kg e umidade entre 7 e 12% B.U. (ROCHA, 2014).

Esse processo, chamado de briquetagem, consiste na trituração e compactação sob elevadas pressões, transformando os resíduos em blocos com melhor potencial de geração de calor em relação aos resíduos in natura (SILVA, et al., 2017). A Tabela 4 apresenta um comparativo de características e preço médio de mercado desses produtos.

Tabela 04: Comparativo de Características e Preço Médio de Mercado

Produto	Tipo de Resíduo	Características	Preço Médio de Mercado
Bagaço In Natura	Bagaço de Cana-de-Açúcar	Baixo poder calorífico, alto volume, difícil armazenamento	Baixo
Briquete	Bagaço de Cana-de-Açúcar	Alto poder calorífico, fácil armazenamento e transporte	Médio
Pellet	Bagaço de Cana-de-Açúcar	Alto poder calorífico, formato padronizado, eficiência energética	Alto

Fonte: Elaborado pelo autor

A queima de briquetes ou pelotas de bagaço de cana-de-açúcar gera um percentual de cinzas que pode ser comparado com outros materiais usados para fins energéticos. Especificamente, a queima de bagaço de cana-de-açúcar in natura resulta em cerca de 4-6% de cinzas. Por outro lado, após a transformação em briquetes, o percentual de cinzas tende a ser reduzido em razão da maior eficiência de queima, embora os valores específicos possam variar dependendo das condições e tecnologias empregadas no processo, chegando, em média, a 2,2% (SILVA et al., 2018).

Para efeito de comparação, o uso de outras biomassas, como casca de arroz e serragem, apresenta percentuais de cinzas que variam amplamente. Por exemplo, a casca de

arroz pode gerar entre 15-20% de cinzas, enquanto a serragem gera em torno de 1-3% de cinzas.

Além disso, a queima de briquetes de bagaço de cana é conhecida por reduzir a emissão de gases de efeito estufa e outros poluentes atmosféricos em comparação com a queima de bagaço in natura. O processo de briquetagem melhora a densidade e a eficiência de queima do bagaço, resultando em menor geração de cinzas e menor emissão de partículas finas e compostos nocivos, como os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs), que são prejudiciais à saúde e ao meio ambiente (YUNUSA et al., 2023).

Esses dados são importantes para entender o impacto ambiental e a eficiência energética da utilização de bagaço de cana-de-açúcar como fonte de energia renovável, destacando as vantagens do processo de briquetagem na redução de resíduos e emissões poluentes.

A densificação de biomassa, como o bagaço de cana, em briquetes ou pellets reduz significativamente a umidade e aumenta a densidade, o que melhora a eficiência da combustão e reduz a emissão de poluentes. A queima mais eficiente desses briquetes em comparação com a biomassa in natura resulta em menores emissões de partículas e potencialmente menos formação de HPAs, em razão de uma combustão mais completa (YUNUSA et al., 2023).

Portanto, a introdução dessas práticas e tecnologias não só beneficia o meio ambiente, mas também reforça o compromisso do setor sucroalcooleiro com a sustentabilidade e a qualidade de vida das comunidades locais, evidenciando investimentos contínuos em pesquisa e inovação. A queima da cana-de-açúcar in natura para fins de colheita manual tem sido uma prática comum no Brasil, mas hoje é pouco utilizada, com mais de 92,4% da colheita no Brasil sendo mecanizada (CONAB, 2023). Esta técnica libera uma quantidade significativa de poluentes atmosféricos, incluindo material particulado, monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs), que são prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente. Estudos indicam que a queima da palha da cana pode liberar entre 3 e 10 toneladas de material particulado por hectare queimado, além de contribuir para a formação de ozônio troposférico e aumentar a incidência de problemas respiratórios na população (YUNUSA et al., 2023).

Em contraste, a transformação do bagaço de cana em briquetes ou pellets resulta em uma combustão mais eficiente, reduzindo significativamente as emissões de poluentes. A queima desses briquetes em caldeiras é mais completa e controlada, levando a uma menor

produção de HPAs e outros contaminantes. Essa tecnologia é uma alternativa mais sustentável e menos poluente, alinhando-se com as práticas de gestão ambiental responsável e melhoria da qualidade do ar nas regiões produtoras (YUNUSA et al., 2023). A Tabela 5 mostra um comparativo de características geradas pela queima de briquetes de diversas biomassas em relação ao bagaço de cana-de-açúcar, comparando o teor de cinzas, emissões de partículas, valor e poder calorífico.

Tabela 05: Características da Queima de Briquetes em Diferentes Biomassas

Tipo de Biomassa	Teor de Cinzas (%)	Emissões de Partículas (mg/m³)	Valor Calorífico (MJ/kg)	Poder Calorífico (kcal/kg)	Fonte
Bagaço de Cana-de-açúcar	2.2	130	18.5	4418.63	(SILVA, R. et al., 2018).
Madeira	1.0	100	19.0	4538.06	(PEREIRA, M. et al., 2017).
Casca de Arroz	15.0	250	14.5	3453.25	(OLIVEIRA, J. et al., 2019).
Casca de Coco	1.2	120	20.5	4896.32	(SANTOS, L. et al., 2020).
Casca de Amendoim	3.0	180	17.5	4179.79	(LIMA, F. et al., 2016).
Bambu	3.5	160	18.5	4418.63	(ALMEIDA, P. et al., 2021).

Fonte: Elaborada pelo autor

Esta tabela mostra que o bagaço de cana-de-açúcar tem um teor de cinzas moderado e um valor calorífico competitivo quando comparado com outras biomassas. A madeira e a casca de coco apresentam menores teores de cinzas e maiores valores caloríficos, enquanto a casca de arroz tem o maior teor de cinzas e a maior emissão de partículas.

Essas informações e dados comparativos ajudam a entender as vantagens e desvantagens do uso de diferentes biomassas para a produção de briquetes, destacando o potencial do bagaço de cana-de-açúcar como uma opção viável e eficiente. A compactação reduz o volume da massa, otimizando o armazenamento e o transporte, e a secagem remove o excesso de água, elevando seu poder calorífico. Isso os torna eficientes para sistemas de aquecimento e geração de energia. Transformar o bagaço em briquetes e pellets não só constitui uma abordagem sustentável ao aproveitar integralmente os resíduos agrícolas, mas também contribui para a economia circular, minimizando o impacto ambiental.

A briquetagem e a peletização exemplificam como inovações tecnológicas podem transformar resíduos agrícolas em recursos valiosos, promovendo práticas de produção

sustentáveis na indústria sucroalcooleira. As Figuras 7 e 8 ilustram os produtos desses processos.

Figura 07: Pellets



Fonte: Mejan Ambiental

Figura 08: Briquetes



Fonte: Biomaxind

A valorização do bagaço de cana-de-açúcar pela produção de briquetes e de pellets destaca-se não só pelo incremento no poder calorífico, mas também pelo aumento na economicidade e eficiência energética. Esses produtos são comparados com outras biomassas e lenha comercial, demonstrando vantagens significativas. A Tabela 6 apresenta as características e o preço médio de venda desses produtos.

Tabela 06: Características e Preço Médio de Venda

Produto	Tipo de resíduo	Poder calorífico superior [kcal/kg]	Peso específico [kg/m ³]	Peso a granel [kg/m ³]	Umidade	Preço médio de venda [ton]
Biomassa para alimentação animal	Algodão, casca de arroz, café, amendoim, bagaço de cana-de-açúcar.			120-250	12% a 46%	R\$ 130,00
Biomassa para geração de energia térmica em caldeiras e aquecedores	Arroz, algodão, amendoim, café, pinus, eucalipto, madeira de lei e bagaço de cana-de-açúcar.	2.000 a 3.500		120-250	12% a 46%	R\$ 100,00
Briquetes	Arroz, algodão, amendoim, café.	3.800 a 4.300	1100	650 - 700	12%	R\$ 550,00
Briquetes	Pinus, madeira de lei, eucalipto e bagaço de cana-de-açúcar.	4.600 a 4.900	1170	700 - 750	12%	R\$ 700,00
Pellets	Pinus, madeira de lei, eucalipto e bagaço de	4.600 a 4.900	1100	700 - 750	12%	R\$ 900,00

	cana-de-açúcar.					
Lenha comercial	eucalipto, pinus, acácia e outras	3.000	600	350 - 400	12% a 30%	R\$ 80,00

Fonte: Adaptado de EMBRAPA; MFRURAL; CANAONLINE; RSUBBRASIL E BIOMAXIND, 2023)Nota: dados trabalhados pelos autores

Briquetes e Pellets de Cana-de-Açúcar: Esses materiais têm poder calorífico entre 4.600 e 4.900 kcal/kg, o que representa um aumento de 72,7% em relação à biomassa in natura, como algodão e casca de arroz. Com preço médio que varia de R\$ 700,00 a R\$ 900,00 por tonelada, eles oferecem uma valorização considerável em razão do seu alto poder calorífico e de densidade, facilitando o transporte e o armazenamento (EMBRABA, 2023; MFRURAL, 2023).

Comparação com Outras Biomassas: Quando comparados a briquetes de outras biomassas, como arroz e café, que têm poder calorífico de 3.800 a 4.300 kcal/kg, os briquetes e pellets de cana apresentam um poder calorífico superior em cerca de 17,3% (EMBRAPA, 2023).

Eficiência em relação à Lenha Comercial: Em comparação com a lenha comercial, que tem poder calorífico de 3.000 kcal/kg e preço médio de R\$ 80,00 por tonelada (MFRURAL, 2023), briquetes e pellets mostram um ganho calorífico médio de 58,3% e uma diferença de preço que ultrapassa os 775%, destacando sua maior eficiência e seu valor de mercado (EMBRAPA, 2023)

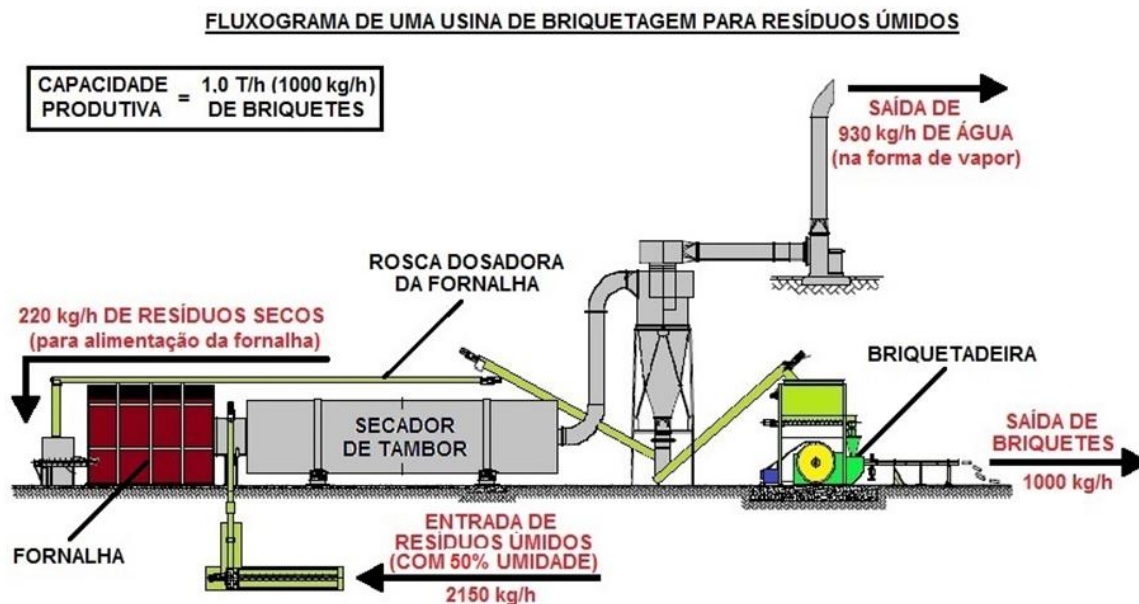
Economicidade em Transporte e Armazenamento

Em razão da sua alta densidade, briquetes e pellets oferecem vantagens significativas em termos de transporte e armazenagem. Essa característica reduz os custos logísticos e aumenta a viabilidade de uso em diferentes regiões, fortalecendo sua posição no mercado de energia sustentável.

Valorização de Mercado

A transformação do bagaço de cana em briquetes e pellets não apenas aproveita um resíduo que, de outra forma, poderia ser descartado, mas também proporciona uma opção de combustível renovável e ambientalmente adequado. Esta valorização contribui para a economia circular e a sustentabilidade na indústria sucroalcooleira. A Figura 9 ilustra o processo de produção de briquetes.

Figura 09: Processo de produção de briquetes



Fonte: ABIB (2019)

O processo de produção de briquetes tem início com a entrada dos resíduos no triturador, passando pela secagem, com remoção do excesso de água até atingir 8% a 10% b.u. – base úmida, seguindo para o silo de armazenagem, concluindo com a prensagem. Este processo, que tem uma perda de cerca de 17% de massa, alimenta uma caldeira que gera energia para o processo produtivo.

A comercialização do excedente de bagaço e palha de cana in natura é uma opção menos rentável pelo grande volume de material e seu baixo valor comercial. Em contraste, briquetes e pellets, conhecidos como "carvão ecológico", são altamente demandados em mercados como cerâmicas, pizzarias e fornos domésticos pelo seu alto poder calorífico e pela facilidade de armazenamento e manuseio.

1.2.5.3.2 Xilitol, subproduto do bagaço

A conversão do bagaço de cana-de-açúcar em xilitol é uma inovação destacada tanto por sua sustentabilidade quanto pela viabilidade econômica. O xilitol, um álcool açucarado

natural, é utilizado como alternativa ao açúcar convencional em produtos alimentícios e no setor farmacêutico, em razão dos seus benefícios à saúde.

Historicamente visto como um simples resíduo agrícola, o bagaço tem seu potencial revalorizado pelos processos de hidrólise e fermentação, que transformam suas fibras em xilitol. De acordo com Monteiro e Sarro (2022), o processo inclui:

1. **Pré-tratamento:** limpeza e preparação do bagaço para otimizar a eficácia da hidrólise.
2. **Hidrólise:** degradação das cadeias de celulose e hemicelulose em açúcares simples, como a xilose, utilizando métodos ácidos ou enzimáticos.
3. **Fermentação:** conversão da xilose em xilitol por leveduras ou bactérias especializadas.
4. **Purificação:** refinamento do xilitol para alcançar a pureza necessária para aplicações alimentícias e farmacêuticas.

Utilizando o bagaço, subproduto abundante da indústria sucroalcooleira, são reduzidos os custos de produção e minimizados os impactos ambientais relacionados ao descarte desse material. Este processo exemplifica o princípio da economia circular, ao reaproveitar resíduos em novos produtos de valor, reduzindo a dependência de recursos virgens, minimizando a geração de resíduos.

Embora promissora, a tecnologia para converter o bagaço em xilitol ainda requer aperfeiçoamentos para ser mais eficaz e competitiva no mercado, frente a outras fontes tradicionais de xilitol, como milho ou madeira (MONTEIRO et al., 2022).

A exploração do xilitol derivado do bagaço representa um avanço significativo para a sustentabilidade e a diversificação das matérias-primas nas indústrias alimentícias e farmacêuticas.

1.2.5.4 Vinhaça

A vinhaça, também conhecida como vinhoto ou restilo, é um subproduto líquido da produção de etanol, obtido após a destilação do caldo de cana fermentado. Este efluente é enriquecido com nutrientes essenciais, tornando-o valioso para a agricultura e a produção de energia (SILVA, 2015).

1.2.5.4.1 Vinhaça e sua aplicação na produção de biogás

Biodigestão Anaeróbica:

A biodigestão anaeróbica é um processo que ocorre na ausência de oxigênio, utilizado para decompor matéria orgânica presente na vinhaça. Este processo transforma o efluente em biogás, uma mistura de gases que contém uma alta concentração de metano (50-70%). O biogás pode ser utilizado como combustível ou para geração de energia elétrica, representando uma solução sustentável para a gestão de resíduos e conversão de um subproduto em uma fonte de energia renovável (PENTEADO et al., 2017).

Composição e Potencial Energético

O biogás produzido a partir da vinhaça tem poder calorífico significativo, variando entre 5.000 e 7.000 kcal/m³, que pode ser aumentado para até 12.000 kcal/m³ com a remoção de dióxido de carbono (EMBRAPA,2023). Esta conversão não apenas reduz o volume de resíduos, mas também ajuda a diminuir a emissão de gases de efeito estufa. A Figura 10 mostra um tanque de tratamento de vinhaça ou vinhoto.

Figura 10: Tanque de tratamento de vinhaça ou vinhoto



Fonte: AgroAdvance

A biodigestão anaeróbica é feita em reatores fechados, em que condições como temperatura e pH são cuidadosamente controladas para otimizar a produção de biogás. Este método é mais eficaz na produção de biogás do que métodos aeróbicos, sendo capaz de tratar uma grande variedade de resíduos orgânicos. O processo não só gera biogás, mas também produz subprodutos como lodo, que pode ser utilizado como fertilizante (CRUZ, 2011).

Dada a crescente demanda por fontes de energia limpas e renováveis, o biogás produzido pela biodigestão anaeróbica da vinhaça oferece um potencial considerável. Este método não apenas promove a sustentabilidade ambiental, mas também fornece uma alternativa econômica para a geração de energia. A produção de biogás a partir da vinhaça demonstra o potencial energético desse resíduo, com cada m³ de vinhaça podendo produzir até 12 m³ de biogás (SILVA, 2015).

1.2.5.4.2 Vinhaça na Fertirrigação

Uso em Fertirrigação: A vinhaça é amplamente utilizada como fertilizante orgânico por meio da fertirrigação, um método que combina água de irrigação com fertilizantes para enriquecer o solo. Este processo não apenas melhora a fertilidade do solo, mas também promove o crescimento saudável das plantas. É indispensável ajustar a proporção de aplicação para evitar o excesso de nutrientes e minimizar riscos de contaminação ambiental (PAULA & BASSETTI, 2022).

Melhoria na Qualidade do Fertilizante: Após a biodigestão anaeróbia, a vinhaça transformada apresenta uma qualidade superior como fertilizante. O processo reduz a carga orgânica e concentra nutrientes como potássio e nitrogênio, facilitando a absorção pelas plantas. Além disso, substâncias potencialmente tóxicas são degradadas, melhorando a segurança e a eficácia do fertilizante (GURGEL, 2012).

Redução de Odores e Patógenos: O tratamento anaeróbico diminui significativamente a presença de patógenos e de odores desagradáveis, facilitando o manuseio e a aplicação da vinhaça. Isso melhora a aceitação do uso deste fertilizante por agricultores e comunidades locais, especialmente em áreas residenciais ou densamente povoadas.

Sustentabilidade e Impacto Ambiental: A fertirrigação com vinhaça tratada reduz o risco de lixiviação e contaminação de solos e de águas subterrâneas, contribuindo para uma prática agrícola mais sustentável. Isso está alinhado com regulamentações ambientais rigorosas e promove a proteção ambiental de longo prazo (GURGEL, 2012). A Figura 11 mostra aplicações da vinhaça na agricultura.

Figura 11: Aplicação da vinhaça na agricultura



Fonte: ResearchGate

A fertirrigação é benéfica para uma variedade de culturas agrícolas além dos canaviais, mas é vital considerar as características específicas de cada cultura e tipo de solo para otimizar a aplicação e evitar danos ambientais (PAULA & BASSETTI, 2022).

A gestão responsável e sustentável da vinhaça, especialmente através da fertirrigação e da biodigestão anaeróbica, transforma um subproduto da produção de etanol em um recurso valioso para a agricultura. Esta prática não só promove a sustentabilidade do processo produtivo como também contribui significativamente para a economia circular na indústria sucroalcooleira. Integrar estas práticas evidencia o compromisso com a sustentabilidade ambiental e agrícola, exigindo investimentos contínuos em pesquisa e desenvolvimento para otimizar os processos e maximizar os benefícios ambientais e econômicos. Essa abordagem não apenas beneficia o setor agrícola, mas também promove inovações tecnológicas para tratamentos mais eficazes e sustentáveis dos subprodutos industriais.

1.2.6 Sustentabilidade e meio ambiente

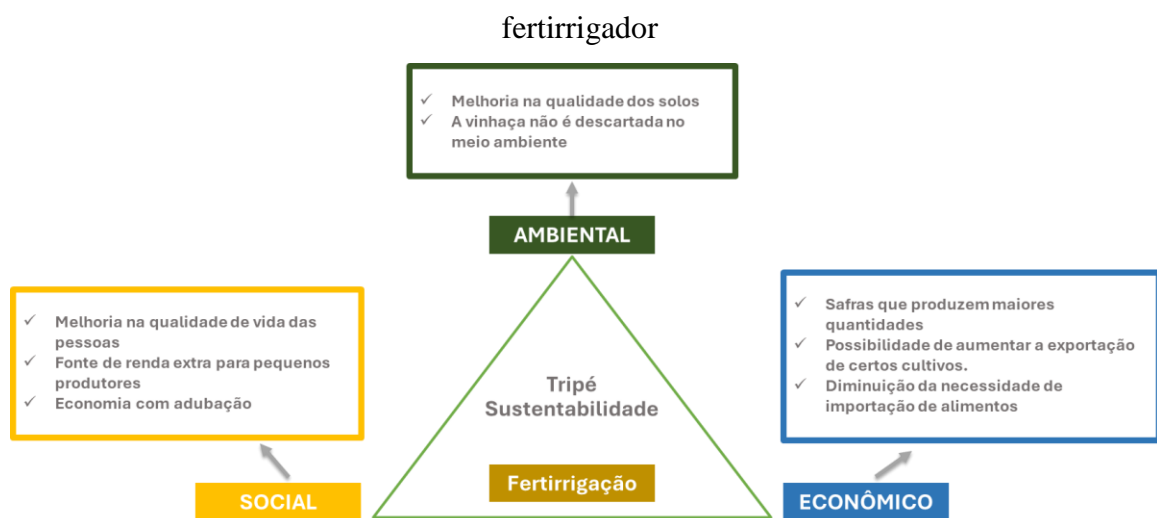
A indústria sucroalcooleira enfrenta o constante desafio de balancear produtividade e práticas sustentáveis. A introdução da colheita mecanizada da cana-de-açúcar e a eliminação da queima da palhada antes da colheita são transformações que ilustram esse equilíbrio. Essas mudanças não só fomentam a produtividade agrícola como também promovem o sequestro de carbono no solo, mitigando, assim, os impactos ambientais significativos (ROSSET et al., 2015).

A prática anterior de queimar a palhada resultava em poluição atmosférica e problemas de saúde pública, mas a proibição dessa queima introduziu novos desafios socioambientais, incluindo a realocação da força de trabalho para operações com maquinário agrícola (ROSSET et al., 2015). O manejo dos resíduos da cana, como bagaço, torta de filtro e vinhaça, através de métodos como a fertirrigação, oferece uma alternativa sustentável que recicla nutrientes e reduz a dependência de fertilizantes minerais (ROSSET et al., 2015).

Fertirrigação com Vinhaça

A fertirrigação com vinhaça combina água de irrigação e fertilizantes para enriquecer o solo com potássio, fósforo e microrganismos benéficos à planta. Este método não apenas melhora a fertilidade do solo, mas também promove o crescimento saudável das plantas, destacando a importância de calcular a proporção correta de aplicação para prevenir o sobrecarregamento do solo com nutrientes e minimizar riscos ambientais (PAULA & BASSETTI, 2022). A Figura 12 elenca os principais benefícios sustentáveis gerados pelo uso da vinhaça como agente fertirrigador.

Figura 12: Principais benefícios sustentáveis gerados pelo uso da vinhaça como agente



Fonte: Adaptado de Paula & Bassetti (2022)

Evolução da Colheita Mecanizada da Cana-de-Açúcar

A evolução da colheita mecanizada da cana-de-açúcar é um reflexo das transformações ocorridas na indústria sucroalcooleira brasileira nas últimas décadas. Desde a década de 2000, observa-se uma tendência crescente no uso de máquinas e de equipamentos para a colheita, substituindo gradativamente o trabalho manual (CONAB, 2023). A Tabela 6 apresenta um panorama da evolução desse processo ao longo de duas décadas, destacando a porcentagem de colheita mecanizada e manual em diferentes regiões do Brasil nos anos de 2007/08 e 2023/24, fornecendo perspectivas sobre as mudanças ocorridas nesse período.

Tabela 07: Evolução da Colheita Mecanizada da Cana-de-Açúcar em Duas Décadas

	% Colheita Mecanizada 2007/08	% colheita Manual 2007/08	% Colheita Mecanizada 2023/24	% colheita Manual 2023/24
NORTE	53,3	46,7	100,0	100,0
NORDESTE	2,2	97,8	27,0	73,0
CENTRO-OESTE	28,9	71,1	99,4	0,6
SUDESTE	30,8	69,2	98,4	1,6
SUL	10,4	89,6	98,4	1,6
Brasil	24,4	75,6	92,4	7,6

Fonte: Conab (2023). Elaborada pelo autor

Colheita Mecanizada e Impactos na Sustentabilidade

Nos últimos vinte anos, o setor sucroalcooleiro no Brasil fez investimentos significativos em tecnologia e pesquisa, culminando em uma transição substancial da colheita manual para a mecanizada. Essa mudança não apenas melhorou a eficiência produtiva e reduziu o impacto ambiental das queimadas, mas também contribuiu para uma melhoria considerável na qualidade de vida dos trabalhadores rurais, ao substituir práticas laboriosas e perigosas por operações mecanizadas mais seguras. Esta evolução reflete um compromisso com a sustentabilidade nas dimensões ambiental, econômica e social, comprovando como a indústria pode evoluir para atender às demandas contemporâneas por práticas mais sustentáveis e responsáveis (PLEC, 2007).

Avanços na Colheita Mecanizada

A mudança para a colheita mecanizada da cana-de-açúcar, acompanhada pela eliminação da queima da palhada antes da colheita, introduziu desafios e oportunidades significativas no manejo dos resíduos canavieiros. Este avanço tem sido fundamental para sustentar a produtividade agrícola e fomentar o sequestro de carbono no solo, conforme Rosset et al. (2015). O manejo apropriado desses resíduos não só aborda desafios ambientais importantes, mas também apresenta potencial para melhorar a sustentabilidade agrícola.

A prática anterior de queimar a palhada tinha consequências negativas, incluindo poluição atmosférica e impactos adversos à saúde pública, que Rosset et al. (2015) detalham. A proibição da queima destacou dilemas socioambientais, equilibrando a melhoria da qualidade do ar com questões econômicas, como a realocação da força de trabalho para operações de maquinário agrícola.

Benefícios da Mecanização

A acumulação de palha no campo, resultante da colheita mecanizada, traz benefícios substanciais para a saúde do solo, incluindo redução da compactação, prevenção de erosão e aumento da matéria orgânica, contribuindo para um microclima mais favorável. Essas vantagens são fundamentais para o sequestro de carbono e a sustentabilidade de sistemas agrícolas em larga escala, segundo Rosset et al. (2015).

A mecanização da colheita reduziu a necessidade de queimadas pré-colheita, diminuindo a emissão de gases de efeito estufa e melhorando a qualidade do ar nas regiões produtoras. Menos queimadas também significam redução nas queimadas acidentais, contribuindo para a preservação de ecossistemas naturais e para a biodiversidade. A eliminação da queima da palha da cana na colheita manual reduziu a degradação do solo e melhorou sua qualidade ao longo do tempo (UNICA, 2020).

A mecanização da colheita aumentou significativamente a eficiência da produção de cana-de-açúcar, reduzindo os custos de mão de obra e acelerando o processo de colheita. Isso resultou em um aumento na produtividade, com mais cana sendo colhida em menos tempo, com menos recursos humanos. A eficiência geral da indústria sucroalcooleira melhorou, tornando-a mais competitiva no mercado global de biocombustíveis e açúcar.

Impactos na Qualidade de Vida dos Trabalhadores

A transição para a colheita mecanizada reduziu a exposição dos trabalhadores rurais a condições de trabalho árduas e perigosas, como a queima manual da cana. Isso melhorou a segurança e as condições de trabalho dos funcionários da indústria. Além disso, a mecanização criou oportunidades de emprego relacionadas à operação e manutenção das máquinas (ROSSET et al., 2015).

Essa mudança não apenas melhorou a eficiência produtiva e reduziu o impacto ambiental das queimadas, mas também contribuiu para uma melhoria considerável na qualidade de vida dos trabalhadores rurais, ao substituir práticas laboriosas e perigosas por operações mecanizadas mais seguras. Esta evolução reflete um compromisso com a sustentabilidade nas dimensões ambiental, econômica e social, mostrando como a indústria pode evoluir para atender às demandas contemporâneas por práticas mais sustentáveis e responsáveis.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Proceder a uma revisão de literatura para avaliar o potencial de aproveitamento de resíduos na cadeia produtiva da cana-de-açúcar, considerando os aspectos econômicos e ambientais, visando à melhoria da eficiência e à diversificação das fontes de receita, assim como à promoção da sustentabilidade.

2.2 Objetivos específicos

- Mostrar o panorama atual e as tendências do setor sucroalcooleiro brasileiro, com foco no processamento dos resíduos associados à cadeia da cana-de-açúcar.
- Investigar e documentar o potencial da vinhaça como fonte de geração de energia renovável do tipo biogás, pela implantação de biodigestores no processamento dos resíduos associados à cadeia da cana-de-açúcar.
- Identificar e disponibilizar caso de novas tecnologias aplicadas aos resíduos da cana-de-açúcar que agregam valor, melhoram seus potenciais energéticos, reduzem os impactos ambientais e maximizam o aproveitamento da matéria-prima.
- Estimular formas de investimento responsável em energia renovável no setor sucroalcooleiro, buscando a sustentabilidade nos aspectos social, ambiental e econômico.

3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIPEL - Associação Brasileira das Indústrias Biomassa Pellets e Briquetes; Instituto Brasileiro Pellets Biomassa Briquetes. Brasil Biomassa e Energia Renovável - Conjuntura Nacional e Internacional do Setor Industrial de Biomassa Pellets, 2019. Disponível em: <https://www.brasilbiomassa.com.br>.

ALMEIDA, G. S.; SOUZA, J. R.; BARROS, L. A.; FERREIRA, M. C.; SANTOS, D. M. Avaliação da queima de bagaço de cana-de-açúcar em caldeiras industriais. Revista Brasileira de Energias Renováveis, v. 4, n. 2, p. 123-135, 2015.

ALMEIDA, P.; GOMES, R.; CARVALHO, T.; RIBEIRO, A. Comparação das Propriedades de Briquetes de Bambu e Outras Biomassas. Biomass and Bioenergy, 2021.

ARIEDI JUNIOR, Vagner Roberto; MIRANDA, José Roberto. Combustão do bagaço da cana-de-açúcar, autossuficiência energética e carbono neutro. VII Workshop Agroenergia, Ribeirão Preto, 2013.

BARRA, Aline dos Reis Chaves; BOAVENTURA, Bruno de Sousa; LEAL, Denise Maria Nunes; QUEIROZ, Fernando Oliveira de; PEREIRA, Gabriela de Brito Leite e Rocha; SOUZA, Luciana Cristina de; FERREIRA, Deusmaque Carneiro. Óleo Fúsel: Caracterização e Aplicações. In: Anais do VII ENTEC – Encontro de Tecnologia da UNIUBE, 16 a 18 de novembro de 2011, Campus Aeroporto – Uberaba. Uberaba: UNIUBE – Universidade de Uberaba, 2011.

BONASSA, Gabriela; SCHNEIDER, Lara Talita; FRIGO, Késia Damaris de Azevedo; FEIDEN, Armin; TELEKEN, Joel Gustavo; FRIGO, Elisandro Pires. Subprodutos Gerados na Produção de Bioetanol: Bagaço, Torta de Filtro, Água de Lavagem e Palhagem. Revista Brasileira de Energias Renováveis, v. 4, p. 144-166, 2015.

BOSCHIERO, Beatriz Nastaro. Vinhaça: De Resíduo a Recurso - Utilização e Perspectivas Futuras. Disponível em: <https://agroadvance.com.br/blog-vinhaca-de-residuo-a-recurso/>. Acesso em: 01 ago. 2023.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Plano Nacional de Energia 2050. Brasília: MME/EPE, 2020.

BRESSER-PEREIRA, L.C. Desenvolvimento e Crise no Brasil. São Paulo: Editora Brasiliense, 1972. CARVALHO MATOS, W. E. C.; SILVA, H. J. B.; PAZ, G. M. et al. Revista Matéria, v. 26, n. 4, 2021.

CAMPOS, Victor Arruda Ferraz. Aspectos técnicos, econômicos e ambientais da valorização energética de resíduos municipais: uso de syngas e biodiesel para a geração de energia elétrica. 2024.

CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Inovação para cidades sustentáveis: soluções para resíduos sólidos. Resumo Executivo. Brasília, DF: CGEE, 2023. 24 p.

CGEE. Prospecção tecnológica no setor elétrico brasileiro: Diagnóstico de CT&I no setor elétrico brasileiro, 2017. Disponível em: <http://www.cgee.org.br>. Acesso em: 19 abril. 2023.

CNA BRASIL. Disponível em: <https://cnabrasil.org.br/>. Acesso em: 14 out. 2023.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Boletim da safra de cana-de-açúcar. [S.l.], 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar>.

DADOS MUNDIAIS. Disponível em: <https://www.dadosmundiais.com/>. Acesso em: 10 de setembro de 2023.

DE FIGUEIREDO, E. B.; PANOSSO, A. R.; ROMÃO, R.; LA SCALA, N. Emissão de gases de efeito estufa associada à produção de açúcar no sul do Brasil. Carbon Balance and Management, 2010.

DIAS, M.O.S.; PEREIRA, L.G.; JUNQUEIRA, T.L.; PAVANELLO, L.G.; CHAGAS, M.F.; CAVALETT, O.; BONOMI, A. Butanol production in a sugarcane biorefinery, using ethanol as feedstock. Part I: Integration to a first generation sugarcane distillery. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 92, p. 1441-1451, 2014.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética . Matriz Energética e Elétrica. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 17 set. 2023.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana>. Acesso em: 14 maio 2023.

FLICKR. Canal do Produtor. Disponível em: <https://www.flickr.com/photos/canaldoprodutor/>. Acesso em: 08 jan. 2024.

FRANCO, H. C. J.; TRIVELIN, P. C. O.; FARONI, C. E.; VITTI, A. C.; OTTO, R. Produtividade de colmos e atributos tecnológicos da cana-de-açúcar plantada relacionados à fertilização nitrogenada. *Scientia Agrícola*, 2010.

GALBIATTI SILVEIRA, P. Energia e mudanças climáticas: impactos socioambientais das hidrelétricas e diversificação da matriz energética brasileira. *Opinião Jurídica*, v. 17, n. 33, p. 123-147, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.22395/ojum.v17n33a5>.

GENTIL, L. V. Tecnologia e economia do briquete de madeira. 2008. 196 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade de Brasília, Brasília, DF.

GONZAGA, L. C.; CARVALHO, J. L. N.; OLIVEIRA, B. G.; SOARES, J. R.; CANTARELLA, H. Remoção de resíduos de cultura e aplicação de inibidores de nitrificação como estratégias para mitigar emissões de N₂O em campos de cana-de-açúcar. *Biomass and Bioenergy*, 2018.

GRÜN, R. Apagão cognitivo: a crise energética e sua sociologia. *Dados*, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0011-52582005000400005>.

GURGEL, M. N. A. Tecnologia para aproveitamento de resíduos da agroindústria sucroalcooleira como biofertilizante organomineral granulado. Campinas, SP: Universidade Estadual de Campinas / Faculdade de Engenharia Agrícola, 2012.

IEA - Agência Internacional de Energia. Matriz Energética. Disponível em: <https://www.iea.org/search?q=matriz%20energ%C3%A9tica>. Acesso em: 18 março 2023.

IEA - International Energy Agency. Energy Statistics Data Browser. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data->

browser?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=TESbySource. Acesso em: 22 dez. 2023.

ISSAC, T. A Transição Energética Tem a Chave para Ultrapassar a Crise Energética e Climática Global. Emirados Árabes Unidos: International Renewable Energy Agency, 2022.

KRÜGER, Eduardo Leite et al. Uma análise sistêmico-ambiental sobre a atual crise energética brasileira. Revista Educação & Tecnologia, v. 8, 2004.

LIMA, F.; NOGUEIRA, E.; MACHADO, M.; PEREIRA, S. Potencial Energético dos Briquetes de Casca de Amendoim. Renewable Energy Research, 2016.

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento . SAPCANA - Sistema de Acompanhamento da Produção Canavieira. Acompanhamento da Produção, 2022.

MONTEIRO, Fernanda Carlos; SARROUH, Boutros. Integração energética de uma planta produtora de xilitol, utilizando um ciclo de trocadores de calor. The Journal of Engineering and Exact Sciences, v. 8, n. 8, 2022.

MORAES, M. A. F. D. Energia e Sustentabilidade no Brasil: Transição Energética e Políticas Públicas. Editora Unesp, 2018.

NOGUEIRA, MAF de S.; GARCIA, M. da S. Gestão dos resíduos do setor industrial sucroenergético: Estudo de caso de uma usina no município de Rio Brillhante, Mato Grosso do Sul, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/2236117010444>.

NOVACANA. Conab divulga dados finais de 2016/17 e 1º levantamento da safra 2017/18 de cana-de-açúcar. Curitiba: NovaCana, 2017. Disponível em: <https://www.novacana.com/n/cana/safra/conab-dados-finais-2016-17-levantamento-safra-2017-18-cana-de-acucar-180417/>. Acesso em: 15 fev. 2023.

PAULA, R. C.; BASSETTI, F. J. Alternativas sustentáveis ao uso da vinhaça: uma revisão. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, v. 13, n. 2, p. 186-197, 2022. Disponível em: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2022.002.0017>.

OLIVEIRA, J.; SANTOS, L.; MENEZES, P.; BARBOSA, V. Impacto Ambiental da Utilização de Briquetes de Casca de Arroz. Environmental Science and Technology, 2019.

OLIVEIRA, L. B. Crises Energéticas e a Necessidade de Alternativas Sustentáveis: Um Estudo sobre a Dependência de Combustíveis Fósseis. Revista Brasileira de Energia, 21(2), 45-60, 2015.

OLIVEIRA, P. A.; SILVA, J. F. Análise comparativa do desempenho da combustão de diferentes briquetes de biomassa. *Energy Conversion and Management*, v. 142, p. 385-392, 2017.

PAOLIELLO, José Maria Morandini. Aspectos ambientais e potencial energético no aproveitamento de resíduos da indústria sucroalcooleira. **MaterThesis. Universidade Estadual**, 2006.

PENTEADO, Mauricio Cabral; SCHIRMER, Waldir Nagel; DOURADO, David Cardoso; GUERI, Matheus Victor. Análise do potencial de geração de biogás a partir da biodigestão anaeróbia da vinhaça e bagaço de cana. Universidade Federal do Paraná. *BIOFIX Scientific Journal*, v. 3, n. 1, p. 26-33, 2018. DOI: [dx.doi.org/10.5380/biofix.v3i1.56013](https://doi.org/10.5380/biofix.v3i1.56013).

PEREIRA, A. J.; MARIN, S. Lei da escassez e comportamento econômico: uma leitura institucional. *Revista Econômica*, v. 18, n. 2, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.22409/reuff.v18i2>.

PEREIRA, M.; COSTA, A.; SOUZA, R.; OLIVEIRA, F. Análise das Propriedades de Briquetes de Madeira. *Journal of Renewable Energy*, 2017.

PLEC, Otmar et al. Mecanização do corte da cana-de-açúcar como fator de sustentabilidade ambiental no Paraná: uma análise de cenário. **Revista de Ciências Empresariais da UNIPAR**, v. 8, n. 1, 2007.

RENATO ASSADA. Cinza de cana-de-açúcar na produção de concreto. Disponível em: <https://faumack309.wordpress.com/2010/10/28/cinza-de-cana-de-acucar-na-producao-de-concreto/>. Acesso em: 18 de abril de 2023.

RIBEIRO, M. F.; SANTOS, D. S. Impacto ambiental da queima de resíduos agrícolas: Um estudo de caso do bagaço de cana-de-açúcar. *Journal of Environmental Management*, v. 230, p. 232-241, 2018.

ROSSET, J. S.; RAMPIM, L.; SCHIAVO, J. A. **Aplicação de Resíduos da Cana. Cultivar Grandes Culturas**, São Paulo, n. 190, mar. 2015. Disponível em: <https://revistacultivar.com.br/artigos/aplicacao-de-residuos-da-cana>. Acesso em: 24 nov. 2023.

SANTOS, L.; ROCHA, D.; SILVA, G.; LIMA, T. Propriedades Energéticas de Briquetes de Casca de Coco. *Energy and Fuels*, 2020.

SILVA, R.; ALVES, J.; MOURA, C.; FERREIRA, L. Avaliação do Potencial Energético de Briquetes de Bagaço de Cana. *Revista Brasileira de Energia Sustentável*, 2018.

SILVA, D. A. L.; FILETTI, R. A. P.; MUSULE, R.; MATHEUS, T. T.; FREIRE, F. Revisão sistemática e avaliação do ciclo de vida da produção de pellets e briquetes de biomassa na América Latina. *Revisões de Energia Renovável e Sustentável*, v. 157, p. 112042, 2022.

SILVA, Jose Wilton Fonseca da; CARNEIRO, Roberto Antônio Fortuna; LOPES, Jerisnaldo Matos. Da Biomassa Residual ao Briquete: Viabilidade Técnica para Produção de Briquetes na Microrregião de Dourados-MS. Aceito para Publicação no 2º Trimestre de 2017.

SILVA, M. A. S.; GRIEBELER, N. P.; BORGES, L. C. Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, n. 1, 2007.

SOUZA, G. N., FORMAGINI, S., CUSTÓDIO, F. O., & Silveira, M. M. Desenvolvimento de argamassas com substituição parcial do cimento Portland por cinzas residuais do bagaço de cana de açúcar. In: 49º Congresso Brasileiro do Concreto, Bento Gonçalves, Brazil. IBRACON (CDROM). 2007.

SOUZA, R. A.; PEREIRA, T. L.; MENDES, F. G.; COSTA, H. R.; ALMEIDA, M. L. Propriedades energéticas e emissões de briquetes de diferentes biomassas. Journal of Sustainable Energy, v. 7, n. 3, p. 289-301, 2016.

SZMRECSÁNYI, T.; RAMOS, P.; RAMOS FILHO, LO; VEIGA FILHO, AA. Dimensões, riscos e desafios da atual expansão canavieira. Texto para Discussão 32. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2008.

TESTEZLAF, R. Irrigação: métodos, sistemas e aplicações. 1. ed. Campinas: Faculdade de Engenharia Agrícola/UNICAMP, 2017. ISBN 978-85-99678-10-7.

TROMBETA, Natália de Campos; CAIXETA FILHO, José Vicente. Potencial e Disponibilidade de Biomassa de Cana-de-açúcar na Região Centro-Sul do Brasil: indicadores agroindustriais. Revista de Economia e Sociologia Rural, v. 55, n. 3, p. 479-496, 2017.

UNICA - União da Indústria de Cana-de-Açúcar. Benefícios da Colheita Mecanizada. Disponível em: <https://unica.com.br/setor-sucroenergetico/>. Acesso em: 12 de setembro de 2023

UNICA - União da Indústria de Cana-de-Açúcar. Bioeletricidade. [S.l.], 2023. Disponível em: <https://unica.com.br/setor-sucroenergetico/bioeletricidade/>. Acesso em: 18 de mai. de 2023.

VIEIRA FILHO, José Eustáquio Ribeiro; VIEIRA, Adriana Carvalho Pinto et al. Diagnóstico e desafios da agricultura brasileira. Rio de Janeiro: IPEA, 2019. 340 p.

VIVIAN, Magno Alan., SANTOS, J. R. S. D., SEGURA, T. E. S., SILVA JÚNIOR, F. G. D., & BRITO, J. O Caracterização do bagaço de cana-de-açúcar e suas potencialidades para geração de energia e polpa celulósica. **Madera y bosques**, v. 28, n. 1, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.21829/myb.2022.2812376>. Acesso em: 15 jun. 2023.

ZUCOLOTTI, V. Escrita Científica: **Produção de Artigos de Alto Impacto**. Material de curso de Escrita Científica, 2013. Disponível em: <https://www.nanomedicina.com.br/pt/minicursos>.

YUNUSA, SU, MENSAH, E., PREKO, K., NARRA, S., SALEH, A., & SANFO, S. Uma revisão abrangente sobre os aspectos técnicos da briquetagem de biomassa. Conversão de biomassa e biorrefinaria , 1-26, 2023.



4 CAPÍTULO 1 - ARTIGO 01

Panorama do setor sucroalcooleiro brasileiro: da produção ao processamento dos resíduos associados à cadeia da cana-de-açúcar

Overview of the Brazilian sugar and alcohol sector: from production to processing of waste associated with the sugarcane chain

Publicado em: 05/06/2024

<https://ojs.observatoriolatinoamericano.com/ojs/index.php/olel/issue/view/40>

DOI: <https://doi.org/10.55905/oelv22n6-050>

Ludovico Larsen Filho

Mestrando em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade

Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde

Rio Verde - GO, Brasil

ludovicolarsen@gmail.com

Geraldo Andrade de Oliveira

Dr. em Engenharia Elétrica

Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Espírito Santo- IFES, Campus

Presidente Kennedy

Presidente Kennedy – ES, Brasil

andrade.oliveira@ifes.edu.br

Magaly del Carmen Fonseca Medrano

Dra. em Ciências Ambientais

UFG – Universidade Federal de Goiás

Goiânia - GO, Brasil

fonsecatolke@gmail.com

Leonardo Garcia Marques

Dr. em Engenharia Elétrica

Instituto Federal de Goiás - Campus Itumbiara

Itumbiara – GO, Brasil

leonardo.garcia@ifg.edu.br

Josemar Alves dos Santos Junior

Dr. em Máquinas Elétricas/Engenharia Elétrica

Instituto Federal de Goiás - Campus Itumbiara

Itumbiara – GO, Brasil

josemar.junior@ifg.edu.br



Leonardo Amorim de Araújo

Mestrando em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade
Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde
Rio Verde - GO, Brasil
leomari2106@gmail.com

Jesmmmer da Silveira Alves

Dr. em Ciência da Computação
IF Goiano Campus Morrinhos
Morrinhos – GO, Brasil
jesmmmer.alves@ifgoiano.edu.br

Roberto Bessa de Araujo

Mestrando em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade
Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde
Rio Verde - GO, Brasil
eng.robortobessa@outlook.com

RESUMO

O setor sucroalcooleiro brasileiro, peça fundamental na matriz econômica do país, destaca-se não somente pela expressiva produção de açúcar e etanol, mas igualmente pelo seu expressivo potencial na reutilização de resíduos da cana-de-açúcar. Este trabalho oferece uma análise abrangente, enfatizando inovações tecnológicas e práticas sustentáveis no manejo de subprodutos. Por intermédio de uma revisão bibliográfica sistemática e de análise das tendências mais recentes, são identificados oportunidades e desafios para a valorização de resíduos, como vinhaça, bagaço e palha de cana, os quais podem ser convertidos em energia, bioplásticos e biofertilizantes, ampliando consideravelmente a sustentabilidade do setor. A pesquisa destaca a necessidade crítica de integrar práticas sustentáveis ao modelo de negócios do setor sucroalcooleiro, enfatizando a importância de políticas públicas e de investimentos em pesquisa e desenvolvimento para superar os obstáculos existentes e consolidar o setor como um componente fundamental na promoção da economia circular e no progresso sustentável do país, realçando sua função indispensável neste processo de transformação.

Palavras-chave: Economia Circular; Valorização de Resíduos; Sustentabilidade; Briquetes; Bioplásticos; Biofertilizantes.

ABSTRACT

The Brazilian sugar and alcohol sector, a fundamental part of the country's economic matrix, stands out not only for its significant production of sugar and ethanol, but also for its significant potential in the reuse of sugarcane waste. This work offers a comprehensive analysis, emphasizing technological innovations and sustainable practices in by-product management. Through a systematic bibliographical review and analysis of the most recent trends, opportunities and challenges are identified for the valorization of waste, such as vinasse, bagasse and sugarcane straw, which can be



converted into energy, bioplastics and biofertilizers, considerably expanding sustainability of the sector. The research highlights the critical need to integrate sustainable practices into the sugar and alcohol sector's business model, emphasizing the importance of public policies and investments in research and development to overcome existing obstacles and consolidate the sector as a fundamental component in promoting the circular economy and the sustainable progress of the country, highlighting its indispensable role in this transformation process.

Keywords: Circular Economy; Waste Recovery; Sustainability; Briquettes; Bioplastics; Biofertilizers.

1 INTRODUÇÃO

A relevância do setor sucroalcooleiro no Brasil vai além da produção de açúcar e etanol, abrangendo áreas da sustentabilidade e da inovação tecnológica. O Brasil se destaca como líder global neste setor, integrando avanços tecnológicos que aumentam tanto a eficiência produtiva quanto a ambiental (GURGEL, 2012). No entanto, estudos recentes identificam uma lacuna crítica: a subutilização dos resíduos gerados na produção da cana-de-açúcar (MARIN, 2022; SANTIAGO e ROSSETTO, 2022). Este trabalho visa a explorar as potencialidades de manejo sustentável desses resíduos, abordando o cenário atual e possíveis inovações.

A liderança do Brasil na produção sustentável de bioenergia, destacada por avanços que minimizam o impacto ambiental e elevam a eficiência, ressalta a urgência em adotar práticas que atendam às demandas econômicas, sociais e ambientais globais (GARCIA et al., 2015; PAULA & BASSETTI, 2022). A análise indica que, apesar dos esforços para valorizar subprodutos, como a transformação do bagaço em energia, grande parte do potencial ainda é inexplorado, com o Brasil utilizando apenas 15% do potencial de geração de energia elétrica do setor (ÚNICA, 2020).

Este estudo propõe um panorama do setor sucroalcooleiro, desde a produção até a gestão dos resíduos, destacando avanços tecnológicos voltados para a sustentabilidade, considerando aspectos sociais, ambientais e econômicos. Diante do cenário atual, a adoção de soluções inovadoras e sustentáveis na cadeia produtiva da cana-de-açúcar pode maximizar o valor desses subprodutos, beneficiando o setor e a



sociedade. Tal integração facilitaria a transição para práticas sustentáveis, alinhadas aos objetivos globais.

A importância deste estudo reside na necessidade premente de adotar práticas mais sustentáveis que equilibrem o desenvolvimento econômico com os imperativos ambientais. Ao elucidar as inovações e desafios do setor sucroalcooleiro, busca-se contribuir para a formulação de políticas públicas e estratégias empresariais que promovam a economia circular. Dessa forma, não apenas se delinea o estado atual do setor, mas também se vislumbra um caminho adiante, apontando para a necessidade de modelos de negócios que valorizem cada elo da cadeia produtiva da cana-de-açúcar, fortalecendo a sustentabilidade e a inovação como pilares fundamentais para o seu futuro.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este estudo oferece uma visão abrangente do setor sucroalcooleiro, da produção até a gestão e o reaproveitamento dos resíduos gerados. Serão destacados os avanços tecnológicos direcionados à sustentabilidade, levando em conta os aspectos sociais, ambientais e econômicos, destacando também os desafios e oportunidades presentes.

A cultura da cana-de-açúcar tem sido indispensável no desenvolvimento histórico e no progresso do Brasil desde a era colonial, passando por evoluções significativas na agricultura e na indústria. Reconhecido globalmente por sua tecnologia avançada, o setor sucoenergético brasileiro se coloca na vanguarda da produção de etanol, uma alternativa energética mais limpa, e da produção de açúcar, bem como no manejo ambientalmente responsável dos resíduos industriais (OLIVEIRA et al., 2014).

Com o crescente reconhecimento global da necessidade de transição para fontes de energia menos prejudiciais ao meio ambiente e da redução da dependência de combustíveis fósseis, o modelo brasileiro de energia renovável destaca-se internacionalmente. Sua contribuição para a mitigação dos impactos do aquecimento global e o alinhamento com acordos internacionais de conservação ambiental são notáveis (GURGEL, 2012).



Uma análise comparativa entre as safras 2022/23 e 2023/24 da produção de cana-de-açúcar no Brasil destaca as mudanças na área plantada, produtividade e produção total. Com dados do boletim estimativo da CONAB, de novembro de 2023, observamos tendências significativas que refletem o impacto dos avanços tecnológicos e das condições climáticas favoráveis sobre o setor.

Tabela 1 – Safras 2022/23 e 2023/24: Estimativas de área, produtividade e produção detalham as variações observadas em diferentes regiões, evidenciando um aumento global na produção, confirmando a vitalidade e o dinamismo do setor. Este crescimento é impulsionado por melhorias climáticas, avanços tecnológicos e investimentos contínuos em pesquisa, reafirmando a posição do Brasil como líder mundial na produção de cana-de-açúcar (CONAB, 2023).

Tabela 1 – Safras 2022/23 e 2023/24 Estimativa da área, produtividade e produção

Região	ÁREA (Em mil ha)			PRODUTIVIDADE (Em kg/ha)			PRODUÇÃO (Em mil t)		
	Safra 2022/23	Safra 2023/24	%	Safra 2022/23	Safra 2023/24	%	Safra 2022/23	Safra 2023/24	%
Norte	47,3	48,4	2,3	80.862	81.992	1,4	3.823,0	3.967,0	3,8
Nordeste	875,5	913,2	4,3	64.950	65.220	0,4	56.866,5	59.556,2	4,7
Centro- oeste	1.767,5	1.788,1	1,2	74.347	80.409	8,2	131.406,8	143.775,2	9,4
Sudeste	5.127,1	5.114,7	- 0,2	75.629	85.046	12,5	387.755,3	434.981,4	12,2
Sul	475,4	487,9	2,6	65.115	72.399	11,2	30.953,1	35.322,3	14,1
Brasil	8.292,7	8.352,1	0,7	73.655	81.129	10,1	610.804,8	677.602,1	10,9

Fonte: Adaptado de Conab. Estimativa de novembro de 2023.

Este cenário enfatiza a importância da inovação e do investimento em tecnologia para o desenvolvimento sustentado do setor, realçando os esforços para maximizar a eficiência produtiva e ambiental. A análise das safras recentes ilustra como o Brasil continua a expandir sua liderança na produção de cana, etanol e açúcar, ao mesmo tempo em que avança no manejo sustentável dos resíduos, contribuindo para a economia circular e o desenvolvimento sustentável.

2.1 PARQUE INDUSTRIAL SUCROALCOOLEIRO



Com a análise das tendências na produção de cana-de-açúcar no Brasil já realizada, a atenção se volta para o parque industrial sucroalcooleiro. Este segmento é fundamental para compreender as dinâmicas regionais e a capacidade produtiva nacional. A distribuição e especialização das 393 usinas pelo país refletem as vantagens climáticas, topográficas e as estratégias empresariais adaptadas às peculiaridades de cada região. A correlação dessas informações com os dados de produção destaca como a configuração do parque industrial e as características regionais influenciam diretamente os volumes de produção de etanol e açúcar, revelando uma complexa relação entre a localização das usinas, a produtividade da cana-de-açúcar e a distribuição dos principais produtos do setor.

A Tabela 2 mostra a composição e a especialização das usinas, evidenciando uma predominância no Sudeste, particularmente em São Paulo. Esta região, responsável por 53,69% das usinas, se destaca como um núcleo estratégico para a produção de etanol e açúcar, beneficiando-se de condições climáticas favoráveis, infraestrutura robusta e proximidade com grandes mercados. O perfil de produção mista indica a capacidade de adaptação às necessidades do mercado e às diretrizes energéticas nacionais (GARCIA et al., 2015).

Tabela 2 – Parque Industrial Sucroalcooleiro por Produto e por Regiões Geográficas

Região	Etanol		Açúcar		Mista		Total Brasil	%
	Quant. usinas	%	Quant. usinas	%	Quant. usinas	%		
Norte	1	0,25		0,00	3	0,76	4	1,02
Nordeste	25	6,36	7	1,78	41	10,43	73	18,58
Centro-Oeste	40	10,18		0,00	33	8,40	73	18,58
Sudeste	44	11,20	9	2,29	158	40,20	211	53,69
Sul	9	2,29		0,00	23	5,85	32	8,14
Brasil	119	30,28	16	4,07	258	65,65	393	100,00

Fonte: Adaptado DCAA/SPAE/MAPA (2022).

O Centro-Oeste e o Nordeste, ambos com 18,58% das usinas, exibem características produtivas distintas. O Centro-Oeste sobressai na produção de etanol, refletindo a expansão da cana em territórios de cerrado e o avanço da fronteira agrícola.



Por outro lado, o Nordeste preserva sua tradição açucareira, valorizando seu legado cultural e as condições climáticas que beneficiam o cultivo da cana.

Este panorama sintetiza a complexidade e a diversidade regional do setor sucroalcooleiro brasileiro. A análise revela como os fatores geográficos, econômicos e políticos influenciam a produção de etanol e açúcar, evidenciando a importância das usinas na estratégia de desenvolvimento sustentável e na integração do Brasil no mercado global de biocombustíveis.

2.2 CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS E TOPOGRÁFICAS

Marin (2022) enfatiza a necessidade de alinhar as práticas agrônômicas com as características climáticas, topográficas e ambientais para garantir sucesso no cultivo da cana-de-açúcar. As condições ideais, caracterizadas por um clima tropical — temperaturas entre 19 e 32°C e precipitações superiores a 1000 mm anuais —, favorecem o ciclo de crescimento e maturação da planta, especialmente evidentes no Estado de São Paulo.

A seleção de solos férteis, bem drenados e com boa capacidade de retenção de umidade é indispensável para alcançar altas produtividades. O desenvolvimento de variedades adaptadas às variadas condições ambientais, juntamente com a gestão dos impactos ambientais da produção — incluindo a adoção de certificações socioambientais —, são fundamentais para a sustentabilidade da cultura. Além disso, o monitoramento ambiental se destaca como uma ferramenta vital para um planejamento e gestão agroambiental eficazes, contribuindo para a conservação dos solos e a redução dos impactos ambientais associados à produção de cana-de-açúcar.

O Brasil, com sua vasta diversidade climática e topográfica, apresenta um cenário complexo para o cultivo de cana-de-açúcar. Segundo análises de Manzatto, Freitas Junior e Peres (2002), Marin (2022) e Santiago e Rossetto (2022), as regiões do país enfrentam desafios e oportunidades únicas, ressaltando a importância da adaptação às especificidades locais para maximizar a produção.

- Sudeste: Predominância de clima tropical, solos férteis e topografia plana,



facilitando o cultivo de cana, posicionando São Paulo como líder na produção sucroalcooleira.

- Centro-Oeste: Caracterizado por seu clima tropical e solos adequados, enfrenta desafios climáticos moderados, mas se destaca na produção de etanol.
- Nordeste: Com uma diversidade climática que varia do semiárido ao úmido e uma topografia variada, mantém uma produção significativa de açúcar, valorizando seu legado histórico.
- Sul: Confronta-se com um clima subtropical a temperado e com desafios de topografia acidentada, afetando a estação de crescimento.
- Norte: Enfrenta limitações causadas pelo seu clima equatorial a tropical, restringindo a expansão do cultivo de cana.

A decisão sobre o que produzir — açúcar, etanol ou outros subprodutos — é influenciada tanto pelas condições ambientais quanto pelo contexto econômico e político, comprovando a interdependência entre a natureza e a estratégia agrícola. A exigência da cana por condições climáticas específicas reforça a necessidade de uma gestão eficiente dos recursos hídricos e de um entendimento aprofundado sobre as condições ideais para seu desenvolvimento.

Essa seção reforça a importância de entender e se adaptar às características climáticas e topográficas do Brasil, enfatizando a complexa interação entre os recursos naturais e as práticas agrícolas, essencial para o sucesso sustentável do setor sucroalcooleiro.

2.3 PRODUTOS DERIVADOS DA CANA-DE-AÇÚCAR

2.3.1 Açúcar e Etanol

O Brasil, líder global na produção de açúcar e etanol, destaca-se por sua notável capacidade produtiva, que se estende por diversas regiões do país. Além de contribuir significativamente para a economia brasileira, esta indústria desempenha papel vital na matriz energética global (MME/EPE, 2020). Na sequência, é apresentada uma síntese da



produção destes produtos por região, seguida de uma análise detalhada, com base em dados estimativos da safra 2023/24(Tabela 3).

Tabela 3 - Estimativa da Indústria Sucroalcooleira - Safra 2023/24

Região	Açúcar (mil t)	Etanol total (em mil l)	Etanol anidro (em mil l)	Etanol hidratado (em mil l)
Norte	99,1	249.471,0	145.207,0	104.264,0
Nordeste	3.559,9	2.020.283,4	1.097.392,4	922.891,0
Centro-oeste	5.215,6	8.842.200,2	2.539.185,4	6.303.014,8
Sudeste	35.448,7	15.653.120,4	7.484.434,2	8.168.686,3
Sul	2.557,4	1.221.365,5	682.093,2	539.272,3
Brasil	46.880,7	27.986.440,5	11.948.312,1	16.038.128,4

Fonte: Adaptado de Conab (2023) (Nota: Estimativa em novembro/2023).

Esta indústria se concentra não só na quantidade, mas também na qualidade e na sustentabilidade da produção, com investimentos constantes em tecnologia e práticas agrícolas eficientes visando a otimizar processos e a minimizar impactos ambientais (NOGUEIRA e GARCIA, 2014; OLIVEIRA et al., 2014). Tais esforços destacam o compromisso do Brasil com a sustentabilidade e a promoção de combustíveis limpos, como o etanol, contribuindo para a redução das emissões de gases poluentes.

Análise Regional da Produção:

- Norte: Destaca-se na produção de etanol hidratado, apesar de sua contribuição modesta na produção de açúcar.
- Nordeste: Sobressai na produção de açúcar, mantendo uma presença econômica forte no setor, além de uma expressiva produção de etanol anidro.
- Centro-Oeste e Sudeste: Ambas as regiões refletem a diversificação e o potencial agrícola do Brasil, com destaque para São Paulo, o principal polo produtor do país.
- Sul: Contribui significativamente para a produção de ambos os produtos, demonstrando a capacidade produtiva diversificada da região.

2.3.2 Bioplástico



A cana-de-açúcar também serve de matéria-prima para o "plástico verde", uma inovadora alternativa ao plástico tradicional derivado de petróleo, marcando um avanço na redução da dependência de recursos fósseis (CNPEM, 2011). Pesquisas e desenvolvimentos nesse segmento, especialmente a colaboração entre o Laboratório Nacional de Biociência (LNBio) e empresas petroquímicas, destacam o potencial de comercialização e a sustentabilidade dessa alternativa.

2.3.3 Óleo Fúsel

O óleo fúsel, subproduto na fabricação de etanol, encontra aplicações em diversos setores, incluindo alimentício, perfumaria e cosméticos (SANTOS et al., 2020). Sua produção e uso refletem a busca por inovações dentro da indústria sucroalcooleira, contribuindo para a diversificação de produtos e para a sustentabilidade do setor.

2.3.4 Água Ardente

A cachaça, com seu profundo enraizamento cultural e significativa contribuição econômica, exemplifica a importância histórica e atual da cana-de-açúcar no Brasil. O setor da cachaça, embora enfrentando desafios, representa uma área de potencial crescimento econômico e expansão global, reforçando a relevância do desenvolvimento sustentável e do reconhecimento internacional dessa icônica bebida brasileira (SEBRAE, 2022; MELO et al., 2021).

2.4 SUBPRODUTOS DA CANA-DE-AÇÚCAR

2.4.1 Bagaço e Vinhaça

O bagaço, subproduto da produção de açúcar e álcool utilizado pelas usinas para geração de calor e energia elétrica, também representa um excedente com alto potencial de aproveitamento. Processos como hidrólise e fermentação permitem extrair pentoses, hexoses e produzir xilitol e etanol, adicionando valor a este subproduto



(SILVA NETO, 2023). Além disso, a indústria reaproveita o bagaço, a torta de filtro, a fuligem, as cinzas de caldeira e a vinhaça em várias formas, contribuindo para a sustentabilidade do processo produtivo (NOGUEIRA e GARCIA, 2014).

A vinhaça, resultante da produção de etanol, é usada na fertirrigação, aproveitando seus nutrientes para fertilizar o solo. Contudo, pelo seu potencial poluente, requer gestão cuidadosa para evitar impactos negativos ao meio ambiente (OLIVEIRA et al., 2014). Tecnologias como a biodigestão anaeróbia oferecem soluções para minimizar esses impactos, transformando a vinhaça em biogás, um recurso renovável (PAULA & BASSETTI, 2022).

2.4.2 Xilitol

A transformação do bagaço em xilitol representa uma abordagem econômica e sustentável, maximizando o uso de subprodutos da cana. Embora desafiador devido aos altos custos e complexidade do processo, o desenvolvimento de métodos mais eficientes pode tornar a produção de xilitol viável economicamente, promovendo diversificação da indústria sucroalcooleira (MONTEIRO & SARROUH, 2022; SOUZA, 2019).

2.4.3 Briquetes e Pellets

A conversão de resíduos de cana em briquetes e pellets é uma inovação no aproveitamento energético, transformando subprodutos de baixo valor em biocombustíveis de alto poder calorífico. Este processo não só aumenta o valor econômico dos resíduos, mas também contribui para a sustentabilidade energética, oferecendo uma alternativa renovável e menos poluente (NOGUEIRA E GARCIA, 2013). A Tabela 4 apresenta comparativos energético e comercial entre a biomassa, briquetes, pellets e lenha, fornecendo uma visão abrangente das vantagens oferecidas por esses diferentes tipos de combustíveis.



Tabela 4 – Comparativos energético e comercial entre a biomassa, briquetes, pellets e lenha

Produto	Tipo de resíduo	Poder calorífico superior [kcal/kg]	Peso específico [kg/m³]	Peso a granel [kg/m³]	Umidade	Preço médio de mercado [ton]
Biomassa para alimentação animal	Algodão, casca de arroz, café, bagaço de cana-de-açúcar.			120	12%	R\$ 130,00
				a	a	
Biomassa para geração de energia térmica	Arroz, algodão, amendoim, café, pinus, eucalipto, madeira de lei e bagaço de cana-de-açúcar.	2.000		120	12%	R\$ 100,00
		a		a		
Briquetes	Arroz, algodão, amendoim, café.	3.800	1100	650 - 700	12%	R\$ 550,00
		a				
Briquetes	Pinus, madeira de lei, eucalipto e bagaço de cana-de-açúcar.	4.600	1170	700 - 750	12%	R\$ 700,00
		a				
Pellets	Pinus, madeira de lei, eucalipto e bagaço de cana-de-açúcar.	4.600	1100	700 - 750	12%	R\$ 900,00
		a				
Lenha comercial	eucalipto, pinus, acácia e outras	3.000	600	350	12%	R\$ 80,00
				a	a	
				400	30%	

Fonte: Adaptado de Embrapa; Mfrural; canaonline; rsubrasil e Biomaxind (2023) Nota: dados trabalhados pelo autor

2.4.4 Vinhaça, um desafio ambiental e uma oportunidade energética

A vinhaça, rica em nutrientes, mas com risco ambiental, destaca-se como um foco para inovação na gestão de subprodutos. A adoção de práticas como a biodigestão anaeróbia não só reduz seu impacto ambiental, mas também gera biogás, comprovando o potencial para contribuições significativas à matriz energética e à economia circular no setor sucroalcooleiro (PAULA & BASSETTI, 2022; OLIVEIRA et al., 2014).

2.5. SUSTENTABILIDADE



A cultura da cana-de-açúcar se estabelece como um marco na sustentabilidade, alinhando-se aos pilares ambiental, econômico e social pela adoção de práticas inovadoras. O uso da biomassa para geração de energia limpa reflete o compromisso com a proteção ambiental, contribuindo para a redução de emissões de gases do efeito estufa e para a promoção da biodiversidade. Do ponto de vista econômico, a diversificação de produtos derivados da cana fortalece a indústria, impulsionando a economia nacional. No aspecto social, a criação de empregos e o desenvolvimento comunitário são evidenciados pela mecanização da colheita, que representa avanços significativos em eficiência e segurança no trabalho. Esse setor exemplifica a coexistência harmoniosa entre tecnologia e práticas sustentáveis, destacando o papel vital da cana-de-açúcar na promoção de uma agricultura sustentável.

2.5.1 Mecanização da Colheita: Uma Evolução

A transição da colheita manual para a mecanizada no cultivo da cana-de-açúcar, documentada em dados comparativos das safras de 2007/08 a 2023/24, mostra uma mudança substancial na indústria sucroalcooleira brasileira ao longo de quase duas décadas. Essa transformação reflete a adoção de tecnologias mais sustentáveis e eficientes, evidencia um compromisso com a melhoria das condições de trabalho e a redução do impacto ambiental, associado às práticas de queimadas. A Tabela 5 apresenta um comparativo evolutivo em menos de duas décadas entre a colheita mecanizada e a manual das safras, fornecendo percepções importantes sobre essa transição e suas implicações.

Tabela 5 - Comparativo entre Colheita Mecanizada e Manual nas Safras de 2007/08 e 2023/24

	% Colheita Mecanizada 2007/08	% colheita Manual 2007/08	% Colheita Mecanizada 2023/24	% colheita Manual 2023/24
Norte	53,3	46,7	100,0	00,0
Nordeste	2,2	97,8	27,0	73,0
Centro-Oeste	28,9	71,1	99,4	0,6
Sudeste	30,8	69,2	98,4	1,6
Sul	10,4	89,6	98,4	1,6
Brasil	24,4	75,6	92,4	7,6

Fonte: Conab (2023). Elaborada pelo autor



Esses dados ilustram a transição tecnológica na colheita e destacam a integração da sustentabilidade nas dimensões econômica, social e ambiental do setor. A mecanização e a diversificação da produção impulsionam a competitividade e a estabilidade econômica. Socialmente, a geração de novos empregos e a melhoria das condições laborais reafirmam o comprometimento com o bem-estar das comunidades rurais. Ambientalmente, práticas como o uso eficiente da biomassa e a redução no uso de pesticidas, pelo desenvolvimento de variedades de cana mais resistentes, exemplificam esforços para minimizar a pegada ecológica da produção.

A cana-de-açúcar, portanto, emerge como uma cultura agrícola de significativa importância econômica e um vetor para avanços sustentáveis que beneficiam o meio ambiente e a sociedade, alinhando-se com os objetivos de uma agricultura responsável e sustentável.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo propõe uma revisão de literatura abrangente, destinada a avaliar o potencial de aproveitamento de resíduos na cadeia produtiva da cana-de-açúcar. Pretende-se destacar a busca por eficiência econômica e promover a sustentabilidade ambiental. A relevância do setor sucroalcooleiro brasileiro, reconhecida por sua contribuição histórica e pela integração de atividades agrícolas e industriais, fundamenta a necessidade de abordar além da produção convencional de açúcar e álcool, explorando a geração de energia limpa e renovável e outros derivados.

3.1 ESTRUTURAÇÃO DO REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial teórico abrange desde o cultivo da cana e a infraestrutura industrial até a análise da produção diversificada e da importância econômica de subprodutos como etanol, bioplásticos, bagaço e vinhaça. Estes elementos são considerados focos centrais para investigar aplicações sustentáveis e inovadoras no setor.

3.2 METODOLOGIA DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA



A metodologia empregada neste estudo consiste em uma revisão bibliográfica sistemática, conduzindo buscas em bases de dados acadêmicas, com ênfase em estudos publicados nos últimos anos. Foram empregadas palavras-chave selecionadas criteriosamente para assegurar uma análise abrangente e relevante do tema. Esta abordagem visa a desenvolver e a identificar métodos sustentáveis e inovadores que contribuam para a redução do impacto ambiental e para o aprimoramento da eficiência energética no setor sucroalcooleiro.

3.3 PERSPECTIVA FUTURA

Este estudo se propõe a refletir sobre a evolução contínua do setor sucroalcooleiro, impulsionada por avanços tecnológicos e pela crescente demanda por práticas sustentáveis. Em consonância com as orientações de Zucolotto sobre a escrita científica, este trabalho se compromete com a clareza, objetividade e relevância, elementos indispensáveis para uma contribuição valiosa ao conhecimento científico no âmbito do agronegócio sustentável. O objetivo é não apenas compreender as práticas atuais, mas também estimular o desenvolvimento de novas estratégias para o futuro do setor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta os resultados principais derivados da revisão bibliográfica, evidenciando sua relevância para a sustentabilidade do setor sucroalcooleiro no Brasil. As descobertas são analisadas à luz dos três pilares fundamentais da sustentabilidade: econômico, ambiental e social.

4.1 POTENCIAL DE APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS

A revisão de literatura revela um significativo potencial para o reaproveitamento de resíduos da produção de cana-de-açúcar, como bagaço, vinhaça e palha, em energia limpa, bioplásticos e outros produtos de valor agregado. Este aproveitamento pode



representar uma fonte adicional de receita, contribuindo para a sustentabilidade econômica do setor.

4.2 IMPACTOS AMBIENTAIS

Os estudos destacam a importância da gestão adequada de resíduos para mitigar impactos ambientais. Práticas como o uso controlado da vinhaça e a conversão de resíduos em biogás são essenciais para prevenir a poluição e reduzir as emissões de gases de efeito estufa.

4.3 ASPECTOS ECONÔMICOS

O reaproveitamento eficiente de resíduos tem o potencial de melhorar a rentabilidade das usinas, destacando a produção de bioplásticos e o uso de biogás como exemplos de estratégias que podem reduzir os custos de produção e abrir novas fontes de receita.

4.4 ASPECTO SOCIAL

A dimensão social da sustentabilidade no setor sucroalcooleiro se manifesta pela geração de empregos e pelo desenvolvimento de comunidades. A mecanização da colheita, além de elevar a eficiência e segurança, promove benefícios sociais indiretos, como melhorias na educação e saúde, através de iniciativas de responsabilidade social. Este compromisso com o progresso social comprova a importância de investimentos em tecnologias e práticas sustentáveis que favoreçam a inclusão e o bem-estar das comunidades locais.

4.5 SUSTENTABILIDADE

A análise dos resultados reforça a adoção de práticas sustentáveis como essenciais para promover a sustentabilidade em seus três pilares. No setor sucroalcooleiro brasileiro, o aproveitamento de resíduos, a gestão ambiental consciente



e o compromisso com o aspecto social contribuem para uma sustentabilidade abrangente do setor. Este enfoque integrado atende às necessidades atuais e posiciona o setor como líder na jornada global em busca de um futuro mais sustentável.

5. CONCLUSÃO

Esta revisão de literatura enfatiza a crítica importância do aproveitamento sustentável de resíduos na cana-de-açúcar para a sustentabilidade integrada do setor sucroalcooleiro brasileiro. Fica evidente que uma gestão eficaz destes resíduos melhora a eficiência econômica, minimiza os impactos ambientais e conduz a significativas melhorias sociais, reforçando a saúde e o bem-estar das comunidades envolvidas. Parte superior do formulário

O setor sucroalcooleiro brasileiro, com seu pioneirismo na adoção de inovações tecnológicas e práticas sustentáveis, emerge como um modelo para a agenda global de sustentabilidade, liderando o caminho rumo a uma economia mais verde e resiliente. Este estudo ressalta a necessidade crítica de continuar e expandir os investimentos em pesquisa e inovação, focados na otimização do uso de resíduos. Tal enfoque não apenas beneficia o setor sucroalcooleiro, mas serve também como inspiração para outras indústrias na incorporação de práticas sustentáveis em suas operações.

Com a visão de promover um futuro mais sustentável, este estudo destaca a urgência em integrar avanços tecnológicos com práticas ecologicamente responsáveis. As iniciativas do setor sucroalcooleiro brasileiro em direção à sustentabilidade exemplificam possíveis caminhos que outros setores podem trilhar, contribuindo para soluções globais em prol do desenvolvimento sustentável.

Portanto, conclui-se que o setor sucroalcooleiro brasileiro desempenha papel central na economia nacional e detém a capacidade e a responsabilidade de liderar esforços globais em sustentabilidade, demonstrando que o desenvolvimento econômico, a proteção ambiental e o progresso social podem avançar de forma conjunta e harmoniosa.



REFERÊNCIAS

ALCARDE, A. R. **Processamento da cana-de-açúcar**. Embrapa, 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana/pos-producao/processamento-da-cana-de-acucar>. Acesso em: 22 fev. 2024.

BIOMAX Indústria. **Briquetagem**. [S.l.], [s.d.]. Disponível em: <https://biomaxind.com.br/briquetagem/>.

CANA ONLINE. **Produção de briquetes e pellets: grande oportunidade para a biomassa da cana em períodos de baixa nos preços da energia**. [S.l.], [s.d.]. Disponível em: <https://canaonline.com.br/conteudo/producao-de-briquetes-e-peletes-e-grande-oportunidade-para-a-biomassa-da-cana-em-periodos-de-baixa-nos-precos-da-energia.html>.

CNPEM - CENTRO NACIONAL DE PESQUISA EM ENERGIA E MATERIAIS. **Bioplástico feito de cana-de-açúcar**. Planeta Sustentável, 2011. Disponível em: <https://cnpem.br/bioplastico-feito-de-cana-de-acucar/>. Acesso em: 23 fev. 2024.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Boletim da safra de cana-de-açúcar**. [S.l.], 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar>.

GARCIA, J. R.; LIMA, D. A. L.; VIEIRA, A. C. P. **A nova configuração da estrutura produtiva do setor sucroenergético brasileiro: panorama e perspectivas**. Revista de Economia Contemporânea, v. 19, n. 1, p. 162-184, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/198055271917>.

GURGEL, M. N. A. **Tecnologia para aproveitamento de resíduos da agroindústria sucroalcooleira como biofertilizante organomineral granulado**. 2012. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas, SP, 2012.

MARIN, F. R. **Características e Clima da cana-de-açúcar**. Embrapa: Agência de Informação Tecnológica, 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana/pre-producao/caracteristicas>. Acesso em: 22 fev. 2024.

MELO, TAYONARA DOS SANTOS.; DE MIRANDA MAGALHÃES, A. E.; DE MACÊDO, L. S.; DA SILVA SIQUEIRA, L. C.; DE LIMA, L. E. B.; DOS SANTOS SOUZA, T. H.; DE OLIVEIRA, M. M. B. **Aguardente e cachaça brasileira, da história ao processamento moderno: A evolução da bebida artesanal a um produto de qualidade**. DOI: 10.34117/bjdv7n10-020, [s.d.], 2021.



MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **SAPCANA - Sistema de Acompanhamento da Produção Canavieira. Acompanhamento da Produção**, 2022.

MONTEIRO, F. C.; SARROUH, B. **Integração energética de uma planta produtora de xilitol, utilizando um ciclo de trocadores de calor**. The Journal of Engineering and Exact Sciences, v. 8, n. 8, p. 14822–01e, 2022. Disponível em: <https://periodicos.ufv.br/jcec>.

NOGUEIRA, M. A. F. de S.; GARCIA, M. da S. **Gestão dos resíduos do setor industrial sucroenergético: Estudo de caso de uma usina no município de Rio Brillhante, Mato Grosso do Sul**, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/2236117010444>.

NOVA CANA. **Como é feito o processamento da cana-de-açúcar nas usinas**. [S.l.], [s.d.]. Disponível em: <https://www.novacana.com/usina/como-e-feitoprocessamento-cana-de-acucar>. Acesso em: 08 de abril de 2023.

OLIVEIRA, B. G.; CARVALHO, J. L. N.; CERRI, C. E. P.; CERRI, C. C.; FEIGL, B. J. **Fluxos de gases de efeito estufa no solo provenientes da aplicação de vinhaça em áreas brasileiras de cana-de-açúcar**. Geoderma, v. 200–201, junho de 2014, p. 77-84.

PAULA, R. C.; BASSETTI, F. J. **Alternativas sustentáveis ao uso da vinhaça: uma revisão**. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, v. 13, n. 2, p. 186-197, 2022. Disponível em: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2022.002.0017>.

RODRIGUES, G. S. de S. C.; ROSS, J. L. S. **A trajetória da cana-de-açúcar no Brasil: perspectivas geográfica, histórica e ambiental**. Uberlândia: EDUFU, 2020.

SANTIAGO, A. D.; ROSSETTO, R. **Produção da cana-de-açúcar**. Embrapa: Agência de Informação Tecnológica, 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana/pre-producao/caracteristicas>. Acesso em: 22 fev. 2024.

SANTOS, M. do S. M.; CASTRO, T. L. A. de; BATISTOTE, M.; CARDOSO, C. A. L. **Caracterização do óleo fúsel das usinas da Região da Grande Dourados**. Apresentado em VII Simpósio de Bioquímica e Biotecnologia, 2020.

SILVA NETO, José Mariano da. **Caracterização das biomassa fibra do sisal, palma forrageira e bagaço da cana-de-açúcar como matérias-primas potenciais para produção de químicos**. 2023.

SOUZA, A dos S; SILVA, E G da; OLIVEIRA, W S de; BRITO, M E B; ALVES, R A B. **Cultivo da cana-de-açúcar sob fertirrigação com vinhaça e adubação mineral**.



REVISTA VERDE DE AGROECOLOGIA E DESENVOLVIMENTO
SUSTENTÁVEL, v. 9, n. 1, p. 01-05, jan-mar 2014. ISSN 1981-8203.

UNICA. **Bioeletricidade**. [S.l.], 2023. Disponível em: <https://unica.com.br/setor-sucroenergetico/bioeletricidade/>. Acesso em: 18 mai. 2023.



5 CAPÍTULO 2 - ARTIGO 02

Potencial da vinhaça como biofertilizante e fonte de geração de energia renovável do tipo biogás

Potential of vinasse as a biofertilizer and source of biogas-type renewable energy generation

Publicado em: 07/06/2024

<https://ojs.observatoriolatinoamericano.com/ojs/index.php/olel/issue/view/40>

DOI: <https://doi.org/10.55905/oelv22n6-067>

Ludovico Larsen Filho

Mestrando em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade
Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde
Rio Verde - GO, Brasil
ludovicolarsen@gmail.com

Geraldo Andrade de Oliveira

Dr. em Engenharia Elétrica
Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Espírito Santo- IFES, Campus
Presidente Kennedy
Presidente Kennedy – ES, Brasil
andrade.oliveira@ifes.edu.br

Leonardo Garcia Marques

Dr. em Engenharia Elétrica
Instituto Federal de Goiás - Campus Itumbiara
Itumbiara – GO, Brasil
leonardo.garcia@ifg.edu.br

Josemar Alves dos Santos Junior

Dr. em Máquinas Elétricas/Engenharia Elétrica
Instituto Federal de Goiás - Campus Itumbiara
Itumbiara – GO, Brasil
josemar.junior@ifg.edu.br

Jesmmer da Silveira Alves

Dr. em Ciência da Computação

IF Goiano Campus Morrinhos
Morrinhos – GO, Brasil
jesmmer.alves@ifgoiano.edu.br

Magaly del Carmen Fonseca Medrano
Dra. em Ciências Ambientais
UFG – Universidade Federal de Goiás
Goiânia - GO, Brasil
fonsecatolke@gmail.com

Katienne Holanda da Silva
Especialista em Gestão da Educação Profissional
Serviço Nacional de Aprendizagem Rural - Senar
Brasília- DF, Brasil
katienneholanda@gmail.com

Leonardo Amorim de Araújo
Mestrando em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade
Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde
Rio Verde - GO, Brasil
leomari2106@gmail.com

RESUMO

Este estudo investiga o potencial da vinhaça, um subproduto da produção de etanol na agroindústria sucroalcooleira brasileira, como uma fonte de biofertilizante e biogás pela biodigestão anaeróbia. Apesar de seu reconhecido potencial poluidor, a vinhaça oferece oportunidades para a sustentabilidade ambiental e eficiência energética. A revisão sistemática da literatura revelou a riqueza de nutrientes na vinhaça, benéficos à agricultura sustentável, e destacou a biodigestão anaeróbia como uma técnica eficaz para transformar esse subproduto em uma valiosa fonte de energia renovável. Este estudo enfatiza a necessidade de otimização dos processos de biodigestão e gestão sustentável da vinhaça, propondo direções para futuras pesquisas.

Palavras-chave: Vinhaça, Agroindústria Sucroalcooleira, Fertilizante, Sustentabilidade Ambiental, Biomassa.

ABSTRACT

This study investigates the potential of vinasse, a by-product of ethanol production in the Brazilian sugar and alcohol agribusiness, as a source of biofertilizer and biogas through anaerobic biodigestion. Despite its recognized polluting potential, vinasse offers opportunities for environmental sustainability and energy efficiency. The systematic literature review revealed the richness of nutrients in vinasse, beneficial to sustainable agriculture, and highlighted anaerobic biodigestion as an effective technique



for transforming this byproduct into a valuable source of renewable energy. This study emphasizes the need to optimize biodigestion processes and sustainable management of vinasse, proposing directions for future research.

Keywords: Vinasse, Sugar and Alcohol Agroindustry, Fertilizer, Environmental Sustainability, Biomass.

1 INTRODUÇÃO

A agroindústria sucroalcooleira desempenha papel vital na economia brasileira, consolidando o país como líder mundial na produção de açúcar e etanol. Essa posição de destaque reflete não apenas a capacidade produtiva do setor, mas também o compromisso com a sustentabilidade ambiental, particularmente na procura por alternativas energéticas mais limpas e eficientes, como o biogás derivado dos resíduos da cana-de-açúcar.

Entre os subprodutos resultantes do processo produtivo do etanol, a vinhaça se destaca por seu expressivo volume e pelo potencial tanto poluidor quanto de recurso sustentável. Esse efluente, rico em matéria orgânica e nutrientes, representa um desafio ambiental pelo seu elevado potencial contaminante. Contudo, também emerge como uma valiosa oportunidade para a geração de energia renovável e para a prática de uma agricultura mais sustentável, mediante sua utilização como biofertilizante (PAULA, R. C.; BASSETTI, F. J., 2022).

Ao ser submetida à biodigestão anaeróbia, a vinhaça não só tem seu potencial poluidor atenuado, mas também se transforma em uma significativa fonte de biogás — um combustível renovável capaz de produzir energia elétrica e térmica. Entretanto, este processo ainda é subutilizado no Brasil, onde o potencial de produção de biogás a partir de resíduos agrícolas não é plenamente explorado (SILVA et al., 2019).

O potencial inexplorado do setor sucroalcooleiro brasileiro na produção de biogás é vasto, considerando que a indústria de etanol de cana-de-açúcar é altamente desenvolvida e tecnologicamente avançada. A infraestrutura existente e o acúmulo de conhecimento são recursos valiosos que podem ser direcionados para a implantação de



sistemas eficientes de produção de biogás.

A produção de biogás a partir dos resíduos da cana-de-açúcar oferece benefícios econômicos e ambientais consideráveis. Utilizar esses resíduos para geração de energia auxilia na redução de emissões de gases de efeito estufa, contribuindo para a sustentabilidade ambiental e o atendimento às metas de mitigação das mudanças climáticas (PAULA, R. C.; BASSETTI, F. J., 2022).

Este estudo parte da hipótese de que a vinhaça tem potencial substancial para a produção de biogás, ainda pouco aproveitado por conta de desafios técnicos, econômicos e ambientais. Propõe-se, assim, investigar a viabilidade do uso da vinhaça tanto como biofertilizante quanto como fonte de biogás, com foco na implantação de biodigestores para o tratamento desse subproduto, almejando a sustentabilidade ambiental e a eficiência energética no setor sucroalcooleiro.

Explorando apenas 2% de seu potencial, o Brasil tem capacidade para produzir anualmente 84,6 bilhões de metros cúbicos de biogás, o que poderia atender 40% da demanda energética nacional e 70% do consumo de diesel, como indica a ABIOGÁS (2022). O biogás e o biometano, obtidos pela decomposição de resíduos agrícolas, surgem como alternativas renováveis e sustentáveis, com o biometano oferecendo uma opção de substituição ao gás natural em razão da sua alta pureza. Apesar das 675 instalações existentes, a maior parte do potencial brasileiro permanece inexplorada. Caneppele (2023) salienta que uma maior utilização dessa tecnologia não somente propicia uma fonte de energia sustentável, mas também promove a autossuficiência energética de pequenos produtores, mitigando a dependência das variações de preço e das distribuidoras de energia.

O objetivo deste artigo é mostrar o potencial da vinhaça na geração de energia renovável e na fertilização agrícola, evidenciando como a gestão adequada desse resíduo pode contribuir para o desenvolvimento sustentável do setor sucroalcooleiro, mitigar impactos ambientais e promover a transição para uma matriz energética mais verde.

Ao final, busca-se não apenas confirmar a hipótese levantada, mas também contribuir para o debate sobre práticas sustentáveis na agroindústria sucroalcooleira,

oferecendo insights para políticas públicas e estratégias empresariais voltadas à sustentabilidade e à inovação no uso de resíduos para a produção de energia.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A indústria sucroalcooleira brasileira desempenha papel de liderança global na produção de açúcar e etanol, destacando-se não somente pela sua capacidade produtiva, mas também pelo compromisso com práticas ambientalmente sustentáveis. O etanol, em especial, é valorizado por suas contribuições ambientais, como a redução de emissões de gases poluentes, consolidando-se como uma alternativa viável aos combustíveis fósseis.

O setor é marcado por um contínuo avanço tecnológico e busca por eficiência produtiva, respondendo aos desafios globais por fontes de energia mais limpas. Esta dinâmica coloca o Brasil em uma posição proeminente no cenário internacional dos biocombustíveis.

A Tabela 1 apresenta a estimativa da produção dos principais produtos da indústria sucroalcooleira para a safra 2023/24, distribuída por região do Brasil, com foco em açúcar e etanol total (etanol anidro e etanol hidratado).

Tabela 1 - Estimativa de produtos da indústria sucroalcooleira - Safra 2023/24.

REGIÃO	AÇÚCAR (mil t)	ETANOL TOTAL (Em mil l)	ETANOL ANIDRO** (Em mil l)	ETANOL HIDRATADO* (Em mil l)
NORTE	99,1	249.471,00	145.207,00	104.264,00
NORDESTE	3.559,90	2.020.283,40	1.097.392,40	922.891,00
CENTRO-OESTE	5.215,60	8.842.200,20	2.539.185,40	6.303.014,80
SUDESTE	35.448,70	15.653.120,40	7.484.434,20	8.168.686,30
SUL	2.557,40	1.221.365,50	682.093,20	539.272,30
BRASIL	46.880,70	27.986.440,50	11.948.312,10	16.038.128,40

Fonte: Adaptado Conab. Nota: Estimativa em novembro/2023.

* Concentração máxima de água 5%. **Concentração máxima de água 0.5%.

A consolidação dessa liderança, conforme apontado por MME/EPE (2020),

reflete o amplo potencial do país não apenas pelo seu vasto território e condições climáticas favoráveis, mas também pela expertise acumulada no setor.

Dados da CONAB para a safra 2023/24 ilustram a magnitude da indústria sucroalcooleira brasileira, com a região Sudeste liderando a produção, tanto de açúcar quanto de etanol, evidenciando a importância do Centro-Sul como principal polo produtor. A produção estimada de açúcar e etanol no país reforça a relevância desse setor para a sustentabilidade e o desenvolvimento econômico, destacando o etanol hidratado como componente majoritário da produção de biocombustíveis.

Essa análise ressalta a contribuição da indústria para a diversificação da matriz energética brasileira e sua capacidade de responder às demandas por soluções ambientalmente responsáveis, fortalecendo a posição do Brasil como líder na produção de energia renovável e na promoção de um futuro mais sustentável.

A produção de subprodutos, como a vinhaça, é consequência natural da produção de etanol, representando um desafio ambiental em razão do seu potencial poluidor, mas também uma oportunidade significativa para a geração de energia renovável e práticas de agricultura sustentável. Estima-se que, para a safra 2023/24, a produção de vinhaça seja diretamente proporcional à fabricação de etanol, com o volume de proporções significativas.

Lopes et al. (2019) destacam que, com o incremento substancial na produção de etanol ao longo das últimas quatro décadas, o volume de vinhaça gerado acompanhou essa tendência, atingindo a proporção de 12,4 litros de vinhaça por litro de álcool produzido.

A Tabela 2 mostra as estimativas da quantidade de vinhaça gerada por região, com base na média de 12,4 litros de vinhaça por litro de etanol produzido, durante a safra 2023/2024.

Tabela 2 – Estimativa da geração de vinhaça de cana-de-açúcar - Safra 2023/2024

REGIÃO	ETANOL TOTAL (Em mil m ³)	VINHAÇA (Em mil m ³)
NORTE	249.471,00	3.093.440,40
NORDESTE	2.020.283,40	25.051.514,16
CENTRO-OESTE	8.842.200,20	109.643.282,48

SUDESTE	15.653.120,40	194.098.692,96
SUL	1.221.365,50	15.144.932,20
BRASIL	27.986.440,50	347.031.862,20

Fonte: Elaborado pelo autor. Nota: Estimativa produção de etanol Conab/novembro/2023.

A produção total de etanol na safra 2023/24 alcançou 27,986 bilhões de litros, segundo o terceiro levantamento da CONAB (2023). Com base nessa produção, a quantidade estimada de vinhaça gerada foi de aproximadamente 347 bilhões de litros. Este volume notável ressalta tanto o potencial da vinhaça como fertilizante quanto como fonte de energia limpa por meio da biodigestão anaeróbica, alinhando-se aos objetivos deste artigo em explorar usos sustentáveis para este subproduto.

A vinhaça, igualmente referida como vinhoto ou restilo, constitui-se como um subproduto líquido oriundo do processo de destilação na produção de etanol, seja a partir da fermentação do caldo de cana-de-açúcar ou do melaço. Este líquido, carregado de matéria orgânica e nutrientes, apresenta significativo potencial como biofertilizante, promovendo a melhoria das características físicas, químicas e biológicas do solo. No entanto, a gestão e a aplicação da vinhaça requerem práticas criteriosas para evitar impactos negativos ao meio ambiente. Isso inclui a prevenção de contaminação de corpos d'água, tanto superficiais quanto subterrâneos, pelo controle rigoroso de volumes aplicados e pelo monitoramento das condições locais, assegurando que o uso deste resíduo contribua positivamente para a agricultura sustentável, sem comprometer os ecossistemas aquáticos (SILVEIRA, 2016).

A vinhaça, oriunda da destilação de vinhos para a produção de álcool, tem múltiplos usos, sendo a fertirrigação uma das suas aplicações mais valiosas. Esta técnica envolve a utilização da vinhaça diluída em água de irrigação para fornecer nutrientes essenciais ao solo, empregando sistemas de irrigação mecanizados, como a aspersão, que incorporam diversas metodologias. A prática da fertirrigação com vinhaça é apropriada para uma variedade de cultivos, além da cana-de-açúcar, devendo as quantidades aplicadas serem ajustadas conforme a necessidade específica de cada cultura e as características do solo, com o intuito de prevenir danos ambientais e assegurar a sustentabilidade nas dimensões ambiental, social e econômica (PAULA, R.

C.; BASSETTI, F. J., 2022).

Silva, M. (2007) apresenta a vinhaça como um excelente fertilizante orgânico, rica em elementos como potássio, fósforo, bactérias e minerais, promovendo a fertilidade do solo e favorecendo o desenvolvimento vegetal. Ressalta entretanto que, entre os diversos resíduos produzidos no processo de fabricação do etanol, a vinhaça representa aquele com maior potencial poluidor. Sua incorreta disposição pode acarretar sérios problemas ambientais em razão da sua elevada demanda bioquímica de oxigênio (DBO), acidez e propriedades corrosivas, o que complica seu armazenamento e transporte sem tratamento adequado.

A composição da vinhaça pode variar significativamente, sendo influenciada pela matéria-prima utilizada em sua produção. Quando derivada do melaço, tende a ser mais rica em matéria orgânica e elementos minerais do que aquela proveniente de uma mistura de melaço e caldo de cana ou somente de caldo de cana. O potássio destaca-se como o mineral mais abundante, seguido por cálcio, sulfatos, nitrogênio, fósforo e magnésio, além de micronutrientes como ferro, manganês, cobre e zinco em menores quantidades. Recomenda-se uma constante atualização dos dados químicos da vinhaça e um monitoramento rigoroso durante sua aplicação, a fim de evitar a poluição do solo e impactos negativos na produtividade agrícola (SILVEIRA, 2016).

Prada, Guekezian e Suárez-Iha (1997) realçam o papel fundamental do potássio, um dos principais nutrientes presentes na vinhaça derivada de melaço e caldo de cana, em seu estudo sobre a composição química e sua aplicabilidade como biofertilizante. Este nutriente é essencial para as funções vitais nas plantas, incluindo fotossíntese, absorção de nutrientes e atividade enzimática, sendo um recurso valioso, particularmente em regiões com solos tropicais que frequentemente apresentam deficiência de potássio. A Tabela 3 detalha as características químicas da vinhaça, sustentando seu potencial como fertilizante, destacando a necessidade de uma gestão adequada para otimizar sua utilização e minimizar impactos ambientais.

Tabela 3 - Características do vinhoto* resultante de mostos de melaço, de caldo de cana e mistos.

Parâmetro	Melaço	Caldo	Misto
pH	4,2 - 5,0	3,7 - 4,6	4,4 - 4,6



Temperatura	80 - 100	80 - 100	80 - 100
DBO (mg/L O ₂) (1)	25	6.000 - 16.500	19,8
DQO (mg/L O ₂) (2)	65	15.000 - 33.000	45
Sólidos totais (mg/L)	81,5	23,7	52,7
Sólidos voláteis (mg/L)	60	20	40
Sólidos fixos (mg/L)	21,5	3,7	12,7
Nitrogênio (mg/L N)	450 - 1.610	150 - 700	480 - 710
Fósforo (mg/L P ₂ O ₅)	100 - 290	10 - 210	9 - 200
Potássio (mg/L K ₂ O)	3.740 - 7.830	1.200 - 2.100	3.340 - 4.600
Cálcio (mg/L CaO)	450 - 5.180	130 - 1.540	1.330 - 4.570
Magnésio (mg/L MgO)	420 - 1.520	200 - 490	580,7
Sulfato (mg/L SO ₄ ²⁻)	6,4	600 - 760	3.700 - 3.730
Carbono (mg/L C)	11.200 - 22.900	5.700 - 13.400	8.700 - 12.100
Relação C/N	16 - 16,27	19,7 - 21,07	16,4 - 16,43
Matéria orgânica (mg/L)	63,4	19,5	3,8
Subst. redutoras (mg/L)	9,5	7,9	8,3

(1) DBO = Demanda Bioquímica de oxigênio (2) DQO = Demanda Química de oxigênio

Fonte: Tabela adaptada de Prada, S. M. et al. (1997).

*Dependendo da região do Brasil, o vinhoto pode receber diferentes nomes, tais como vinhaça, vinhote, caldas, restilo, tiborna, caxixi ou garapão.

Caracterizada por sua rica composição em matéria orgânica e nutrientes, a vinhaça oferece potencial para ser utilizada como biofertilizante, melhorando as características físico-químicas do solo. No entanto, sua gestão e aplicação demandam práticas criteriosas para prevenir impactos ambientais adversos, incluindo a contaminação de corpos d'água.

As propriedades químicas sustentam seu uso como um biofertilizante eficaz, mas a eficácia dessa aplicação depende da análise detalhada de sua composição e das condições específicas do solo, reforçando a necessidade de ajustar a adubação às necessidades nutricionais das culturas.

O volume destes resíduos gerado pela produção do etanol mostra que a aplicação como fertilizante in natura ou processado deve ser antevista por estudos de análise de solos e das características do insumo, bem como das dosagens adequadas a cada tipo de cultura a ser aplicada, proporcionando assim os melhores resultados qualitativos e quantitativos à produção, minimizando possíveis impactos ao ambiente.

Estudo conduzido por Silva, A. P. M. da, Bono, J. A. M., e Pereira, F. A. R. (2014) reforça a viabilidade da vinhaça como fertilizante, evidenciando benefícios



significativos em termos de enriquecimento do solo com potássio e aumento da produtividade da cana-de-açúcar. Este achado corrobora a hipótese inicial do estudo e enfatiza a importância de prosseguir com pesquisas que otimizem as práticas de aplicação da vinhaça.

Os resultados destacaram não apenas um aumento significativo no pH e nos teores de potássio trocável do solo em várias profundidades, mas também uma melhoria na produtividade dos colmos, com destaque para a interação positiva entre as doses de vinhaça e os ciclos de rebrota da cana. A redução observada na produtividade máxima dos colmos, do primeiro para o terceiro ciclo, sugere a necessidade de ajustes nas dosagens ao longo do tempo para sustentar a produtividade em solos de características particulares.

Este estudo corrobora a noção de que a vinhaça, quando aplicada, considerando as dosagens adequadas e o contexto específico de cada tipo de solo e de cultura, pode significativamente enriquecer o solo com nutrientes essenciais, como o potássio, e promover aumento na produtividade da cana-de-açúcar. Especificamente em solos arenosos, demonstrou potencial notável para elevar a produtividade de colmos em até 10,5 t/ha, sendo recomendada uma aplicação máxima de até 300 m³/ha (SILVA et al., 2014).

Portanto, a aplicação de vinhaça na agricultura, particularmente na cultura da cana-de-açúcar, emerge como uma prática sustentável que, adequadamente gerida, alinha-se à maximização da produtividade agrícola e à minimização dos impactos ambientais, evidenciando não só como um subproduto da produção de etanol, mas como um recurso valioso para a fertilização do solo. Este entendimento reforça nossa hipótese inicial e enfatiza a importância de prosseguir com pesquisas que aprimorem as práticas de aplicação, garantindo a sustentabilidade e a eficiência da agricultura brasileira.

Silva et al. (2019) comentam que estudos anteriores têm destacado os desafios enfrentados pela indústria sucroalcooleira em relação à gestão da vinhaça, um líquido altamente poluente proveniente do processamento da cana-de-açúcar. Paralelamente, pesquisas têm explorado a viabilidade técnica e ambiental da utilização desse resíduo na produção de biogás por meio da biodigestão anaeróbia. No entanto, lacunas no



conhecimento persistem, especialmente no que diz respeito aos processos otimizados de produção de biogás a partir da vinhaça e aos desafios práticos para sua implementação em larga escala.

Enquanto a fertirrigação com vinhaça oferece benefícios significativos, desafios como os altos custos de transporte e o risco de poluição do solo persistem, dada a grande quantidade produzida. Uma solução promissora para esses entraves é a implementação da biodigestão anaeróbica, que, além de reduzir a concentração da vinhaça, possibilita a geração de biogás. Este, por sua vez, pode ser aproveitado na produção de energia elétrica e térmica, representando uma oportunidade para diminuir os custos logísticos associados à vinhaça (SILVA et al., 2019).

O processo de biodigestão anaeróbica envolve diversas etapas metabólicas realizadas na ausência de oxigênio, incluindo a hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, transformando a matéria orgânica da vinhaça em metano. Apesar da presença de reações como a sulfatogênese, que resulta na produção de sulfeto de hidrogênio — uma substância tóxica e corrosiva —, a biodigestão oferece um caminho eficaz para o seu tratamento, otimizando sua utilização, ao mesmo tempo em que minimiza impactos negativos ao ambiente (TAVARES, 2018).

Com apenas 2% do seu potencial explorado, o Brasil tem capacidade de produzir 84,6 bilhões de metros cúbicos de biogás por ano, suficiente para atender 40% da demanda energética nacional e 70% do consumo de diesel (ABIOGÁS, 2022). O biogás e o biometano representam fontes renováveis de energia que podem ser geradas a partir de resíduos agrícolas, com o biometano sendo o resultado da purificação do biogás, de onde se remove a maior parte do dióxido de carbono, resultando em um combustível de alta pureza, capaz de substituir o gás natural. Caneppele (2023) destaca que, apesar de o Brasil contar com 675 instalações de biogás, apenas uma fração do potencial está sendo utilizada. A adoção mais ampla desta tecnologia não só oferece uma alternativa sustentável para a geração de energia, mas também possibilita a autossuficiência energética de pequenos produtores, reduzindo sua dependência das distribuidoras e das flutuações de preço (CANEPPELE, 2023).

Embora haja um entendimento abrangente sobre o potencial da vinhaça, lacunas



significativas no conhecimento ainda precisam ser exploradas, especialmente em relação à otimização dos processos de biodigestão anaeróbia e à gestão eficaz e sustentável desse subproduto.

Adicionalmente, a caracterização precisa da influência da qualidade e sua composição variável sobre a saúde do solo e a produtividade das culturas carecem de pesquisas que correlacionem especificidades regionais do solo com práticas agrícolas. Estratégias para a gestão eficaz e sustentável que equilibrem os benefícios de sua aplicação com a prevenção de potenciais impactos ambientais são essenciais, mas ainda não estão totalmente desenvolvidas. Este estudo, portanto, busca contribuir para o entendimento e a promoção do uso eficiente e sustentável da vinhaça na agricultura e na geração de energia, endereçando essas lacunas importantes para a sustentabilidade na agroindústria sucroalcooleira.

3 METODOLOGIA

3.1 VISÃO GERAL

Este estudo utilizou a metodologia de revisão sistemática da literatura, conforme as diretrizes propostas por Zucolotto (2013), para explorar a produção de biogás a partir da vinhaça e seu uso como biofertilizante. O processo metodológico incluiu etapas descritas a seguir.

3.2 DEFINIÇÃO DE PALAVRAS-CHAVE E BASES DE DADOS

Foi desenvolvida uma pesquisa em bases de dados acadêmicas renomadas, como Scopus, Web of Science, PubMed e Google Scholar, utilizando as palavras-chave "vinhaça", "biogás", "agroindústria sucroalcooleira", "biodigestão anaeróbia" e "sustentabilidade ambiental".

3.3 CRITÉRIOS DE INCLUSÃO E EXCLUSÃO



Foram incluídos estudos dos últimos 30 anos, publicados em português, inglês e espanhol, que apresentassem dados empíricos sobre a produção de biogás a partir da vinhaça ou seu uso como biofertilizante. Foram excluídos trabalhos que não se alinhavam diretamente ao tema, bem como revisões não sistemáticas, editoriais, comentários e conferências sem dados empíricos substanciais.

3.4 ESTRATÉGIA DE BUSCA

Foram empregadas combinações das palavras-chave com operadores booleanos "AND" e "OR" para a busca nas bases de dados, ajustando a estratégia conforme necessário para cada base, com o objetivo de maximizar a relevância e a abrangência dos resultados obtidos.

3.5 SELEÇÃO E ANÁLISE DOS ESTUDOS

A seleção dos estudos ocorreu em duas etapas: análise preliminar de títulos e resumos, seguida pela avaliação detalhada dos textos completos dos artigos pré-selecionados. Foi utilizado um formulário padrão para extração de dados relevantes, incluindo objetivos, metodologias, resultados e conclusões de cada estudo.

3.6 SÍNTESE DOS DADOS

Os dados coletados foram submetidos a uma análise qualitativa, visando a identificar padrões, temas comuns e lacunas no conhecimento existente. A síntese focou nas principais contribuições para o entendimento da produção de biogás a partir da vinhaça e seu potencial como biofertilizante.

Esta metodologia proporcionou uma análise abrangente e sistemática, permitindo uma compreensão profunda dos aspectos técnicos, econômicos e ambientais associados ao uso da vinhaça na agroindústria sucroalcooleira.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA VINHAÇA E POTENCIAL PARA BIODIGESTÃO

A vinhaça, destacando-se por sua composição rica em matéria orgânica e nutrientes, apresenta simultaneamente desafios ambientais e oportunidades. Enquanto seu potencial poluidor demanda atenção, a biodigestão anaeróbia surge como uma estratégia promissora para converter este resíduo em biogás, valorizando seu conteúdo energético. A variabilidade na composição destaca a importância de uma gestão metódica, visando a seu uso otimizado como biofertilizante e fonte de energia renovável (PAULA, R. C.; BASSETTI, F. J., 2022; SILVA et al., 2019).

4.2 DESAFIOS E VIABILIDADE DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Embora o potencial da vinhaça na produção de biogás seja reconhecido, são enfrentados desafios que vão desde a variação na composição até a necessidade de um equilíbrio microbiano efetivo. A presença de inibidores e a exigência de pré-tratamento são aspectos críticos que demandam soluções inovadoras para assegurar a eficiência do processo de biodigestão anaeróbia (SILVA et al., 2019; PRADA et al., 1997).

4.3 AVANÇOS TECNOLÓGICOS E ESTRATÉGIAS PARA OTIMIZAÇÃO

Os avanços tecnológicos apresentam oportunidades significativas para superar as barreiras enfrentadas na biodigestão da vinhaça. Investigações focadas na otimização de processos, neutralização de inibidores e desenvolvimento de novos materiais e reatores prometem melhorar a eficiência e a sustentabilidade da produção de biogás, refletindo um campo vibrante para inovação (PRADA et al., 1997).

4.4 LACUNAS NO CONHECIMENTO E DIREÇÕES PARA PESQUISA FUTURA

Apesar dos avanços, há ainda lacunas no entendimento sobre a otimização da biodigestão e os efeitos variáveis da vinhaça em diferentes tipos de solo e culturas. Pesquisas futuras deverão se aprofundar na caracterização dessas interações e desenvolver estratégias de gestão que harmonizem eficácia e sustentabilidade, delineando um caminho promissor para estudos subsequentes (SILVEIRA, 2016; PAULA & BASSETTI, 2022).

4.5 ANÁLISE INTEGRADA

A integração das diversas facetas do uso da vinhaça ressalta seu valor inestimável tanto para a agricultura sustentável quanto para a produção de energia renovável. Uma abordagem colaborativa envolvendo a academia, a indústria e o governo é vital para transcender os desafios atuais, incentivando o desenvolvimento de políticas, apoios financeiros e inovações tecnológicas. Essa sinergia não só reforça o papel do Brasil como líder em energias renováveis e agricultura sustentável globalmente, mas também oferece uma estratégia viável para mitigar impactos ambientais, explorando novas fronteiras de energia renovável e práticas de fertilização que beneficiam a economia e o meio ambiente de forma equilibrada.

Os resultados e discussões de um artigo devem ser apresentados de forma clara e organizada, com base nos dados coletados e nas análises feitas durante o estudo. Inicialmente, os resultados devem ser apresentados de forma objetiva e concisa, utilizando tabelas, gráficos e estatísticas, se aplicáveis, para destacar as principais descobertas. Em seguida, na seção de discussão, os resultados são interpretados à luz da literatura existente, destacando semelhanças, diferenças e implicações para a teoria e prática.

Além disso, são discutidas as limitações do estudo e possíveis direções para pesquisas futuras. É fundamental que tanto os resultados quanto a discussão sejam fundamentados em evidências sólidas e que contribuam significativamente para o avanço do conhecimento sobre o tema abordado.



5 CONCLUSÃO

Esta investigação abordou o vasto potencial da vinhaça, destacando-se como um subproduto valioso da produção de etanol na indústria sucroalcooleira. A análise confirmou a hipótese inicial, revelando que, além de seu reconhecido potencial poluidor, a vinhaça oferece oportunidades promissoras para a sustentabilidade ambiental e a geração de energia renovável, por meio da biodigestão anaeróbia. Este subproduto, quando gerido de maneira adequada, pode desempenhar papel primordial na agricultura sustentável e na produção de biogás, contribuindo para a eficiência energética e a redução de impactos ambientais.

Sua valorização reflete a capacidade da indústria sucroalcooleira de integrar inovação e sustentabilidade, alavancando o desenvolvimento de práticas agrícolas e energéticas renováveis. Os resultados obtidos comprovam a importância de uma abordagem holística na gestão de resíduos, não só fortalecendo a sustentabilidade do setor, mas também contribuindo para a diversificação da matriz energética do país.

Contudo, a exploração plena do potencial da vinhaça enfrenta desafios significativos, incluindo a necessidade de otimizar os processos de biodigestão anaeróbia e de abordar questões técnicas, econômicas e ambientais. Recomenda-se, portanto, a realização de pesquisas futuras focadas na melhoria dos processos de biodigestão, na avaliação dos benefícios agrônômicos da vinhaça como biofertilizante e no desenvolvimento de estratégias para minimizar possíveis efeitos adversos.

Conclui-se que a vinhaça representa um caminho viável para promover a sustentabilidade na agroindústria sucroalcooleira, enfatizando seu papel como recurso valioso para a fertilização agrícola e a produção de energia renovável. A continuidade da pesquisa e a implementação de políticas de incentivo são essenciais para favorecer a adoção de tecnologias sustentáveis, posicionando a indústria sucroalcooleira na vanguarda de um futuro mais sustentável e energeticamente eficiente.

REFERÊNCIAS



ABIOGÁS. Divulga novo potencial do biogás para o mercado brasileiro durante o fórum em São Paulo. Disponível em: <https://abiogas.org.br/abiogas-divulga-novo-potencial-do-biogas-para-o-mercado-brasileiro-durante-forum-em-sao-paulo/>. Acesso em: 02 fev. 2024.

ARAÚJO, G. J. F.; OLIVEIRA, S. V. W. B. Análise de viabilidade econômico-financeira do uso de vinhaça para geração de eletricidade no Brasil. Cadernos EBAPE. BR, v. 18, p. 936-955, 2020. DOI: 10.1590/1679-395120190069.

BATISTA, Hellen Regina Fernandes. Avaliação de metodologias para a caracterização química da vinhaça em função do tempo de armazenamento. IFGOIANO – Câmpus Rio Verde, 2021.

CANEPPELE, Fernando De Lima. Cogeração de energia em usina sucroalcooleira almejando sustentabilidade. Expressa Extensão, v. 25, n. 3, p. 45-59, 2020.

CANEPPELE, F. L. Brasil utiliza apenas 2% do seu potencial em biocombustíveis. Jornal da USP, São Paulo, 08 ago. 2023. Disponível em: <https://jornal.usp.br/atualidades/brasil-utiliza-apenas-2-do-seu-potencial-em-biocombustiveis/>. Acesso em: 21 jan. 2024.

CETESB. Biogás, Definição. Publicado em 20 mar. 2020. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/biogas/>. Acesso em 11 dez. 2022.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Cana-de-açúcar - Análise Mensal, janeiro-fevereiro 2023. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento, 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras>. Acesso em: 24 março 2023.

LOPES, Mário Lúcio; AMORIM NETO, Henrique B.; AMORIM, Henrique V. Volume de vinhaça: menos é mais. Fermentec, 16 jul. 2019. Disponível em: <https://fermentecnews.com.br/2019/07/16/volume-de-vinhaca-menos-e-mais/>. Acesso em: 04 jan. 2024.

MENDONÇA, Nayara Fernandes de. Avaliação dos impactos ambientais associados à inserção do sistema de biodigestão anaeróbica ao processamento da vinhaça em biorrefinarias de cana-de-açúcar. 2023. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2023. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-17042023-081931/>. Acesso em: 02 fev. 2024.

NOVACANA. Conab divulga dados finais de 2016/17 e 1º levantamento da safra 2017/18 de cana-de-açúcar. Curitiba: NovaCana, 2017. Disponível em: <https://www.novacana.com/n/cana/safra/conab-dados-finais-2016-17-levantamento-safra-2017-18-cana-de-acucar-180417/>. Acesso em: 15 fev. 2023.

PAULA, R. C.; BASSETTI, F. J. **Alternativas sustentáveis ao uso da vinhaça: uma revisão.** Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, v.13, n.2, p.186-197, 2022. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2022.002.0017>.

PRADA, S. M.; GUEKEZIAN, M.; SUÁREZ-IHA, M. E. **Metodologia analítica para a determinação de sulfato em vinhoto.** Instituto de Química - Universidade de São Paulo, 1997.

POVEDA, Manuel Moreno Ruiz. **Análise econômica e ambiental do processamento da vinhaça com aproveitamento energético.** 2014. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SALOMON, Karina Ribeiro. **Avaliação Técnico-Econômica e Ambiental da Utilização do Biogás Proveniente da Biodigestão da Vinhaça em Tecnologias para Geração de Eletricidade.** Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Itajubá, novembro de 2007.

SANTA CRUZ, Luiz Felipe Lomanto; DUARTE, Carla Grigoletto; MALHEIROS, Tadeu Fabrício; PIRES, Eduardo Cleto. **Análise da viabilidade técnica, econômica e ambiental das atuais formas de aproveitamento da vinhaça: fertirrigação, concentração e biodigestão.** Revista Brasileira de Ciências Ambientais, número 29, setembro de 2013. ISSN Impresso 1808-4524 / ISSN Eletrônico: 2176-9478.

SILVA, A. P. M. da; BONO, J. A. M.; PEREIRA, F. A. R. **Aplicação de vinhaça na cultura da cana-de-açúcar: Efeito no solo e na produtividade de colmos.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 18, n. 1, p. 38-43, 2014.

SILVA, M. M.; MAZIERO, R.; OLIVEIRA, S. L.; RUBIO, C. J. **Aproveitamento da vinhaça residual da produção do etanol para geração de biogás: uma revisão.** Retec, v. 12, n. 2, p. 17-25, jul./dez. 2019.

SILVEIRA, Renata Nayara Câmara Miranda. **Manejo e cuidados no uso da vinhaça na fertirrigação.** Fortaleza: INOVAGRI/IFCE, 2016. 37 p.: il.

ZUCOLOTTI, V. **Escrita Científica: Produção de Artigos de Alto Impacto.** Material de curso de Escrita Científica, 2013. Disponível em: <https://www.nanomedicina.com.br/pt/minicursos>.



6 CAPÍTULO 3 - ARTIGO 03

Explorando o potencial da vinhaça na produção de hidrogênio verde: desafios e oportunidades para o Brasil

Exploring the potential of vinasse in green hydrogen production: challenges and opportunities for Brazil

Publicado em: 13/06/2024

<https://ojs.observatoriolatinoamericano.com/ojs/index.php/olel/issue/view/40>

DOI: <https://doi.org/10.55905/oclv22n6-115>

Ludovico Larsen Filho

Mestrando em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade
Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde
Rio Verde - GO, Brasil
ludovicolarsen@gmail.com

Geraldo Andrade de Oliveira

Dr. em Engenharia Elétrica
Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Espírito Santo- IFES, Campus
Presidente Kennedy
Presidente Kennedy – ES, Brasil
andrade.oliveira@ifes.edu.br

Magaly del Carmen Fonseca Medrano

Dra. em Ciências Ambientais
UFG – Universidade Federal de Goiás
Goiânia - GO, Brasil
fonsecatolke@gmail.com

Leonardo Garcia Marques

Dr. em Engenharia Elétrica
Instituto Federal de Goiás - Campus Itumbiara
Itumbiara – GO, Brasil
leonardo.garcia@ifg.edu.br

Josemar Alves dos Santos Junior

Dr. em Máquinas Elétricas/Engenharia Elétrica
Instituto Federal de Goiás - Campus Itumbiara
Itumbiara – GO, Brasil

josemar.junior@ifg.edu.br

Jesmmmer da Silveira Alves

Dr. em Ciência da Computação
IF Goiano Campus Morrinhos
Morrinhos – GO, Brasil

jesmmmer.alves@ifgoiano.edu.br

Katienne Holanda da Silva

Especialista em Gestão da Educação Profissional
Serviço Nacional de Aprendizagem Rural - Senar
Brasília- DF, Brasil

katienneholanda@gmail.com

Leonardo Amorim de Araújo

Mestrando em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade
Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde
Rio Verde - GO, Brasil

leomari2106@gmail.com

RESUMO

A crescente demanda por energia e a necessidade de soluções sustentáveis impulsionam a busca por alternativas energéticas renováveis. Este estudo investiga o potencial da vinhaça, subproduto da produção de etanol, para a geração de hidrogênio verde no Brasil. O objetivo é identificar e discutir os desafios tecnológicos, econômicos e ambientais associados a essa aplicação, bem como as oportunidades que a utilização deste recurso pode oferecer para a matriz energética brasileira. A metodologia inclui uma revisão sistemática da literatura e análise de casos específicos sobre a produção de hidrogênio verde a partir de biomassa. Os resultados indicam que a vinhaça tem grande potencial para contribuir com a sustentabilidade energética, desde que superados os desafios técnicos e econômicos. A produção de hidrogênio verde a partir da vinhaça pode reduzir significativamente as emissões de gases de efeito estufa, promover uma gestão eficiente de resíduos na agroindústria sucroalcooleira e diversificar a matriz energética brasileira. Conclui-se que, com o desenvolvimento de tecnologias adequadas e investimentos em pesquisa, a utilização da vinhaça pode resultar em benefícios econômicos e ambientais significativos.

Palavras-chave: Hidrogênio Verde, Vinhaça, Sustentabilidade Energética, Biogás, Agroindústria Sucroalcooleira, Descarbonização.

ABSTRACT

The growing demand for energy and the need for sustainable solutions drive the search for renewable energy alternatives. This study investigates the potential of vinasse, a byproduct of ethanol production, for green hydrogen generation in Brazil. The aim is to



identify and discuss the technological, economic, and environmental challenges associated with this application, as well as the opportunities it presents for Brazil's energy matrix. The methodology includes a systematic literature review and case studies on green hydrogen production from biomass. The results indicate that vinasse has significant potential to contribute to energy sustainability, provided that technical and economic challenges are overcome. Green hydrogen production from vinasse can significantly reduce greenhouse gas emissions, promote efficient waste management in the sugarcane agroindustry, and diversify Brazil's energy matrix. It concludes that, with the development of appropriate technologies and investments in research, the use of vinasse can result in significant economic and environmental benefits.

Keywords: Green Hydrogen, Vinasse, Energy Sustainability, Biogas, Sugarcane Agroindustry, Decarbonization.

1 INTRODUÇÃO

A disponibilidade de recursos naturais é inversamente proporcional ao crescimento demográfico. À medida que a população aumenta, a demanda por produtos e serviços também cresce, resultando em um aumento significativo no consumo de energia. Esta relação direta entre crescimento populacional e demanda energética sublinha a necessidade de explorar fontes de energia sustentáveis e renováveis para garantir o desenvolvimento sustentável.

Neste contexto, este estudo investiga o potencial da vinhaça, um subproduto da produção de etanol, para a geração de hidrogênio verde no Brasil. A análise aborda os desafios tecnológicos, econômicos e ambientais envolvidos, além das oportunidades que a utilização deste recurso pode trazer para a matriz energética brasileira. A metodologia inclui uma revisão bibliográfica detalhada e um estudo de casos sobre a produção e aplicação de hidrogênio verde a partir de biomassa. Os resultados indicam que a vinhaça tem grande potencial para contribuir com a sustentabilidade energética, desde que superados os desafios técnicos e econômicos.

Os principais pontos discutidos neste artigo incluem:

- A relação entre o crescimento populacional e a demanda por energia.
- A gestão de resíduos e a sustentabilidade.
- O papel do etanol e da vinhaça no contexto energético.
- A produção de hidrogênio verde a partir da vinhaça.



- Desafios e oportunidades para o Brasil na utilização de hidrogênio verde.

A hipótese deste estudo é que a vinhaça, subproduto da produção de etanol, tem grande potencial para ser utilizada na produção de hidrogênio verde no Brasil. A aplicação desta tecnologia pode não apenas contribuir para a sustentabilidade energética, mas também oferecer soluções viáveis para a gestão de resíduos na agroindústria sucroalcooleira. Além disso, com o desenvolvimento de tecnologias adequadas e investimentos em pesquisa e desenvolvimento, a utilização da vinhaça para a produção de hidrogênio verde pode resultar em benefícios econômicos e ambientais significativos, promovendo a diversificação da matriz energética brasileira e a redução das emissões de gases de efeito estufa.

O objetivo deste artigo é explorar o potencial da vinhaça na geração de hidrogênio verde no Brasil. Especificamente, este estudo busca:

- Identificar e discutir os desafios tecnológicos, econômicos e ambientais associados à produção de hidrogênio verde a partir da vinhaça.
- Avaliar as oportunidades que a utilização da vinhaça pode oferecer para a matriz energética brasileira.
- Contribuir para a compreensão do papel da vinhaça na promoção de sustentabilidade energética.
- Incentivar a adoção de práticas inovadoras no setor agroindustrial.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CRESCIMENTO POPULACIONAL E CONSUMO DE ENERGIA

O crescimento populacional tem relação direta com o consumo de energia. À medida que a população aumenta, a demanda por produtos, serviços e, conseqüentemente, por energia também cresce. Segundo Boserup (1981), há cerca de 10.000 anos a pressão populacional levou à transição da coleta de alimentos para a produção agrícola, impulsionando a busca por fontes de energia mais eficientes, como a



energia hídrica e a tração animal. Nos séculos XVII e XVIII, a escassez de madeira na Europa impulsionou inovações tecnológicas que culminaram na Revolução Industrial, destacando a substituição da madeira pelo carvão (BOSERUP, 1981). Após a Segunda Guerra Mundial, o petróleo substituiu o carvão como principal fonte de energia em razão de novas descobertas e avanços tecnológicos na extração e transporte de petróleo (WRIGLEY, 1990). Esse aumento no consumo de petróleo coincidiu com o maior crescimento populacional da história, criando uma relação direta entre o tipo de energia consumida e o crescimento populacional (WRIGLEY, 1992).

2.2 GESTÃO DE RESÍDUOS E SUSTENTABILIDADE

A gestão de resíduos é uma questão essencial em todas as sociedades. Segundo Sehnem et al. (2019), a economia circular sugere que o valor dos recursos extraídos e produzidos deve ser mantido em circulação através de cadeias produtivas integradas. Neste modelo, o destino de um material não é apenas uma questão de gerenciamento de resíduos, mas parte integrante do processo de design de produtos e sistemas (WEBSTER, 2015). A ideia é eliminar o conceito de lixo, visualizando cada material dentro de um fluxo cíclico, permitindo sua trajetória 'do berço ao berço' – de produto a produto, preservando e transmitindo seu valor.

Desde o início da vida, os resíduos sempre fizeram parte do ciclo dos organismos vivos, e a evolução humana transformou a relação entre seres vivos e os resíduos gerados. Os resíduos estão presentes em diversos setores, incluindo o industrial, o urbano, o hospitalar e o setor de construção, cada um necessitando de um destino adequado para evitar problemas ambientais e de saúde.

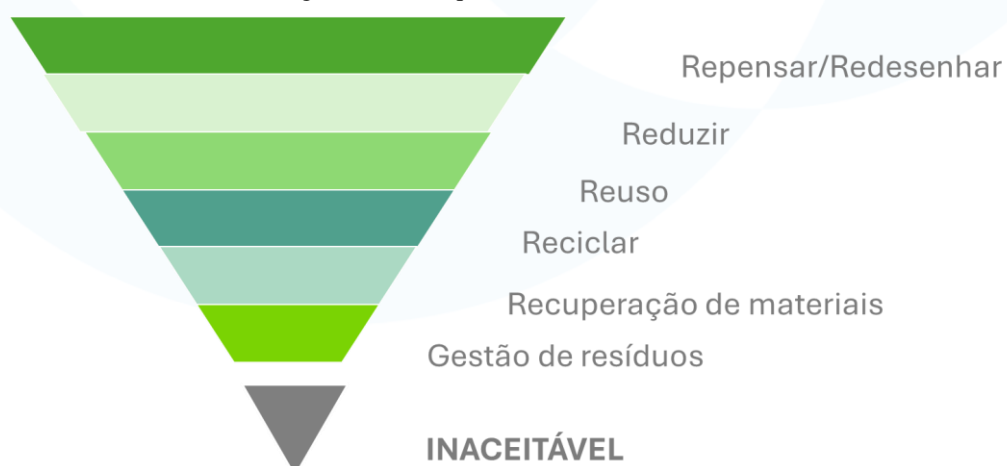
No Brasil, a Lei nº 12.305/10, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), estabelece instrumentos para enfrentar os problemas decorrentes do gerenciamento inadequado de resíduos (MMA, 2023). A gestão de resíduos inclui mapear processos, analisar e classificar resíduos, armazená-los, identificá-los e descartá-los adequadamente.

A sustentabilidade na gestão de resíduos é essencial para equilibrar os interesses

sociais e econômicos com a preservação ambiental. Desde a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano (UNCAMP) em 1972, o conceito de Desenvolvimento Sustentável tem sido central nas discussões sobre a utilização racional dos recursos naturais (MEDRANO, 2007). Ignacy Sachs formulou cinco dimensões da sustentabilidade - social, econômica, ecológica, espacial/geográfica e cultural -, que foram posteriormente sintetizadas em três - ambiental, social e econômica.

A Sustentabilidade Ambiental foca na preservação do meio ambiente para as gerações futuras, promovendo o uso de tecnologias limpas para aumentar a ecoeficiência e reduzir riscos ao homem e ao meio ambiente (FOSCHI et al., 2023). A gestão sustentável de resíduos visa a manter materiais em uso pelo maior tempo possível e a minimizar a quantidade de resíduos descartados. Essa abordagem é parte de uma economia circular mais ampla, que busca separar o crescimento econômico do consumo de recursos finitos, promovendo a prevenção, a redução, a reutilização, a reciclagem e a recuperação de energia (LAW; ASFAW; HOSSAIN, 2022; SALEH, 2021). A Figura 1 apresenta a hierarquia de gestão de resíduos, ilustrando as etapas essenciais para alcançar uma abordagem sustentável na gestão de resíduos.

Figura 1. Hierarquia de Gestão de Resíduos.



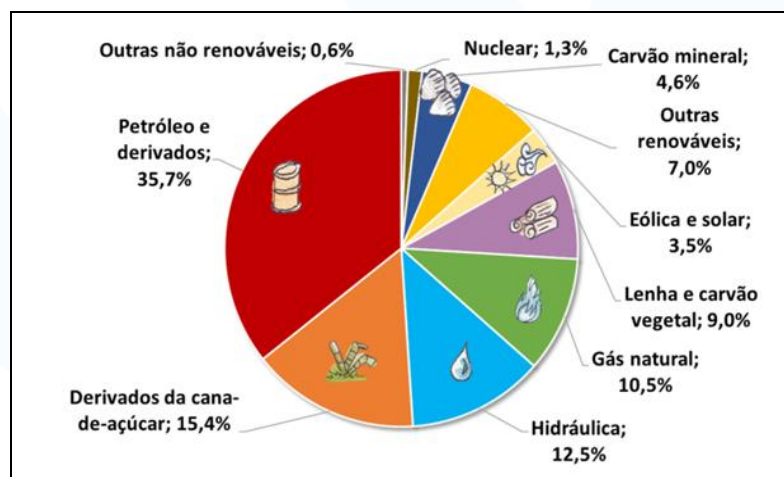
Fonte: Adaptado de Al. Arnei; Elwheidei (2020, p.25).

2.3 DEPENDÊNCIA ENERGÉTICA

A dependência energética pode acarretar implicações profundas para o desenvolvimento humano e econômico, tendo em vista que a energia é uma pré-condição fundamental para todos os bens e serviços, sendo essencial para o progresso humano. A segurança energética, portanto, é um ponto-chave para garantir o bem-estar e a sustentabilidade das sociedades. Medrano (2007) observou que a diminuição das reservas de petróleo eleva os preços internacionais, afetando as economias globais. No Brasil, a necessidade de importar petróleo do Oriente Médio, em razão das características das refinarias nacionais, exemplifica a vulnerabilidade energética do país.

Em resposta, o Brasil tem desenvolvido programas de energias renováveis, como o biodiesel, para diversificar sua matriz energética e reduzir a dependência de combustíveis fósseis (MEDRANO, 2007; BIODIESELBR, 2023). A Figura 2 apresenta a Matriz Energética Brasileira de 2022, oferecendo uma visão abrangente das fontes de energia utilizadas, destacando a importância das energias renováveis nesse contexto.

Figura 2. Matriz Energética Brasileira 2022.



Fonte: Ben (2023)

2.4 ETANOL E VINHAÇA

A vinhaça é um subproduto da produção de etanol, obtido da destilação do vinho proveniente da fermentação do caldo ou do melaço da cana-de-açúcar. Rica em

nutrientes, a vinhaça é utilizada como fertilizante orgânico para o cultivo da cana-de-açúcar, contribuindo para a fertilidade do solo e a produtividade agrícola, sendo uma fonte de energia renovável do tipo biogás e hidrogênio (RAIZEN, 2023).

A Tabela 1 e o Gráfico 1 fornecem uma visão abrangente sobre a produção de etanol e a consequente geração de vinhaça no Brasil para a safra de 2023/24. A vinhaça é gerada em volumes significativos, conforme ilustrado na Tabela 1. Cada litro de etanol produzido resulta em aproximadamente 12,4 litros de vinhaça, destacando a enorme quantidade de resíduo produzido pela indústria sucroalcooleira (LOPES et al., 2019).

Tabela 1: Estimativa de Geração de Vinhaça, com Base na Produção de Etanol Total

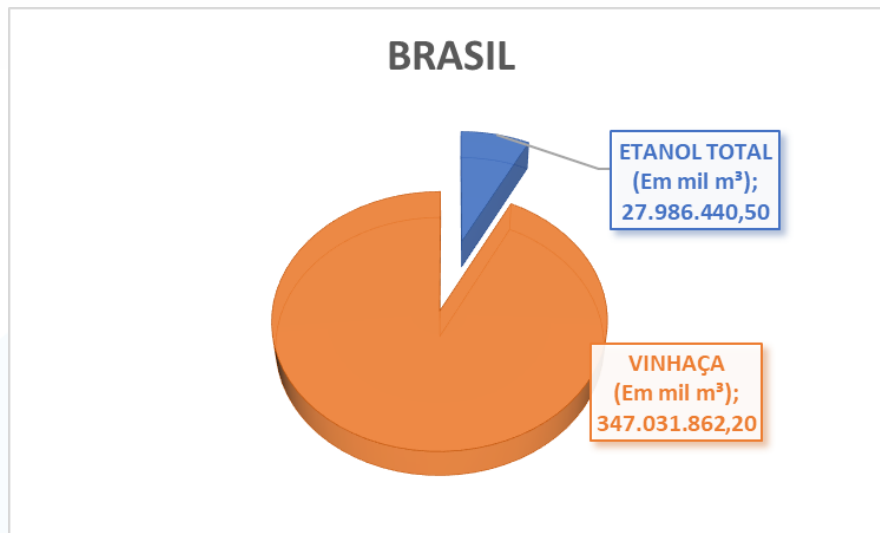
REGIÃO	ETANOL TOTAL (Em mil m ³)	VINHAÇA (Em mil m ³)
NORTE	249.471,00	3.093.440,40
NORDESTE	2.020.283,40	25.051.514,16
CENTRO-OESTE	8.842.200,20	109.643.282,48
SUDESTE	15.653.120,40	194.098.692,96
SUL	1.221.365,50	15.144.932,20
BRASIL	27.986.440,50	347.031.862,20

Fonte: Elaborado pelos autores (1 litro etanol = 12,4 litros de vinhaça)

A análise da Tabela 1 mostra que a região Sudeste é a maior produtora de etanol, seguida pelas regiões Centro-Oeste e Nordeste. Consequentemente, essas regiões também geram a maior quantidade de vinhaça. A produção de etanol e a consequente geração de vinhaça no Brasil totalizam, aproximadamente, 27,98 milhões de m³ e 347,03 milhões de m³, respectivamente.

O Gráfico 1 traz uma representação visual da proporção de geração de vinhaça em relação à produção de etanol total no Brasil. Observa-se que a vinhaça representa um volume substancial em comparação ao etanol produzido. Este gráfico ilustra a magnitude dos resíduos gerados e destaca a importância de encontrar soluções sustentáveis para sua utilização.

Gráfico 1: Proporção de geração de Vinhaça em relação à produção de Etanol Total



Fonte: Elaborado pelos autores (1 litro etanol = 12,4 litros de vinhaça).

Este contexto mostra a necessidade de estratégias eficazes para a gestão da vinhaça, promovendo sua utilização como matéria-prima na produção de hidrogênio verde, uma solução que pode contribuir significativamente para a sustentabilidade energética e a gestão eficiente de resíduos na agroindústria sucroalcooleira.

2.5 TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

A transição energética global está promovendo mudanças significativas na composição das energias primárias, destacando a expansão das energias renováveis e a evolução das tecnologias de consumo e mobilidade (DELGADO; NOGUEIRA, 2021). As empresas petrolíferas estão adotando estratégias de diversificação e descarbonização para se adaptar a esse novo cenário, investindo em energias renováveis e tecnologias de baixo carbono para cumprir suas metas de redução de emissões (DELGADO; NOGUEIRA, 2021). O hidrogênio verde, produzido a partir de fontes renováveis através da eletrólise, está se tornando essencial na transição energética global, substituindo combustíveis fósseis, contribuindo para a redução das emissões de carbono (ABREU et al., 2021). O Brasil, com sua matriz energética diversificada e renovável, pode liderar a produção de hidrogênio verde, aproveitando sua abundância

de recursos naturais (ABREU et al., 2021). Investimentos em energias renováveis não apenas contribuem para a descarbonização, mas também estimulam a criação de empregos e o desenvolvimento econômico. A transição para uma economia de energia limpa tem o potencial de gerar milhões de empregos, superando as perdas nos setores de combustíveis fósseis e nuclear (DELGADO; NOGUEIRA, 2021).

A produção de hidrogênio verde, que envolve a eletrólise da água utilizando fontes de energia renováveis, está emergindo como uma tecnologia de grande potencial. No contexto brasileiro, o setor sucroalcooleiro oferece uma oportunidade única para essa implementação pela abundância de matérias-primas como o etanol e a vinhaça (VARELA; LOPES, 2021). Essa produção de hidrogênio verde desempenha papel imprescindível na descarbonização da matriz energética global. Ao substituir combustíveis fósseis, o hidrogênio verde ajuda a reduzir as emissões de carbono, tornando-se uma solução promissora para várias aplicações industriais e de transporte.

De acordo com Abreu et al. (2021), o Brasil, com sua matriz energética diversificada e predominantemente renovável, está estrategicamente posicionado para liderar a produção de hidrogênio verde, aproveitando seus vastos recursos naturais. Além de contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa, os investimentos em tecnologias de produção de hidrogênio verde também impulsionam o desenvolvimento econômico e a criação de empregos.

Delgado e Nogueira (2021) destacam que a transição para uma economia baseada em energia limpa pode gerar milhões de empregos, superando as perdas nos setores de combustíveis fósseis e nuclear. O potencial do Brasil para desenvolver a produção de hidrogênio verde é significativo, especialmente considerando sua capacidade de produzir bioenergia de forma sustentável. Utilizar resíduos da produção de etanol, como a vinhaça, não apenas promove a sustentabilidade ambiental, mas também oferece uma solução eficaz para a gestão de resíduos na agroindústria sucroalcooleira. Aproveitar esses resíduos para a produção de hidrogênio verde poderia diversificar ainda mais a matriz energética brasileira e reduzir substancialmente as emissões de gases de efeito estufa (ABREU et al., 2021).

2.6 DESCARBONIZAÇÃO E DIVERSIFICAÇÃO DAS EMPRESAS PETROLÍFERAS

As grandes empresas petrolíferas estão adotando estratégias de diversificação e descarbonização para se adaptar ao novo cenário energético global (DELGADO; NOGUEIRA, 2021). Companhias como BP, Shell, Total e Eni estão investindo em energias renováveis e tecnologias de baixo carbono para cumprir suas metas de redução de emissões conforme estipulado no Acordo de Paris. Essa abordagem não só ajuda a mitigar os impactos ambientais, mas também oferece novas oportunidades de crescimento e sustentabilidade para essas empresas (DELGADO; NOGUEIRA, 2021).

Apesar das crises econômicas e da volatilidade dos preços do petróleo, as empresas petrolíferas estão cada vez mais direcionando seus investimentos para projetos de energia renovável (DELGADO; NOGUEIRA, 2021). Em 2021, essas empresas alocaram uma média de 15% de seus orçamentos para fontes de energia de baixo carbono, um aumento substancial em comparação aos 4% de 2019. Este movimento estratégico responde à crescente demanda por energias limpas e à necessidade de reduzir as emissões de carbono (DELGADO; NOGUEIRA, 2021).

2.7 CRIAÇÃO DE EMPREGOS E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO

Os investimentos em energias renováveis não apenas contribuem para a descarbonização, mas também estimulam a criação de empregos e o desenvolvimento econômico (DELGADO; NOGUEIRA, 2021). A Agência Internacional de Energia (IEA) estima que a transição para uma economia de energia limpa pode gerar cerca de 100 milhões de empregos até 2050, com as energias renováveis sendo responsáveis por 42 milhões desses empregos. Este potencial de geração de empregos é significativamente maior do que a perda prevista de seis milhões de empregos nos setores de combustíveis fósseis e nuclear (DELGADO; NOGUEIRA, 2021).

2.8 TRANSFORMAÇÕES NO CENÁRIO ENERGÉTICO GLOBAL

O cenário energético global vem passando por significativas transformações, impulsionadas pela expansão das energias renováveis, tecnologias mais eficientes e pela digitalização dos sistemas de consumo (DELGADO; NOGUEIRA, 2021). Essas mudanças aportam desafios importantes para as empresas energéticas tradicionais, que precisam adaptar suas estratégias e operações para sobreviver no novo contexto (DELGADO; NOGUEIRA, 2021). Diante da incerteza sobre o futuro da matriz energética, as empresas do setor adotam duas posturas principais: algumas continuam apostando na continuidade dos negócios tradicionais, enquanto outras reconhecem que a atual transformação não é transitória, mas uma ruptura significativa, exigindo adaptação e inovação (DELGADO; NOGUEIRA, 2021).

O hidrogênio verde, produzido a partir de fontes renováveis através da eletrólise, está se tornando indispensável na transição energética global, substituindo combustíveis fósseis e contribuindo para a redução das emissões de carbono (ABREU et al., 2021).

O Brasil destaca-se como um potencial líder na produção de hidrogênio verde graças à sua matriz energética renovável, além de ser um grande consumidor indireto de hidrogênio, especialmente no setor agroindustrial, pela produção de fertilizantes à base de amônia (ABREU et al., 2021).

Apesar do potencial, o mercado de hidrogênio verde no Brasil enfrenta desafios internos e externos. Esses desafios tornam a produção de hidrogênio verde uma prioridade estratégica para o governo brasileiro e os formuladores de políticas (ABREU et al., 2021).

3 METODOLOGIA

3.1 VISÃO GERAL

Este estudo utilizou a metodologia de revisão sistemática de literatura para explorar a produção de hidrogênio verde a partir da vinhaça. A metodologia seguiu as

diretrizes propostas por Zucolotto (2013) e incluiu etapas descritas a seguir.

3.2 DEFINIÇÃO DE PALAVRAS-CHAVE E BASES DE DADOS

Foram conduzidas buscas em bases de dados acadêmicas renomadas, como Scopus, Web of Science, PubMed e Google Scholar, utilizando as palavras-chave "vinhaça", "hidrogênio verde", "biogás", "biodigestão anaeróbia" e "sustentabilidade ambiental".

3.3 CRITÉRIOS DE INCLUSÃO E EXCLUSÃO

Foram incluídos estudos dos últimos 30 anos, publicados em português, inglês e espanhol, que apresentassem dados empíricos sobre a produção de hidrogênio verde a partir da vinhaça ou seu uso como biofertilizante. Foram excluídos trabalhos não diretamente relacionados ao tema, bem como revisões não sistemáticas, editoriais e comentários.

3.4 ESTRATÉGIA DE BUSCA

Foram utilizadas combinações das palavras-chave com operadores booleanos "AND" e "OR" para a busca nas bases de dados, ajustando a estratégia conforme necessário para cada base, visando a maximizar a relevância e a abrangência dos resultados.

3.5 SELEÇÃO E ANÁLISE DOS ESTUDOS

A seleção dos estudos ocorreu em duas etapas: análise preliminar de títulos e resumos, seguida pela avaliação detalhada dos textos completos dos artigos pré-selecionados. Foi utilizado um formulário padrão para extração de dados relevantes, incluindo objetivos, metodologias, resultados e conclusões de cada estudo.

3.6 SÍNTESE DOS DADOS

Os dados coletados foram submetidos a uma análise qualitativa, identificando padrões, temas comuns e lacunas no conhecimento existente. A síntese focou nas principais contribuições para o entendimento da produção de hidrogênio verde a partir da vinhaça e seu potencial como biofertilizante.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 RESULTADOS

Os resultados deste estudo destacam o potencial significativo da vinhaça na produção de hidrogênio verde no Brasil. A análise dos dados coletados revela que a utilização de vinhaça como matéria-prima para a produção de hidrogênio verde pode contribuir significativamente para a descarbonização da matriz energética brasileira.

4.1.1 Produção de Hidrogênio Verde a partir da Vinhaça

Diversos estudos indicam que a vinhaça pode ser utilizada de forma eficaz para a produção de hidrogênio verde. A vinhaça tem alto teor de matéria orgânica e nutrientes que, quando submetidos ao processo de biodigestão anaeróbia, resultam na produção de biogás. Este biogás pode ser posteriormente convertido em hidrogênio verde por processos de reforma ou eletrólise, utilizando fontes de energia renováveis (VARELA; LOPES, 2021; ABREU et al., 2021). A Tabela 2 apresenta a Eficiência da Produção de Hidrogênio Verde a partir da Vinhaça, mostrando os resultados dos estudos conduzidos nesse campo.

Tabela 2: Eficiência da Produção de Hidrogênio Verde a partir da Vinhaça

Estudo	Eficiência de Produção (%)	Método Utilizado	Fonte de Energia
Varela & Lopes (2021)	45	Reforma do Biogás	Solar
Abreu et al. (2021)	50	Eletrólise	Eólica

Delgado & Nogueira (2021)	48	Reforma do Biogás	Biomassa
------------------------------	----	----------------------	----------

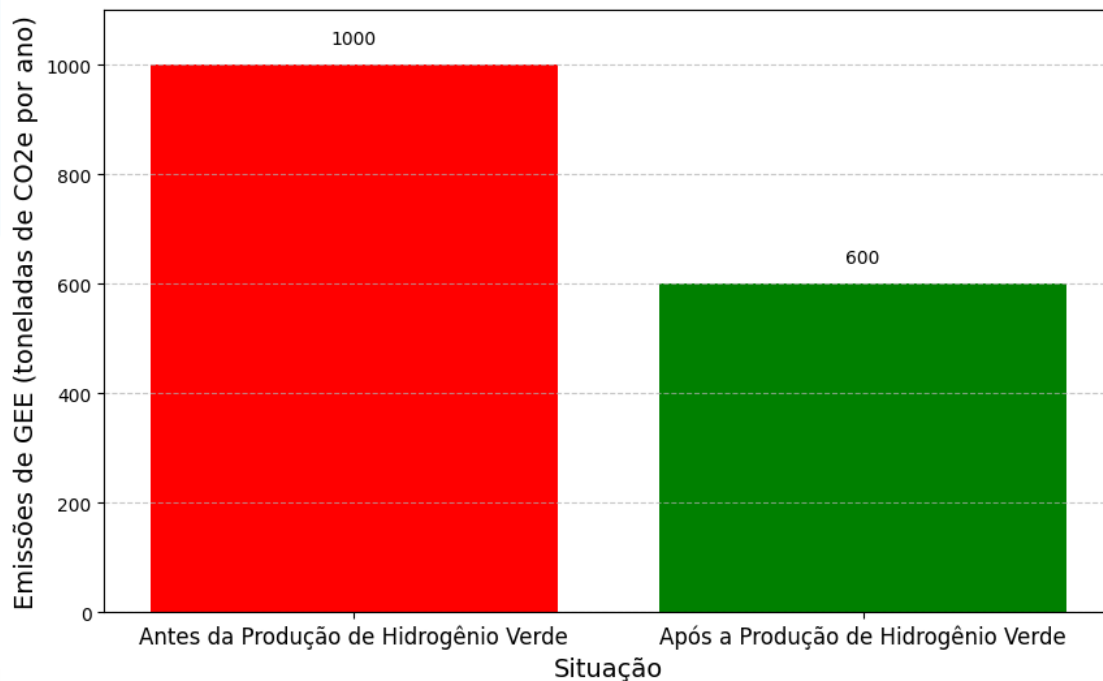
Fonte: Elaborado pelos autores.

4.1.2 Impacto Ambiental

Os estudos analisados destacam que a utilização da vinhaça para a produção de hidrogênio verde pode significativamente reduzir as emissões de gases de efeito estufa. A reforma do biogás e a eletrólise são processos que, quando alimentados por energia renovável, apresentam baixas emissões de carbono. Além disso, a utilização da vinhaça como matéria-prima contribui para uma gestão sustentável de resíduos na agroindústria sucroalcooleira (DELGADO; NOGUEIRA, 2021).

O Gráfico 2 mostra que, antes da produção de hidrogênio verde, as emissões de GEE eram de, aproximadamente, 1000 toneladas de CO₂ por ano. Após a implementação da produção de hidrogênio verde, as emissões foram reduzidas para cerca de 600 toneladas de CO₂ por ano, uma redução de 40% nas emissões de CO₂.

Gráfico 2: Redução de Emissões de GEE com Produção de Hidrogênio Verde a partir da Vinhaça



Fonte: Adaptado de Abreu et al. (2021)

4.1.3 Viabilidade Econômica

Os estudos também abordam a viabilidade econômica da produção de hidrogênio verde a partir da vinhaça. A utilização de resíduos como matéria-prima reduz os custos de produção e promove a economia circular. Investimentos em tecnologias de biodigestão e reforma do biogás são essenciais para aumentar a eficiência e a competitividade dessa produção (DELGADO; NOGUEIRA, 2021).

4.2 DISCUSSÕES

4.2.1 Comparação com a Literatura Existente

Os resultados deste estudo corroboram as descobertas de outros pesquisadores que apontam a vinhaça como uma matéria-prima promissora para a produção de hidrogênio verde. Estudos anteriores já destacavam a importância da biodigestão anaeróbia e da reforma do biogás como processos viáveis para a produção de biocombustíveis limpos (VARELA; LOPES, 2021; ABREU et al., 2021). A análise dos dados revela que a eficiência de produção de hidrogênio verde a partir da vinhaça é comparável a outras fontes de biomassa, mas com a vantagem adicional de aproveitar um subproduto abundante na agroindústria brasileira.

4.2.2 Implicações para a Teoria e Prática

A produção de hidrogênio verde a partir da vinhaça é uma inovação significativa para a matriz energética brasileira. Esta abordagem não apenas contribui para a sustentabilidade ambiental, mas também oferece uma solução prática para a gestão de resíduos na indústria sucroalcooleira. A adoção desta tecnologia pode incentivar investimentos em energias renováveis e promover a diversificação da matriz energética do Brasil, alinhando-se às metas globais de redução de emissões de carbono (DELGADO; NOGUEIRA, 2021).

4.2.3 Limitações do Estudo

Este estudo tem por base uma revisão sistemática da literatura, o que pode limitar a abrangência dos dados coletados. A maioria dos estudos analisados foi conduzida em condições controladas de laboratório, e a aplicação em larga escala pode enfrentar desafios técnicos e econômicos não contemplados nos artigos revisados. Além disso, a disponibilidade de dados específicos sobre a produção de hidrogênio verde a partir da vinhaça ainda é limitada, exigindo mais pesquisas para validar os resultados obtidos.

4.2.4 Direções para Pesquisas Futuras

Futuras pesquisas devem focar na implementação de projetos-piloto de produção de hidrogênio verde a partir da vinhaça em escala industrial. Estudos adicionais são necessários para avaliar a viabilidade econômica em diferentes contextos regionais e explorar outras fontes de energia renovável que possam ser integradas ao processo. Também é essencial investigar o impacto ambiental de longo prazo e desenvolver políticas públicas que incentivem a adoção dessa tecnologia inovadora.

5 CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo destacam o potencial significativo da vinhaça como matéria-prima para a produção de hidrogênio verde no Brasil. A utilização dessa tecnologia pode contribuir para a sustentabilidade ambiental, promover a gestão eficiente de resíduos na agroindústria sucroalcooleira e diversificar a matriz energética brasileira. No entanto, a implementação em larga escala requer mais pesquisas e investimentos em tecnologias avançadas para garantir sua viabilidade econômica e ambiental.

REFERÊNCIAS

AL ARNI, Saleh S.; ELWAHEIDI, Mahmoud M. Manual conciso de tecnologias de tratamento de resíduos. Imprensa CRC, 2020.

BESSEN, Gina Rizpah; GUTBERLET, Jutta; FERRARA, Luciana; DIAS, Sonia Maria; SANTOS, Mario Roberto. Gestão da coleta seletiva e de organizações de catadores: indicadores e índices de sustentabilidade. São Paulo: Faculdade de Saúde Pública/USP, 2017.

BONACIN, Juliano Alves; MONTABONE, Paulo; GONÇALVES, Renato Vitalino. Hidrogênio verde: como o Brasil pode se tornar polo de produção do 'combustível do futuro'[Entrevista a Igor Savenhago]. **G1: O Portal de Notícias da Globo**, 2022.

BOSERUP, Ester. **População e tecnologia**. Oxford: Blackwell, 1981.

CARVALHO, Francielle; OSIPOVA, Liudmila; ZHOU, Yuanrong. Emissões de gases de efeito estufa do ciclo de vida do hidrogênio como combustível marítimo e custo de produção do hidrogênio verde no Brasil. 2023.

DE ABREU, Thiago Modesto; SILVA, João Paulo; PEREIRA, Maria Fernanda; ALMEIDA, Rodrigo Luiz; SOUZA, Carolina Beatriz. Desafios e oportunidades para o mercado de hidrogênio verde no Brasil: uma análise SWOT.

DELGADO, Fernanda; NOGUEIRA, Luiz Augusto Horta. Brasil: o país que já fez a transição energética. **Revista Conjuntura Econômica**, v. 74, n. 12, p. 50-53, 2020.

DELGADO, Fernanda; NOGUEIRA, Luiz Augusto Horta. O desafio da transição energética na indústria do petróleo. **Revista Conjuntura Econômica**, v. 75, n. 04, p. 45-49, 2021.

FERNANDES, Gláucia et al. Panorama dos desafios do hidrogênio verde no Brasil. 2023.

FOSCHI, Eleonora; AURELI, Selena; PALETTA, Ângelo. Vinculando bioeconomia, economia circular e sustentabilidade: Tendências, lacunas e orientação futura na indústria de plásticos de base biológica e biodegradáveis. **Revista Europeia de Impacto Social e Economia Circular**, v. 2, pág. 16-31, 2023.

HOSSAIN, Sahadat; LEI, H. James; ASFAW, Araya. **A crise dos resíduos: roteiro para a gestão sustentável dos resíduos nos países em desenvolvimento**. John Wiley & Filhos, 2022.

LOPES, Mário Lúcio; AMORIM NETO, Henrique B.; AMORIM, Henrique V. **Volume de vinhaça: menos é mais**. Fermentec, 16 jul. 2019. Disponível em: <https://fermentecnews.com.br/2019/07/16/volume-de-vinhaca-menos-e-mais/>. Acesso em: 04 jan. 2024.

LOPES, Thiago; VARELA, Hamilton; SANTOS, Edmilson Moutinho dos. Centro atua em três grandes frentes de tecnologia para produção de hidrogênio: Produtos ou subprodutos do setor sucroalcooleiro, como o etanol e a vinhaça, são as matérias-primas usadas nos projetos em andamento. **Jornal da USP**, 2023.

MEDRANO, Magaly Fonseca. Avaliação da sustentabilidade do biodiesel de soja no Brasil. 2007.

MESQUITA, Camila Luciana Silva de. Hidrogênio verde, uma alternativa promissora em solos brasileiros: Uma revisão bibliográfica. 2022.

MMA - Ministério do Meio Ambiente. Acesso à Informação - Informações Ambientais. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/aceso-a-informacao/informacoes-ambientais>. Acesso em: 15 de dezembro de 2023.

NOGUEIRA, Luiz Augusto Horta et al. **Dendroenergia: fundamentos e aplicações**. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

NOGUEIRA, Luiz Augusto Horta; CAPAZ, Rafael Silva; LORA, Electo Silva. Bioenergia no Brasil: onde estamos e quais nossos horizontes. **Revista Brasileira de Energia**, v. 27, 2021.

RAÍZEN. Transição Energética. Disponível em: <https://www.raizen.com.br/blog/transicao-energetica>. Acesso em: 07 de dezembro de 2023.

SEHNEM, Simone; PEREIRA, Susana Carla Farias. Rumo à economia circular: sinergia existente entre as definições conceituais correlatas e apropriação para a literatura brasileira. **Revista Eletrônica de Ciência Administrativa**, v. 18, n. 1, p. 35-62, 2019.

WRIGLEY, Edward Anthony. **Continuidade, acaso e mudança: O caráter da revolução industrial na Inglaterra**. Imprensa da Universidade de Cambridge, 1990.

WRIGLEY, Edward Anthony. **Os economistas clássicos, o estado estacionário e a Revolução Industrial**. Universidade Nacional Australiana, 1992.

ZUCOLOTTO, V. **Escrita Científica: Produção de Artigos de Alto Impacto**. Material de curso de Escrita Científica, 2013. Disponível em: <https://www.nanomedicina.com.br/pt/minicursos>.

7. CONCLUSÃO

7.1 Principais Evidências

No desenvolvimento das pesquisas alguns aspectos se destacaram e merecem aprofundamento. Entre eles, podem ser citados:

Desenvolvimento de Práticas Sustentáveis

- A prática da fertirrigação com vinhaça é promovida como uma solução sustentável que melhora a fertilidade do solo, reduz a dependência de fertilizantes minerais e promove o crescimento saudável das plantas.

Impacto Econômico e Social

- A mecanização da colheita de cana-de-açúcar aumentou a produtividade agrícola e melhorou a qualidade de vida dos trabalhadores rurais ao substituir práticas laboriosas e perigosas por operações mecanizadas mais seguras.

Inovações Tecnológicas:

- A introdução de novas tecnologias no manejo de resíduos da cana, como o bagaço, torta de filtro e vinhaça, é identificada como uma estratégia para a sustentabilidade do setor.

Redução de Emissões de Gases de Efeito Estufa:

- A eliminação da queima da palhada e a adoção de práticas mecanizadas contribuíram para uma significativa redução das emissões de GEE.

7.2 Sugestões de Trabalhos Futuros

O campo de pesquisa explorado nessa dissertação mostrou-se amplo e com o escopo superior ao que foi proposto no presente trabalho. Dessa forma, são abertas possibilidades de novas investigações. Algumas sugestões são apresentadas:

Armazenamento da Vinhaça

- Formas de armazenamento da vinhaça em ambiente controlado para manutenção de suas características físico-químicas para tratamento anaeróbico e fertirrigação futura.

Otimização da Fertirrigação com Vinhaça

- Desenvolver métodos para maximizar a eficiência da fertirrigação, minimizando impactos ambientais e melhorando a absorção de nutrientes pelas plantas.

Viabilidade Econômica da Geração de Hidrogênio Verde

- Estudos adicionais são necessários para avaliar a viabilidade econômica da geração de hidrogênio verde em relação ao custo operacional de produção e à abundância de matéria-prima gerada pela cana-de-açúcar.

Transporte Seguro do Hidrogênio Verde

- Estudos que auxiliem no desenvolvimento de métodos para o transporte seguro do hidrogênio verde, visando à comercialização e ao transporte a curta e longa distância.

7.3 Outras Publicações

O processo de amadurecimento da presente pesquisa proporcionou a criação de diversos produtos secundários, não diretamente relacionados ao tema principal da dissertação. Assim, os seguintes artigos foram publicados durante o Mestrado de Engenharia Aplicada e Sustentabilidade – PPGEAS:

- ANÁLISE DA IMPLEMENTAÇÃO DA GESTÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO EM DIFERENTES PERSPECTIVAS
DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv8n7-069>
- APLICAÇÃO DO MÉTODO AHP NO PROCESSO DECISÓRIO NA ADMINISTRAÇÃO PÚBLICA: ESTUDO DE CASO NA SECRETARIA DE AQUICULTURA E PESCA
➤ DOI: <https://doi.org/10.54751/revistafoco.v16n8-070>

7.4 Considerações Finais

Esta dissertação avalia o potencial de aproveitamento de resíduos na cadeia produtiva da cana-de-açúcar, destacando a importância econômica e ambiental de práticas sustentáveis. A pesquisa mostra que subprodutos como a vinhaça e o bagaço de cana são fontes valiosas para a geração de energia renovável, contribuindo para a redução de emissões de gases de efeito estufa. Os produtos da pesquisa reforçam a necessidade de investimentos em novas tecnologias e práticas sustentáveis, incluindo a mecanização da colheita e a eliminação da queima da palhada, melhorando a produtividade e a qualidade de vida dos trabalhadores. A dissertação conclui que o futuro do setor depende de uma abordagem integrada que combine inovação tecnológica, políticas públicas eficazes e investimentos em energias renováveis, garantindo um desenvolvimento econômico sustentável e ambientalmente responsável.