

BIOENERGIA E SUSTENTABILIDADE: O PAPEL DO BAGAÇO DA CANA NA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

BIOENERGY AND SUSTAINABILITY: THE ROLE OF SUGARCANE BAGASSE IN THE BRAZILIAN ENERGY MATRIX

Kristianno Fireman Tenório

Doutorando em Desenvolvimento Regional e Agronegócio pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Unioeste/Toledo. Bolsista de Pós-Graduação Capes. E-mail: kristianno.tenorio@unioeste.br

Oscar Rene Silvero Arguello

Doutorando em Desenvolvimento Regional e Agronegócio pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Unioeste/Toledo. E-mail: oscarsilveroarguello@hotmail.com

José João de Alencar

Doutorando em Desenvolvimento Regional e Agronegócio pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Unioeste/Toledo. E-mail: jose.alencar3@unioeste.br

Pery Francisco Assis Shikida

Pós-doutor em Economia pela FGV/SP. Professor da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Unioeste/Toledo. Bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq. E-mail: pery.shikida@unioeste.br

Grupo de Trabalho (GT): 4. Questão ambiental, agroecologia e sustentabilidade

Resumo

A necessidade de diversificação da matriz energética brasileira tem impulsionado a adoção de fontes renováveis, consolidando a bioenergia como uma alternativa estratégica para reduzir a dependência de combustíveis fósseis. Nesse contexto, o bagaço da cana-de-açúcar desempenha um papel essencial na geração de bioeletricidade, promovendo maior eficiência no setor sucroenergético e contribuindo para a segurança e sustentabilidade do sistema elétrico nacional. O objetivo deste estudo é analisar como a participação do bagaço da cana na matriz energética brasileira evoluiu ao longo dos últimos anos e quais são seus impactos na diversificação da geração de eletricidade. Para isso, utilizam-se dados secundários de fontes governamentais e setoriais e Revisão Sistemática de Literatura, permitindo a análise de séries históricas da produção energética a partir da biomassa e sua contribuição ao sistema elétrico. Além disso, são feitas comparações temporais para identificar tendências, desafios regulatórios e oportunidades de ampliação do uso do bagaço na geração de eletricidade. Os resultados indicam que, apesar do crescimento da bioeletricidade a partir do bagaço da cana, ainda existem entraves técnicos, econômicos e estruturais que limitam sua plena integração ao mercado energético brasileiro. Infraestrutura inadequada, incentivos insuficientes e a necessidade de regulamentação mais clara são fatores que influenciam sua viabilidade como fonte de energia renovável. A valorização dessa biomassa pode consolidá-la como um pilar estratégico da diversificação energética do Brasil, alinhando-se aos princípios da Economia Circular e às metas ambientais do País.

Palavras-chave: Bioenergia, cogeração de energia, transição energética, bagaço da cana-de-açúcar.

Abstract

The need to diversify Brazil's energy matrix has driven the adoption of renewable sources, establishing bioenergy as a strategic alternative to reduce dependence on fossil fuels. In this context, sugarcane bagasse plays an essential role in bioelectricity generation, enhancing efficiency in the sugar-energy sector and contributing to the security and sustainability of the national electricity system. This study aims to analyze how the participation of sugarcane bagasse in Brazil's energy matrix has evolved over recent years and what its impacts are on electricity generation diversification. To achieve this, secondary data from governmental and sectoral sources are used and Systematic

Literature Review, allowing for a historical series analysis of biomass energy production and its contribution to the electrical system. Additionally, temporal comparisons are made to identify trends, regulatory challenges, and opportunities for expanding the use of bagasse in electricity generation. The results indicate that, despite the growth of bioelectricity from sugarcane bagasse, technical, economic, and structural barriers still hinder its full integration into the Brazilian energy market. Inadequate infrastructure, insufficient incentives, and the need for clearer regulations are factors that affect its viability as a renewable energy source. Enhancing the value of this biomass can establish it as a strategic pillar for Brazil's energy diversification, aligning with the principles of the Circular Economy and the country's environmental goals.

Key words: Bioenergy, energy cogeneration, energy transition, sugarcane bagasse.

1. Introdução

A necessidade de redução das emissões de gases de efeito estufa e a urgência em acelerar a transição para uma economia de baixo carbono têm ampliado a busca global por fontes de energia renováveis. Essa prioridade está expressa nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), em especial no compromisso com o acesso à energia limpa, segura e acessível até 2030 (ONU, 2025).

Essa transição energética se concretiza na substituição progressiva de fontes não renováveis e altamente poluentes, como o petróleo e o carvão, por alternativas como energia hidrelétrica, solar, eólica, geotérmica, biomassa e tecnologias emergentes derivadas de marés e ondas. Essas fontes renováveis não apenas contribuem para a mitigação dos impactos ambientais, mas também são estratégicas para a segurança energética e a diversificação das matrizes elétricas (Parker, 2018; Teixeira; Pessoa, 2024).

Nesse cenário, o Brasil apresenta vantagens significativas. A combinação de vastos recursos naturais, clima favorável e histórico de políticas públicas voltadas à sustentabilidade permitiu a formação de uma matriz energética principalmente renovável. Dados da Superintendência de Concessões, Permissões e Autorizações do Serviço de Energia Elétrica – SCE (2025) indicam que, em janeiro de 2025, o País opera com uma matriz composta por 52,01% de fonte hídrica, 16,81% de origem fóssil, 14,32% eólica, 8,55% biomassa, 8,36% solar e 0,93% nuclear.

O avanço das tecnologias renováveis no País reflete uma política de Estado que visa garantir segurança energética, reduzir dependências externas e enfrentar os desafios das mudanças climáticas. Programas como o PROINFA, a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBIO) e o apoio do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) têm contribuído para fomentar a expansão do setor, sempre sob a regulamentação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (Tolmasquim, 2016; Frehner *et al.*, 2024).

Dentro dessa lógica de transformação, o Plano Nacional de Energia 2050 aponta que a diversificação das fontes de energia e o uso mais eficiente de recursos são condições essenciais para garantir o suprimento futuro e reduzir impactos ambientais. Nesse sentido, o aproveitamento de subprodutos industriais e agrícolas – como prevê a Economia Circular (EC) – emerge como uma alternativa estratégica e viável para atender à crescente demanda energética (BRASIL, 2020; Salimi; Amidpour, 2022; Frehner *et al.*, 2024).

É nesse contexto que o setor sucroenergético se insere. Com histórico de relevância na economia nacional, esse setor tem se reposicionado como fornecedor de energia renovável, a partir do aproveitamento de seus resíduos industriais. O bagaço da cana-de-açúcar, resultado do processo de moagem, é, hoje, um insumo energético de crescente importância, cuja contribuição à geração de eletricidade merece ser analisada com mais profundidade.

Embora a cogeração de energia a partir do bagaço represente ganhos significativos em eficiência e sustentabilidade, sua plena integração ao sistema elétrico nacional ainda enfrenta obstáculos. A escassez de incentivos, limitações de infraestrutura e entraves regulatórios

impedem que esse potencial seja totalmente explorado (Trombeta; Caixeta, 2017; Medeiros; Fabre; Silva, 2024).

Assim, a questão central deste estudo é investigar como a participação do bagaço da cana-de-açúcar na matriz energética brasileira evoluiu ao longo dos últimos anos e quais são os reflexos dessa bioenergia na diversificação da geração de eletricidade. A análise considera o papel estratégico da biomassa no contexto das fontes renováveis e os caminhos possíveis para ampliar sua inserção no sistema elétrico nacional.

Isto posto, além da introdução, este artigo divide-se em cinco seções. A segunda seção salienta a participação das fontes renováveis na matriz elétrica, enquanto a terceira contém o recorte metodológico. Os resultados e discussões e as considerações finais compõem a quarta e quinta seções, respectivamente.

2. Participação das fontes renováveis na matriz elétrica

Diante desse cenário, torna-se essencial compreender como as fontes renováveis se inserem na matriz elétrica nacional, com ênfase na biomassa, cuja relevância cresce com a adoção de práticas da EC¹ e estratégias de cogeração. A matriz elétrica brasileira possui uma das composições mais limpas do mundo, com predominância de fontes renováveis e baixa emissão de gases de efeito estufa. Esse perfil é resultado de uma combinação histórica de políticas públicas, potencial natural e articulação entre setores estratégicos como o agronegócio e o setor energético. Em janeiro de 2025, a capacidade instalada total no Brasil era de 210.599 MegaWatt (MW) dos quais 84,7% originavam-se de fontes renováveis, consolidando o País como referência global em sustentabilidade energética (UNICA, 2025).

Entende-se, então, que uma unidade de potência MW equivale a 1 milhão de watts. Em proporções, a biomassa possui 12.698 MW instalados, o que significa que essa é a capacidade total das usinas que utilizam biomassa (como o bagaço da cana) para gerar eletricidade no Brasil. Apenas o volume de energia gerado pelo bagaço da cana supera a potência instalada de grandes usinas hidrelétricas, como Belo Monte, que possui 11.233 MW, e Itaipu, cuja capacidade é de cerca de 14.000 MW. Esses dados reforçam a capacidade da biomassa de substituir fontes convencionais, com vantagens ambientais e logísticas (Aló *et al.*, 2017; UNICA, 2025).

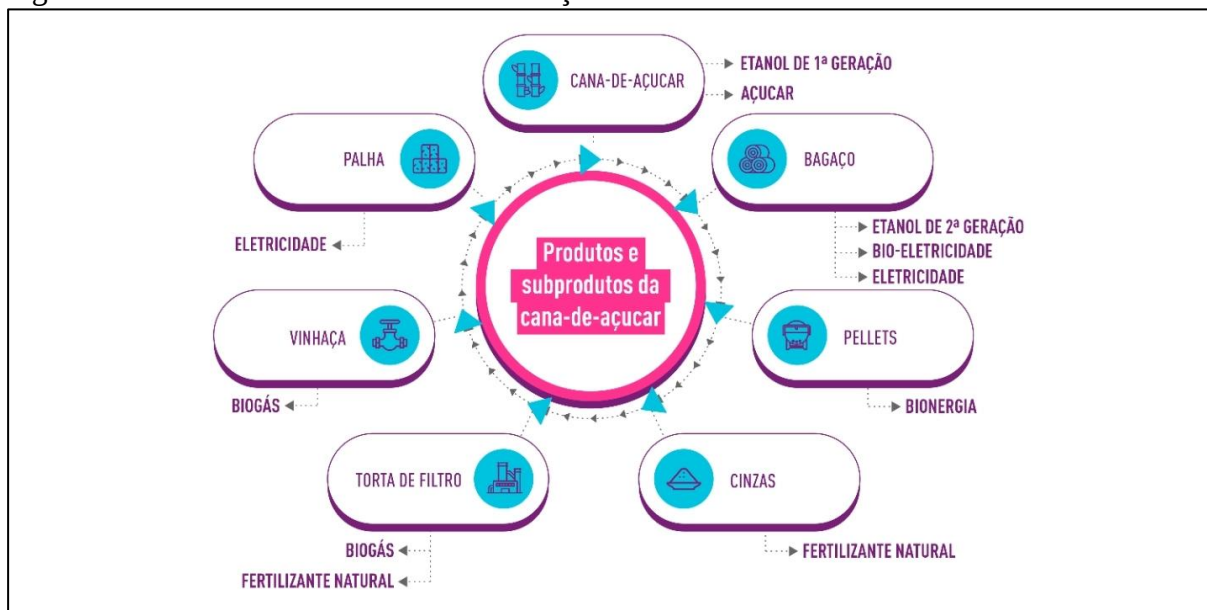
A biomassa representa um elo direto entre o setor agroindustrial e a produção de energia e sua diversidade fortalece a resiliência do sistema energético nacional, especialmente diante dos desafios impostos pelas mudanças climáticas e pela urgência da descarbonização (Teixeira, 2015; Coelho Junior *et al.*, 2024a). Composta por diferentes materiais orgânicos, seu uso permite o aproveitamento de resíduos de processos agrícolas e industriais, sendo a transformação do bagaço em eletricidade ocorrendo, em sua maioria, por meio da cogeração, o que possibilita às usinas gerarem calor e energia de forma simultânea, promovendo eficiência energética e autossuficiência (Riaza *et al.*, 2014).

Contudo, estudos como o de Dias (2024) discutem, inclusive, os dilemas estratégicos na destinação dos subprodutos da cana-de-açúcar, em que pode haver a escolha pela produção de etanol de segunda geração em vez da geração de eletricidade. Os subprodutos, como a palha (Figura 1), o bagaço da cana, a torta de filtro, a vinhaça, a levedura, os pellets, briquetes e as cinzas, têm suas destinações definidas conforme a capacidade de produção da usina

¹ As diretrizes da EC baseiam-se na minimização e/ou eliminação da poluição e resíduos, com o fito de manter a utilização de produtos e materiais *pari passu* à restauração de sistemas naturais. Maiores considerações sobre a ideia e o debate em torno da EC podem ser encontradas, entre outros, em: Ellen MacArthur Foundation (2017), Weetman (2019) e Lacerda e Leitão (2021).

sucroalcooleira e a tomada de decisão dos gestores (Rípoli; Molina Jr.; Rípoli, 2000; Raízen, 2025).

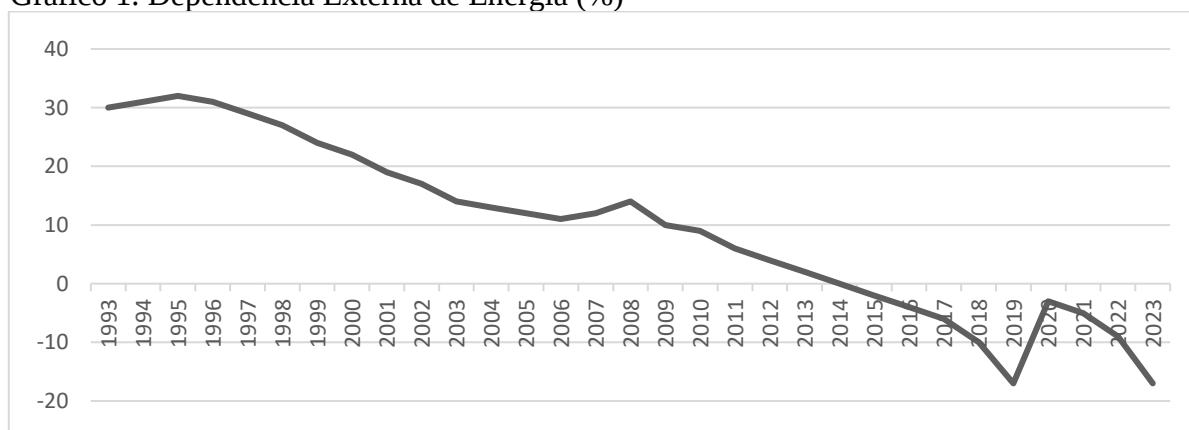
Figura 1. Economia Circular da Cana-de-Açúcar



Fonte: Raízen (2025).

Embora os dados recentes sejam animadores, entre 1993 e 2005, o Brasil apresentava uma alta dependência externa de energia, com percentuais superiores a 10% e, em alguns momentos, ultrapassando 30% (Gráfico 1). Esse cenário, segundo a Empresa de Pesquisa Energética (2020), refletia a forte dependência da importação de combustíveis fósseis, como petróleo e derivados, para suprir a demanda interna. Naquele período, o País ainda enfrentava limitações estruturais no setor energético e estava em processo de ampliação e diversificação de sua matriz.

Gráfico 1. Dependência Externa de Energia (%)



Fonte: Adaptado do Ministério de Minas e Energia (BRASIL, 2024))

A partir de 2005, observa-se uma queda gradual desse índice, evidenciando os efeitos positivos de políticas públicas que incentivaram o uso de fontes renováveis. Iniciativas como a expansão da biomassa, da energia eólica e da geração hidrelétrica ganharam força, promovendo maior equilíbrio entre produção e consumo de energia. A energia hidrelétrica permanece como

a principal fonte da matriz elétrica, graças à ampla disponibilidade hídrica doméstica (Energy Institute, 2024).

Paralelamente, a energia solar e a eólica avançam rapidamente, impulsionadas pela elevada irradiação solar no território nacional e pelo potencial eólico *onshore* e *offshore*, ainda pouco explorado, mas de alta qualidade técnica (Energy Institute, 2024). Esse avanço foi reforçado por programas de infraestrutura, como o Programa de Aceleração do Crescimento (PAC), que contribuíram para reduzir a vulnerabilidade energética. Nesse período, a dependência externa aproximou-se de zero, sinalizando um marco de estabilidade energética nacional (Garcia; Vilpoux; Cereda, 2018; Dantas, 2021; Ferreira, 2022).

Já a partir de 2014, o Gráfico indica uma mudança estrutural importante: o Brasil passa a apresentar percentuais negativos de dependência externa. Isso significa que o País começa a exportar mais energia do que importar, entrando definitivamente em uma fase de independência energética. A autossuficiência alcançada reflete o fortalecimento da capacidade interna de geração e o destaque brasileiro no cenário internacional das energias renováveis (Ferreira, 2024).

Em 2023, o País atinge o nível mais baixo da série histórica, com uma dependência negativa próxima de -17%. Esse resultado é fruto de um processo contínuo de transformação da matriz energética, com crescimento significativo da bioenergia – como a proveniente do bagaço da cana-de-açúcar – e da energia solar e eólica. Além disso, houve uma redução progressiva da necessidade de importação de energia, como gás natural da Bolívia ou petróleo, consolidando o protagonismo do Brasil na transição para uma matriz mais limpa, autônoma e sustentável.

Geograficamente, a contribuição da biomassa se concentra em regiões com alta densidade agroindustrial. São Paulo lidera com 7.028 MW instalados em 238 usinas térmicas, o que representa 39,8% da biomassa interna. Em conjunto com Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Goiás e Paraná, esses estados respondem por 79,2% da capacidade nacional. A concentração territorial acompanha a lógica da produção canavieira e a estrutura consolidada das usinas (Lima *et al.*, 2022; ANEEL, 2025; UNICA, 2025).

Apesar do potencial, essa regionalização revela desigualdades. Regiões com menor presença da agroindústria ainda não conseguem aproveitar plenamente a biomassa como fonte renovável, devido à ausência de infraestrutura e políticas específicas. Como destacam Oliveira (2022) e Martins *et al.* (2014), a expansão da bioeletricidade (definida como a geração de energia elétrica a partir de biomassa) enfrenta entraves financeiros, regulatórios e logísticos que comprometem sua interiorização e competitividade em relação a outras fontes, como a solar e a eólica.

O histórico de expansão da bioeletricidade no Brasil é expressivo, mas irregular. Entre 2005 e 2025 foram adicionados 14.459 MW à capacidade instalada de geração por biomassa, com uma média anual de 657 MW. O pico ocorreu em 2010, com 1.750 MW, e a previsão para 2025 é de 793 MW. Esses números reforçam a viabilidade da biomassa, embora indiquem que o País ainda está aquém do seu potencial pleno (UNICA, 2025; Pires, 2023).

Um dos principais desafios para consolidar a biomassa como fonte estratégica é sua inserção plena no Sistema Interligado Nacional (SIN). Barreiras como a dificuldade de conexão à rede, baixa atratividade nos leilões e lacunas regulatórias limitam a integração da bioeletricidade (Rocha, 2020). Mesmo reconhecida como fonte limpa e renovável, a biomassa carece de condições equitativas de concorrência no mercado energético.

Em consonância com os princípios da EC já destacados, a biomassa, especialmente o bagaço da cana, representa uma solução concreta para o reaproveitamento de resíduos na geração de energia limpa e eficiente (Fernandes, 2015; Cascaret-Carmenaty, 2024; Coelho Junior *et al.*, 2024b). Portanto, deve ser compreendida não como uma fonte complementar, mas

como um componente estratégico da transição energética brasileira. Sua expansão exige a articulação entre políticas públicas, planejamento setorial e inovação tecnológica. Diante de seu potencial consolidado, a biomassa desempenha um papel central na construção de uma matriz elétrica diversificada, limpa e resiliente.

3. Metodologia

Este estudo adota uma abordagem qualitativa e descritiva, baseada na análise de dados secundários sobre a participação do bagaço da cana-de-açúcar na matriz energética brasileira. A pesquisa utiliza séries históricas de produção de bioeletricidade a partir da biomassa, permitindo a avaliação da evolução temporal dessa fonte energética e seu reflexo na diversificação do setor elétrico.

Os dados secundários são abertos, oriundos dos sítios da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (2025), que vincula o Sistema de Informações de Geração da ANEEL – SIGA (2025), o Sistema de Informações Energéticas – SIE, a Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2007) e o Relatório de Acompanhamento da Expansão da Oferta de Geração de Energia Elétrica – RALIE (2024), além dos dados complementares da UNICAdata (2025) e do portal NOVACANA (2025). A coleta, realizada no período de fevereiro e março de 2025, foi tabulada em *software* Excel. Para completar a análise, utilizou-se o método de Análise Sistemática de Literatura (ASL), envolvendo a técnica PICO (Quadro 1).

Quadro 1. Detalhamento do Método PICO

Elemento	Definição	Aplicação na Pesquisa
P (Problema)	O tema central ou contexto da pesquisa	Participação do bagaço da cana-de-açúcar na matriz energética brasileira
I (Intervenção)	A abordagem, tecnologia ou fator analisado	Uso do bagaço de cana na bioeletricidade
C (Comparação)	Fonte de dados para análise temporal	Dados secundários de ANEEL (SIGA, SIE), EPE, RALIE, UNICAdata e NOVACANA
O (Outcomes - Desfechos)	Os impactos ou resultados esperados	Reflexos na diversificação da geração de eletricidade

Fonte: Dados da pesquisa (2025).

No segundo passo foram estabelecidos critérios de inclusão e exclusão, priorizando publicações que utilizassem conceitos de EC no ambiente construído. Além disso, os artigos precisavam estar contextualizados em bioenergia, ou seja, não foram consideradas publicações que realizassem análises químicas de materiais, validações mecânicas do uso de resíduos ou que abordassem indústrias fora do setor sucroenergético. O passo seguinte consistiu na seleção de publicações na base de dados Scopus e Scielo, utilizando três combinações de operadores de busca e operadores *Booleanos*, conforme descrito a seguir.

Quadro 2. String das Bases de Dados

Base de Dados	String de busca	Resultados
SciELO	TITLE-ABS-KEY ("sugarcane bagasse" OR "sugarcane biomass")	403
	TITLE-ABS-KEY ("bioenergy" OR "bioelectricity" OR "biopower")	533
	TITLE-ABS-KEY ("energy transition" OR "renewable energy" OR "energy matrix")	1054
Total Scielo		1.990
SCOPUS	TITLE-ABS-KEY ("sugarcane bagasse" OR "sugarcane biomass") AND ("bioenergy" OR "bioelectricity" OR "biopower")	259
	TITLE-ABS-KEY ("sugarcane bagasse" OR "sugarcane biomass") AND ("energy transition" OR "renewable energy" OR "energy matrix")	259
Total Scopus		518
Total geral		2.508

Fonte: Dados da pesquisa (2025).

O protocolo PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), onde se observou 11 trabalhos repetidos nas bases de dados, resultando em 95 trabalhos. O *Screening* secundário levou em consideração apenas o conteúdo pertinente sobre bagaço da cana, produção de energia, fontes renováveis e bioeletricidade, resultando em 43 trabalhos que foram utilizados para o diálogo com os dados encontrados. A tabulação e organização das etapas da Revisão Sistemática de Literatura ocorreram com uso do *software* Zotero (7.0.15), além disso, foi utilizado a Inteligência Artificial (Chat GPT em sua versão gratuita) apenas para correção ortográfica e gramatical, com base no texto original escrito pelos proponentes (Anexo 1).

4. Resultados e Discussões

Para uma exposição mais didática, esta seção está dividida em: produção e disponibilidade do bagaço da cana (4.1), bioeletricidade na matriz energética (4.2), impactos ambientais e econômicos (4.3) e políticas públicas e incentivos (4.4).

4.1 Produção e Disponibilidade do Bagaço da Cana

A cana-de-açúcar é uma das culturas agrícolas relevantes para a economia brasileira, tanto por sua contribuição à cadeia sucroenergética quanto pela geração de subprodutos com alto valor agregado. Entre esses subprodutos, o bagaço da cana se destaca como o principal resíduo gerado no processo de moagem, representando cerca de 30% da massa processada. Essa biomassa é amplamente utilizada como fonte de energia nas próprias usinas, mas seu potencial vai além do uso interno, ganhando destaque como recurso energético estratégico para o País (Ferreira *et al.*, 2022a; Coelho; Bragagnolo, 2024; UNICA, 2025).

Em 2023, o Brasil manteve sua posição de liderança mundial na produção de cana-de-açúcar, com destaque para os estados de São Paulo, Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso do Sul e Paraná (Figura 2). A estimativa é de que mais de 630 milhões de toneladas de cana tenham

sido processadas no ciclo 2022/2023, resultando em aproximadamente 190 milhões de toneladas de bagaço úmido, segundo dados da UNICA e da EPE. Essa quantidade representa uma disponibilidade significativa de matéria-prima para fins energéticos, podendo ser aproveitada de forma mais ampla por meio da cogeração (BRASIL, 2020; SCE, 2025; UNICA, 2025)

Tabela 1. Distribuição de Usinas de Biomassa da Cana

Estado	Quantidade	MW	% MW total
AL	21	358	2,8%
AM	1	5	0,0%
BA	2	22	0,2%
ES	3	69	0,5%
GO	37	1499	11,8%
MA	2	9	0,1%
MG	50	1700	13,4%
MS	24	1159	9,1%
MT	9	204	1,6%
PA	2	21	0,2%
PB	5	102	0,8%
PE	18	289	2,3%
PI	1	24	0,2%
PR	29	593	4,7%
RJ	2	49	0,4%
RN	2	61	0,5%
SC	3	11	0,1%
SE	5	60	0,5%
SP	211	6383	50,3%
TO	1	80	0,6%
Total	428	12698	100%

Fonte: EPE (2025).

A regionalização da produção tem forte influência na distribuição do bagaço disponível. O Estado de São Paulo, por exemplo, concentra 50,3% da moagem nacional e, conseqüentemente, da oferta de bagaço, o que justifica a forte presença de usinas de cogeração no território paulista. Minas Gerais e Goiás também aparecem como centros relevantes para a produção de biomassa, especialmente nos polos canavieiros localizados no Triângulo Mineiro e no sul goiano (Vasconcelos, 2002; Oliveira, 2007; Trombeta; Caixeta, 2017; Medeiros; Fabre; Silva, 2024)

A geração do bagaço acompanha o ciclo agrícola da cana, com maior disponibilidade no período da safra (abril a novembro). Esse aspecto sazonal impõe desafios logísticos e operacionais, especialmente para as usinas que pretendem armazenar biomassa para geração de energia durante a entressafra. A umidade do bagaço e a sua degradação natural ao longo do tempo exigem estratégias adequadas de conservação, como o uso de silagens ou o aproveitamento imediato na geração de energia (Bastos Do Carmo, 2013; Souza; Souza; Souza, 2023; Coelho; Bragagnolo, 2024).

Do ponto de vista energético, o bagaço possui um poder calorífico inferior médio de 8.600 kJ/kg na forma úmida, o que o torna altamente competitivo em relação a outras fontes renováveis. Com a utilização de caldeiras eficientes e sistemas de cogeração modernos, é possível gerar uma quantidade significativa de eletricidade e vapor, contribuindo para a autossuficiência energética das usinas e para o fornecimento de excedentes ao SIN (Silva, 2016; Teixeira *et al.*, 2019; Wiesberg *et al.*, 2021; Chinnaraj *et al.*, 2022)

O aproveitamento energético do bagaço tem se intensificado nos últimos anos, tanto por razões econômicas quanto ambientais. A valorização dos Créditos de Descarbonização

(CBIOs), no âmbito do RenovaBio, tem estimulado a adoção de práticas mais eficientes de geração de energia a partir de resíduos agrícolas. Além disso, a substituição de combustíveis fósseis por biomassa contribui diretamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa, alinhando o setor sucroenergético aos compromissos climáticos assumidos pelo Brasil em âmbito mundial (Oliveira, 2007; Lima; White, 2017; Garcia *et al.*, 2019; Gomes, 2019; Bahín-Deroncelé, 2023a; GARCIA, 2024)

Apesar do potencial, parte do bagaço ainda é subutilizada, sendo que muitas usinas o utilizam apenas para suprir suas necessidades internas, sem aproveitar a oportunidade de comercializar o excedente como bioeletricidade. Essa realidade está associada a diversos fatores, como a ausência de infraestrutura adequada para conexão à rede, a baixa atratividade dos leilões de energia e os custos de modernização dos sistemas de cogeração (Bastos Do Carmo, 2013; Nakai, 2016; Vivian, 2022; Yepes, 2022)

Estudos da EPE (2020, 2024) apontam que, se todo o bagaço disponível fosse aproveitado de forma eficiente para geração de energia, seria possível adicionar até 15 GW à capacidade instalada de bioeletricidade no Brasil. Isso representa um acréscimo expressivo em comparação à capacidade atual, que gira em torno de 12,7 GW em biomassa, dos quais cerca de 70% provêm do bagaço da cana (Trombeta; Caixeta, 2017; Review Energy, 2023; Napoli, 2024).

A expansão do uso do bagaço como fonte energética também depende da articulação com políticas públicas, incentivos à inovação tecnológica e estímulos ao uso de sistemas de cogeração de alta eficiência. Algumas iniciativas regionais têm buscado integrar o setor energético ao planejamento agrícola, otimizando a logística de transporte e a estocagem da biomassa, mas ainda há lacunas a serem preenchidas para garantir um aproveitamento mais amplo.

Portanto, a produção e disponibilidade dessa matéria prima no Brasil representam não apenas uma oportunidade econômica para o setor sucroenergético, mas também um instrumento estratégico para ampliar a segurança energética nacional e avançar na transição para uma matriz mais sustentável. A valorização desse subproduto, dentro de uma lógica de EC, é fundamental para consolidar o papel da biomassa na matriz elétrica do País.

4.2 Bioeletricidade na Matriz Energética

O bagaço da cana-de-açúcar, gerado em larga escala durante a moagem da cana, tem papel fundamental na diversificação da matriz elétrica nacional, especialmente por sua origem renovável, seu potencial de redução de emissões e sua capacidade de geração distribuída. Nos últimos dez anos, o avanço da bioeletricidade tem refletido uma tendência global de valorização de fontes energéticas sustentáveis, com ganhos econômicos e ambientais expressivos (Rípoli; Molina Jr.; Rípoli, 2000)

Atualmente, cerca de 8,4% da matriz elétrica brasileira é composta por biomassa, sendo que mais de 70% dessa participação advém desse bagaço. Isso posiciona o Brasil como um dos líderes mundiais na geração de eletricidade a partir de resíduos agrícolas, com uma estrutura já consolidada no setor sucroenergético. O modelo predominante é o da cogeração, no qual a biomassa é utilizada para produzir simultaneamente calor e eletricidade, aumentando a eficiência energética das usinas (Bastos Do Carmo, 2013; Souza; Souza; Souza, 2023)

A cogeração nas usinas de açúcar e etanol tem permitido não apenas a autossuficiência energética dessas unidades industriais, mas também a exportação de excedentes para o SIN. Em 2023, mais de 620 usinas estavam aptas a fornecer bioeletricidade, com destaque para São Paulo, que sozinho concentrava cerca de 39,8% da capacidade instalada de geração a partir de

biomassa (UNICA, 2025). Essa realidade demonstra o papel relevante da bioeletricidade na descentralização do sistema elétrico brasileiro (Oliveira, 2007; SCE, 2025).

O grande diferencial da bioeletricidade frente a outras fontes renováveis, como a solar e a eólica, está na sua previsibilidade e estabilidade. Enquanto o sol e o vento são intermitentes, a queima do bagaço pode ser gerenciada conforme a necessidade de demanda, permitindo o despacho programado de energia ao longo do dia. Essa característica contribui para a segurança energética e para o equilíbrio de sua oferta nos momentos de maior consumo, principalmente durante a entressafra hidrelétrica (Carvalho, 2021; Ferreira; Ferreira Júnior; Braz, 2024)

Embora o potencial técnico da bioeletricidade seja elevado, a sua exploração ainda está aquém do ideal. A EPE estima que, com o pleno aproveitamento do bagaço disponível, seria possível dobrar a atual capacidade de geração elétrica a partir dessa fonte. Contudo, diversos desafios precisam ser enfrentados, como a modernização das caldeiras, a ampliação da infraestrutura de conexão e a melhoria dos contratos de venda de energia. Esses gargalos limitam a competitividade da biomassa frente às demais fontes, especialmente nos leilões regulados (BRASIL, 2020; Coelho; Bragagnolo, 2024; ANEEL, 2025)

Outro aspecto importante é a inserção dessa fonte no mercado livre de energia. A partir de 2024, a abertura gradual desse mercado deve beneficiar as usinas cogeradoras, permitindo a negociação direta com consumidores interessados em energia renovável e rastreável. Essa flexibilidade tende a impulsionar a viabilidade econômica da biomassa, ampliando sua participação na matriz elétrica e incentivando a adoção de tecnologias mais eficientes (Blanco-Orozco, 2018; Catelan, 2019; Ferreira *et al.*, 2022b; SCE, 2025)

As projeções para os próximos anos indicam uma tendência de crescimento da bioeletricidade, especialmente em função das metas de descarbonização e do estímulo à EC. A valorização dos CBIOS, os incentivos do Programa RenovaBio e a atualização dos marcos regulatórios são fatores que colaboram para esse cenário. No entanto, é necessário um alinhamento maior entre os agentes do setor para garantir a estabilidade dos investimentos e a segurança jurídica das operações (Bahín-Deroncelé, 2023b; Cascaret-Carmenaty, 2024)

A presença da bioeletricidade também favorece a regionalização da produção de energia, pois se concentra em regiões com forte atividade agroindustrial, como o Centro-Sul do Brasil. Essa distribuição territorial contribui para a redução de perdas na transmissão e para o fortalecimento das economias locais, além de permitir que a geração de energia esteja mais próxima dos maiores centros consumidores. Isso é relevante em áreas onde o acesso à infraestrutura elétrica ainda é limitado (Watanabe *et al.*, 2020; Coelho Junior *et al.*, 2024a; Díaz Molina *et al.*, 2024)

Do ponto de vista ambiental, a geração de eletricidade a partir do bagaço é uma estratégia eficiente de reaproveitamento de resíduos e de redução de impactos ambientais. A substituição de fontes fósseis por biomassa contribui para mitigar as emissões de gases de efeito estufa, especialmente quando o processo de cogeração é realizado com alto grau de eficiência. Ademais, o uso do bagaço evita o acúmulo de resíduos nas usinas, promovendo práticas mais limpas e sustentáveis (Santos; Nascimento; Alves, 2017; Frehner *et al.*, 2024).

Portanto, a bioeletricidade proveniente dessa fonte representa uma oportunidade concreta para fortalecer a matriz elétrica brasileira e promover o desenvolvimento, tanto no crescimento econômico quanto no avanço social e ambiental. O uso da bioeletricidade proveniente do bagaço de cana pode ser uma ferramenta para promover o desenvolvimento sustentável, e avançar na transição energética. O desafio está em transformar esse potencial em realidade por meio de incentivos consistentes, investimentos estruturantes e estratégias que valorizem a energia gerada a partir de resíduos agrícolas.

4.3 Impactos Ambientais e Econômicos

Conforme salientado, a geração de bioeletricidade a partir do bagaço da cana-de-açúcar apresenta uma série de impactos positivos tanto no campo ambiental quanto no econômico. No aspecto ambiental, destaca-se principalmente a substituição de fontes fósseis e a consequente redução das emissões de gases de efeito estufa. O uso do bagaço, por ser uma biomassa residual, não implica em novos desmatamentos ou mudanças de uso da terra, o que garante seu papel como uma fonte limpa e renovável de energia.

A conversão do bagaço em energia também contribui para o controle de resíduos no setor sucroenergético. Ao invés de acumular volumes elevados de biomassa nas usinas, o reaproveitamento do material como insumo energético evita a decomposição orgânica descontrolada, que poderia liberar metano (CH_4), um gás com potencial de aquecimento global muito superior ao dióxido de carbono (CO_2). Essa prática fortalece os princípios da EC e estimula uma gestão mais eficiente de resíduos sólidos no meio rural (Vera *et al.*, 2020; Weetman, 2019; Domingues, 2023; Cascaret-Carmenaty, 2024).

Além da mitigação das emissões diretas, a substituição de termelétricas movidas a carvão ou óleo combustível por usinas que operam com biomassa tem impacto direto na qualidade do ar local e na saúde da população. A menor emissão de material particulado e de óxidos de enxofre e nitrogênio reduz os riscos de doenças respiratórias e os custos associados ao sistema de saúde pública, sobretudo em regiões onde há maior concentração de geração térmica tradicional.

Do ponto de vista econômico, a valorização do bagaço como insumo energético cria oportunidades de geração de receita adicional para as usinas. Muitas delas, ao vender o excedente de eletricidade gerada para o SIN, têm conseguido diversificar sua fonte de renda, reduzindo a dependência do mercado de açúcar e etanol. Essa diversificação é especialmente importante em anos de oscilação nos preços internacionais desses produtos (Duran, 2023; Brasil, 2024).

A bioeletricidade também gera efeitos multiplicadores sobre o desenvolvimento. A ampliação da cogeração contribui para a criação de empregos diretos e indiretos nas áreas de operação, manutenção, transporte, logística e engenharia. A formação de polos tecnológicos e industriais no entorno das usinas gera dinamismo econômico e aumenta a arrecadação de tributos nos municípios produtores, o que fortalece a infraestrutura local (Cardoso, 2013).

Outro impacto positivo está relacionado à segurança energética. Ao incorporar a bioeletricidade como uma fonte firme e previsível, o Brasil reduz sua vulnerabilidade a eventos climáticos extremos que afetam a geração hidrelétrica, como secas prolongadas. A diversificação da matriz elétrica, nesse sentido, fortalece a resiliência do sistema e melhora o planejamento de longo prazo no setor energético nacional (Batista, 2024).

A produção de energia a partir do bagaço também promove ganhos em eficiência energética. Usinas que operam com sistemas modernos de cogeração conseguem aproveitar até 80% da energia contida na biomassa, o que as torna mais sustentáveis e competitivas em comparação com termelétricas convencionais. Esse aumento na eficiência reduz o consumo de recursos e os custos de operação, melhorando a rentabilidade do setor sucroenergético (Brasil, 2007; García-Ramos; Quirós-Roque; Rosales-Mendoza, 2022).

Além disso, a bioeletricidade pode gerar créditos de descarbonização, como os CBIOS previstos no RenovaBio. Essa política pública permite que usinas certificadas comercializem seus ganhos ambientais no mercado financeiro, transformando a sustentabilidade em valor econômico. A comercialização dos CBIOS tem se mostrado uma fonte importante de receita para empresas que investem em eficiência energética e redução de emissões (Bravo Hidalgo, 2019; Barragán-Escandón, 2019; Andrade; Rodrigues, 2024).

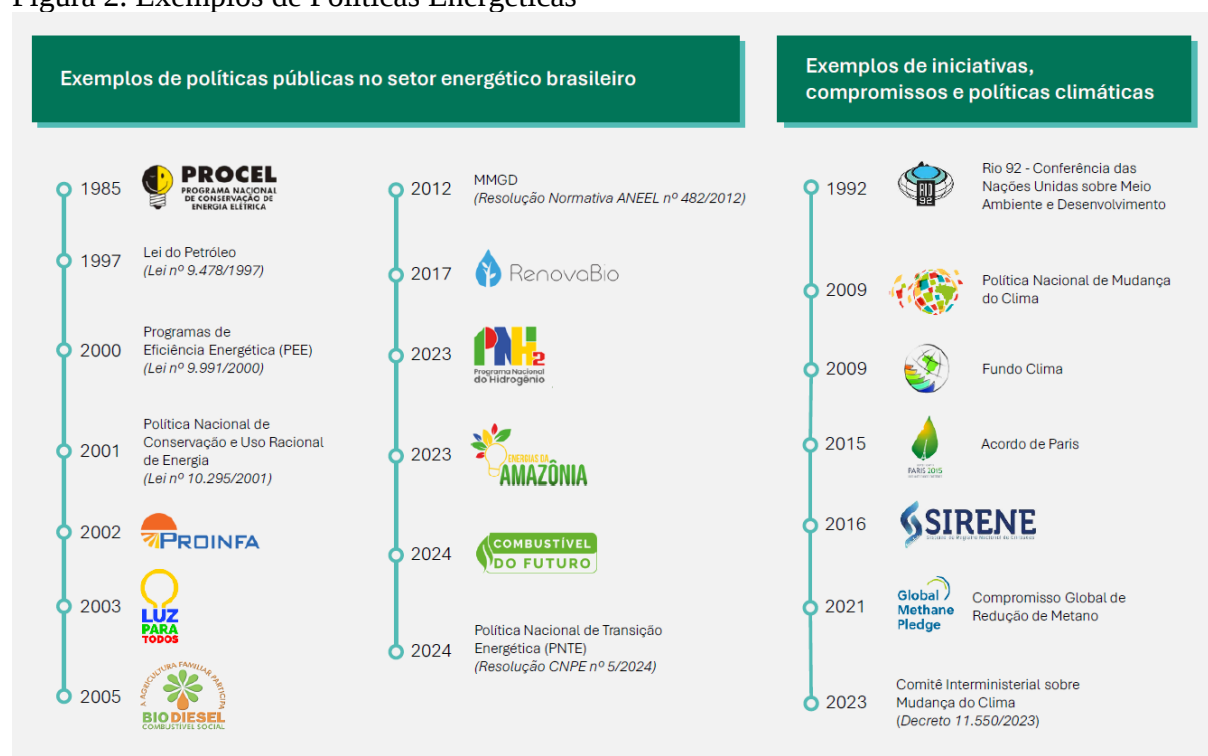
Mesmo com tantos benefícios, os impactos positivos da bioeletricidade ainda são subaproveitados. Barreiras como a falta de políticas de longo prazo, a ausência de incentivos específicos para projetos de cogeração e os entraves burocráticos para conexão à rede dificultam a expansão desse modelo. O reconhecimento dos benefícios ambientais e econômicos do bagaço ainda precisa ser refletido de forma mais contundente nas políticas públicas de energia e desenvolvimento rural.

Portanto, os impactos ambientais e econômicos da utilização do bagaço da cana na geração de bioeletricidade revelam-se múltiplos e interdependentes. Ao mesmo tempo em que promove a sustentabilidade ambiental, a bioenergia impulsiona a economia local, fortalece o setor agroindustrial e contribui para a segurança energética do País. Sua valorização representa uma estratégia integrada de desenvolvimento, capaz de aliar competitividade, inovação e compromisso com o meio ambiente.

4.4 Políticas Públicas e Incentivos

A expansão da bioeletricidade no Brasil, especialmente aquela proveniente do bagaço da cana-de-açúcar, está intimamente ligada à existência de políticas públicas que incentivem a geração de energia a partir de fontes renováveis. Nos últimos anos, diversos instrumentos foram implementados com o objetivo de fomentar a diversificação da matriz elétrica e promover o uso de biomassa na geração energética. Ainda assim, os desafios regulatórios e institucionais permanecem como entraves à consolidação do setor (Arias, 2022). A Figura 2 cita exemplos de políticas energéticas.

Figura 2. Exemplos de Políticas Energéticas



Fonte: EPE (2025).

Um dos principais marcos legais do setor é o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), instituído em 2002. O Programa teve um papel importante ao garantir contratos de compra de energia de longo prazo para projetos de

biomassa, eólica e pequenas centrais hidrelétricas. No entanto, com o passar dos anos, o PROINFA perdeu protagonismo, sendo substituído por novos mecanismos de comercialização e leilões do governo federal (BRASIL, [s. d.]).

Outro avanço importante foi a criação da Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), que entrou em vigor em 2017. Embora tenha foco prioritário no setor de transportes, o Programa contribui indiretamente para a expansão da bioeletricidade ao estimular práticas mais eficientes e sustentáveis na cadeia produtiva da cana-de-açúcar. Usinas que produzem etanol e eletricidade podem ser certificadas e comercializar CBIOS, agregando valor à energia gerada a partir do bagaço (Anser, 2020; Deshavath; Goud; Veeranki, 2024).

No âmbito do financiamento, o BNDES tem papel estratégico no apoio à infraestrutura de energia renovável. O Banco oferece linhas de crédito específicas para projetos de biomassa, incluindo a modernização de caldeiras, sistemas de cogeração e equipamentos de controle ambiental. A ampliação da disponibilidade de crédito a taxas competitivas é fundamental para tornar viáveis projetos de médio e grande porte no interior do País (Brasil, 2007, 2024; Ferreira *et al.*, 2022a).

A ANEEL atua como órgão regulador do setor e é responsável por normatizar e fiscalizar os empreendimentos de geração de energia. Embora a agência tenha avançado em algumas diretrizes voltadas à biomassa, a falta de mecanismos específicos para facilitar a conexão das usinas ao SIN ainda é apontada como um dos principais gargalos. Em muitos casos, usinas prontas para operar não conseguem injetar energia por falta de infraestrutura de rede ou entraves regulatórios (Brasil, 2020; ANEEL, 2025).

A ausência de leilões dedicados à bioeletricidade tem sido outro fator limitante. Ao contrário das fontes solar e eólica, que têm recebido incentivos mais robustos e chamadas específicas nos leilões de energia, a biomassa tem enfrentado dificuldades para competir em igualdade de condições. Isso se deve, em parte, à precificação do MWh nos leilões e à falta de reconhecimento dos benefícios ambientais e sociais associados à geração de energia a partir de resíduos agrícolas (Oliveira, 2007; SCE, 2025).

Além das políticas nacionais, algumas iniciativas estaduais têm se destacado. O Estado de São Paulo, por exemplo, possui programas que incentivam a geração distribuída e a eficiência energética no setor agroindustrial. Parcerias entre governos locais e cooperativas de produtores têm contribuído para o avanço de pequenos projetos de cogeração, especialmente em regiões canavieiras. Essa descentralização de políticas pode ser uma alternativa interessante para impulsionar a bioeletricidade em outras regiões produtoras (Alves *et al.*, 2010).

Para que os incentivos surtam efeitos práticos, é fundamental que haja previsibilidade regulatória e planejamento de longo prazo. O setor de bioenergia, por sua natureza, requer investimentos elevados e horizontes de retorno amplos, o que exige segurança jurídica e estabilidade institucional. Mudanças bruscas em regras, tarifas ou exigências ambientais podem desestimular investidores e comprometer a continuidade dos projetos em andamento (Salimi; Amidpour, 2022; Brasil, 2024).

Há também espaço para inovação em políticas públicas, como a criação de um “certificado verde” específico para energia de biomassa, que reconheça os benefícios socioambientais da bioeletricidade. Outro caminho é o fortalecimento do mercado livre de energia, onde consumidores podem optar por contratar diretamente energia renovável, abrindo novas oportunidades para as usinas que operam com bagaço de cana (Brasil, [s. d.]; Tolmasquim, 2016; Andrade; Rodrigues, 2024).

Em síntese, as políticas públicas e os instrumentos de incentivo são peças-chave para consolidar a bioeletricidade como uma fonte estratégica na matriz elétrica brasileira. O fortalecimento de programas como o RenovaBio, a modernização regulatória promovida pela ANEEL, o financiamento adequado via BNDES e a valorização dos benefícios ambientais e

regionais da biomassa são passos fundamentais para que o País aproveite todo o potencial energético do setor sucroenergético.

5. Considerações Finais

O presente trabalho teve como objetivo analisar o potencial energético do bagaço da cana-de-açúcar no contexto da matriz elétrica brasileira, com ênfase na produção, disponibilidade, impactos e políticas públicas voltadas à bioeletricidade. A investigação buscou compreender de que forma esse subproduto dessa cadeia pode contribuir para a segurança energética e a sustentabilidade ambiental.

O objetivo da pesquisa foi alcançado por meio de uma revisão sistemática da literatura, apoiada por uma análise crítica de 43 estudos relevantes, que trataram da cogeração, conversão energética, impactos ambientais, viabilidade econômica e instrumentos de incentivo à geração de bioeletricidade a partir do bagaço. Essa abordagem permitiu evidenciar a importância estratégica desse recurso no atual cenário de transição energética quando comparado com os dados da produção da cana, etanol e biomassa presentes nos sítios da Agência Nacional de Energia Elétrica, do Sistema de Informações de Geração da ANEEL, do Sistema de Informações Energéticas, da Empresa de Pesquisa Energética, do Relatório de Acompanhamento da Expansão da Oferta de Geração de Energia Elétrica, dos dados complementares da UNICadata e do portal NOVACANA.

Os principais resultados apontam que o bagaço da cana possui alto poder calorífico, ampla disponibilidade nas regiões produtoras e potencial para aumentar significativamente a oferta de energia renovável no Brasil. Não obstante, verificou-se que, embora haja infraestrutura e conhecimento técnico disponíveis, a utilização plena do bagaço ainda é limitada por barreiras logísticas, regulatórias e institucionais. Além disso, a inserção da bioeletricidade no mercado livre de energia e os mecanismos de incentivo como os CBIOS têm ampliado as perspectivas para o setor, mas ainda de forma desigual entre as regiões.

As lacunas identificadas ao longo da pesquisa indicam a necessidade de estudos futuros voltados à integração territorial entre a produção agroindustrial e a infraestrutura energética, bem como investigações que aprofundem a eficiência de novos modelos de cogeração e o papel da bioeletricidade no cumprimento das metas climáticas nacionais. Também se destaca a carência de análises que explorem o impacto social da expansão da bioenergia em comunidades locais e nas cadeias produtivas associadas.

Assim, o bagaço da cana-de-açúcar se confirma como um vetor relevante para a matriz elétrica brasileira, e sua valorização adequada demanda um esforço conjunto entre o setor produtivo, o Estado e a sociedade na construção de políticas públicas integradas e sustentáveis. Como sugestão para estudos futuros, seria importante avaliar os gargalos que dificultam o amplo uso da cogeração de energia excedente, considerando a perspectiva dos *players* que podem comercializar esse produto.

Referências

- ALVES, H. P. da F.; ALVES, C. D.; PEREIRA, M. N. Dinâmicas de urbanização na hiperperiferia da metrópole de São Paulo: análise dos processos de expansão urbana e das situações de vulnerabilidade socioambiental em escala intraurbana. **Revista Brasileira de Estudos de População**, v. 27, n. 1, p. 141-159, 2010.
- ANDRADE, V. C. S. de; RODRIGUES, G. S. de S. C. Análise da Formulação da Política Nacional de Biocombustíveis - Renovabio: o Territorial, o Político e o Econômico. **Sociedade & Natureza**, v. 36, e71461, 2024.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **ANEEL | Portal Reports Abertos**. 2025. Disponível em: <https://portalrelatorios.aneel.gov.br/Ralie>. Acesso em: 13 mar. 2025.
- ANSER, I. S.; HANIF, I; ALHARTHI, M; CHAUDHRY, I. S. Impact of fossil fuels, renewable energy consumption and industrial growth on carbon emissions in Latin American and Caribbean economies. **Atmosfera**, v. 33, n. 1, p. 201-213, 2020.
- ARIAS, D., GAVELA, P.; RIOFRIO, J. Estado del Arte: Incentivos y Estrategias para la Penetración de Energía Renovable. **Revista Técnica Energía**, v. 18, n. 2, p. 91-103, 2022.
- BAHÍN-DERONCELÉ, L J.; QUESADA-GONZÁLEZ, O.; CASCARET-CARMENATY, D. A.; ODIO-GONZÁLEZ, R. A.; CANTOS-MACÍAS, M. Á. Obtención de material carbonoso de bagazo de caña de azúcar con activación salina. **Revista Cubana de Química**, v. 35, n. 2, p. 253-273, 2023.
- BARRAGÁN-ESCANDÓN, E.; ZALAMEA-LEÓN, E.; TERRADOS-CEPEDA, J.; VANEGAS-PERALTA, P. Factores que influyen en la selección de energías renovables en la ciudad. **EURE (Santiago)**, v. 45, n. 134, p. 259-277, 2019.
- BASTOS DO CARMO, V. **Avaliação da eficiência energética renovável de biomassas alternativas para geração de eletricidade**. 2013. Tese de Doutorado em Engenharia Química - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2013.
- BATISTA, R. R. **Análise técnico-econômica do aproveitamento da palhada de cana-de-açúcar para fins energéticos**. 2017. 75 f. Dissertação (Mestrado em Bioenergia) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina.
- BLANCO-OROZCO, N. V. Productividad del uso de recursos energéticos en los agentes del mercado eléctrico nicaragüense con sistemas de cogeneración. **Revista Tecnología en Marcha**, v. 31, n. 1, p. 47-57, 2018.
- BRASIL. **Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis 2023**. 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/analise-de-conjuntura-dos-biocombustiveis-2023>. Acesso em: 2 abr. 2025.
- BRASIL. **Plano Nacional De Energia 2030**. Rio de Janeiro: EPE, 2007. (Empresa de Pesquisa Energética, Plano Nacional de Energia 2030).
- BRASIL. **Plano Nacional de Energia 2050**. Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia, 2020. Empresa de Pesquisa Energética. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-563/Relatorio%20Final%20do%20PNE%202050.pdf>. Acesso em: 12 mar. 2025.

BRASIL. **PROINFA**. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://enbpar.gov.br/areas-de-atuacao/programas-setorias/proinfa/>. Acesso em: 2 abr. 2025.

HIDALGO, D. B.; YANES, J. P. M. Modelos de difusión de tecnologías energéticas renovable. **Ingeniería Energética**, v. 40, n. 1, p. 30-41, 2019.

CARDOSO, B. O. **Avaliação da sustentabilidade de sistemas de produção da cana-de-açúcar no estado de São Paulo**: uma proposta metodológica e de modelo conceitual. 2013. 273 f. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia) - Universidade Federal de São Carlos, Campinas.

CARVALHO, N. R.; BARROS, J. L. de; SILVA, D. A. DA; NAKASHIMA, G. T.; YAMAJI, F. M. Caracterização Física e Química da Biomassa Usada Como Combustível Sólido em uma Caldeira. **Química Nova**, v. 44, n. 1, p. 35-40, 2021.

CASCARET-CARMENATY, D. A.; MUNÉ-BANDERA, P. D.; CANTOS-MACÍAS, M. Á.; QUESADA-GONZÁLEZ, O. Uso del bagazo de caña de azúcar y la activación básica, para la síntesis de carbón. **Revista Cubana de Química**, v. 36, n. 1, p. 71-80, 2024.

CATELAN, T. C.; PINOTTI, L. M. Avanço das pesquisas envolvendo *Aspergillus niger* e bagaço da cana-de-açúcar como fonte de carbono visando à produção de celulases: uma análise bibliométrica. **Matéria**, v. 24, n. 2, 2019.

WEETMAN, C. **Economia circular**: conceitos e estratégias para fazer negócios de forma mais inteligente, sustentável e lucrativa. São Paulo: Autêntica Editora, 2019.

CHINNARAJ, S.; THINAGARAN S.; BALAMURUGAN S.; VARADARAJAN S. J.; SEENIVASAN R. Circular Economy For Resource Conservation, Ghg Emission Reduction And Carbon Sequestration. **IPPTA: Quarterly Journal of Indian Pulp and Paper Technical Association**, v. 34 n. 3, p. 67-75, 2022.

COELHO, L. F.; BRAGAGNOLO, C. Fatores determinantes da eficiência técnica da cana-de-açúcar nos polos de produção do sudeste e centro-oeste brasileiros. **Estudos Econômicos**, v. 54, n. 1, p. 167-204, 2024.

COELHO JUNIOR, L. M. SANTOS JÚNIOR, E. P.; DA SILVA, C. F. F.; DE OLIVEIRA, B. H. C.; DANTAS, J. B. C.; DOS REIS, J. V.; SCHRAMM, V. B.; SCHRAMM, F.; CARVALHO, M. Supply of bioelectricity from sugarcane bagasse in Brazil: a space-time analysis. **Sustainable Environment Research**. BioMed Central Ltda., 2024.

DANTAS, G. C. B.; RODRIGUES, M. V. S.; SILVA, L. M. X.; AQUINO, M. D. de; THOMAZ, A. C. F. Panorama do setor eólico no estado do Rio Grande do Norte no período 2004-2017. **Estudos Avançados**, v. 35. n. 102, p. 79-94, 2021.

DESHAVATH, N. N.; GOUD, V. V.; VEERANKI, V. D. Commercialization of 2G bioethanol as a transportation fuel for the sustainable energy, environment, and economic growth of India: theoretical and empirical assessment of bioethanol potential from agriculture crop residues. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 14, n. 3, 2024.

DIAS, C. O; Paulo Sobrinho, E. V. de; SANTOS, I. N. Analysis of Complementarity between Renewable Sources in River Basins: a Proposed Methodology and a Brazilian Case Study Basins. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 67 e24240197, 2024.

DÍAZ MOLINA, N. A.; Olivier J. A. S.; Canepa, J. R. L.; Silvan, Rudy Solis; Jaramillo, D. A. F. Evaluation of the bioenergy potential of agricultural and agroindustrial waste generated in southeastern Mexico. **AIMS Energy**, v. 12, n. 5, p. 984-1009, 2024.

DOMINGUES, R. C.; GURGEL, A. DO M.; SANTOS, R. C. DOS; PEREIRA, J. A. DOS S.; BEZERRA, V. C. R.; SOUZA, W. V. DE; SANTOS, M. O. S. DOS; GURGEL, I. G. D. Queima de biomassa da cana-de-açúcar e hospitalizações de crianças e idosos por agravos respiratórios em Pernambuco, Brasil. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 39, n. 10, 2023.

DURAN, A. J. F. P.; LOPES JÚNIOR, W. E.; PAVESI, M.; FIORELLI, J. Avaliação de painéis de média densidade de bagaço de cana-de-açúcar. **Ciência Florestal**, v. 33, 2023.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Circular economy introduction**. 2017. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview>. Acesso em: 2 abr. 2025.

ENERGY INSTITUTE. **Home**. 2024. Disponível em: <https://www.energyinst.org/statistical-review/home>. Acesso em: 1 abr. 2025.

FERNANDES, S. E.; TASHIMA, M. M.; MORAES, J. C. B. DE; ISTUQUE, D. B.; FIORITI, C. F.; MELGES, J. L. P.; AKASAKI, J. L. Cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBC) como adição mineral em concretos para verificação de sua durabilidade. **Matéria**, v. 20, n. 04, p. 909-923, 2015.

FERREIRA, A. C. Desenvolvimento e geoeconômica da energia: uma antropologia da transição energética e dos confrontos por hegemonia no sistema interestatal energia. **Horizontes Antropológicos**, v. 30, n. 70, 2024.

FERREIRA, L. F.; SANTANA, J. R. DE; RAPINI, M. S.; MOURA, F. R. Financiamento à pesquisa em energia renovável no Brasil: uma análise a partir do Fundo Setorial de Energia. **Nova Economia**, v. 32, n. 2, p. 505-537, 2022.

FERREIRA, S. de O. P. M.; FERREIRA JÚNIOR, J. A. M.; BRAZ, R. L. Caracterização energética de biomassas agrícolas e florestais no estado de Pernambuco. **Ciência Florestal**, v. 34, n. 3, p. e73324, 2024.

FREHNER, A. L.; TENÓRIO, K. F.; GIRARDI, M. P.; SHIKIDA, P. F. A. Agroindústria canavieira e a economia circular: um estudo de caso na Usina De Bandeirantes (Paraná). **Revista Desenvolvimento, Fronteiras & Cidadania**, v. 8, p. 1-19, 2024.

GARCIA, D. P.; CARASCHI, J. C.; VENTORIM, G.; VIEIRA, F. H. A.; PROTÁSIO, T. DE P. Assessment of plant biomass for pellet production using multivariate statistics (PCA and HCA). **Renewable Energy**, v. 139, p. 796-805, 2019.

GARCIA, I. de O.; BORGHI, R. A. Z. Sustainable development in China: the pathway of decarbonizing the energy mix China. **Brazilian Journal of Political Economy**, v. 44, n. 4, 2024.

GARCIA, M. da S.; VILPOUX, O. F.; CEREDA, M. P. Distributed electricity generation from sugarcane for agricultural irrigation: A case study from the midwest region of Brazil. **Utilities Policy**. Elsevier Ltda, 2018.

GARCÍA-RAMOS, C. M.; QUIRÓS-ROQUE, V. A.; ROSALES-MENDOZA, L. E. Los residuos generados en la producción de la industria azucarera en los últimos 25 años. **Rev. Iberoam. Bioecon. Cambio Clim.**, v. 8, n. 16, p. 1979-1991, 2022.

GOMES, A. F.; MARTINS, M. A.; PEREIRA, E. G. Simulação computacional de dispositivos de mistura em câmara de combustão para gases de carbonização. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 2, p. 673-684, 2019.

LACERDA, M. S.; LEITÃO, F. O. Desafios e Oportunidades Da Economia Circular: O Caso dos Resíduos do Coco Verde / Challenges and opportunities of the circular economy: the case of green coconut residues. **Informe GEPEC**, v. 25, n. 2, p. 164-181, 2021.

LIMA, K. M.; DELGADO, D. B. de M.; MARTINS, D. D.; CARVALHO, M. Solar Energy and Biomass within Distributed Generation for a Northeast Brazil Hotel. **Energies**, v. 15, (23), MDPI, , 2022.

LIMA, I. M.; WHITE, P. M. Sugarcane bagasse and leaf residue biochars as soil amendment for increased sugar and cane yields. **International Sugar Journal**, v. 119 (1421), Informa Agra, 2017.

MARTINS, F. D. A.; MARTIM, T.; CORRÊA, A. M.; OLIVEIRA, F. F. de. A produção do Etanol de segunda geração a partir do bagaço da cana-de-açúcar. **Revista Latino-Americana de Inovação e Engenharia de Produção**, v. 2, n. 3, p. 5, 2014.

MEDEIROS, M. B.; FABRE, J. D. A. R.; SILVA, M. P. D. Um panorama do uso de biocombustíveis como fonte de energia renovável no Brasil. **Revista ft**, v. 29, n. 140, p. 09-10, 2024.

NAKAI, É. S. **Quantificação da biomassa e estoque de carbono em diferentes coberturas vegetais por meio de sensoriamento remoto**. 2016. Tese de Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.

NAPOLI, E. **Brasil: matriz energética com maior uso de renováveis do G20**. 2024. Disponível em: <https://www.poder360.com.br/poder-energia/brasil-tem-a-matriz-energetica-com-maior-uso-de-renovaveis-do-g20/>. Acesso em: 26 fev. 2025.

NOVACANA DATA. **Levantamento da cogeração de energia no Brasil por usina**. 2025. Disponível em: <https://www.novacana.com/data/planilha/levantamento-da-cogeneracao-de-energia-no-brasil-por-usina/>. Acesso em: 2 abr. 2025.

OLIVEIRA, J. G. D. **Perspectivas para a cogeração com bagaço de cana-de-açúcar: potencial do mercado de carbono para o setor sucro-alcooleiro paulista**. 2007. 159 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

ONU. **Sustainable Development Goal 7: Energia limpa e acessível | As Nações Unidas no Brasil**. 2025. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/7>. Acesso em: 10 nov. 2024.

PARKER, C. Energy Transition In South America: elite's views in the mining sector, four cases under study. **Ambiente & Sociedade**, v. 21, 2018.

RAÍZEN. **Raízen | Redefinindo o futuro da energia**. 2025. Disponível em: <https://www.raizen.com.br/sustentabilidade/estrategia>. Acesso em: 1 abr. 2025.

REVIEW ENERGY. **Brasil bate record renovable: 3,218 MW de biomassa em 2023.** 2023. Disponível em: <https://www.review-energy.com/biomassa/brasil-bate-record-renovable-3-218-mw-de-biomassa-en-2023>. Acesso em: 25 fev. 2025.

RIAZA, J.; KHATAMI, R.; LEVENDIS, Y. A.; LEVENDIS Y.A.; ÁLVAREZ, L.; GIL, M. V.; PEVIDA, C.; RUBIERA, F.; PIS, J. J. Combustion of single biomass particles in air and in oxy-fuel conditions. **Biomass and Bioenergy**, v. 64, p. 162-174, Elsevier Ltda., 2014.

RÍPOLI, T. C. C.; MOLINA JR., W. F.; RÍPOLI, M. L. C. Energy potential of sugar cane biomass in Brazil. **Scientia Agricola**, v. 57, n. 4, p. 677-681, 2000.

SALIMI, M.; AMIDPOUR, M. The Impact of Energy Transition on the Geopolitical Importance of Oil-Exporting Countries. **World**, v. 3, n. 3, p. 607-618, 2022.

SANTOS, G. H. F.; NASCIMENTO, R. S. D.; ALVES, G. M. BIOMASSA COMO ENERGIA RENOVÁVEL NO BRASIL. **Uningá Review**, v. 29, n. 2, 2017.

SCE, S. de C., Permissões e Autorizações do Serviço de Energia Elétrica. **Dashboard Matriz Energética Brasileira**. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoibGE3NjVmYjAtNDZkZC00MDY4LTliNTItMTVkJZTU4NWYzYzFmIiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYjYtYjYtNDZkZmI05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBlMSIsImMiOiJR9>. Acesso em: 25 fev. 2025.

SILVA, V. B. da. **Avaliação do potencial energético da cana energia e do ciclo de vida da produção de eletricidade via combustão da biomassa.** João Pessoa, 2016. 102 f. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA) na Universidade Federal da Paraíba.

SOUZA, V. T. D. A.; SOUZA, Z. J. D.; SOUZA, R. T. D. A. OS RECURSOS NATURAIS E A MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA. In: III CONGRESSO NACIONAL ON-LINE DE CONSERVAÇÃO E EDUCAÇÃO AMBIENTAL, 2023. Anais do III Congresso Nacional On-line de Conservação e Educação Ambiental. **Revista Multidisciplinar de Educação e Meio Ambiente**, 2023.

TEIXEIRA, N. B.; PIZAIA, M. G.; CAMARA, M. R. G. da.; CALDARELLI, C. E.; ZAPPAROLI, I. D. Cogeração de energia elétrica utilizando o bagaço de cana-de-açúcar no Brasil e no Paraná em 2018. **A Economia em Revista - AERE**, v. 27, n. 1, p. 66-78, 2019.

TEIXEIRA, A. S.; de OLIVEIRA, M. C.; MENEZES, J. F.; GOUVEA, B. M.; TEIXEIRA, S. R.; GOMES, A. R. Poultry litter of wood shavings and/or sugarcane bagasse: animal performance and bed quality. **Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias**, v. 28, n. 3, p. 238-246, 2015.

TEIXEIRA, R. L. P.; PESSOA, Z. S. Energias renováveis e mudanças climáticas: análise de políticas públicas correlatas em estados do Nordeste brasileiro. **Ambiente & Sociedade**, v. 27, p. 55, 2024.

TOLMASQUIM, M. T. **Energia renovável: hidráulica, biomassa, eólica, solar, oceânica.** Rio de Janeiro: EPE, 2016.

TROMBETA, N. de C.; CAIXETA, J. V. 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, p. 479-496, 2017.

UNICA. **UNICA Data**. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://unicadata.com.br/>. Acesso em: 10 mar. 2025.

VASCONCELOS, Y. Não sobra nem o bagaço. **Revista Pesquisa Fapesp**, v. 77, p. 66-70, 2002.

VERA, I. HOEFNAGELS, R.; van der KOOIJ, A.; MORETTI, C.; JUNGINGER, M.; A carbon footprint assessment of multi-output biorefineries with international biomass supply: a case study for the Netherlands. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 14, n. 2, John Wiley and Sons Ltda., 2020.

VIVIAN, M. A.; SANTOS, J. R. S. dos; SEGURA, T. E. S.; SILVA JÚNIOR, F. G. da; 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.

WATANABE, M. D. B.; MORAIS, E. R.; CARDOSO, T. F.; CHAGAS, M. F.; JUNQUEIRA, T. L.; CARVALHO, D. J.; BONOMI, A. Process simulation of renewable electricity from sugarcane straw: Techno-economic assessment of retrofit scenarios in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 254, Elsevier Ltda., 2020.

WIESBERG, I. L.; MEDEIROS, J. L. de.; MELLO, R. V. P de.; MAIA, J. G. S. S.; BASTOS, J. B. V.; ARAÚJO, O. de Q. F. Bioenergy production from sugarcane bagasse with carbon capture and storage: Surrogate models for techno-economic decisions. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 150, Elsevier Ltda., 2021.

YEPES, J.; ORÉ, G.; ALCÂNTARA, M. S.; HERNANDEZ-FIGUEROA, H. E.; Teruel, B. Classification Of Sugarcane Yields According To Soil Fertility Properties Using Supervised Machine Learning Methods. **Engenharia Agrícola**, v. 42, n. 5, 2022.