

EDSON LUIS GERALDI JUNIOR

**ESTUDO DA PRODUÇÃO E COGERAÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BAGAÇO DE
CANA-DE-AÇÚCAR NA REGIÃO DE TUPÃ**

Relatório de Pós-doutorado realizado na
Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Faculdade de Ciências e Engenharia, Tupã.

Supervisor: Prof. Dr. Mario Molloy Neto

Tupã

2025

RESUMO

Este estudo avalia o potencial de geração de energia elétrica a partir da biomassa de cana-de-açúcar na região da Nova Alta Paulista, com foco na sustentabilidade energética e ambiental. A metodologia baseia-se na análise de dados secundários para estimar a produção de eletricidade, o sequestro de carbono, as emissões de CO₂ e o consumo de recursos hídricos nas usinas da região entre 2009 e 2023. Os resultados indicam que a bioeletricidade gerada por essas usinas contribui significativamente para a matriz energética local, com um potencial médio anual superior a 0,8 TWh. A análise de diferentes cenários revela que a absorção líquida de CO₂ pelas plantações de cana-de-açúcar supera as emissões das usinas, reforçando o papel do setor sucroenergético na mitigação das mudanças climáticas. Além disso, o consumo estimado de água nos processos industriais está em conformidade com as diretrizes ambientais vigentes, variando conforme a eficiência de cada usina. O estudo destaca a importância da modernização das usinas e da adoção de tecnologias que maximizem a eficiência energética, ao mesmo tempo em que minimizam o consumo de água. A metodologia desenvolvida demonstra ser replicável para outras regiões de São Paulo e do Brasil, baseando-se em fontes de dados nacionais confiáveis. Assim, a cogeração de energia elétrica a partir da biomassa de cana-de-açúcar consolida-se como uma solução sustentável para a segurança energética e a sustentabilidade ambiental da região da Nova Alta Paulista.

Palavras-chave: Cogeração, bioeletricidade, biomassa de cana-de-açúcar, sequestro de carbono, sustentabilidade, Nova Alta Paulista.

ABSTRACT

This study evaluates the potential for electricity generation from sugarcane biomass in the Nova Alta Paulista region, focusing on energy and environmental sustainability. The methodology is based on the analysis of secondary data to estimate electricity production, carbon sequestration, CO₂ emissions, and water resource consumption in the region's mills between 2009 and 2023. The results indicate that the bioelectricity generated by these mills significantly contributes to the local energy matrix, with an average annual potential exceeding 0.8 TWh. The analysis of different scenarios reveals that net CO₂ absorption by sugarcane plantations surpasses emissions from the mills, reinforcing the role of the sugar-energy sector in mitigating climate change. Additionally, the estimated water consumption in industrial processes complies with current environmental guidelines, varying according to the efficiency of each mill. The study highlights the importance of modernizing the mills and adopting technologies that maximize energy efficiency while minimizing water consumption. The developed methodology proves to be replicable in other regions of São Paulo and Brazil, relying on reliable national data sources. Thus, electricity cogeneration from sugarcane biomass is consolidated as a sustainable solution for energy security and environmental sustainability in the Nova Alta Paulista region.

Keywords: Cogeneration, bioelectricity, sugarcane biomass, carbon sequestration, sustainability, Nova Alta Paulista.

1. ESTRUTURA DO RELATÓRIO

Este relatório final tem como objetivo apresentar, de forma clara e objetiva, as atividades desenvolvidas ao longo do projeto de pós-doutorado realizado entre julho de 2024 e junho de 2025. Para isso, o documento está estruturado nas seguintes seções:

- **Seção 2:** apresenta uma visão geral do cronograma e das etapas desenvolvidas ao longo dos doze meses de execução do projeto de pós-doutorado. São descritas as atividades principais, destacando o cumprimento integral dos objetivos propostos;
- **Seção 3:** introduz o panorama energético nacional e o papel estratégico da biomassa da cana-de-açúcar na matriz elétrica brasileira, com destaque para a relevância da região da Nova Alta Paulista nesse contexto. Também são discutidos avanços tecnológicos na cogeração, o aproveitamento de subprodutos e a importância da gestão hídrica. Ao final, são apresentados o objetivo principal da pesquisa e os objetivos específicos que orientam a análise do potencial energético, do sequestro de carbono, das emissões de CO₂ e do uso de recursos hídricos na região;
- **Seção 4:** fornece uma caracterização da região da Nova Alta Paulista, destacando aspectos populacionais, econômicos e o papel da produção sucroenergética local, com ênfase na geração de bioeletricidade a partir da biomassa da cana-de-açúcar;
- **Seção 5:** aborda os conceitos e avanços relacionados à cogeração de energia a partir da biomassa de cana-de-açúcar, com foco nos tipos de ciclos termodinâmicos, nas tecnologias utilizadas nas usinas e em estudos que analisam o desempenho energético, econômico e ambiental do setor. São discutidos desde os sistemas tradicionais baseados em turbinas de contrapressão até tecnologias mais modernas, como BIG/GTCC e biorrefinarias, destacando caminhos para a maximização da eficiência energética e da sustentabilidade na geração de bioeletricidade;
- **Seção 6:** traz as práticas relacionadas à sustentabilidade ambiental nas usinas sucroenergéticas, com foco no sequestro de carbono e no uso eficiente dos recursos hídricos. São discutidas estratégias para mitigar as emissões de gases de efeito estufa, como a captura de CO₂ e o aproveitamento de resíduos da cana-de-açúcar. Também são apresentadas tecnologias e políticas voltadas para a redução do consumo de água nos processos industriais, destacando iniciativas que contribuem para a eficiência hídrica e para o cumprimento de diretrizes ambientais;

- **Seção 7:** a metodologia baseia-se em dados secundários para estimar a geração de energia, a absorção e emissão de CO₂, e o consumo hídrico em usinas da Nova Alta Paulista entre 2009 e 2023. As análises consideram variáveis primárias e derivadas, três cenários de captura de CO₂ e dois casos de uso de água, com foco na sustentabilidade regional;
- **Seção 8:** apresenta os resultados obtidos para geração de energia, absorção líquida de CO₂ e consumo hídrico, avaliando três cenários energéticos e seus impactos sobre a sustentabilidade regional e o atendimento da população da Nova Alta Paulista;
- **Seção 9:** a conclusão destaca a contribuição da bioeletricidade da cana para a sustentabilidade regional, evidenciando o potencial energético, o sequestro de CO₂ e a gestão hídrica, além da aplicabilidade da metodologia a outras regiões brasileiras.

Assim, este relatório sintetiza as principais etapas, análises e resultados do projeto, oferecendo subsídios técnicos e metodológicos para futuras pesquisas e ações voltadas à sustentabilidade energética e ambiental no setor sucroenergético e em outras regiões do país.

2. RESUMO DAS ATIVIDADES REALIZADAS NO PERÍODO

Este projeto de pós-doutorado, classificado como PD-II conforme a Resolução UNESP nº 12/2022, foi desenvolvido entre 1º de julho de 2024 e 30 de junho de 2025. Durante esse período, o pesquisador esteve afastado de suas atividades no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), por meio de afastamento remunerado concedido pela instituição. O projeto foi conduzido com dedicação integral, conforme previsto para a modalidade PD-II, respeitando as diretrizes estabelecidas pela UNESP e pelo IFSP.

O cronograma deste projeto de pós-doutorado compreendeu os doze meses de vigência, entre julho de 2024 e junho de 2025, e foi estruturado em etapas sequenciais e complementares, visando o cumprimento dos objetivos propostos. As atividades foram distribuídas de forma a garantir a execução eficiente da pesquisa, contemplando o levantamento bibliográfico, a coleta e análise de dados, o desenvolvimento metodológico, a elaboração de resultados e a redação de artigos científicos. Todas as etapas previstas foram integralmente cumpridas dentro dos prazos estabelecidos. A seguir, cada etapa é detalhada no Quadro 1, com a indicação dos respectivos períodos de execução.

Quadro 1 – Cronograma de execução das etapas do projeto

Etapas	Meses											
	jul/24	ago/24	set/24	out/24	nov/24	dez/24	jan/25	fev/25	mar/25	abr/25	mai/25	jun/25
A												
B												
C												
D												
E												
F												
G												
H												

Fonte: Compilação do autor.

- A. Revisão bibliográfica abrangendo o processo de cogeração, sequestro de carbono, uso de recursos hídricos em usinas de cana-de-açúcar e estudos relevantes sobre o tema na literatura;
- B. Coleta de dados referentes à produção de cana-de-açúcar nas cidades da região da Nova Alta Paulista;
- C. Estimativa do potencial de geração de energia elétrica a partir da biomassa de cana na Nova Alta Paulista;
- D. Cálculo das absorções e emissões de gás carbônico;
- E. Estimativa do consumo de recursos hídricos nas usinas da região;
- F. Obtenção e análise detalhada dos principais resultados do projeto;
- G. Redação de artigos científicos baseados nos resultados obtidos;
- H. Elaboração do relatório final consolidando as etapas e resultados do projeto.

3. CONTEXTO E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

Em 2023, a oferta interna de energia primária do Brasil alcançou 313,9 Mtep, registrando um crescimento de 3,5% em relação ao ano anterior. A matriz energética brasileira manteve uma participação significativa de 49,1% de fontes renováveis, percentual substancialmente superior à média global e à dos países da OCDE. A matriz elétrica do Brasil é predominantemente renovável, com destaque para a energia hidrelétrica. Em 2023, as fontes renováveis representaram 89,2% da matriz elétrica, correspondendo a um aumento de 1,2% em comparação ao ano anterior [1]. Esse valor supera amplamente a participação global de 30% da geração de eletricidade proveniente de fontes renováveis no mesmo ano [2]. Durante esse

período, o fornecimento hidrelétrico no Brasil manteve-se estável, enquanto as fontes eólica, solar e a biomassa da cana-de-açúcar apresentaram crescimento significativo na geração de eletricidade.

No que se refere à biomassa da cana-de-açúcar, a oferta energética cresceu 13,1% em relação a 2022, representando 16,9% da oferta interna de energia e consolidando-se como a principal fonte de energia renovável do país [1]. Essa biomassa é utilizada tanto na produção de etanol hidratado e anidro quanto na geração de energia elétrica. Em 2023, a geração de eletricidade a partir de plantas de cogeração, nas quais a biomassa da cana é o principal combustível, apresentou um aumento de 14% em relação ao ano anterior [3].

As primeiras plantas de cogeração na indústria canavieira utilizavam o bagaço da cana apenas para produção de vapor voltado aos processos internos, como a preparação da cana e a extração do caldo. Com o avanço tecnológico e a substituição de equipamentos mecânicos por versões elétricas mais eficientes, passou a ser viável também a geração de eletricidade para consumo interno. Esse aprimoramento na conversão de energia permitiu a produção de excedentes, que passaram a ser injetados no Sistema Interligado Nacional (SIN) [4, 5]. Com a mecanização da colheita da cana-de-açúcar, a palha, antes queimada no campo, passou a ser incorporada aos sistemas de cogeração [6].

Nos últimos anos, a vinhaça, subproduto líquido da produção de etanol, e a torta de filtro vêm sendo utilizadas na produção de biogás, empregado tanto para o aquecimento do reator de digestão quanto na geração de eletricidade em motores a combustão interna acoplados a geradores elétricos. Além disso, o biogás pode ser integrado a ciclos de cogeração ou queimado diretamente em caldeiras. Esses processos contribuíram para aumentar a eficiência da geração de eletricidade injetada na rede, reduzindo as emissões de dióxido de carbono e a contaminação do solo pela vinhaça [7, 8].

Outras formas de aproveitamento do potencial energético da biomassa da cana incluem a produção de etanol de segunda geração, capaz de aumentar o sequestro de carbono nas usinas [9, 10, 11]. A gestão dos recursos hídricos também se mostra uma questão crítica, com melhorias contínuas nos processos de produção. Entre essas melhorias, destaca-se a implementação de circuitos fechados, nos quais a água utilizada é tratada e reintegrada ao processo, promovendo eficiência hídrica e menor impacto ambiental [12, 13, 14].

De acordo com os dados da Produção Agrícola Municipal de 2022, as regiões Sudeste e Centro-Oeste do Brasil concentram 87% da produção nacional de cana-de-açúcar, sendo que o Sudeste lidera com 69% da produção total [15]. O estado de São Paulo se destaca por

responder por aproximadamente 58% da produção nacional. Em relação à geração de eletricidade a partir da biomassa de cana, São Paulo é o principal polo, abrigando usinas responsáveis por 52% da capacidade instalada do país. Em 2023, essas usinas forneceram 11,06 TWh à rede, o que corresponde a 52,8% da eletricidade gerada a partir da biomassa da cana no Brasil, um aumento de 15% em relação a 2022.

A região da Nova Alta Paulista, composta por 30 municípios, localiza-se no extremo oeste do estado de São Paulo. Seu desenvolvimento foi impulsionado pela expansão do cultivo de café em direção ao interior, acompanhando o ramal oeste da malha ferroviária da Companhia Paulista de Estradas de Ferro (CPEF) [16]. Com uma área equivalente a aproximadamente 3,4% do território total do estado e uma população superior a 400 mil habitantes [17], a economia da Nova Alta Paulista é sustentada por diversos setores, como agricultura, turismo, inovação tecnológica e transporte intermodal [18]. Além disso, usinas de açúcar e etanol localizadas em sete cidades da região contribuem significativamente para a produção de bioeletricidade, injetando excedentes energéticos no Sistema Interligado Nacional (SIN).

Nesse contexto, o objetivo principal deste estudo é avaliar o potencial de geração de energia elétrica a partir da biomassa de cana-de-açúcar na região da Nova Alta Paulista, com foco nas emissões de carbono, sequestro de CO₂ e consumo de água. Para isso, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- (i) quantificar a produção de cana-de-açúcar na região;
- (ii) calcular a média de CO₂ sequestrado por hectare e estimar o potencial total de sequestro;
- (iii) determinar as emissões de carbono e o uso de água por tonelada de cana processada;
- (iv) estimar a carga que pode ser atendida com a eletricidade gerada por cogeração nas usinas locais.

Esses objetivos visam responder à seguinte pergunta de pesquisa: **De que forma a geração de energia elétrica a partir da biomassa de cana-de-açúcar nas usinas da Nova Alta Paulista pode contribuir para a sustentabilidade regional, considerando o potencial energético, o sequestro de carbono, as emissões de CO₂ e o uso dos recursos hídricos?**

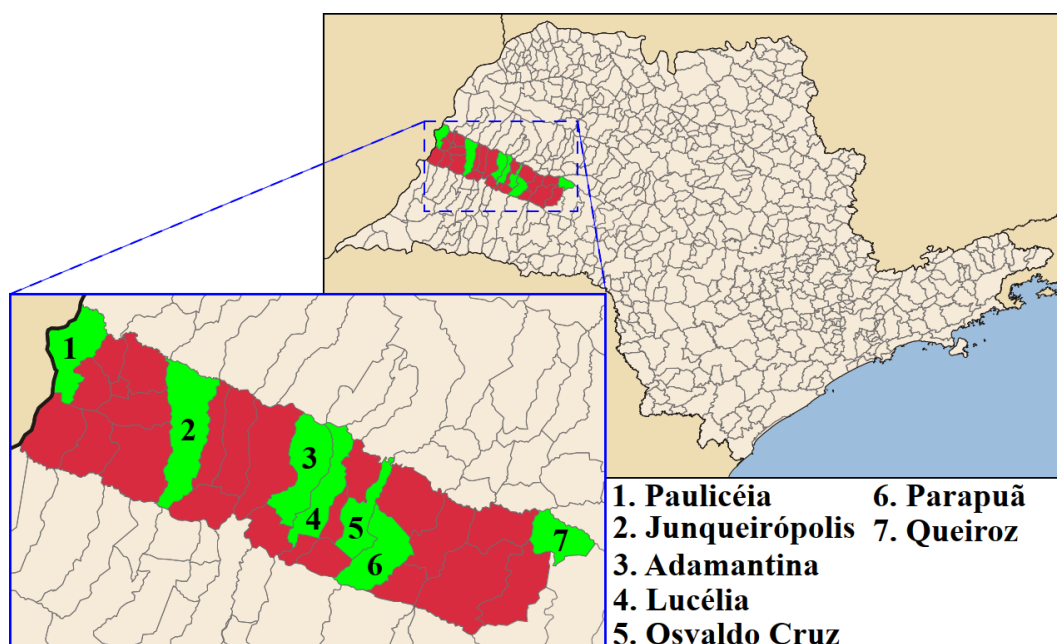
4. REGIÃO DA NOVA ALTA PAULISTA

A região da Nova Alta Paulista, localizada no extremo oeste do estado de São Paulo, é composta por trinta cidades, conforme apresentado na Tabela 1. Seu desenvolvimento foi

impulsionado pela expansão da cafeicultura em direção à porção ocidental do estado, acompanhando o traçado do ramal oeste da linha ferroviária da Companhia Paulista de Estradas de Ferro (CPEF) [16]. A maioria dessas cidades pertence à região intermediária de Presidente Prudente, enquanto oito estão inseridas na região intermediária de Marília [19]. A população totaliza 403,7 mil habitantes, representando cerca de 0,9% da população paulista e 0,2% da população brasileira, segundo o censo de 2022. Com uma área de aproximadamente 8.509 km², essa região abrange 3,4% do território estadual e 0,1% do território nacional [17]. O PIB per capita é de R\$ 33.193,14, sustentado por diversas cadeias produtivas, como a agropecuária, o turismo, a inovação tecnológica e a intermodalidade de transportes [18]. Embora os dados do Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) das cidades sejam de 2010 [17], observa-se que apenas duas cidades apresentavam um IDHM médio (0,55 a 0,70), enquanto as demais registravam um índice alto (0,70 a 0,80).

Com relação à produção de açúcar e álcool a partir da cana-de-açúcar, a região abriga dez usinas açúcar e álcool em sete cidades, Adamantina, Junqueirópolis, Lucélia, Osvaldo Cruz, Parapuã, Paulicéia e Queiroz, como pode ser visto na Figura 1. Nessas unidades, a bioeletricidade é obtida a partir da cogeração da biomassa da cana, sendo a potência total fiscalizada dessas unidades igual a 220,15 MW [20]. A injeção de energia elétrica excedente é injetada no Sistema Interligado Nacional (SIN).

Figura 1 – Região da Nova Alta Paulista com destaque para as cidades com usinas sucroalcooleiras



Fonte: Compilação do autor.

5. GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DA COGERAÇÃO

A cogeração de energia é um processo no qual uma única fonte de combustível é utilizada para produzir simultaneamente duas ou mais formas de energia úteis, como eletricidade, energia mecânica e energia térmica [21]. A cogeração é considerada uma alternativa eficiente por maximizar o aproveitamento do combustível e reduzir desperdícios energéticos. Um exemplo típico desse processo ocorre em usinas de cana-de-açúcar, onde a biomassa da cana, especialmente o bagaço, é queimada para gerar vapor. Esse vapor é então convertido em diferentes formas de energia por meio de sistemas específicos.

Tabela 1 – Indicadores Socioeconômicos e Demográficos dos Municípios da Nova Alta Paulista

Cidade	População	Área total (km²)	IDHM (2010)	PIB per capita (R\$)
Adamantina	34.687	411,987	0,790	38.997,12
Arco-Íris	2.044	264,904	0,722	35.382,28
Bastos	21.503	170,912	0,751	50.936,28
Dracena	45.474	487,688	0,776	30.557,62
Flora Rica	1.487	224,711	0,727	30.176,19
Flórida Paulista	12.958	524,138	0,715	17.731,75
Herculândia	9.125	364,252	0,727	36.890,40
Iacri	6.131	321,948	0,733	50.533,65
Inúbia Paulista	3.615	87,119	0,759	33.790,08
Irapuru	7.085	214,461	0,712	13.115,75
Junqueirópolis	20.448	582,565	0,745	38.510,78
Lucélia	20.061	314,81	0,752	26.531,25
Mariápolis	3.513	186,544	0,718	18.663,17
Monte Castelo	18.663	233,547	0,741	30.746,00
Nova Guataporanga	2.156	34,158	0,726	15.762,88
Oswaldo Cruz	31.272	248,038	0,762	32.836,81
Ouro Verde	7.779	266,778	0,692	15.558,53
Pacaembu	14.877	339,375	0,725	15.195,79
Panorama	14.964	356,05	0,722	19.933,87
Parapuã	10.580	366,664	0,737	67.842,13
Paulicéia	7.955	374,091	0,711	26.544,40
Pracinha	2.578	63,054	0,696	9.468,33
Queiroz	3.265	234,914	0,715	194.914,13
Rinópolis	9.259	358,481	0,723	35.113,28
Sagres	2.474	147,935	0,730	22.566,69
Salmourão	4.808	172,934	0,719	18.037,04
Santa Mercedes	2.956	166,753	0,739	23.436,56
São João do Pau d'Alho	2.242	117,665	0,750	27.920,27
Tupã	63.928	627,986	0,771	33.732,18

Tupi Paulista	15.854	244,77	0,769	21.720,31
---------------	--------	--------	-------	-----------

Fonte: Compilação do autor.

O processo de cogeração pode ser classificado em dois tipos de ciclos: o ciclo topping, no qual a eletricidade é gerada primeiro e a energia rejeitada é usada para aquecimento; e o ciclo bottoming, em que o calor é produzido inicialmente e a energia residual é usada para gerar eletricidade [22]. No setor sucroalcooleiro, o ciclo topping é amplamente empregado, no qual o vapor gerado é direcionado para turbinas, onde ocorre a conversão em energia elétrica. O calor residual desse processo é recuperado e aproveitado para atender às demandas térmicas no processo produtivo, otimizando a eficiência energética da usina [23]. Entre os mecanismos que operam segundo esse ciclo, destacam-se motores de combustão interna, turbinas a gás, turbinas a vapor de contrapressão e esquemas de ciclo combinado [24].

Muitas usinas de cana-de-açúcar ainda utilizam o ciclo Rankine tradicional baseado em sistemas de turbina de contrapressão para cogeração de energia térmica e elétrica. Usinas mais modernas, que geram e exportam energia elétrica para a rede, adotam o ciclo Rankine avançado com sistemas baseados em turbinas de extração e condensação [25, 26], e algumas já substituíram o sistema de acionamento dos moedores, tradicionalmente baseado em turbinas de contrapressão de baixa eficiência, por motores elétricos que utilizam a eletricidade gerada em turbo-geradores maiores e com maior eficiência [7].

Com a consolidação da queima do bagaço e do palhiço da cana para geração de eletricidade, assim como do sistema de turbina de extração e condensação, que se revela mais eficiente na produção de excedentes elétricos em comparação ao sistema de turbina de contrapressão [5], surge a preocupação em aprimorar os processos nas usinas para maximizar a geração excedente de energia elétrica. Nesse contexto, ganha destaque a gasificação, que permite uma conversão mais eficiente da biomassa em energia em comparação com a combustão direta. O processo produz um combustível gasoso mais limpo que pode ser utilizado em turbinas a gás, que geralmente têm eficiências mais altas do que os sistemas de combustão tradicionais [27, 28]. A tecnologia de ciclo combinado de gasificação integrada de Biomassa/Turbina a Gás (em inglês, Biomass Integrated Gasification/Gas Turbine Combined Cycle, conhecida pela sigla BIG/GTCC) oferece maior eficiência na geração de eletricidade por unidade de biomassa em comparação aos sistemas convencionais de turbina a vapor. Isso se deve à combinação da gasificação com a geração elétrica por turbinas a gás e à recuperação de calor para a produção de vapor, maximizando a conversão da energia contida no bagaço [29].

No estudo em [30], foi realizada uma avaliação econômica e ambiental da

implementação da tecnologia BIG/GTCC em uma usina de cana-de-açúcar no Brasil, visando aumentar o potencial de geração de energia. A análise incluiu o uso da torrefação como pré-tratamento do bagaço úmido, para solucionar problemas de alimentação no gaseificador durante a operação contínua com esse material particulado. A tecnologia foi comparada ao sistema de turbina de extração e condensação. Os resultados indicam que a gaseificação do volume excedente de bagaço é a opção mais vantajosa, tanto economicamente quanto ambientalmente.

O trabalho [31] analisa a otimização da produção de eletricidade e calor em plantas de cogeração a partir da biomassa de cana, com foco na eficiência energética e na análise termoeconômica. Ele propõe métodos para melhorar a alocação de custos e a formação de preços de produtos internos, como eletricidade e calor de refinaria. A pesquisa sugere que a operação ideal de uma planta de cogeração deve otimizar o uso do bagaço como combustível, equilibrar a demanda por serviços energéticos e maximizar a venda de eletricidade excedente. Para isso, o estudo identifica três subciclos principais no ciclo de vapor: geração de trabalho e calor de refinaria na turbina de alta pressão; geração de trabalho e calor de processo nas turbinas de alta e média pressão; e o ciclo de condensação, que gera trabalho nas turbinas de alta, média e baixa pressão. A gestão adequada dos subciclos, considerando a disponibilidade de bagaço e a demanda energética, é crucial para otimizar o desempenho econômico da planta. A análise termoeconômica orienta a priorização dos subciclos, visando maximizar a produção e reduzir custos de forma eficiente e sustentável.

Os autores em [32] avaliam a viabilidade econômica de expandir uma destilaria de etanol de primeira geração para uma biorrefinaria, focando na produção de etanol de segunda geração e no aumento da geração de eletricidade. A pesquisa analisa o uso de subprodutos da cana-de-açúcar, como bagaço e palha, e explora a produção de biogás a partir da vinhaça. A conclusão indica que a configuração mais eficiente envolve a hidrólise de todo o bagaço, o uso de um ciclo Rankine para eletricidade e a biodigestão da vinhaça para gerar biogás. Contudo, o estudo técnico-econômico aponta que o projeto pode não ser viável financeiramente sem reduções adicionais de custos, produtos mais valiosos ou incentivos externos, como créditos de carbono ou subsídios.

6. SUSTENTABILIDADE

A sustentabilidade no setor sucroenergético envolve um equilíbrio entre a produção eficiente de energia e a redução dos impactos ambientais, especialmente em relação às emissões

de carbono e ao uso de recursos hídricos. A biomassa de cana-de-açúcar, utilizada na produção de açúcar, etanol e eletricidade, desempenha um papel essencial no sequestro de CO₂ durante seu ciclo de cultivo, contribuindo para mitigar as emissões de gases de efeito estufa. Além disso, as usinas enfrentam desafios para otimizar o uso de água em seus processos produtivos, buscando práticas mais eficientes que reduzam o consumo hídrico e minimizem o impacto ambiental. Esta seção abordará o sequestro de carbono nas plantações de cana-de-açúcar e a gestão dos recursos hídricos nas usinas, destacando as práticas que contribuem para a sustentabilidade do setor.

6.1. Sequestro de Carbono

A captura de carbono no setor sucroenergético desempenha um papel crucial na mitigação das mudanças climáticas, especialmente no contexto da produção de bioenergia a partir da cana-de-açúcar. A produção de etanol de cana, embora reconhecida por sua contribuição para a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) em comparação com combustíveis fósseis, ainda enfrenta desafios relacionados à dívida de carbono gerada pelo uso inadequado da terra. A conversão de áreas florestais, por exemplo, pode resultar em emissões substanciais de CO₂. Para contornar esse problema, estudos sugerem a conversão de pastagens degradadas em áreas de cultivo de cana-de-açúcar como uma alternativa mais sustentável. Essa abordagem não apenas minimiza as emissões, mas também permite a recuperação do solo, aumentando os estoques de carbono e contribuindo para a redução das emissões de GEE [13, 33].

A dinâmica do carbono nas plantações de cana-de-açúcar é um aspecto fundamental abordado em estudos que monitoram o fluxo de CO₂ [34-35]. Esses estudos demonstram que a capacidade dessas plantações de funcionar como sumidouros ou fontes de carbono varia significativamente ao longo dos ciclos de crescimento, influenciada por fatores como condições climáticas e práticas de manejo. O etanol produzido a partir da cana-de-açúcar sobressai tanto pelo seu elevado rendimento energético quanto pela sua capacidade de reduzir significativamente as emissões de gases de efeito estufa em até 85%, muito superior à redução obtida com o etanol de milho (30%) e outras culturas [13]. O estudo realizado em [35] identificou que, durante a fase de crescimento ativo, o ecossistema da cana-de-açúcar atua como um importante sumidouro de carbono. Já os autores em [34] destacam a conservação da biomassa no solo e a eliminação das queimadas como estratégias essenciais para aumentar os estoques de carbono e mitigar as emissões associadas à colheita. Com o avanço da mecanização

da colheita e a proibição da queima da palha, as plantações de cana-de-açúcar têm desempenhado um papel cada vez mais relevante como sumidouros de carbono. No entanto, a liberação de CO₂ ocorre principalmente nas etapas de processamento nas usinas sucroalcooleiras, o que reforça a importância de melhorias nos processos industriais para reduzir essas emissões.

A cogeração de energia a partir do bagaço da cana, uma prática comum nas usinas, é uma oportunidade importante para integrar tecnologias de captura de carbono. A captura de CO₂ durante a fermentação da cana para a produção de etanol, por exemplo, é uma tecnologia promissora por sua eficiência energética e custo acessível, além de ser menos intensiva em energia do que a captura de CO₂ de processos de combustão, o que é mais vantajoso para o balanço energético das usinas [36]. Essa abordagem, quando combinada com a bioenergia e tecnologias de captura e armazenamento de carbono (em inglês, *Bioenergy with Carbon Capture and Storage*, conhecida pela sigla BECCS), tem o potencial de gerar emissões negativas, contribuindo significativamente para a descarbonização do setor energético brasileiro. Subsídios governamentais pode ser uma ferramenta útil para fomentar a adoção do BECCS, tornando-o uma tecnologia chave para mitigar as mudanças climáticas no Brasil, especialmente dado o grande papel do país na produção de etanol [37].

A implementação do BECCS em usinas de cana-de-açúcar envolve, contudo, uma série de desafios tecnológicos, especialmente no que se refere ao equilíbrio entre a eficiência da captura de CO₂ e a penalidade energética associada. Esse conceito diz respeito à energia adicional requerida para o processo de captura de CO₂, o que implica que parte da energia gerada pela queima da biomassa precisa ser redirecionada para o próprio sistema de captura, reduzindo a eficiência global da usina. A captura de CO₂ resultante da combustão impõe penalidades energéticas consideráveis, podendo reduzir a geração de eletricidade entre 43% e 52%, em comparação a um cenário de referência sem captura. Essa redução depende da eficiência do processo de captura, que varia entre 58% e 91%, respectivamente [36]. Conforme demonstrado em [38], o uso de sistemas de cogeração com captura de CO₂ via absorção química por monoetanolamina (MEA) permite a captura de até 51,9% das emissões de CO₂ em configurações de regenerador único. No entanto, essa configuração resulta em uma penalidade energética significativa de 14,9%, o que compromete a eficiência global da planta. Alternativas como a configuração com três regeneradores e reaquecimento, embora apresentem uma penalidade energética menor (7,41%), capturam uma quantidade inferior de CO₂ (36,3%). Esses resultados destacam a importância de otimizar as configurações dos sistemas BECCS para

maximizar a captura de CO₂ sem prejudicar a geração de eletricidade. Os autores em [38] revelam que o aumento das taxas de captura de CO₂ além de 51,9% pode, paradoxalmente, levar a emissões específicas mais altas (gCO₂/kWh) em comparação com uma planta de cogeração convencional sem captura. Isso se deve ao aumento do consumo de energia necessário para capturar e comprimir o CO₂, resultando em uma penalidade energética que pode superar os ganhos ambientais de maior captura de CO₂. Dessa forma, torna-se crucial o desenvolvimento de otimizações multiobjetivo que equilibrem a captura de carbono e a eficiência energética para garantir a viabilidade dos sistemas BECCS nas plantas de cana-de-açúcar.

Além da captura de carbono, a vinhaça, um subproduto líquido da produção de etanol, oferece oportunidades para melhorar a sustentabilidade no setor. Seu uso como fertilizante é uma prática comum, mas pode levar a aumentos significativos nas emissões de GEE, especialmente quando combinada com restos de culturas, como observado em sistemas de cana-soca. As emissões de N₂O e CO₂ em uma plantação de cana podem variar significativamente de acordo com o método de fertilização. Conforme [39], a utilização de vinhaça em combinação com fertilizantes minerais resulta em taxas de emissão mais elevadas, especialmente em cana-soca com maior acúmulo de restos de culturas. No entanto, o uso de vinhaça tem se mostrado eficaz na redução do uso de fertilizantes sintéticos, especialmente quando associada à fertirrigação [13]. A aplicação adequada de vinhaça é essencial para evitar emissões elevadas de N₂O, um potente gás de efeito estufa. Além disso, o tratamento adequado da vinhaça pode viabilizar a geração de biogás por meio de digestão anaeróbica, produzindo metano que pode ser utilizado para gerar eletricidade ou calor, promovendo um uso mais eficiente dos recursos e contribuindo para a redução das emissões do setor [40].

O potencial de mitigação de emissões também depende da adoção de tecnologias avançadas de captura de carbono. A escolha entre a captura de CO₂ pré e pós-combustão em plantas de cana-de-açúcar envolve *trade-offs* financeiros e operacionais. Enquanto a captura pré-combustão, realizada após a gaseificação da biomassa, tem custos mais altos devido à complexidade dos processos e à demanda de tecnologias adicionais, a captura pós-combustão, aplicada diretamente aos gases de exaustão, apresenta um custo mais baixo e é energeticamente menos intensiva [41]. A captura pré-combustão, por exemplo, usada em plantas de Ciclo Combinado de Gaseificação Integrada (IGCC), oferece uma oportunidade para otimizar a separação de CO₂. As simulações indicam que plantas de IGCC baseadas em biomassa podem alcançar taxas de captura de CO₂ de até 93%, demonstrando que tecnologias de captura pré-combustão têm um papel importante na redução das emissões de GEE [42]. Contudo, vale

destacar que a captura pós-combustão, que remove o CO₂ dos gases de combustão após a queima do combustível, é uma tecnologia mais madura e estabelecida em comparação com a captura pré-combustão.

Por fim, o uso de resíduos da cana-de-açúcar, como bagaço, palha e vinhaça, é fundamental para promover uma economia circular no setor. A valorização desses subprodutos não apenas reduz o desperdício, mas também gera novas fontes de energia e produtos, como biogás, biofertilizantes e bioplásticos. A utilização eficiente desses resíduos pode aumentar a sustentabilidade da produção de cana-de-açúcar e reduzir a pegada de carbono da indústria, especialmente quando associada à captura e utilização de CO₂ [13, 40].

A adoção de práticas agrícolas mais sustentáveis, como a conversão de pastagens degradadas, a gestão adequada da vinhaça e a valorização de resíduos, são fundamentais para mitigar as emissões de GEE e promover a sustentabilidade no setor sucroenergético. A integração de tecnologias de captura de carbono, aliada ao uso eficiente dos subprodutos da cana, tem o potencial de transformar a produção de bioenergia no Brasil em um modelo global de sustentabilidade, além de impulsionar a bioeconomia brasileira [43].

6.2. Recursos hídricos

O conceito de pegada hídrica, essencial para a gestão sustentável dos recursos hídricos, representa uma métrica que quantifica o volume total de água utilizado, tanto direta quanto indiretamente, na produção de bens e serviços, ou por indivíduos [44]. Essa medida é composta por três componentes principais: a pegada hídrica azul, que se refere ao uso de água superficial e subterrânea; a pegada hídrica verde, relacionada à água das chuvas absorvida pelas plantas; e a pegada hídrica cinza, que corresponde ao volume de água necessário para diluir poluentes gerados durante o processo produtivo, garantindo que os níveis de qualidade da água sejam mantidos [45-46].

A produção de etanol a partir da cana-de-açúcar apresenta uma vantagem significativa em termos de pegada hídrica em comparação com outras culturas utilizadas para biocombustíveis. Embora a cana-de-açúcar não tenha a menor pegada hídrica entre as culturas analisadas, seu valor de 2.245 litros de água por litro de etanol é relativamente baixo se comparado a alternativas como sorgo (8.317 litros), trigo (4.339 litros) e milho (2.486 litros) [13]. No Brasil, a pegada hídrica da cana-de-açúcar apresenta, em média, os seguintes valores: a pegada hídrica verde é de aproximadamente 145 m³/ton; a pegada hídrica azul é de cerca de 38 m³/ton; e a pegada hídrica cinza corresponde a aproximadamente 18 m³/ton [47]. Esses

valores são relativamente baixos em comparação a outros países produtores de açúcar, reforçando a eficiência hídrica da cana-de-açúcar no contexto brasileiro.

Pesquisas mostram que a seleção de híbridos de cana-de-açúcar eficientes no uso de água, aliada a práticas de irrigação otimizadas, pode reduzir significativamente a pegada hídrica verde e azul, promovendo sustentabilidade. No entanto, o desafio de equilibrar esse uso eficiente da água com a sustentabilidade é mais crítico em regiões com escassez hídrica [48-49]. No que diz respeito as técnicas empregadas nos processos das usinas de cana-de-açúcar, várias tecnologias foram desenvolvidas ou melhoradas para diminuir o consumo de água. No estudo de caso apresentado por [50], que analisa o consumo de água em uma usina sucroenergética no noroeste do Estado de São Paulo, observou-se uma redução no uso de 0,86 m³ por tonelada de cana processada em 2012 para 0,56 m³ em 2021. Segundo o estudo, as principais tecnologias responsáveis por essa redução foram: o reuso da água, a limpeza a seco da cana-de-açúcar, a utilização de circuitos fechados, a recuperação de condensados e a implementação de um sistema de medição de vazão.

O Protocolo Etanol Mais Verde [51], implementado pelo Estado de São Paulo, fortalece o compromisso das usinas sucroalcooleiras em minimizar os impactos ambientais, com ênfase no uso sustentável da água. A Resolução SMA 88, de 19 de dezembro de 2008, estabelece diretrizes rigorosas para o consumo de água no setor, incentivando a adoção de tecnologias como circuitos fechados e a redução da captação de água de fontes externas. O protocolo também define metas claras de eficiência hídrica, exigindo que as usinas limitem o consumo de água a menos de 1 m³ por tonelada de cana-de-açúcar processada em áreas classificadas como Adequadas ou Adequadas com Limitações Ambientais, e a 0,7 m³ por tonelada em áreas designadas como Adequadas com Restrições Ambientais [52].

Diversas usinas sucroalcooleiras do Estado de São Paulo publicam relatórios de ESG (*Environmental, Social and Governance*), que abordam, entre outros aspectos, práticas voltadas para a preservação ambiental e a gestão sustentável da água potável, em consonância com o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 6 [53]. Esses relatórios indicam a adoção de circuitos fechados, nos quais a água é tratada e reutilizada no processo produtivo, reduzindo a necessidade de captação de novos recursos hídricos. Além disso, águas residuais são incorporadas à vinhaça e aplicadas na fertirrigação, uma prática que contribui para a otimização de recursos. De acordo com esses relatórios, o consumo de água por tonelada de cana-de-açúcar processada nas últimas duas safras variou entre 0,6 m³ e 1,80 m³ [54-59], sendo que a maioria das usinas opera dentro dos parâmetros estabelecidos pela Resolução SMA 88.

7. METODOLOGIA

Este estudo adota uma abordagem quantitativa baseada em levantamentos e estimativas para avaliar o potencial de geração de energia, a dinâmica de emissões e captura de CO₂ e o uso de recursos hídricos nos processos de cogeração das usinas de cana-de-açúcar na região da Nova Alta Paulista. A metodologia consiste na análise de dados secundários de fontes oficiais, abrangendo a produção de energia elétrica, a captura de CO₂ e o consumo hídrico entre 2009 e 2023 nas usinas sucroenergéticas locais.

A metodologia é estruturada em duas etapas principais: a primeira foca na coleta de dados secundários e obtenção de grandezas principais; a segunda utiliza essas grandezas para estimar variáveis derivadas, a fim de avaliar a capacidade energética e o uso de recursos hídricos nas usinas, bem como o potencial de captura de carbono das plantações de cana-de-açúcar da região.

7.1. Levantamento de dados e determinação de grandezas primárias

Para fundamentar as análises sobre o potencial de geração de energia elétrica, captura de CO₂ e consumo de recursos hídricos nas usinas da região da Nova Alta Paulista, foi realizado o levantamento de grandezas primárias relevantes ao contexto da cogeração de energia a partir da cana-de-açúcar. Essas grandezas incluem a área de cana-de-açúcar colhida, a quantidade de cana-de-açúcar produzida, a população regional, além de dados sobre o consumo médio anual de energia elétrica e água, e emissões médias de CO₂. As fontes dessas grandezas foram selecionadas de maneira a garantir a confiabilidade e a cobertura temporal necessária, abrangendo o período de 2009 a 2023.

O Quadro 2 apresenta as grandezas levantadas, com seus respectivos símbolos e fontes. Esses dados primários constituem a base para as estimativas e análises subsequentes, possibilitando o cálculo de variáveis derivadas. Vale notar que, para o consumo médio anual de energia elétrica, não foi possível obter dados específicos da região da NAP; portanto, adotou-se o consumo médio do estado de São Paulo, considerando que a região está inserida nesse estado. No caso do consumo médio anual de água por habitante, as informações não estavam disponíveis para todas as trinta cidades da NAP, mas foram consideradas as médias das cidades com dados disponíveis e suas respectivas populações para estimar o consumo regional. Quanto à emissão média anual de CO₂ per capita, utilizou-se a média nacional, pois não há dados específicos para a NAP ou o estado de São Paulo.

Quadro 2 - Levantamento das grandezas primárias e suas fontes de dados

Grandeza primária	Símbolo	Fonte
Área de cana-de-açúcar colhida, em hectares, da região da NAP	Acol	Pesquisa da Produção Agrícola Municipal (PAM), do IBGE [60]
Quantidade produzida de cana-de-açúcar, em toneladas, da região da NAP	QPr	Pesquisa da Produção Agrícola Municipal (PAM), do IBGE [60]
População das cidades da região da NAP	P _{NAP}	Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA) [61]
Consumo médio anual de energia elétrica por habitante do estado de São Paulo	CEE _{SP}	Anuário Estatístico de Energia Elétrica da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) [62]
Consumo médio anual de água por habitante da região da NAP	CA _{NAP}	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) do Ministério das Cidades [63]
Emissão média anual de CO ₂ por habitante no Brasil	E _{BR}	<i>Our World in Data</i> [64]

Fonte: Elaborado pelo autor

Com as grandezas primárias identificadas, é possível calcular variáveis derivadas essenciais para analisar o potencial energético da biomassa de cana-de-açúcar e a sustentabilidade das usinas de cogeração na Nova Alta Paulista. A próxima subseção detalha o processo de obtenção dessas variáveis, que servirão como parâmetros para avaliar o cenário energético e ambiental da região.

7.2. Estimativa de variáveis derivadas

Nesta subseção, são apresentadas as grandezas estimadas que são fundamentais para a análise energética e de sustentabilidade da região da NAP. Essas variáveis derivadas foram calculadas a partir das grandezas primárias listadas na subseção anterior. Para as estimativas, foram considerados diferentes cenários de captura de CO₂ com suas respectivas penalidades energéticas, além de casos para o consumo de recursos hídricos nas usinas de cana-de-açúcar da região.

Conforme Quadro 3, algumas grandezas estimadas dependem diretamente das grandezas primárias, como o rendimento médio (RM) das plantações de cana-de-açúcar, que é calculado a partir da quantidade produzida de cana (QPr) e da área colhida (Acol). Outras variáveis dependem de grandezas já estimadas, como a energia elétrica gerada a partir do palhiço da cana (EPa), que é derivada da quantidade de palhiço (QPa). Os parâmetros presentes nas fórmulas para a obtenção dessas grandezas são explicados na sequência.

Quadro 3 – Descrição das grandezas estimadas e suas respectivas fórmulas

Grandeza Estimada	Símbolo	Fórmula
Rendimento médio, em toneladas por hectare, da região da NAP	RM	$RM = \frac{QPr}{Acol}$
Quantidade de bagaço obtida da moagem da cana-de-açúcar, em toneladas, em usinas da NAP	QB	$QB = 0,28 \cdot QPr$
Quantidade de palhiço de cana-de-açúcar, em toneladas, da região da NAP	QPa	$QPa = 0,12 \cdot QPr$
Energia elétrica obtida a partir do bagaço da cana-de-açúcar, em kWh, nas usinas da região da NAP	E _B	$E_B = 155 \cdot QB$
Energia elétrica obtida a partir do palhiço da cana-de-açúcar, em kWh, nas usinas da região da NAP	E _{Pa}	$E_{Pa} = 162,1 \cdot QPa$
Energia elétrica total obtida no processo de cogeração, em kWh, nas usinas da região da NAP	E _{tot}	$E_{tot} = E_B + E_P$
Energia elétrica utilizada no autoconsumo, em kWh, nas usinas da região da NAP	E _{aut}	$E_{aut} = 0,426 \cdot E_{tot}$
Energia elétrica injetada na rede, em kWh, nas usinas da região da NAP para o Cenário 1	E _{inj1}	$E_{inj1} = E_{tot} - E_{aut}$
Energia elétrica injetada na rede, em kWh, nas usinas da região da NAP para o Cenário 2	E _{inj2}	$E_{inj2} = 0,9259 \cdot E_{tot} - E_{aut}$
Energia elétrica injetada na rede, em kWh, nas usinas da região da NAP para o Cenário 3	E _{inj3}	$E_{inj3} = 0,851 \cdot E_{tot} - E_{aut}$
Porcentagem da população equivalente que poderia ser atendida pela energia elétrica injetada na rede no Cenário i	PEE _{eqi}	$PEE_{eqi} = \frac{E_{inji}}{P_{NAP} \cdot CEE_{SP}} \cdot 100$
Quantidade de água, em m ³ , utilizada nos processos das usinas da região da NAP para o Caso A	QA _A	$QA_A = QPr$
Quantidade de água, em m ³ , utilizada nos processos das usinas da região da NAP para o Caso B	QA _B	$QA_B = 0,7 \cdot QPr$
Porcentagem da população equivalente que poderia ser atendida pela quantidade de água utilizada no Caso X	PA _{eqx}	$PA_{eqx} = \frac{QA_x}{P_{NAP} \cdot CA_{NAP}} \cdot 100$
Absorção de CO ₂ pelas plantações de cana-de-açúcar, em toneladas, da região da NAP	Abs	$Abs = 0,7331 \cdot RM \cdot Acol$
Liberação de CO ₂ , em toneladas, pelos processos internos das usinas da região da NAP para o Cenário 1	Lib ₁	$Lib_1 = 0,6953 \cdot QPr$
Liberação de CO ₂ , em toneladas, pelos processos internos das usinas da região da NAP para o Cenário 2	Lib ₂	$Lib_2 = 0,4429 \cdot QPr$

Liberação de CO ₂ , em toneladas, pelos processos internos das usinas da região da NAP para o Cenário 3	Lib ₃	$Lib_3 = 0,33443 \cdot QPr$
Absorção líquida de CO ₂ , em toneladas, para o Cenário i	Abs _{líqi}	$Abs_{líqi} = Abs - Lib_i$
Porcentagem da população equivalente que liberaria o mesmo valor da absorção líquida de CO ₂ para o Cenário i	PAbs _{seqi}	$PAbs_{seqi} = \frac{Abs_{líqi}}{P_{NAP} \cdot E_{BR}} \cdot 100$

Fonte: Elaborado pelo autor

Para estimar a quantidade de bagaço, assumiu-se que toda a cana-de-açúcar colhida foi processada nas usinas da região. De acordo com [38, 65, 66], cada tonelada de cana moída gera 0,28 tonelada de bagaço, informação essa utilizada para calcular a produção de bagaço em todos os anos analisados, já que a maior parte do período estudado está abrangida pelas publicações dessas referências. A quantidade de palhiço considerada por tonelada de cana moída foi de 0,12 tonelada, conforme indicado em [67-68]. A estimativa da quantidade de bagaço e palhiço é crucial, pois a queima desses resíduos é a principal fonte de geração de energia no processo de cogeração nas usinas.

Segundo o estudo detalhado de [65], que analisou a geração termoelétrica pela queima do bagaço no Brasil na safra de 2009-2010, a geração média de energia nas usinas da mesorregião de Presidente Prudente, onde estão 24 cidades da NAP, era de 155 kWh por tonelada de bagaço queimado, um valor inferior à média estadual de 193,8 kWh por tonelada. Neste trabalho, adotou-se o valor conservador de 155 kWh/tonelada para quantificar a energia gerada pela queima do bagaço. Com relação à energia média gerada pela queima do palhiço, o relatório em [65] não fornece dados, já que o uso do palhiço na cogeração tornou-se mais comum em anos recentes. Contudo, [68] aponta que a energia liberada pela queima do palhiço é 1,046 vez maior que a do bagaço. Assim, neste estudo, a energia gerada pela queima de uma tonelada de palhiço foi calculada em 162,1 kWh. O total de energia gerada nas usinas considera a soma das energias derivadas do bagaço e do palhiço. Entretanto, parte dessa energia é consumida internamente pelas usinas antes de ser disponibilizada à rede. Segundo o relatório de bioeletricidade da União da Indústria de Cana-de-Açúcar e Bioenergia (Unica) [3], desde 2014, o maior índice médio de autoconsumo das usinas produtoras de bioeletricidade sucroenergética foi de 42,6%, registrado em 2023. Considerando uma abordagem conservadora, este índice foi adotado para as usinas da NAP.

Com o objetivo de avaliar a captura de gás carbônico pelas plantações de cana-de-açúcar da região, foi realizado um levantamento da média de absorção de CO₂ por hectare. [8] destaca que, anualmente, cada hectare de cana-de-açúcar remove aproximadamente 60 toneladas de CO₂ da atmosfera, incorporando esse carbono na biomassa. No entanto, o estudo não detalha o rendimento médio da plantação, o que impede a estimativa da quantidade de CO₂ absorvido por tonelada de cana. Em contrapartida, [69] informa que a fitomassa da cana absorve 52,5 toneladas de CO₂ equivalente por hectare ao ano, considerando uma plantação com rendimento médio de 71,61 toneladas por hectare, já descontando as emissões relacionadas à colheita mecânica e à adubação nitrogenada. Já o estudo em [34] demonstra uma absorção de 53,7 toneladas de CO₂ por hectare em uma plantação de cana-de-açúcar em Luiz Antônio, São Paulo. Esse valor foi obtido por meio de medições dos fluxos de CO₂ sobre uma plantação, utilizando o método de covariância dos redemoinhos (*eddy-covariance*) durante o período de crescimento de dois ciclos (segunda e terceira socas), com colheita acompanhada de queima da palhada, prática atualmente pouco utilizada no estado.

Com base nas informações de [8, 34, 69] e com o objetivo de adotar uma abordagem conservadora, foi considerado que cada hectare de cana-de-açúcar absorve 52,5 toneladas de CO₂, em uma plantação com rendimento médio de 71,61 toneladas por hectare. Como o rendimento médio das plantações da NAP varia ao longo dos anos estudados, aplicou-se o princípio da proporcionalidade para calcular a absorção de CO₂ por hectare em cada ano. Esse valor foi então multiplicado pela área colhida anualmente, obtendo-se a quantidade total de CO₂ capturada pelas plantações da região, em toneladas equivalentes. Para uma análise mais detalhada da quantidade de CO₂ absorvida, essa captação foi comparada com a emissão anual de CO₂ de uma fração equivalente da população da NAP. Essa estimativa considerou a emissão per capita média de CO₂ dos habitantes do Brasil [64] e a população da região para cada ano analisado.

Um aspecto importante a ser analisado é a absorção líquida de CO₂, ou seja, a quantidade absorvida pela plantação de cana-de-açúcar descontada a quantidade liberada durante os processos nas usinas. Conforme destacado em [70], a emissão de CO₂ nos processos industriais das usinas de cana-de-açúcar ocorre principalmente na queima do bagaço, com a liberação de 0,6596 tonelada de CO₂ por tonelada de cana processada, e na fermentação, que libera 0,0357 tonelada de CO₂ por tonelada de cana processada. Portanto, um total de 0,6953 tonelada de CO₂ é emitido para cada tonelada de cana processada. Esse valor foi utilizado neste trabalho para

estimar a quantidade anual de CO₂ liberada nos processos industriais das usinas da região ao longo dos anos considerados.

Três cenários foram considerados neste trabalho:

- **Cenário 1:** assume que toda a energia gerada na cogeração é injetada na rede, com apenas o desconto da energia utilizada no autoconsumo.
- **Cenário 2:** aplica uma penalidade energética de 7,41% ao total da energia gerada, antes do desconto do autoconsumo.
- **Cenário 3:** aplica uma penalidade energética de 14,9% ao total da energia gerada, também antes do desconto do autoconsumo.

As penalidades de 7,41% e 14,9% nos Cenários 2 e 3 correspondem à energia necessária para capturar 36,3% e 51,9% do CO₂ produzido no processo, respectivamente, conforme [38]. Esses valores estão sumarizados na Tabela 2. A introdução dos Cenários 2 e 3 reflete a consideração de uma possível modernização das usinas com foco em sustentabilidade e seus impactos na NAP.

Tabela 2 – Cenários de captura de CO₂ e penalidades energéticas

Cenário	Captura CO₂ (%)	Penalidade Energética (%)
1	0	0
2	36,3	7,41
3	51,9	14,9

Fonte: Elaborado pelo autor

No Cenário 1, a absorção líquida de CO₂ foi calculada pela diferença entre a quantidade de CO₂ capturada pela plantação e a quantidade liberada no processamento. Nos Cenários 2 e 3, a emissão de CO₂ é ajustada considerando fatores de captura de 36,3% e 51,9%, respectivamente, sobre o total de CO₂ produzido no processo. Para facilitar a interpretação dos resultados, a quantidade líquida de CO₂ absorvida foi também comparada à emissão anual de CO₂ de uma fração equivalente da população da NAP, usando as médias de emissão per capita.

Para avaliar a quantidade de energia gerada nos três cenários e sua capacidade de atendimento à população da Nova Alta Paulista (NAP), foi realizado um levantamento da parcela populacional que poderia ser abastecida com toda a energia elétrica injetada na rede. Primeiramente, foi identificado o consumo per capita de energia elétrica do estado de São Paulo para cada ano considerado neste estudo, com base nos anuários estatísticos de energia elétrica publicados anualmente pela Empresa de Pesquisa Energética [62, 71]. Em seguida, os dados

populacionais da NAP foram obtidos para todos os anos analisados, a partir de informações do IBGE, extraídas de censos e estimativas anuais da população [61, 72]. Com esses dados, foi possível quantificar a parcela da população da NAP que poderia ser atendida em cada cenário, utilizando a energia gerada e injetada na rede, com base no consumo per capita de energia elétrica e no número de habitantes da região.

Outra estimativa realizada neste estudo foi a quantidade de água consumida nos processos das usinas de cana-de-açúcar na região da Nova Alta Paulista (NAP). Com base em relatórios de usinas sucroalcooleiras no estado de São Paulo, verificou-se que o consumo de água por tonelada de cana processada é frequentemente inferior a 1 m³. Considerando esses relatórios e a Resolução SMA 88, que exige que as usinas limitem o consumo de água a menos de 1 m³ por tonelada de cana processada em áreas classificadas como adequadas ou adequadas com limitações ambientais, adotou-se neste estudo o valor de 1 m³ por tonelada de cana processada, um valor conservador, especialmente para usinas mais modernas. Entretanto, para uma análise mais abrangente, também foi considerado o valor de 0,7 m³ por tonelada, exigido em áreas classificadas como Adequadas com Restrições Ambientais [52]. Ambos os casos analisados estão sintetizados na Tabela 3 e são representados nas variáveis do Quadro 3.

Tabela 3 – Casos de utilização de recursos hídricos nas usinas

Caso	Volume de água por tonelada de cana (m³/ton)
A	0,7
B	1,0

Fonte: Elaborado pelo autor

Para entender melhor o volume de água utilizado nessas usinas, foi estimada a parcela da população da NAP que poderia ser atendida com essa quantidade de água. Para isso, considerou-se a população da região ao longo dos anos analisados e o consumo anual de água per capita, conforme dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) [63]. Ressalta-se que, embora o SNIS não forneça dados para todas as trinta cidades da região, o consumo médio foi calculado com base nas informações disponíveis para as cidades registradas, juntamente com suas respectivas populações.

As estimativas apontadas nesta subseção fornecem uma base sólida para a análise energética e de sustentabilidade da região da NAP, considerando a geração de energia elétrica a partir do bagaço e do palhiço, a captação e emissão de CO₂ e o consumo de recursos hídricos pelas usinas.

8. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, são discutidos os dados obtidos, evidenciando as implicações dos diferentes cenários e casos analisados para a geração de energia, a absorção líquida de CO₂ e o consumo de recursos hídricos. Além disso, avalia-se a relação desses fatores com o atendimento das necessidades populacionais da região da NAP, considerando o impacto das práticas sucroenergéticas sobre a sustentabilidade local.

A Tabela 4 sintetiza os valores das grandezas primárias descritas anteriormente, abrangendo o período de 2009 a 2023. Com base nesses dados, foram calculadas as grandezas estimadas apresentadas no Quadro 3, possibilitando a análise detalhada dos cenários e casos estudados.

Tabela 4 – Grandezas primárias obtidas para o período considerado

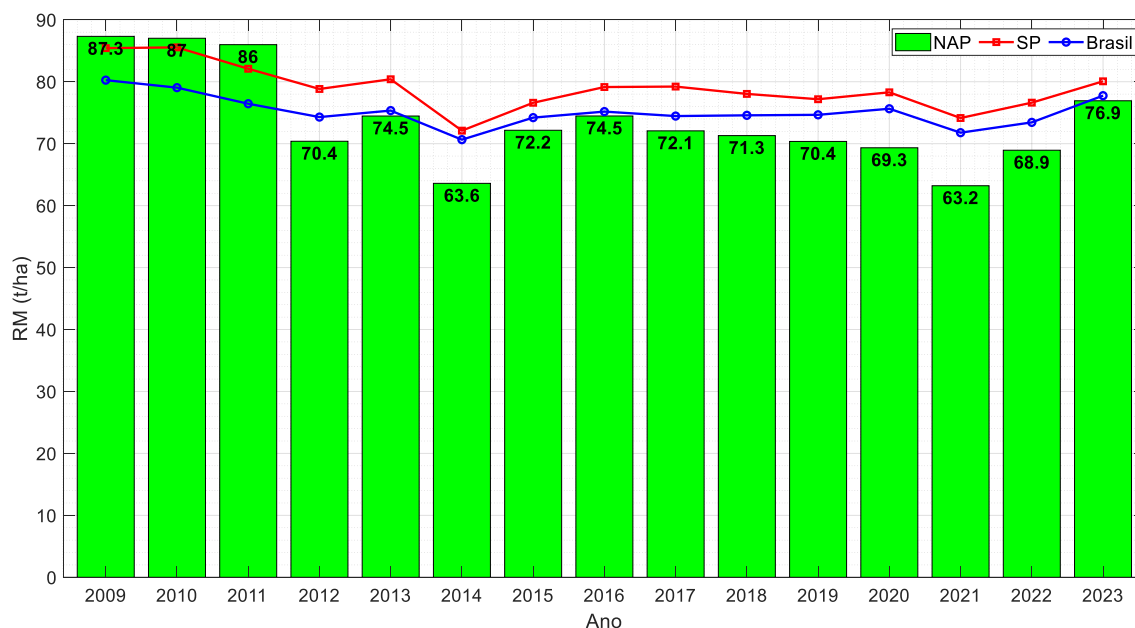
Ano	Acol (hec)	QPr (ton)	P _{NAP} (habitantes)	CEE _{SP} (kWh)	CA _{NAP} (m ³)	E _{BR} (tCO ₂ eq)
2009	171.356	14.963.389	387.196	2.795,0	62,36	2,0
2010	195.917	17.047.823	378.525	2.940,0	68,01	2,2
2011	214.706	18.461.143	379.765	3.024,0	68,95	2,3
2012	221.887	15.618.591	380.947	3.076,0	74,01	2,5
2013	224.426	16.711.413	394.690	3.107,0	67,71	2,6
2014	240.595	15.300.478	396.245	3091,5	76,28	2,7
2015	237.060	17.106.967	397.762	2935,8	72,14	2,6
2016	231.985	17.276.151	399.239	2828,8	70,65	2,4
2017	244.300	17.606.016	400.690	2858,3	68,16	2,4
2018	234.341	16.708.934	401.302	2896,1	71,53	2,3
2019	220.129	15.488.667	402.853	2881,5	73,79	2,2
2020	215.999	14.976.497	404.370	2780,9	75,44	2,1
2021	210.949	13.333.784	405.840	2933,6	75,98	2,3
2022	215.047	14.825.926	403.741	2926,4	82,04	2,2
2023	210.168	16.167.109	389.300	2975,8	79,01	2,2

Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 2 exibe o rendimento médio (RM) da região da Nova Alta Paulista (NAP), em toneladas por hectare (t/ha), ao longo do período analisado. A média do RM foi de 73,8 t/ha, com um máximo de 87,3 t/ha em 2009 e um mínimo de 63,2 t/ha em 2021. Para efeito de comparação, no mesmo intervalo, as médias do estado de São Paulo e do Brasil foram de 78,9

e 75,2 t/ha, respectivamente [60]. Entre as cidades da NAP, Salmourão apresentou o maior RM, com 84,96 t/ha, superando as médias estadual e nacional. Além disso, Dracena, Nova Guataporanga, São João do Pau d'Alho, Tupi Paulista, Inúbia Paulista, Irapuru, Osvaldo Cruz, Parapuã, Herculândia e Queiroz também se destacaram, registrando valores superiores à média estadual no período.

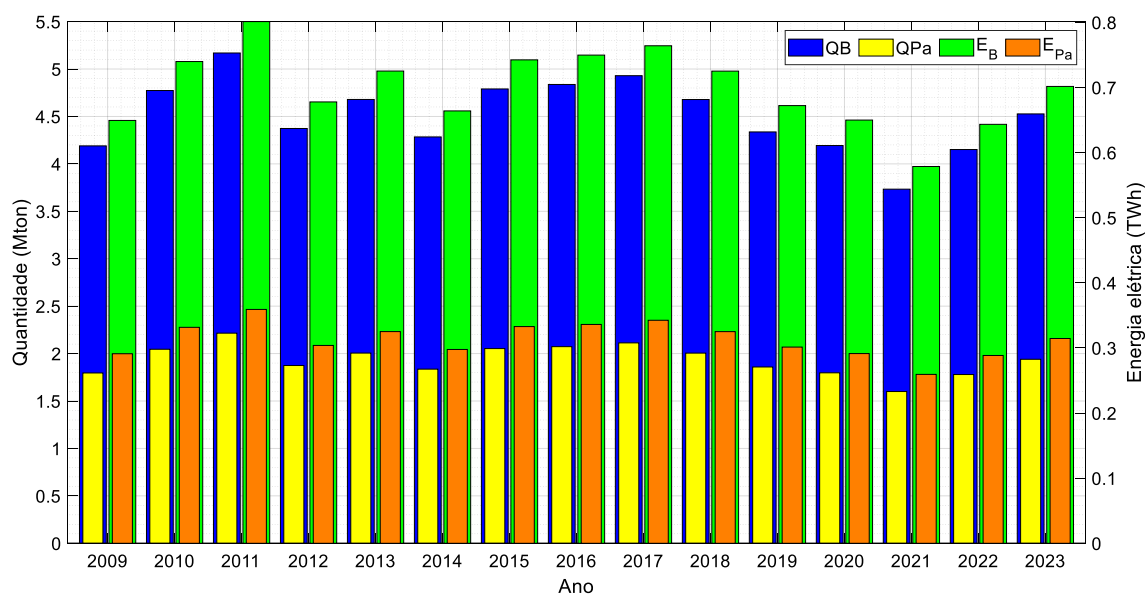
Figura 2 – Rendimento médio (RM) da região da NAP para o período considerado



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 3 destaca quatro grandezas estimadas para a região da NAP, derivadas das grandezas primárias: a quantidade de bagaço gerado a partir da moagem da cana-de-açúcar (QB), a quantidade de palhiço disponível (QPa), energia elétrica produzida a partir do bagaço (EB) e a energia elétrica gerada a partir do palhiço (EPa). Conforme ilustrado na Figura 3, existe uma relação direta entre a quantidade de bagaço e palhiço e o potencial de geração de energia. De maneira mais precisa, as fórmulas do Quadro 2 indicam que a relação entre a quantidade de cana-de-açúcar produzida (QPr) e a energia gerada a partir do bagaço e do palhiço é de 43,4 kWh/t e 19,45 kWh/t, respectivamente. Dessa forma, cada tonelada de cana-de-açúcar apresenta um potencial total de geração de 62,85 kWh.

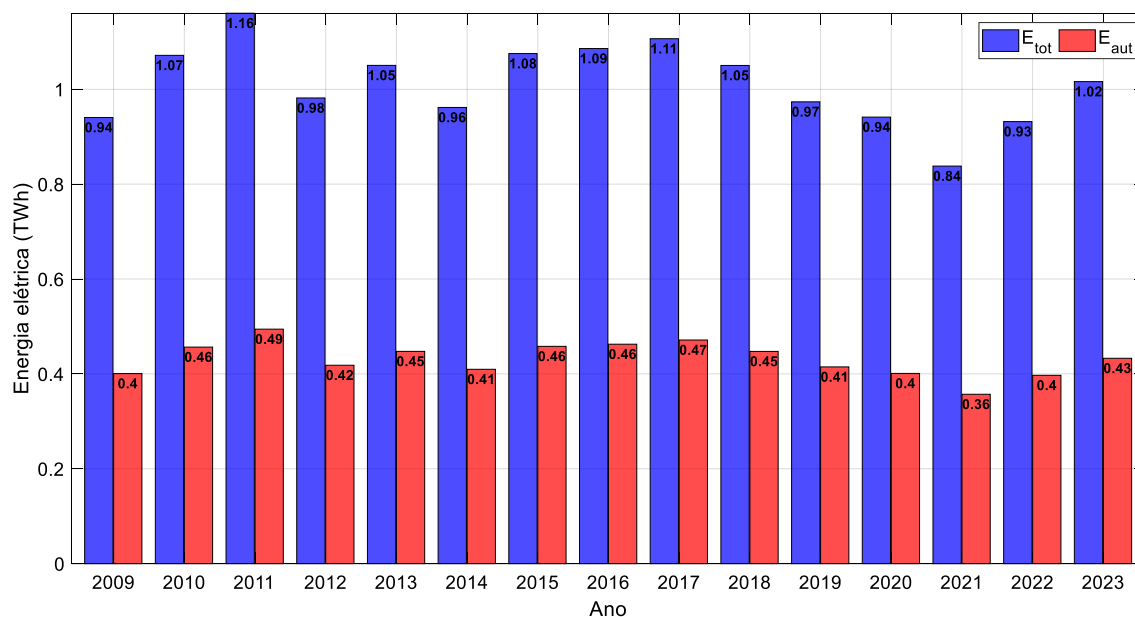
Figura 3 – Quantidade de insumos e potencial de energia elétrica gerada



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 4 exibe o potencial total de energia elétrica no processo de cogeração (E_{tot}) e a estimativa de consumo interno das usinas da região (E_{aut}). Ao longo do período analisado, a geração anual projetada supera consistentemente 0,8 TWh, enquanto o autoconsumo das usinas permanece abaixo de 0,5 TWh por ano. A diferença média entre E_{tot} e E_{aut} no período é de 0,58 TWh, resultando em um potencial acumulado de geração líquida de 8,72 TWh.

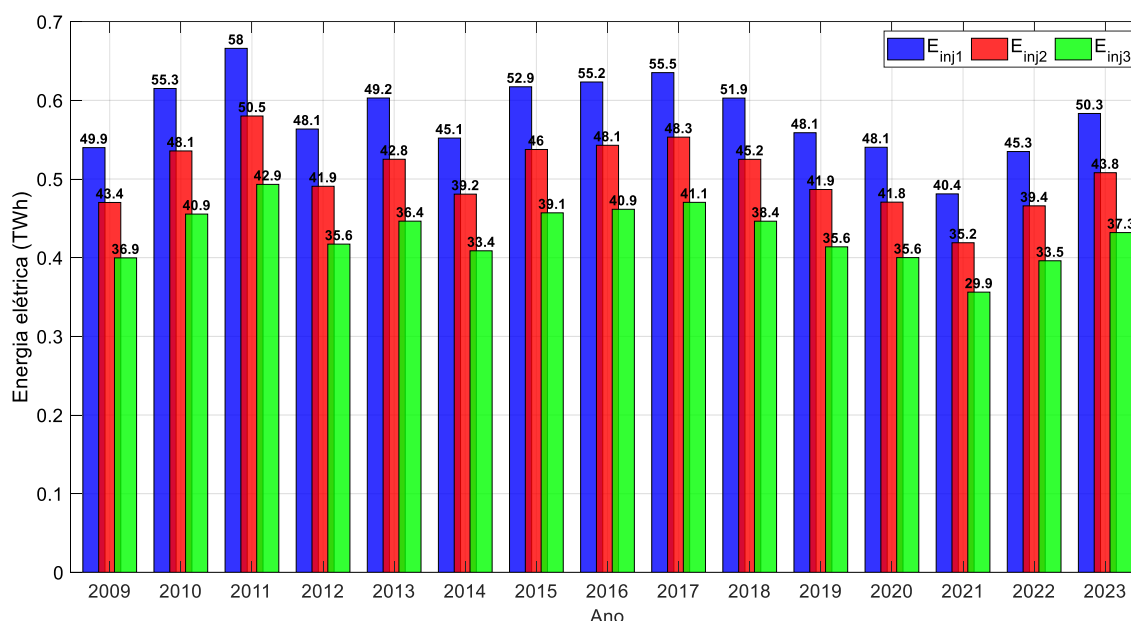
Figura 4 – Potencial de geração de energia elétrica total e estimativa do autoconsumo nos processos internos



Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme evidenciado pelas fórmulas apresentadas no Quadro 3 e pelas penalidades energéticas indicadas na Tabela 2, a energia elétrica injetada na rede no Cenário 1 é superior à dos Cenários 2 e 3, devido à ausência de penalidades energéticas nesse caso. Essa diferença é ilustrada na Figura 5, que destaca o ano de 2011 como o de maior energia injetada na rede durante o período analisado, refletindo a maior quantidade de cana-de-açúcar produzida (QPr) nesse ano, conforme apresentado na Tabela 4. As médias de energia elétrica injetada na rede para os Cenários 1, 2 e 3 ao longo do período foram de 0,581 TWh, 0,506 TWh e 0,430 TWh, respectivamente. Além disso, as barras do gráfico indicam as porcentagens da população equivalente da região que poderiam ser atendidas pela energia elétrica injetada na rede, denominadas neste trabalho como PEE_{eq1} , PEE_{eq2} e PEE_{eq3} , para os Cenários 1, 2 e 3, respectivamente. Considerando a média simples das energias injetadas ao longo dos anos analisados, os valores médios de PEE_{eq1} , PEE_{eq2} e PEE_{eq3} correspondem a 50,2%, 43,7% e 37,2% da população potencialmente atendida pela eletricidade disponibilizada na rede.

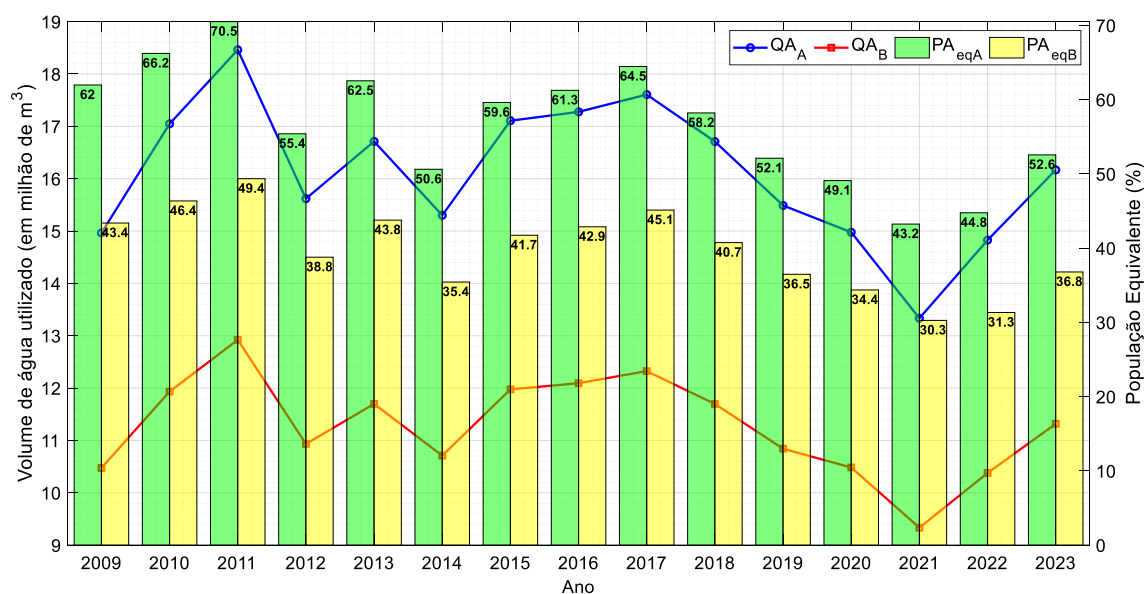
Figura 5 – Energia elétrica injetada na rede em cada um dos cenários



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 6 apresenta o volume de água estimado para os processamentos internos das usinas da região da NAP, considerando os dois casos avaliados neste estudo. A partir dos volumes de água utilizados nos casos A (QA_A) e B (QA_B), foram calculadas as porcentagens da população que poderiam ser atendidas por esses recursos hídricos, representadas como PA_{eqA} e PA_{eqB} nas barras do gráfico. Como esperado, o volume de água utilizado no caso A permitiria atender a uma parcela maior da população em comparação com o caso B.

Figura 6 – Volume de água utilizado e porcentagem de população equivalente

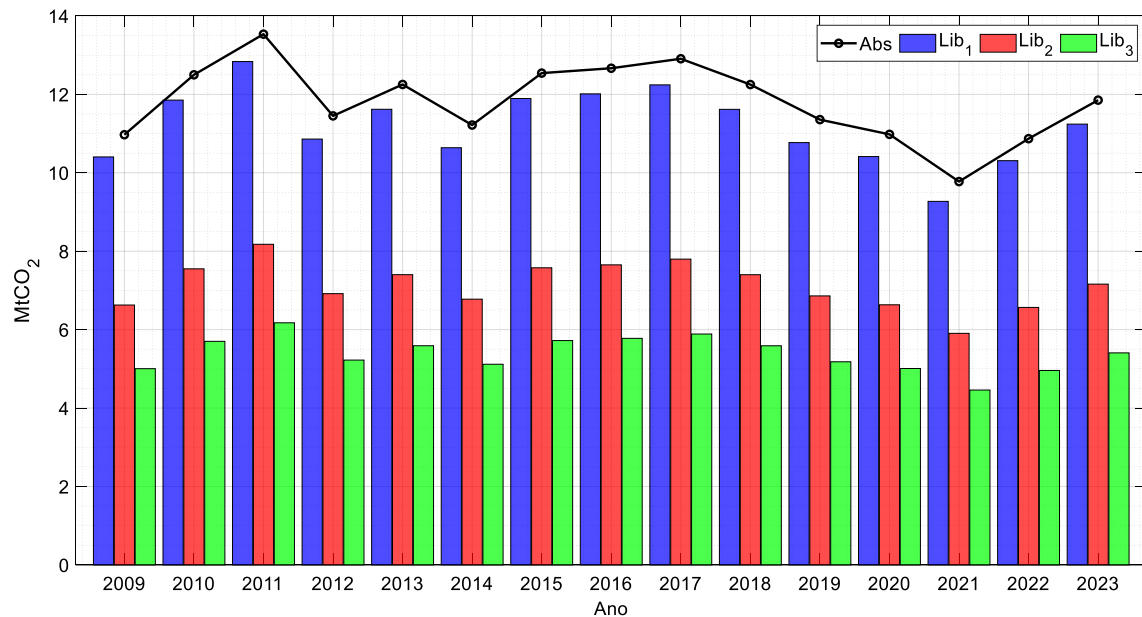


Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 7 mostra a absorção de CO₂ pelas plantações de cana-de-açúcar da região da NAP (Abs) ao longo do período analisado, juntamente com a liberação de CO₂ associada aos processos internos das usinas nos Cenários 1, 2 e 3, denominadas Lib₁, Lib₂ e Lib₃, respectivamente. O gráfico evidencia que, em todos os cenários, a absorção de CO₂ pelas plantações supera as emissões dos processos industriais, com destaque para o Cenário 3, que apresenta o melhor desempenho ambiental, refletindo a menor liberação líquida de CO₂. É importante destacar que este estudo considera apenas a emissão de dióxido de carbono nos processos internos das usinas, sem incluir as emissões resultantes da combustão do etanol em veículos automotores. Embora sejam necessários estudos adicionais para quantificar os gases liberados pela frota da região analisada, ressalta-se que o uso do etanol em substituição à gasolina proporciona benefícios ambientais significativos.

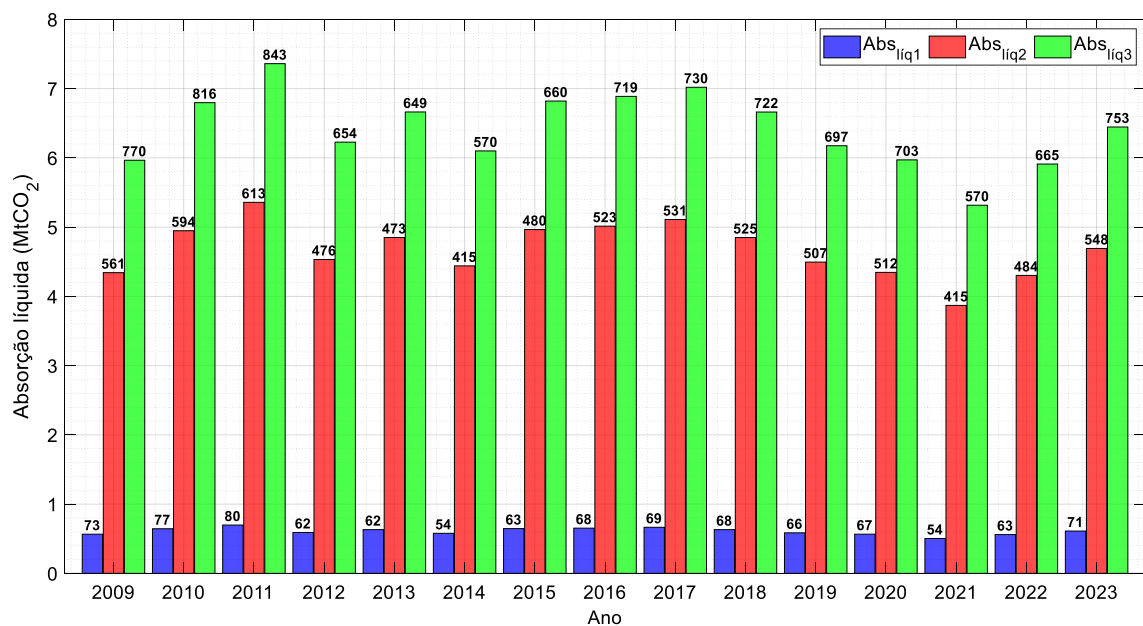
A Figura 8 ilustra a absorção líquida de CO₂ nos três cenários avaliados, identificados como Abs_{liq1}, Abs_{liq2} e Abs_{liq3}. O gráfico também exibe, junto às barras de cada cenário, a porcentagem da população cuja emissão de CO₂ corresponderia ao valor da absorção líquida, denominadas PAbs_{eq1}, PAbs_{eq2} e PAbs_{eq3}, respectivamente. Observa-se que, em oito dos quinze anos analisados para o Cenário 3, a absorção líquida de CO₂ supera em mais de sete vezes as emissões de CO₂ da população da NAP, destacando o impacto ambiental positivo do uso da biomassa de cana-de-açúcar como insumo para a geração de energia. Ressalta-se ainda que, apenas no Cenário 1, a absorção líquida não excede as emissões de CO₂ da população da região.

Figura 7 – Absorção pelas plantações e Liberação pelos processos das usinas



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 8 – Absorção líquida de CO2 em cada um dos cenários



Fonte: Elaborado pelo autor

A análise da Tabela 2 revela que a penalidade energética no Cenário 3 é praticamente o dobro da observada no Cenário 2, enquanto a captura de CO₂ aumenta cerca de 143%, demonstrando a relação não linear entre esses fatores. Assim, em termos de energia consumida por unidade de CO₂ capturado, o Cenário 2 apresenta um custo inferior ao do Cenário 3. Neste estudo, essa relação é de 18,45 kWh/tCO₂ para o Cenário 2 e de 25,95 kWh/tCO₂ para o Cenário 3, reforçando a maior eficiência energética do primeiro. Contudo, vale destacar que entre os

dois cenários destacados nesse trabalho, que foram baseados em estudos realizados em [38], podem haver outros cenários, que podem ser mais vantajosos do que o próprio cenário 2. A decisão pela porcentagem de captura de CO₂ a ser implementada depende de aspectos técnicos das plantas da região.

9. CONCLUSÕES

O principal objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial de geração de energia elétrica a partir da biomassa de cana-de-açúcar na região da Nova Alta Paulista, com foco nas emissões de carbono, no sequestro de CO₂ e no consumo de água. Este objetivo principal foi alcançado a partir de quatro objetivos específicos, que foram todos atingidos. A resposta para a pergunta de pesquisa deste trabalho segue na sequência.

De que forma a geração de energia elétrica a partir da biomassa de cana-de-açúcar nas usinas da Nova Alta Paulista pode contribuir para a sustentabilidade regional, considerando o potencial energético, o sequestro de carbono, as emissões de CO₂ e o uso de recursos hídricos?

A cogeração de energia elétrica a partir da biomassa de cana-de-açúcar desempenha um papel estratégico para a sustentabilidade energética e ambiental da região da Nova Alta Paulista. As avaliações e estimativas realizadas evidenciam que a bioeletricidade gerada nas usinas locais não apenas contribui para o suprimento energético da região, mas também apresenta um impacto positivo na redução das emissões de CO₂ e na gestão dos recursos hídricos. A análise dos diferentes cenários revelou que, mesmo sem considerar a implementação da tecnologia de captura de CO₂, a absorção líquida desse gás pelas plantações de cana-de-açúcar supera significativamente as emissões industriais, reforçando o potencial do setor sucroenergético na mitigação das mudanças climáticas. Diante desses resultados, destaca-se a importância da modernização das usinas e da adoção de tecnologias que maximizem a eficiência energética e reduzam o consumo de recursos hídricos, garantindo um balanço ambiental ainda mais favorável. Assim, a bioeletricidade gerada a partir da cana-de-açúcar se consolida como uma alternativa viável e sustentável para a matriz elétrica da NAP, promovendo segurança energética e benefícios ambientais de longo prazo.

Além do cumprimento do objetivo principal, a metodologia desenvolvida neste estudo se mostra robusta e replicável para outras regiões do estado de São Paulo e do Brasil, visto que as fontes de dados utilizadas, como IBGE, EPE e ANEEL, possuem abrangência nacional.

Dessa forma, a aplicação dessa abordagem em diferentes localidades pode fornecer informações estratégicas para a formulação de políticas públicas voltadas à ampliação da bioeletricidade e ao aprimoramento da sustentabilidade do setor sucroenergético.

REFERÊNCIAS

- [1] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanço energético nacional 2024:** ano base 2023. Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-723/BEN2024.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2024.
- [2] REN21. **Renewables 2024 global status report collection:** energy supply. Paris: REN21 Secretariat, 2024. ISBN 978-3-948393-15-1.
- [3] UNIÃO DA INDÚSTRIA DA CANA-DE-AÇÚCAR (UNICA). **Bioeletricidade em números:** maio de 2024. São Paulo: UNICA, 2024. Disponível em: <https://unicadata.com.br/listagem.php?idMn=134>. Acesso em: 20 abr. 2024.
- [4] NOVACANA. **Cogeração:** como funciona a produção de energia elétrica. [S. l.]: NovaCana, [202–]. Disponível em: <https://www.novacana.com/noticias/cogeracao-como-funciona-producao-energia-eletrica>. Acesso em: 10 dez. 2024.
- [5] ALVES, M.; PONCE, G. H.; SILVA, M. A.; ENSINAS, A. V. Surplus electricity production in sugarcane mills using residual bagasse and straw as fuel. *Energy*, Oxford, v. 91, p. 751–757, 2015. DOI: 10.1016/j.energy.2015.08.101.
- [6] BIZZO, W. A.; LENÇO, P. C.; CARVALHO, D. J.; VEIGA, J. P. S. The generation of residual biomass during the production of bio-ethanol from sugarcane, its characterization and its use in energy production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Oxford, v. 29, p. 589–603, 2014. DOI: 10.1016/j.rser.2013.08.056.
- [7] FIORANELLI, A.; BIZZO, W. A. Generation of surplus electricity in sugarcane mills from sugarcane bagasse and straw: Challenges, failures and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Oxford, v. 186, n. 113647, 2023. DOI: 10.1016/j.rser.2023.113647.
- [8] CERRI, C. E. P. et al. Carbon balance in the sugarcane sector - conference report. *Journal of Cleaner Production*, Oxford, v. 375, n. 134090, 2022. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.134090.
- [9] BARBOSA, L. de S. N. S.; HYTÖNEN, E.; VAINIKKA, P. Carbon mass balance in sugarcane biorefineries in Brazil for evaluating carbon capture and utilization opportunities. *Biomass and Bioenergy*, Oxford, v. 105, p. 351–363, 2017. DOI: 10.1016/j.biombioe.2017.07.015.
- [10] UPPALAPATI, S. et al. Environmental impact and energy balance assessment in ethanol production from sugarcane molasses: A life cycle analysis in southern India. *Renewable and*

Sustainable Energy Reviews, Oxford, v. 204, n. 114807, 2024. DOI: 10.1016/j.rser.2024.114807.

[11] CORRÊA DO LAGO, A. et al. Sugarcane as a carbon source: The Brazilian case. *Biomass and Bioenergy*, Oxford, v. 46, p. 5–12, 2012. DOI: 10.1016/j.biombioe.2012.09.007.

[12] DIAS, M. O. de S. et al. Sugarcane processing for ethanol and sugar in Brazil. *Environmental Development*, Oxford, v. 15, p. 35–51, 2015. DOI: 10.1016/j.envdev.2015.03.004.

[13] BORDONAL, R. D. O. et al. Sustainability of sugarcane production in Brazil: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, Paris, v. 38, n. 2, p. 1–23, 2018. DOI: 10.1007/s13593-018-0490-x.

[14] GONÇALES FILHO, M. et al. Opportunities and challenges for the use of cleaner production to reduce water consumption in Brazilian sugar-energy plants. *Journal of Cleaner Production*, Oxford, v. 186, p. 353–363, 2018. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.03.114.

[15] INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Produção Agrícola Municipal 2022: culturas temporárias e permanentes**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. 12 p. (Informativo; v. 49). ISSN 0101-3963. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html?=&t=o-que-e>. Acesso em: 10 dez. 2024.

[16] GIL, Izabel Castanha. **Nova Alta Paulista, 1930-2006: entre memórias e sonhos**. Do desenvolvimento contido ao projeto político de desenvolvimento regional. 2007. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, 2007.

[17] INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). IBGE Cidades. Rio de Janeiro: IBGE, [s.d.]. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/>. Acesso em: 11 dez. 2024.

[18] SÃO PAULO (Estado). Últimas notícias. Portal do Governo do Estado de São Paulo. Disponível em: <https://www.saopaulo.sp.gov.br/spnoticias/ultimas-noticias>. Acesso em: 11 dez. 2024.

[19] INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Divisão regional do Brasil em regiões geográficas imediatas e regiões geográficas intermediárias**: 2017. Rio de Janeiro: IBGE, 2017. 82 p. e-ISBN 978-85-240-4418-2. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv100600.pdf>. Acesso em: 16 dez. 2024.

[20] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **SIGA – Sistema de Informações de Geração da ANEEL**. Disponível em: <https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/siga-sistema-de-informacoes-de-geracao-da-aneel>. Acesso em: 16 dez. 2024.

- [21] COGEN – Associação da Indústria de Cogeração de Energia. **Cogeração**: conceito e tecnologias. Disponível em: <https://www.cogen.com.br/cogeracao/conceito-e-tecnologias>. Acesso em: 18 dez. 2024.
- [22] BOYCE, Meherwan P. **Handbook for cogeneration and combined cycle power plants**. 2. ed. New York: ASME Press, 2010.
- [23] PROGRAMA POTENCIALIZEE. **Programa PotencializEE – Eficiência Energética na Indústria**. Disponível em: <https://www.programa-potencializee.com.br>. Acesso em: 18 dez. 2024.
- [24] DELGADO, Rafael Filipe Lourenço. **Estudo e implementação de um sistema de cogeração**. 2016. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2016.
- [25] ALVES, Moisés. **Estudo de sistemas de cogeração em usinas de açúcar e álcool, com utilização do bagaço e palha da cana**. 2011. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, SP. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/Acervo/Detalhe/807858>. Acesso em: 29 abr. 2024.
- [26] RESTREPO-VALENCIA, S.; WALTER, A. CO₂ capture in a thermal power plant using sugarcane residual biomass. *Energies*, Basel, v. 16, n. 12, 4570, 2023. DOI: 10.3390/en16124570.
- [27] REY, J. Copa; PACHECO, J. Tamayo; TARELHO, L. António da Cruz; SILVA, V.; CARDOSO, J.; SILVEIRA, J. et al. Evaluation of cogeneration alternative systems integrating biomass gasification applied to a Brazilian sugar industry. *Renewable Energy*, v. 178, p. 318–333, 2021. DOI: 10.1016/j.renene.2021.06.053.
- [28] GHAFARPOUR, Z.; MAHMOUDI, M.; MOSAFFA, A.; FARSHI, L. Thermoeconomic assessment of a novel integrated biomass based power generation system including gas turbine cycle, solid oxide fuel cell and rankine cycle. *Energy Conversion and Management*, v. 161, p. 1–12, 2018. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.01.071.
- [29] PEDROSO, D.; MACHIN, E.; PROENZA PEREZ, N.; BRAGA, L.; SILVEIRA, J. Technical assessment of the biomass integrated gasification/gas turbine combined cycle (BIG/GTCC) incorporation in the sugarcane industry. *Renewable Energy*, v. 114, p. 464–479, 2017. DOI: 10.1016/j.renene.2017.07.038.
- [30] MACHIN, E. et al. Biomass integrated gasification-gas turbine combined cycle (BIG/GTCC) implementation in the Brazilian sugarcane industry: economic and environmental appraisal. *Renewable Energy*, v. 172, p. 529–540, 2021. DOI: 10.1016/j.renene.2021.03.074.
- [31] LOZANO, M.; SANTOS, R.; SANTOS, J.; SERRA, L. Optimal modes of operation and product cost allocation in sugarcane steam cogeneration plants. *Thermal Science and Engineering Progress*, v. 52, n. 102686, 2024. DOI: 10.1016/j.tsep.2024.102686.

- [32] FONSECA, G.; COSTA, C.; CRUZ, A. Economic analysis of a second-generation ethanol and electricity biorefinery using superstructural optimization. *Energy*, v. 204, n. 117988, 2020. DOI: 10.1016/j.energy.2020.117988.
- [33] ALKIMIM, A.; CLARKE, K. Land use change and the carbon debt for sugarcane ethanol production in Brazil. *Land Use Policy*, v. 72, p. 65–73, 2018. DOI: 10.1016/j.landusepol.2017.12.039.
- [34] CABRAL, O. et al. Fluxes of CO₂ above a sugarcane plantation in Brazil. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 182–183, p. 54–66, 2013. DOI: 10.1016/j.agrformet.2013.08.004.
- [35] PATEL, N. et al. Dynamics of CO₂ fluxes and controlling environmental factors in sugarcane (C₄)–wheat (C₃) ecosystem of dry sub-humid region in India. *International Journal of Biometeorology*, v. 65, p. 1069–1084, 2021. DOI: 10.1007/s00484-021-02088-y.
- [36] RESTREPO-VALENCIA, S.; WALTER, A. Techno-economic assessment of bioenergy with carbon capture and storage systems in a typical sugarcane mill in Brazil. *Energies*, v. 12, n. 1129, 2019. DOI: 10.3390/en12061129.
- [37] MOREIRA, J. et al. BECCS potential in Brazil: achieving negative emissions in ethanol and electricity production based on sugar cane bagasse and other residues. *Applied Energy*, v. 179, p. 55–63, 2016. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.06.044.
- [38] BUNYA, B. et al. Optimization and tradeoff analysis for multiple configurations of bio-energy with carbon capture and storage systems in Brazilian sugarcane ethanol sector. *Entropy*, v. 26, n. 8, p. 698, 2024. DOI: 10.3390/e26080698.
- [39] CARMO, J. B. et al. Infield greenhouse gas emissions from sugarcane soils in Brazil: effects from synthetic and organic fertilizer application and crop trash accumulation. *GCB Bioenergy*, v. 5, n. 3, p. 267–280, 2012. DOI: 10.1111/j.1757-1707.2012.01199.x.
- [40] FORMANN, S. et al. Beyond sugar and ethanol production: value generation opportunities through sugarcane residues. *Frontiers in Energy Research*, v. 8, 579577, 2020. DOI: 10.3389/fenrg.2020.579577.
- [41] RESTREPO-VALENCIA, S.; WALTER, A. BECCS opportunities in Brazil: comparison of pre and post-combustion capture in a typical sugarcane mill. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, v. 124, n. 103859, 2023. DOI: 10.1016/j.ijggc.2023.103859.
- [42] MIKULIC, H. et al. Flexible carbon capture and utilization technologies in future energy systems and the utilization pathways of captured CO₂. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 114, n. 109338, 2019. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109338.
- [43] KARP, S.; BURGOS, W.; VANDENBERGHE, L. et al. Sugarcane: A promising source of green carbon in the circular bioeconomy. *Sugar Tech*, v. 24, p. 1230–1245, 2022. DOI: 10.1007/s12355-022-01161-z.

- [44] ANSORGE, L.; STEJSKALOVÁ, L. Water footprint as a tool for selection of alternatives (comments on “Food recommendations for reducing water footprint”). *Sustainability*, v. 14, n. 6317, 2022. DOI: 10.3390/su14106317.
- [45] HU, M. et al. Spatial-temporal variations in green, blue and gray water footprints of crops: how do socioeconomic drivers influence? *Environmental Research Letters*, v. 17, n. 124024, 2022. DOI: 10.1088/1748-9326/aca4e5.
- [46] SHEN, R.; YAO, L. A holistic analysis of China’s consumption-based water footprint (2012–2017) from a multilevel perspective. *Journal of Cleaner Production*, v. 429, n. 139593, 2023. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.139593.
- [47] SCARPARE, F.; HERNANDES, T.; RUIZ-CORREA, S. et al. Sugarcane water footprint under different management practices in Brazil: Tietê/Jacaré watershed assessment. *Journal of Cleaner Production*, v. 112, p. 4576–4584, 2016. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.05.107.
- [48] TAYADE, A.; VASANTHA, S.; ANUSHA, S. et al. Water-efficient genotypes along with conservation measures significantly reduce the green and blue water footprints in sugarcane (*Saccharum spp.*). *Scientific Reports*, v. 13, n. 13229, 2023. DOI: 10.1038/s41598-023-40223-4.
- [49] RAJKUMAR, R. et al. Drip irrigation for sustaining high sugarcane (*Saccharum officinarum*) yield in marginally to moderately waterlogged saline Vertisols of Karnataka, India. *Irrigation and Drainage*, 2024. DOI: 10.1002/ird.2990.
- [50] BARROQUELA, W.; BEGA, J.; ANICIO, S. d. O.; OLIVEIRA, J. d. Water consumption in the production process of the sugar-energy industry: case study in the northwest of São Paulo (Brazil). *Brazilian Journal of Environmental Sciences*, v. 58, n. 2, p. 251–260, 2023. DOI: 10.5327/Z2176-94781559.
- [51] SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística. **Protocolo Etanol Mais Verde**. Disponível em: <https://semil.sp.gov.br/sma/etanolverde/>. Acesso em: 4 jan. 2025.
- [52] SÃO PAULO (Estado). Secretaria do Meio Ambiente. **Resolução SMA nº 88, de 19 de dezembro de 2008**. Dispõe sobre critérios e diretrizes para o uso da água nas unidades de produção de etanol no Estado de São Paulo. Disponível em: https://www.cetesb.sp.gov.br/licenciamento/documentos/2008_Res_SMA_88.pdf. Acesso em: 4 jan. 2025.
- [53] ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 4 jan. 2025.
- [54] USINA LINS. **Relatório de Sustentabilidade: Safra 2022/2023**. Lins: Usina Lins, [s.d.]. Disponível em: https://www.usinalins.com.br/Relatorio_Sustentabilidade.pdf. Acesso em: 10 out. 2024.

- [55] COLOMBO AGROINDÚSTRIA. **Relatório de Sustentabilidade Anual**. Colombo Agroindústria, [s.d.]. Disponível em: <https://www.colomboagroindustria.com.br/relatorio-de-sustentabilidade-anual>. Acesso em: 10 out. 2024.
- [56] ZILOR. **Relatório de Sustentabilidade**. Zilor, [s.d.]. Disponível em: <https://www.zilor.com.br/relacoes-com-investidores/governanca-corporativa/relatorio-de-sustentabilidade/>. Acesso em: 10 out. 2024.
- [57] SÃO MANOEL. **Sustentabilidade**. São Manoel, [s.d.]. Disponível em: <https://www.saomanoel.com.br/sustentabilidade>. Acesso em: 10 out. 2024.
- [58] TEREOS. **Relatório de sustentabilidade**. [S.l.]: Tereos, [s.d.]. Disponível em: <https://br.tereos.com/pt-pt/sustentabilidade/relatorio-sustentabilidade/>. Acesso em: 10 out. 2024.
- [59] SÃO MARTINHO. **Relatório Anual de Sustentabilidade**. [S.l.]: São Martinho, [s.d.]. Disponível em: <https://www.saomartinho.com.br/ListRelatorio.aspx?idCanal=E/5CI5hbGiTfjZ7mhu2y5w==>. Acesso em: 10 out. 2024.
- [60] INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Produção Agrícola Municipal: culturas temporárias e permanentes**. Rio de Janeiro: IBGE, [s.d.]. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html>. Acesso em: 24 jan. 2025.
- [61] INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Tabela 6579: Cana-de-açúcar - Área colhida, quantidade produzida e rendimento médio da produção - Brasil - Série histórica**. Rio de Janeiro: IBGE, [s.d.]. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/6579>. Acesso em: 24 jan. 2025.
- [62] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Anuário estatístico de energia elétrica 2024: ano base 2023**. Rio de Janeiro: EPE, jun. 2024. Disponível em: <https://dashboard.epe.gov.br/apps/anuario-livro/>. Acesso em: 24 jan. 2025.
- [63] BRASIL. Ministério das Cidades. **SNIS – Série Histórica: Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento**. Disponível em: <https://app4.cidades.gov.br/serieHistorica/>. Acesso em: 24 jan. 2025.
- [64] ROSER, Max; RITCHIE, Hannah; ORTIZ-OSPINA, Esteban; RODÉS-GRAU, Pablo. **CO₂ and Greenhouse Gas Emissions**. Our World in Data, 2024. Disponível em: <https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions>. Acesso em: 25 jan. 2025.
- [65] COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (Brasil). **A geração termoeletrônica com a queima do bagaço de cana-de-açúcar no Brasil: análise do desempenho da safra 2009-2010**. Brasília: Conab, mar. 2011. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/agroenergia/arquivos-termoeletrica-com-a-queima-do-bagaco-de>

cana-de-acucar/termoeletrica-com-a-queima-do-bagaco-de-cana-de-acucar-no-brasil-safra-2009-2010.pdf. Acesso em: 10 out. 2024.

[66] NOVACANA. **Como é feito o processamento da cana-de-açúcar nas usinas**. Disponível em: <https://www.novacana.com/noticias/como-e-feito-processamento-cana-de-acucar>. Acesso em: 10 out. 2024.

[67] MENANDRO, Lauren Maine Santos et al. Comprehensive assessment of sugarcane straw: implications for biomass and bioenergy production. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, v. 11, n. 3, p. 488–504, 2017. DOI: 10.1002/bbb.1760.

[68] CARVALHO, Danilo José; VEIGA, João Paulo Soto; BIZZO, Waldir Antonio. Analysis of energy consumption in three systems for collecting sugarcane straw for use in power generation. *Energy*, v. 119, p. 178–187, 2017. DOI: 10.1016/j.energy.2016.12.067.

[69] PAULA, Mauro de; PEREIRA, Francisco Assis Rolim; ARIAS, Edison Rubens Arrabal; SCHEEREN, Bruno Ricardo; SOUZA, Celso Correia de; MATA, Danúbia Sales da. Fixação de carbono e a emissão dos gases de efeito estufa na exploração da cana-de-açúcar. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v. 34, n. 3, p. 633–640, jun. 2010. DOI: 10.1590/S1413-70542010000300015.

[70] DIAS, Raquel de Freitas; CARMINATI, Hudson Bolsoni; ARAÚJO, Ofélia de Queiroz Fernandes; MEDEIROS, José Luiz de. Water and power consumption, ethanol production and CO₂ emissions: high-scale sugarcane-based biorefinery toward neutrality in carbon. In: *CARBON DIOXIDE: PROBLEMS AND DECISIONS II*, 2019. Materials Science Forum, [S. l.], v. 965, p. 87–95, set. 2019. Trans Tech Publications Ltd. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.965.87.

[71] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Anuário estatístico de energia elétrica 2014**: ano base 2013. Rio de Janeiro: EPE, out. 2014. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anu%C3%A1rio%20Estat%C3%ADstico%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%202014.pdf>. Acesso em: 24 jan. 2025.

[72] INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Demográfico 2022**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/trabalho/22827-censo-demografico-2022.html>. Acesso em: 21 jan. 2025.