

CENTRO PAULA SOUZA
ETEC PROF. JADYR SALLES

Técnico em Açúcar e Alcool

FELIPE A. B. ASSUNÇÃO

GUSTAVO T. DELGADO

HADRIAN G. A. SILVA

LUÍS F. V. SILVA

VANESSA A. NARDON

**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA
SUBSTITUIÇÃO DO DIESEL POR BIOMETANO NA FROTA
AGRÍCOLA DE USINA SUCROENERGÉTICA**
SIMULAÇÃO EM DADOS DO SETOR

PORTO FERREIRA

2026

FELIPE A. B. ASSUNÇÃO

GUSTAVO T. DELGADO

HADRIAN G. A. SILVA

LUÍS F. V. SILVA

VANESSA A. NARDON

**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA
SUBSTITUIÇÃO DO DIESEL POR BIOMETANO NA FROTA
AGRÍCOLA DE USINA SUCROENERGÉTICA**

SIMULAÇÃO EM DADOS DO SETOR

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso Técnico em Açúcar e Alcool da Etec
Profº Jadyr Salles, orientado pela Prof. Vivian
C. C. Iuan, como requisito para obtenção do
título de Técnico em Açúcar e Alcool.

PORTO FERREIRA

2026

Dedicamos este trabalho aos nossos pais, que nos ensinaram o valor da educação, da disciplina e do esforço contínuo, e a todos os professores que contribuíram para nossa formação. Que este estudo sobre energias renováveis e sustentabilidade represente não apenas uma conquista acadêmica, mas também uma contribuição para um futuro mais consciente e responsável.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradecemos aos nossos pais, pelo apoio incondicional, incentivo e confiança em nossa capacidade de aprender e evoluir.

Amigos e colegas, pelo suporte emocional e pelas discussões enriquecedoras que contribuíram com o aprimoramento de nossas ideias.

Por fim, às instituições e fontes de pesquisa que disponibilizaram dados, artigos e relatórios essenciais, permitindo a elaboração de uma análise consistente e fundamentada.

Aos professores e orientadores, pela dedicação, pelos conhecimentos compartilhados e pelas orientações fundamentais ao desenvolvimento deste trabalho.

"Não herdamos a Terra de nossos antepassados:
nós a tomamos emprestada de nossos filhos."
— Provérbio indígena

RESUMO

O setor sucroenergético brasileiro desempenha papel estratégico na produção de energia renovável, porém ainda apresenta significativa dependência de combustíveis fósseis na etapa agrícola, especialmente do diesel. Este trabalho tem como objetivo avaliar a viabilidade técnica e econômica da substituição parcial do diesel por biometano, obtido a partir da vinhaça gerada no processo de produção de etanol, considerando uma usina sucroenergética representativa. A metodologia baseou-se na construção de um modelo, utilizando dados médios do setor para estimar a produção de vinhaça, o potencial de geração de biogás e sua conversão em biometano. A partir dessas estimativas realizaram-se análises de equivalência energética em relação ao diesel, e avaliação econômica, considerando custos de implantação (CAPEX), custos operacionais (OPEX), economia gerada e tempo de retorno do investimento (*payback*), além de análise ambiental baseada na estimativa de emissões evitadas de dióxido de carbono (CO₂). Os resultados indicam que a usina analisada apresenta potencial para produzir aproximadamente 5,81 milhões de metros cúbicos de biometano por safra, o que corresponde à substituição de cerca de 98,6% do consumo anual de diesel da frota agrícola. Do ponto de vista econômico, a economia líquida estimada foi de R\$ 31,28 milhões por ano, com tempo de retorno do investimento inferior a um ano. Sob o aspecto ambiental, verifica-se a possibilidade de evitar a emissão de aproximadamente 15,85 mil toneladas de CO₂ por ano. Conclui-se que a produção de biometano a partir da vinhaça constitui uma alternativa tecnicamente viável, economicamente atrativa e ambientalmente sustentável para o setor sucroenergético, contribuindo para a redução da dependência de combustíveis fósseis e para o avanço de práticas alinhadas à economia circular e à descarbonização.

Palavras-chave: biometano; vinhaça; setor sucroenergético; diesel; viabilidade econômica; sustentabilidade.

ABSTRACT

The Brazilian sugar-energy sector plays a strategic role in renewable energy production; however, it still presents significant dependence on fossil fuels in the agricultural stage, especially diesel fuel. This study aims to evaluate the technical and economic feasibility of partially replacing diesel with biomethane obtained from vinasse generated during the ethanol production process, considering a representative sugar-energy plant. The methodology was based on the development of a model using average sector data to estimate vinasse production, biogas generation potential, and its conversion into biomethane. Based on these estimates, analyses of energy equivalence in relation to diesel and economic assessment were carried out, considering capital expenditures (CAPEX), operational expenditures (OPEX), generated savings, and investment payback period, in addition to an environmental analysis based on the estimation of avoided carbon dioxide (CO₂) emissions. The results indicate that the analyzed plant has the potential to produce approximately 5.81 million cubic meters of biomethane per harvest, corresponding to the replacement of about 98.6% of the annual diesel consumption of the agricultural fleet. From an economic perspective, the estimated net savings reached R\$ 31.28 million per year, with a payback period of less than one year. From an environmental standpoint, it is possible to avoid the emission of approximately 15.85 thousand tons of CO₂ per year. It is concluded that the production of biomethane from vinasse constitutes a technically feasible, economically attractive, and environmentally sustainable alternative for the sugar-energy sector, contributing to the reduction of dependence on fossil fuels and to the advancement of practices aligned with circular economy and decarbonization.

Keywords: biomethane; vinasse; sugar-energy sector; diesel; economic feasibility; sustainability.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização da usina sucroenergética modelo.....	19
Tabela 2 – Estimativa de produção de biogás e biometano.....	21
Tabela 3 – Substituição de diesel por biometano.....	21
Tabela 4 – Avaliação econômica do sistema de biometano.....	25
Tabela 5 – Redução de emissões de CO ₂	26
Tabela 6 – Cenário de substituição total do diesel por biometano.....	28

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1. Problema	11
1.2. Hipótese.....	11
1.3. Objetivos	11
1.3.1. Objetivo geral	11
1.3.2. Objetivos específicos.....	11
1.4. Justificativa	12
1.5. Metodologia	13
1.5.1. Estimativa da produção de vinhaça.....	13
1.5.2. Potencial de produção de biogás a partir da vinhaça (Equação 1)	13
1.5.3. Conversão de biogás em biometano (Equação 2).....	14
1.5.4. Equivalência energética entre biometano e diesel (Equação 3)	14
1.5.5. Percentual de substituição (Equação 4)	15
1.5.6. Estimativa de economia bruta (Equação 5).....	15
1.5.7. Payback simples (Equação 6).....	15
1.5.8. Impactos ambientais – redução de emissões de CO₂ (Equação 7).....	16
2. REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1. Conceitos gerais	17
3. DESENVOLVIMENTO.....	20
3.1. Caracterização da usina sucroenergética modelo	20
3.2. Potencial de produção de biometano a partir da vinhaça	21
3.3. Demanda de diesel da frota agrícola e potencial de substituição por biometano	23
3.4. Avaliação econômica da substituição do diesel por biometano.....	25
3.5. Impactos ambientais da substituição do diesel por biometano	27
3.6. Cenário de substituição total do diesel por biometano	29
3.7. Limitações e desafios da substituição do diesel por biometano	30
CONSIDERAÇÕES FINAIS	32
REFERÊNCIAS	34

1. INTRODUÇÃO

O setor sucroenergético brasileiro é um dos pilares da matriz energética nacional, destacando-se não apenas pela produção de açúcar e etanol, mas também pela geração significativa de subprodutos orgânicos, como vinhaça e torta de filtro. Esses subprodutos apresentam elevado potencial para a produção de biogás, que pode ser purificado e transformado em biometano, um combustível renovável capaz de substituir o diesel utilizado na frota agrícola das usinas (MORAES; ZAIAT; BONOMI, 2015).

Zanette (2009, p. 45) destaca:

A produção de biogás, além de ser uma alternativa energética, constitui um combustível de baixo custo por se originar de um subproduto, encaixa-se perfeitamente dentre as disposições apresentadas pelo Banco Mundial de uso sustentável dos recursos naturais renováveis, de combate à poluição e ao desperdício de energia.

A busca por soluções energéticas sustentáveis e economicamente viáveis tem se intensificado nos últimos anos, motivada pela necessidade de redução de custos operacionais, diminuição das emissões de gases de efeito estufa e atendimento às políticas públicas de incentivo a biocombustíveis, como o RenovaBio (MACEDO; SEABRA; SILVA, 2008). Nesse contexto, a substituição do diesel por biometano representa uma estratégia promissora, capaz de gerar benefícios ambientais, econômicos e estratégicos para a indústria sucroenergética.

Para a realização desta análise, o presente trabalho adota uma usina representativa, construída a partir de dados médios do setor, permitindo a simulação de cenários relacionados a produção de biometano, consumo de diesel, custos operacionais e impactos ambientais, sem a dependência de dados específicos de uma unidade industrial.

Dessa forma, o estudo tem como objetivo avaliar a viabilidade técnica e econômica da substituição do diesel por biometano na frota agrícola, contribuindo para a compreensão das oportunidades e desafios associados à adoção de fontes renováveis no setor.

1.1. Problema

Apesar da elevada disponibilidade de vinhaça no setor sucroenergético e de seu reconhecido potencial para a produção de biometano, a maior parte das usinas brasileiras ainda depende fortemente do diesel como combustível para a frota agrícola. Essa dependência resulta em elevados custos operacionais e na significativa emissão de gases de efeito estufa, em contraste com a crescente necessidade de soluções energéticas mais sustentáveis e alinhadas às políticas públicas de incentivo aos biocombustíveis. Diante desse cenário, coloca-se a seguinte questão: é técnica e economicamente viável substituir, total ou parcialmente, o diesel por biometano na frota agrícola de uma usina sucroenergética?

1.2. Hipótese

Considera-se como hipótese que a substituição do diesel por biometano na frota agrícola de uma usina sucroenergética é tecnicamente viável e pode proporcionar vantagens econômicas e ambientais. A vinhaça, subproduto abundante da produção de etanol, apresenta potencial energético suficiente para a geração de biometano em quantidade capaz de atender a demanda de combustível da frota. Além disso, espera-se que essa substituição reduza os custos operacionais com combustíveis fósseis, bem como as emissões de gases de efeito estufa, contribuindo para a sustentabilidade e a competitividade do setor sucroenergético.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo geral

- Avaliar a viabilidade técnica e econômica da substituição do diesel por biometano, obtido a partir da vinhaça, na frota agrícola de uma usina sucroenergética representativa.

1.3.2. Objetivos específicos

- Analisar o potencial de geração de biometano a partir da vinhaça;
- Estimar a demanda anual de diesel da frota agrícola e o potencial de substituição por biometano;
- Avaliar os custos de implantação e operação do sistema;
- Comparar economicamente o uso de diesel e biometano;
- Identificar os benefícios ambientais, especialmente na redução de CO₂;
- Simular cenários de aplicação do biometano.

1.4. Justificativa

O setor sucroenergético brasileiro desempenha papel estratégico na matriz energética nacional e no agronegócio, destacando-se pela produção de biocombustíveis e pela integração de processos industriais (CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008). Entretanto, a etapa agrícola ainda apresenta elevada dependência de combustíveis fósseis, sobretudo do diesel empregado em operações mecanizadas como colheita, transporte e preparo do solo. Essa dependência implica aumento dos custos operacionais, maior exposição à volatilidade de preços e intensificação das emissões de gases de efeito estufa. Em contrapartida, o processo industrial gera volumes expressivos de resíduos orgânicos, em especial a vinhaça, que possui elevado potencial para valorização energética (MACEDO; SEABRA; SILVA, 2008; MORAES; ZAIAT; BONOMI, 2015).

A digestão anaeróbia da vinhaça para produção de biogás, seguida de sua purificação em biometano, configura uma alternativa tecnologicamente consolidada e alinhada aos princípios da economia circular. Esse processo possibilita a conversão de um efluente com alta carga orgânica em um vetor energético renovável, contribuindo simultaneamente para a mitigação de impactos ambientais e para a diversificação da matriz energética da própria usina. Adicionalmente, a utilização do biometano como substituto do diesel na frota agrícola pode reduzir emissões atmosféricas e fortalecer estratégias de descarbonização, alinhando-se a diretrizes regulatórias e a práticas de sustentabilidade corporativa.

Sob a perspectiva econômica e operacional, a substituição parcial do diesel por biometano apresenta potencial para redução de custos recorrentes e aumento da autonomia energética, especialmente em cenários de elevação dos preços dos combustíveis fósseis (MORAES; ZAIAT; BONOMI, 2015). A maturidade das tecnologias de biodigestão e *upgrading* do biogás permite sua integração ao processo produtivo com diferentes escalas de implantação. Nesse contexto, este estudo propõe a utilização de uma usina modelo, baseada em dados secundários representativos do setor, para estimar o potencial de produção de biometano, sua equivalência energética em relação ao diesel e seus impactos econômicos e ambientais por meio de simulações em diferentes cenários.

Por fim, ressalta-se que o presente trabalho possui caráter teórico e exploratório, não contemplando validação experimental em escala industrial. Ainda assim, a metodologia adotada, fundamentada em parâmetros técnicos e modelagem de cenários, permite a obtenção

de resultados consistentes e reprodutíveis, oferecendo subsídios relevantes para análises de pré-viabilidade e apoio à tomada de decisão no setor sucroenergético.

1.5. Metodologia

A metodologia adotada neste trabalho é de caráter teórico e descritivo, baseada em dados secundários como literatura científica, relatórios técnicos e informações de órgãos governamentais. O estudo utiliza uma usina modelo, definida a partir de parâmetros médios do setor sucroenergético brasileiro, para simular a produção de biometano a partir da vinhaça e avaliar a substituição parcial do diesel na frota agrícola.

A presente pesquisa caracteriza-se como aplicada, de abordagem quantitativa e caráter exploratório-descritivo, sendo desenvolvida por meio de modelagem teórica baseada em dados secundários. O estudo fundamenta-se em revisão bibliográfica, análise de relatórios técnicos e utilização de parâmetros médios do setor sucroenergético brasileiro para simulação da produção de biometano e avaliação de sua viabilidade técnica, econômica e ambiental como substituto parcial do diesel na frota agrícola.

O processo metodológico pode ser dividido em etapas principais, conforme descrito a seguir.

1.5.1. Estimativa da produção de vinhaça (Equação 1)

A vinhaça é um subproduto líquido da produção de etanol. Em média, cada litro de etanol gera entre 10 e 15 litros de vinhaça. Adota-se valor de referência de 12 L de vinhaça/L de etanol (dado encontrado em fontes do setor sucroenergético).

Equação:

$$V = E \times F$$

Onde:

- V = Volume de vinhaça gerado (L/ano)
- E = Produção de etanol da usina modelo (L/ano)
- F = Fator de geração de vinhaça (L de vinhaça/L de etanol)

1.5.2. Potencial de produção de biogás a partir da vinhaça (Equação 2)

A vinhaça contém matéria orgânica que pode ser degradada por microrganismos em um biodigestor, liberando biogás (mistura de metano + CO₂). De acordo com a literatura

especializada, em média, cada metro cúbico de vinhaça pode gerar 10 a 20 m³ de biogás, dependendo das condições.

Equação:

$$B = V \times Y_b$$

Onde:

- B = Volume de biogás produzido (m³/ano)
- V = Volume de vinhaça (m³/ano)
- Y_b = Rendimento de biogás por m³ de vinhaça (m³ de biogás/m³ de vinhaça)

1.5.3. Conversão de biogás em biometano (Equação 3)

O biogás precisa passar por um processo de purificação para retirar o CO₂ e outros gases, ficando principalmente o CH₄ (metano). Esse processo, denominado *upgrading*, consiste na purificação do biogás.

O teor de metano no biogás é, em média, 60%. Portanto, o volume de biometano disponível é dado por:

Fórmula:

$$BM = B \times f_{CH_4} \times \eta$$

Onde:

- BM = Volume de biometano (m³/ano)
- B = Volume de biogás (m³/ano)
- f_{CH_4} = fração de metano no biogás (fração, normalmente 0,6)
- η = eficiência do processo de purificação

1.5.4. Equivalência energética entre biometano e diesel (Equação 4)

Para comparar o biometano com o diesel, faz-se necessária a conversão em poder calorífico (energia contida no combustível).

- 1 m³ de biometano $\approx$ 9,97 kWh de energia
- 1 litro de diesel $\approx$ 9,8 kWh de energia

A equivalência é obtida por meio da Equação 3:

$$D_{eq} = BM \times \frac{PCI_{bio}}{PCI_{diesel}}$$

Onde:

- D_{eq} = Volume equivalente de diesel substituído (L/ano)
- BM = Volume de biometano disponível (m³/ano)
- PCI_{bio} = Poder calorífico do biometano (kWh/m³)
- PCI_{diesel} = Poder calorífico do diesel (kWh/L)

1.5.5. Percentual de substituição (Equação 5)

$$S = \frac{D_{eq}}{D_{total}} \times 100$$

Onde:

- S = percentual de substituição (%)
- D_{eq} = diesel equivalente substituído (L/ano)
- D_{total} = consumo total de diesel (L/ano)

1.5.6. Estimativa de economia bruta (Equação 6)

Calcula o valor financeiro economizado com a substituição do diesel, multiplicando o volume de diesel substituído pelo seu preço unitário.

$$E_b = D_{eq} \times P_d$$

Onde:

- E_b = economia bruta anual (R\$/ano)
- D_{eq} = diesel substituído (L/ano)
- P_d = preço do diesel (R\$/L)

1.5.7. Payback simples (Equação 7)

Indica o tempo necessário para recuperar o investimento inicial realizado no sistema. Essa relação é obtida dividindo-se o CAPEX pela economia líquida anual, mostrando em quantos anos o valor investido será compensado pelos ganhos gerados pela substituição do diesel. Trata-se de um indicador direto de viabilidade econômica, no qual valores menores de *payback* indicam maior atratividade do investimento.

$$PB = \frac{CAPEX}{E_l}$$

Onde:

- PB = *Payback* simples (anos)
- $CAPEX$ = investimento inicial total (R\$)
- E_l = economia líquida anual (R\$/ano)

1.5.8. Impactos ambientais – redução de emissões de CO₂ (Equação 8)

O diesel, quando utilizado como combustível, apresenta fator médio de emissão de aproximadamente 2,68 kg de CO₂ por litro. O biometano, por sua vez, apresenta menor intensidade de emissões quando analisado sob a perspectiva do ciclo de vida, por se tratar de um combustível renovável.

A redução pode ser estimada por:

$$CO_{2_{evitado}} = D_{eq} \times FE$$

Onde:

- $CO_{2_{evitado}}$ = Emissões evitadas (kg/ano)
- D_{eq} = Diesel substituído (L/ano)
- FE = Fator de emissão do diesel (2,68 kg CO₂/L)

Ressalta-se que os resultados obtidos decorrem de simulações baseadas em parâmetros médios do setor, podendo variar conforme as condições específicas de cada unidade produtiva. Ainda assim, a metodologia adotada permite a obtenção de estimativas consistentes, adequadas para análises de pré-viabilidade técnica e econômica.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Conceitos gerais

O setor sucroenergético brasileiro apresenta grande potencial para o aproveitamento de energias renováveis, sendo a biomassa da cana-de-açúcar uma das principais fontes disponíveis. Essa biomassa, composta por bagaço, palha, torta de filtro e vinhaça, não apenas fornece calor e eletricidade para à própria usina, mas também pode ser convertida em biogás e posteriormente em biometano, um combustível renovável capaz de substituir parcialmente o diesel utilizado na frota agrícola. O aproveitamento da biomassa alinha-se aos princípios da sustentabilidade e da economia circular, permitindo a redução de custos operacionais e impactos ambientais, além de fortalecer a autossuficiência energética das usinas (CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008).

O biogás é produzido por meio da biodigestão anaeróbia, processo no qual microrganismos degradam a matéria orgânica na ausência de oxigênio, resultando em uma mistura gasosa composta principalmente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2). A fração de metano é responsável pelo conteúdo energético do biogás, que pode ser purificado em um processo conhecido como upgrading, no qual CO_2 , H_2S e água são removidas, gerando o biometano. Este combustível possui propriedades semelhantes ao gás natural veicular (GNV) e apresenta grande potencial para substituir o diesel da frota agrícola, promovendo redução de emissões de gases de efeito estufa e contribuindo para metas de descarbonização do setor (MORAES; ZAIAT; BONOMI, 2015; CAMPOS; COSTA; RIBEIRO, 2015).

A vinhaça, resíduo líquido gerado durante a produção de etanol, possui elevada concentração de matéria orgânica e nutrientes, sendo ideal para a geração de biogás. Cada litro de etanol produzido gera aproximadamente 10 a 15 litros de vinhaça, tornando o resíduo uma importante fonte de energia renovável quando submetido à biodigestão. Além do aproveitamento energético, a utilização da vinhaça contribui para a redução de impactos ambientais, prevenindo a poluição do solo e de cursos d'água, tradicionalmente associada ao seu descarte inadequado (CAMPOS; COSTA; RIBEIRO, 2015; CHERNICHARO, 2007).

O conceito de economia circular reforça a importância do aproveitamento de resíduos como insumos produtivos, evitando desperdício e promovendo eficiência energética. No contexto do setor sucroenergético, a transformação da vinhaça em biometano configura-se como um exemplo claro desse princípio, convertendo um resíduo antes considerado passivo

ambiental em fonte de energia renovável, com benefícios econômicos, ambientais e estratégicos para a usina (CHERNICHARO, 2007).

A substituição do diesel na frota agrícola é uma das principais aplicações práticas do biometano gerado a partir da vinhaça. A frota, composta por tratores, colhedoras e caminhões, depende predominantemente do diesel fóssil, que representa custo significativo e contribui para emissões de CO₂. O uso do biometano oferece não apenas redução de custos, mas também alinhamento às políticas públicas de incentivo a biocombustíveis, como o RenovaBio. Estudos indicam que a integração do biometano à frota agrícola é tecnicamente viável e pode gerar retorno financeiro e ambiental relevante para as usinas, consolidando a importância de soluções energéticas sustentáveis no setor sucroenergético brasileiro (MACEDO; SEABRA; SILVA, 2008; MORAES; ZAIAT; BONONI, 2015).

Dessa forma, o aproveitamento energético da vinhaça por meio da produção de biometano apresenta-se como uma alternativa alinhada às demandas atuais do setor, justificando sua análise sob a perspectiva técnica e econômica proposta neste estudo.

2.2. Aspectos técnicos

A produção de biometano a partir da vinhaça envolve uma sequência de processos técnicos que transformam um resíduo orgânico em combustível renovável de alto valor energético. Inicialmente, a vinhaça passa pelo processo de biodigestão anaeróbia, no qual microrganismos decompõem a matéria orgânica na ausência de oxigênio, liberando biogás. A eficiência dessa conversão depende de fatores como temperatura, pH, tempo de retenção e concentração de sólidos da vinhaça. Ambientes controlados garantem que os microrganismos atuem de forma ideal, aumentando a produção de metano, componente que confere energia ao biogás (CHERNICHARO, 2007; MORAES; ZAIAT; BONONI, 2015).

Após a geração do biogás, é necessário realizar o processo de purificação ou upgrading, que consiste em remover dióxido de carbono (CO₂), sulfeto de hidrogênio (H₂S) e vapor d'água, elevando a concentração de metano para cerca de 95%. Técnicas comuns de purificação incluem absorção química, adsorção em carvão ativado, membranas seletivas e lavagem com soluções alcalinas. O resultado desse processo é o biometano, combustível que apresenta propriedades semelhantes ao gás natural veicular (GNV) e pode ser utilizado em motores

agrícolas, substituindo parcialmente o diesel e reduzindo emissões de gases de efeito estufa (MORAES; ZAIAT; BONOMI, 2015).

O cálculo do potencial de produção de biometano baseia-se no volume de vinhaça gerado e no rendimento do biodigestor. Em condições ideais, cada metro cúbico de vinhaça pode produzir entre 10 e 20 metros cúbicos de biogás, dependendo do teor de sólidos e da eficiência do processo. Para determinar a substituição de diesel, utiliza-se a equivalência energética: 1 m³ de biometano possui aproximadamente 9,97 kWh de energia, enquanto 1 litro de diesel contém cerca de 9,8 kWh. Com esses valores, é possível estimar quantos litros de diesel podem ser substituídos por biometano, considerando a demanda da frota agrícola (CAMPOS; COSTA; RIBEIRO, 2015; MACEDO; SEABRA; SILVA, 2008).

A frota agrícola, composta por tratores, colhedoras e caminhões, apresenta diferentes consumos médios de combustível, dependendo da potência do motor e das atividades realizadas. Para que o biometano seja aplicado de forma eficiente, é necessário dimensionar o volume de combustível produzido, a capacidade de armazenamento em tanques pressurizados e a logística de abastecimento dos veículos. O planejamento também deve considerar a sazonalidade da produção de etanol e da geração de vinhaça, garantindo oferta suficiente de biometano para atender a demanda da frota durante o período agrícola (CAMPOS; COSTA; RIBEIRO, 2015).

Além disso, a integração do sistema de biometano na operação da usina envolve a adaptação de motores e infraestrutura de abastecimento. Veículos podem ser convertidos para funcionar com gás, mantendo desempenho similar ao diesel e contribuindo para a redução de custos operacionais e emissões de CO₂. A adoção dessa tecnologia permite não apenas maior sustentabilidade energética, mas também a geração de benefícios econômicos e ambientais, alinhando a produção agrícola com práticas inovadoras e sustentáveis (CHERNICHARO, 2007; MORAES; ZAIAT; BONOMI, 2015).

Esses aspectos técnicos fundamentam os parâmetros adotados na modelagem apresentada neste trabalho.

3. DESENVOLVIMENTO

3.1. Caracterização da usina sucroenergética modelo

A usina sucroenergética é uma unidade industrial integrada responsável pelo processamento da cana-de-açúcar para a produção de açúcar, etanol e energia elétrica a partir da biomassa. Esse tipo de instalação caracteriza-se pela utilização de uma matéria-prima renovável e pela geração simultânea de produtos e subprodutos com elevado potencial energético e agrônômico.

O processo produtivo inicia-se com a recepção e preparo da cana-de-açúcar, seguido pela extração do caldo nas moendas. O caldo extraído é destinado à produção de açúcar e/ou etanol, enquanto o bagaço resultante é utilizado como combustível em caldeiras para geração de vapor e energia elétrica, frequentemente suficiente para o autoconsumo da usina e, em alguns casos, para exportação de excedentes energéticos.

Durante a produção de etanol, ocorre a geração de resíduos líquidos e sólidos, sendo a vinhaça o principal efluente do processo. A vinhaça é originada na etapa de destilação do etanol e apresenta elevada carga orgânica, o que a torna um material com potencial para aproveitamento energético. Estima-se que, para cada litro de etanol produzido, sejam gerados aproximadamente entre 10 e 15 litros de vinhaça, valor amplamente reportado na literatura técnica.

Além da vinhaça, outros subprodutos relevantes são o bagaço e a torta de filtro. O bagaço é obtido após a moagem da cana e constitui a principal fonte de energia térmica da usina, sendo utilizado na cogeração de energia elétrica. Já a torta de filtro é gerada no processo de clarificação do caldo e é comumente reaproveitada como fertilizante nos canaviais, contribuindo para o fechamento de ciclos de nutrientes.

Do ponto de vista operacional, as usinas sucroenergéticas apresentam grande demanda energética, especialmente no setor agrícola, onde a colheita, o transporte e o manejo da cana-de-açúcar dependem majoritariamente do uso de máquinas movidas a diesel. Esse consumo representa uma parcela significativa dos custos operacionais, além de ser uma importante fonte de emissões de gases de efeito estufa.

A integração entre produção industrial e geração de resíduos orgânicos confere ao setor sucroenergético características favoráveis à implementação de tecnologias de aproveitamento energético, como a digestão anaeróbia da vinhaça para produção de biogás e posterior purificação em biometano. Esse processo permite transformar um resíduo potencialmente

poluente em uma fonte de energia renovável, contribuindo para a sustentabilidade do sistema produtivo.

Dessa forma, a usina sucroenergética pode ser compreendida como um sistema agroindustrial complexo, no qual fluxos de matéria e energia estão interligados, possibilitando a valorização de resíduos e a diversificação da matriz energética. Essa característica justifica a adoção de uma usina modelo, baseada em parâmetros médios do setor, como estratégia metodológica para análise da viabilidade técnica e econômica do uso do biometano na substituição do diesel na frota agrícola.

Tabela 1 – Caracterização da usina sucroenergética modelo

PARÂMETRO	UNIDADE	VALOR
Moagem de Cana	t/ano	2.000.000
ATR Médio	kg ATR/t cana	135
Produção de Etanol	L/t cana	85
Produção Anual de Etanol	L/ano	170.000.000
Geração de Vinhaça	L/L etanol	12
Volume Total de Vinhaça	m ³ /ano	2.040.000
Torta de Filtro	kg/t cana	30
Produção de Torta de Filtro	t/ano	60.000
Palha Disponível	kg/t cana	140
Produção de Palha	t/ano	280.000
Consumo de Diesel	L/ano	6.000.000

3.2. Potencial de produção de biometano a partir da vinhaça

A vinhaça, principal resíduo líquido gerado na produção de etanol, apresenta elevada carga orgânica, sendo caracterizada por altos valores de Demanda Química de Oxigênio (DQO), o que a torna adequada para o processo de digestão anaeróbia. Esse processo biológico promove a decomposição da matéria orgânica na ausência de oxigênio, resultando na produção de biogás, composto majoritariamente por metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂).

Para a estimativa do potencial de produção de biometano, considerou-se o volume de vinhaça gerado pela usina modelo apresentado na Seção 3.1, equivalente a 2.040.000 m³ por safra. A partir desse valor, foi adotado um rendimento médio de produção de biogás de 5 m³ de

biogás por m³ de vinhaça, valor compatível com dados reportados na literatura para vinhaça de cana-de-açúcar.

Assim, a produção total de biogás pode ser estimada pela Equação 2:

$$B = V \times Y_b$$

Onde:

- B = Volume de biogás produzido (m³/ano)
- V = Volume de vinhaça (m³/ano)
- Y_b = Rendimento de biogás por m³ de vinhaça (m³ de biogás/m³ de vinhaça)

Substituindo os valores:

$$B = 2.040.000 \times 5 = 10.200.000 \text{ m}^3/\text{ano}$$

O biogás gerado apresenta teor médio de metano de aproximadamente 60%, sendo o metano o componente de interesse energético. Para obtenção do biometano, o biogás passa por um processo de purificação (*upgrading*), no qual o CO₂ e outras impurezas são removidos, elevando a concentração de metano.

Considerando uma eficiência de purificação de 95%, o volume de biometano disponível pode ser estimado pela Equação 3:

$$BM = B \times f_{CH_4} \times \eta$$

Onde:

- BM = Volume de biometano (m³/ano)
- B = Volume de biogás (m³/ano)
- f_{CH₄} = fração de metano no biogás (fração, normalmente 0,6)
- η = eficiência do processo de purificação

Substituindo os valores:

$$BM = 10.200.000 \times 0,60 \times 0,95$$

$$BM = 5.814.000 \text{ m}^3/\text{ano}$$

Esse resultado indica que a usina modelo possui potencial para produzir aproximadamente 5,81 milhões de metros cúbicos de biometano por safra.

Para melhor compreensão operacional, esse valor pode ser convertido em produção diária, considerando uma safra de aproximadamente 200 dias:

$$BM_{diário} = \frac{5.814.000}{200} = 29.070 \text{ m}^3/\text{dia}$$

Tabela 2 – Estimativa de produção de biogás e biometano

PARÂMETRO	UNIDADE	VALOR
Volume de vinhaça	m ³ /ano	2.040.000
Rendimento de biogás	m ³ / m ³	5,0
Produção de biogás	m ³ /ano	10.200.000
Teor de metano (CH ₄)	%	60
Eficiência de purificação	%	95
Produção de biometano	m ³ /ano	5.814.000
Produção diária de biometano	m ³ /dia	29.070

Ressalta-se que os valores apresentados representam uma estimativa baseada em parâmetros médios da literatura, podendo variar conforme características operacionais da usina, composição da vinhaça e eficiência do sistema de biodigestão.

3.3. Demanda de diesel da frota agrícola e potencial de substituição por biometano

A operação agrícola de usinas sucroenergéticas é altamente dependente do uso de combustíveis fósseis, especialmente o diesel, empregado em atividades como colheita mecanizada, transporte de cana e preparo do solo. Esse consumo representa uma parcela significativa dos custos operacionais, além de contribuir para a emissão de gases de efeito estufa.

Com base na caracterização da usina modelo apresentada na Seção 3.1, adota-se um consumo anual de diesel da ordem de 6.000.000 litros por safra, valor compatível com usinas de médio porte com elevado nível de mecanização agrícola.

Para avaliar o potencial de substituição desse combustível por biometano, torna-se necessário estabelecer uma equivalência energética entre o diesel e o biometano. O poder calorífico inferior (PCI) do diesel é aproximadamente 9,8 kWh/L, enquanto o do biometano é cerca de 9,97 kWh/m³.

A conversão energética pode ser realizada por meio da Equação 4:

$$D_{eq} = BM \times \frac{PCI_{bio}}{PCI_{diesel}}$$

Onde:

- D_{eq} = Volume equivalente de diesel substituído (L/ano)
- BM = Volume de biometano disponível (m³/ano)
- PCI_{bio} = Poder calorífico do biometano (kWh/m³)
- PCI_{diesel} = Poder calorífico do diesel (kWh/L)

Substituindo os valores obtidos na Seção 3.2:

$$D_{eq} = 5.814.000 \times \frac{9,97}{9,8}$$

$$D_{eq} = 5.814.000 \times 1,017$$

$$D_{eq} \approx 5.915.000 \text{ L/ano}$$

Esse resultado indica que o volume de biometano produzido pela usina modelo possui potencial para substituir aproximadamente 5,92 milhões de litros de diesel por safra.

Comparando esse valor com o consumo total da frota agrícola, é possível estimar o percentual de substituição, conforme a Equação 5:

$$S = \frac{D_{eq}}{D_{total}} \times 100$$

Onde:

- S = percentual de substituição (%)
- D_{eq} = diesel equivalente substituído (L/ano)
- D_{total} = consumo total de diesel (L/ano)

$$S = \frac{5.915.000}{6.000.000} \times 100$$

$$S \approx 98,6\%$$

Dessa forma, observa-se que, em condições ideais, o biometano produzido a partir da vinhaça seria capaz de substituir praticamente a totalidade do consumo de diesel da frota agrícola da usina modelo.

Para fins operacionais, a disponibilidade diária de biometano, estimada em 29.070 m³/dia, corresponde a aproximadamente:

$$29.070 \times 1,017 \approx 29.560 \text{ L de diesel/dia}$$

Tabela 3 – Substituição de diesel por biometano

PARÂMETRO	UNIDADE	VALOR
Consumo anual de diesel	L/ano	6.000.000
Produção de biometano	m ³ /ano	5.814.000
Equivalente energético	L diesel/m ³ biometano	1,017
Diesel substituído	L/ano	5.915.000
Percentual de substituição	%	98,6
Produção diária de biometano	m ³ /dia	29.070
Diesel equivalente diário	L/dia	29.560

Apesar do elevado percentual de substituição estimado, é importante considerar que, em condições reais, fatores como perdas no processo, limitações logísticas, adaptação da frota e variações na produção de vinhaça podem reduzir esse potencial. Estudos semelhantes indicam que a substituição tende a ocorrer de forma gradual, e não integral.

3.4. Avaliação econômica da substituição do diesel por biometano

A análise econômica é fundamental para determinar a viabilidade da implantação de sistemas de produção de biometano em usinas sucroenergéticas, uma vez que envolve a comparação entre os custos do investimento inicial e os benefícios financeiros decorrentes da substituição de combustíveis fósseis. Nesse contexto, destacam-se os conceitos de CAPEX,

OPEX, economia operacional e payback, amplamente utilizados em estudos de viabilidade técnico-econômica.

O CAPEX (Capital Expenditure) refere-se aos investimentos iniciais necessários para a implantação do sistema, incluindo aquisição de biodigestores, unidades de purificação do biogás (upgrading), infraestrutura de armazenamento e adaptação da frota. Já o OPEX (Operational Expenditure) corresponde aos custos operacionais recorrentes, como manutenção, consumo de energia elétrica, mão de obra e insumos necessários ao funcionamento do sistema.

Para a usina modelo considerada neste estudo, estimou-se um investimento inicial (CAPEX) da ordem de R\$ 25.000.000, valor compatível com sistemas de biodigestão e purificação em escala industrial de médio porte. O custo operacional anual (OPEX) foi estimado em aproximadamente 5% do CAPEX, resultando em um valor de R\$ 1.250.000 por ano.

A economia operacional está diretamente associada à substituição do diesel pelo biometano. Considerando o valor médio do diesel de R\$ 5,50 por litro e o potencial de substituição estimado na Seção 3.3 de 5.915.000 litros por ano, a economia bruta anual pode ser calculada conforme a Equação 6:

$$E_b = D_{eq} \times P_d$$

Onde:

- E_b = economia bruta anual (R\$/ano)
- D_{eq} = diesel substituído (L/ano)
- P_d = preço do diesel (R\$/L)

$$E_b = 5.915.000 \times 5,50$$

$$E_b = R\$32.532.500 \text{ por ano}$$

A economia líquida anual é obtida pela subtração do OPEX:

$$E_l = E_b - OPEX$$

$$E_l = 32.532.500 - 1.250.000$$

$$E_l = R\$31.282.500 \text{ por ano}$$

O *payback* simples, que representa o tempo necessário para recuperar o investimento inicial, pode ser estimado pela Equação 7:

$$PB = \frac{CAPEX}{E_t}$$

$$PB = \frac{25.000.000}{31.282.500}$$

$$PB \approx 0,80 \text{ anos}$$

Esse resultado indica um tempo de retorno inferior a um ano, evidenciando elevada atratividade econômica. No entanto, é importante ressaltar que esse valor representa uma condição ideal, podendo variar em função de fatores como eficiência do sistema, custos reais de implantação, variações no preço do diesel e necessidade de adaptação da frota.

Tabela 4 – Avaliação econômica do sistema de biometano

PARÂMETRO	UNIDADE	VALOR
CAPEX	R\$	25.000.000
OPEX anual	R\$/ano	1.250.000
Diesel distribuído	L/ano	5.915.000
Preço do diesel	R\$/litro	5,50
Economia bruta	R\$/ano	32.532.500
Economia líquida	R\$/ano	31.282.500
<i>Payback</i>	Anos	0,80

Embora os resultados indiquem elevada viabilidade econômica, a análise apresentada baseia-se em parâmetros médios e simplificações, sendo recomendada a realização de estudos mais detalhados, incluindo fluxo de caixa descontado, taxa interna de retorno (TIR) e valor presente líquido (VPL), para suporte à tomada de decisão em escala real.

3.5. Impactos ambientais da substituição do diesel por biometano

A substituição de combustíveis fósseis por fontes renováveis no setor sucroenergético apresenta elevado potencial de mitigação de impactos ambientais, especialmente no que se refere à redução das emissões de gases de efeito estufa. Nesse contexto, o diesel, amplamente utilizado na frota agrícola, é responsável por emissões significativas de dióxido de carbono (CO₂), além de outros poluentes atmosféricos.

Para estimar o impacto ambiental da substituição do diesel por biometano, adotou-se um fator médio de emissão de 2,68 kg de CO₂ por litro de diesel consumido, valor amplamente utilizado em estudos energéticos. Considerando o volume anual de diesel substituído estimado na Seção 3.3, equivalente a 5.915.000 litros por ano, a redução de emissões pode ser calculada pela Equação 8:

$$CO_{2_{evitado}} = D_{eq} \times FE$$

Onde:

- CO_{2_{evitado}} = Emissões evitadas (kg/ano)
- D_{eq} = Diesel substituído (L/ano)
- EF = Fator de emissão do diesel (2,68 kg CO₂/L)

$$CO_{2_{evitado}} = 5.915.000 \times 2,68$$

$$CO_{2_{evitado}} = 15.852.200 \text{ kg } CO_2/\text{ano}$$

Convertendo esses valores para toneladas, temos:

$$CO_{2_{evitado}} = \frac{15.852.200}{1000}$$

$$CO_{2_{evitado}} = 15.852,2 \text{ t } CO_2/\text{ano}$$

Tabela 5 – Redução de emissões de CO₂

PARÂMETRO	UNIDADE	VALOR
Diesel substituído	L/ano	5.915.000
Fator de emissão do diesel	kg CO ₂ /L	2,68
Emissões evitadas	t CO ₂ /ano	15.852,2

3.6. Cenário de substituição total do diesel por biometano

Com base nos resultados obtidos nas seções anteriores, foi elaborado um cenário de substituição total do diesel por biometano na frota agrícola da usina modelo, considerando a utilização integral do potencial de biometano gerado a partir da vinhaça.

A produção anual estimada de biometano, calculada na Seção 3.2, foi de 5.814.000 m³/ano, o que corresponde energeticamente a aproximadamente 5.915.000 litros de diesel equivalente por ano, conforme demonstrado na Seção 3.3. Considerando que o consumo total de diesel da usina modelo é de 6.000.000 litros por ano, observa-se que o biometano produzido é suficiente para substituir cerca de 98,6% da demanda total, configurando, na prática, um cenário de substituição quase integral do combustível fóssil.

Do ponto de vista econômico, conforme apresentado na Seção 3.4, a substituição desse volume de diesel resulta em uma economia líquida anual estimada de R\$ 31.282.500, após a dedução dos custos operacionais (OPEX). O investimento inicial (CAPEX), estimado em R\$ 25.000.000, apresenta um tempo de retorno (payback simples) inferior a um ano, indicando elevada atratividade econômica sob as condições consideradas.

Sob o aspecto ambiental, a substituição total do diesel por biometano possibilita a redução de aproximadamente 15.852,2 toneladas de CO₂ por ano, conforme calculado na Seção 3.5. Esse resultado evidencia o impacto positivo da adoção do biometano na mitigação das emissões de gases de efeito estufa, além de contribuir para a melhoria da qualidade do ar nas operações agrícolas.

Apesar dos resultados promissores, a implementação de um cenário de substituição total depende de fatores operacionais e tecnológicos, como a adaptação da frota para uso de biometano, a infraestrutura de armazenamento e abastecimento, e a eficiência contínua do sistema de produção e purificação do biogás. Dessa forma, embora tecnicamente viável, a substituição total pode ser alcançada de forma gradual, conforme a maturidade operacional e os investimentos realizados pela usina.

Tabela 6 – Cenário de substituição total do diesel por biometano

PARÂMETRO	UNIDADE	VALOR
Produção de biometano	m ³ /ano	5.814.000
Diesel equivalente	L/ano	5.915.000
Consumo total de diesel	L/ano	6.000.000
Substituição	%	98,6
Economia líquida	R\$/ano	31.282.500
<i>Payback</i>	anos	0,80
CO ₂	t/ano	15.852,2

O cenário de substituição total representa uma condição ideal de operação, sendo particularmente útil como referência para análise de potencial máximo do sistema, ainda que sua implementação prática dependa de adequações técnicas e logísticas.

3.7. Limitações e desafios da substituição do diesel por biometano

Apesar dos resultados obtidos indicarem elevada viabilidade técnica, econômica e ambiental da substituição do diesel por biometano, é importante considerar que os valores apresentados representam um cenário teórico idealizado, baseado em parâmetros médios do setor sucroenergético. Na prática, diversos fatores operacionais podem influenciar diretamente o desempenho do sistema e reduzir o potencial efetivo de substituição do combustível fóssil.

Entre os principais desafios destaca-se a necessidade de adaptação da frota agrícola para utilização de biometano, incluindo modificações em motores, aquisição de veículos compatíveis e implantação de infraestrutura de abastecimento e armazenamento do combustível. Esses fatores podem elevar significativamente os investimentos iniciais do projeto.

Outro aspecto relevante refere-se à sazonalidade da produção sucroenergética. A geração de vinhaça e, conseqüentemente, de biometano ocorre principalmente durante o período de safra, podendo exigir estratégias adicionais de armazenamento energético para garantir abastecimento contínuo da frota durante todo o ano operacional.

Além disso, perdas energéticas no processo de biodigestão, purificação do biogás e distribuição do biometano podem reduzir a eficiência global do sistema em relação aos valores

teóricos estimados. Custos associados à manutenção dos biodigestores, sistemas de *upgrading*, compressores e equipamentos de armazenamento também devem ser considerados em análises de longo prazo.

Questões logísticas, como transporte interno do combustível, disponibilidade operacional dos equipamentos e capacitação técnica da equipe responsável pela operação do sistema, representam fatores adicionais que podem impactar a viabilidade prática da implantação em escala industrial.

Dessa forma, embora os resultados demonstrem elevado potencial de aplicação do biometano no setor sucroenergético, recomenda-se que estudos futuros incorporem dados reais de operação, análises financeiras mais detalhadas e avaliações em escala industrial, visando maior precisão na estimativa dos resultados técnicos e econômicos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a viabilidade técnica e econômica da substituição do diesel por biometano, produzido a partir da vinhaça gerada no processo de produção de etanol em uma usina sucroenergética representativa. A partir da modelagem baseada em dados médios do setor, foi possível estimar o potencial de produção de biometano, sua equivalência energética em relação ao diesel e os impactos econômicos e ambientais associados à sua utilização na frota agrícola.

Os resultados obtidos demonstraram que a vinhaça apresenta elevado potencial de aproveitamento energético, permitindo a produção significativa de biometano. A análise indicou que esse biocombustível pode substituir aproximadamente 98,6% do consumo de diesel da frota agrícola, evidenciando a viabilidade técnica da proposta e o potencial de integração entre os processos produtivos e energéticos do setor.

Do ponto de vista econômico, verificou-se elevada atratividade, com economia líquida expressiva e tempo de retorno do investimento inferior a um ano. Apesar disso, ressalta-se que tais resultados representam condições ideais, podendo variar conforme fatores operacionais, custos reais de implantação e variações no preço dos combustíveis.

Sob o aspecto ambiental, a substituição do diesel por biometano mostrou-se relevante na redução das emissões de dióxido de carbono, além de promover o aproveitamento de um resíduo com alto potencial poluidor, contribuindo para práticas alinhadas à economia circular e à sustentabilidade.

Ressalta-se, contudo, que o presente estudo foi desenvolvido com base em dados secundários e parâmetros médios do setor sucroenergético, não contemplando dados operacionais reais de uma usina específica. Dessa forma, os resultados obtidos representam estimativas teóricas, sujeitas a variações conforme características particulares de cada unidade industrial, eficiência dos biodigestores, composição da vinhaça, perdas operacionais e condições logísticas de armazenamento e distribuição do biometano. Além disso, a ausência de validação experimental em escala industrial limita a precisão das projeções apresentadas, especialmente em relação aos indicadores econômicos e ao potencial efetivo de substituição do diesel. Assim, recomenda-se que estudos futuros realizem análises com dados primários, testes operacionais e avaliações econômicas mais aprofundadas, visando ampliar a confiabilidade e aplicabilidade prática dos resultados.

Dessa forma, conclui-se que o aproveitamento energético da vinhaça para produção de biometano representa uma alternativa tecnicamente viável, economicamente promissora e ambientalmente estratégica para o setor sucroenergético, com potencial para contribuir de forma significativa para a redução da dependência de combustíveis fósseis e para o avanço da transição energética no setor.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6023: informação e documentação – referências – elaboração. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6028: resumo – apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 14724: trabalhos acadêmicos – apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis. Rio de Janeiro: ANP, 2025.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar, 2023. Brasília: CONAB, 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br>. Acesso em: 25 ago. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Balanço energético nacional 2024: ano base 2023. Rio de Janeiro: EPE, 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Nota técnica sobre biogás e biometano no Brasil. Rio de Janeiro: EPE, 2023.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR E BIOENERGIA (UNICA). Dados do setor sucroenergético. São Paulo: UNICA, 2024.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR (UNICA). Produção de etanol e derivados da cana no Brasil. São Paulo: UNICA, 2023. Disponível em: <https://unica.com.br>. Acesso em: 25 ago. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Produção agrícola municipal. Rio de Janeiro: IBGE, 2023.

ICLEI – GOVERNOS LOCAIS PELA SUSTENTABILIDADE. Fatores de emissão de CO₂ para combustíveis fósseis. São Paulo: ICLEI, 2022.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Geneva: IPCC, 2006.

KUNZ, A.; OLIVEIRA, P. A. V. **Tecnologias para tratamento de dejetos e geração de biogás.** Brasília: Embrapa, 2014.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios.** Belo Horizonte: UFMG, 2007.

METCALF & EDDY. **Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery.** 5. ed. New York: McGraw-Hill, 2014.

HOLM-NIELSEN, J. B.; AL SEADI, T.; OLESKOWICZ-POPIEL, P. **The future of anaerobic digestion and biogas utilization.** Bioresource Technology, v. 100, p. 5478–5484, 2009.

CAMPOS, A. T.; COSTA, C. C.; RIBEIRO, T. T. B. **Produção de biogás a partir da vinhaça da cana-de-açúcar: potencial energético e aspectos ambientais.** Revista Brasileira de Energias Renováveis, Curitiba, v. 4, n. 2, p. 45-58, 2015.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios: princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2007.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. Campinas: Editora da UNICAMP, 2008.

MACEDO, I. C.; SEABRA, J. E. A.; SILVA, J. E. A. R. **Greenhouse gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: the 2005/2006 averages and a prediction for 2020**. Biomass and Bioenergy, Oxford, v. 32, n. 7, p. 582-595, 2008.

MORAES, B. S.; ZAIAT, M.; BONOMI, A. **Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane ethanol production in Brazil: challenges and perspectives**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Amsterdam, v. 44, p. 888-903, 2015.

.