

**CEETEPS - CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO
TECNOLÓGICA “PAULA SOUZA”**

ETEC “PROFESSOR JADYR SALLES”

Técnico em açúcar e álcool

**Produção de biogás a partir da vinhaça: potencial energético e implicações
ambientais na indústria sucroenergética**

**CEETEPS - CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO
TECNOLÓGICA “PAULA SOUZA”**

ETEC “PROFESSOR JADYR SALLES”

Técnico em açúcar e álcool

Ana Júlia de Marco

Ana Rita da Cunha Samogin

Carlos Roberto de Assis

Elinton Sousa Mendes

Marco Antônio Muttilli

Pietro Alexandre Licatta

**Produção de biogás a partir da vinhaça: potencial
energético e implicações ambientais na indústria
sucroenergética**

2026

Ana Júlia de Marco
Ana Rita da Cunha Samogin
Carlos Roberto de Assis
Elinton Sousa Mendes
Marco Antônio Muttilli
Pietro Alexandre Licatta

**Produção de biogás a partir da vinhaça: potencial
energético e implicações ambientais na indústria
sucroenergética**

Trabalho de Conclusão de curso como
requisito obrigatório das atividades de
avaliação.

“O desenvolvimento sustentável é aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer as gerações futuras.”
— Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento

RESUMO

O presente trabalho analisa a produção de biogás a partir da vinhaça, resíduo líquido gerado em grande volume durante a fabricação de etanol, destacando seu potencial energético e suas implicações ambientais na indústria sucroenergética. A relevância do tema esteve associada à necessidade de ampliar o uso de fontes renováveis e reduzir impactos decorrentes do manejo inadequado de efluentes agroindustriais. O objetivo consistiu em compreender como a digestão anaeróbia pode transformar a vinhaça em recurso energético, identificando fatores operacionais, tecnologias aplicáveis e benefícios ambientais vinculados ao processo. A metodologia adotada baseou-se em revisão bibliográfica de caráter qualitativo e descritivo, com consulta a artigos científicos, trabalhos acadêmicos, relatórios técnicos e bases setoriais especializadas. Os resultados demonstraram que a biodigestão reduziu a carga orgânica da vinhaça e possibilitou a geração de biogás com potencial de uso térmico, elétrico e como biometano. Verificou-se que variáveis como temperatura, pH, carga orgânica e tipo de reator influenciaram diretamente a eficiência produtiva, sendo os sistemas anaeróbios de alta taxa os mais promissores. Constatou-se ainda que o aproveitamento energético da vinhaça favoreceu a sustentabilidade industrial, contribuiu para a mitigação de emissões de gases de efeito estufa e fortaleceu o conceito de economia circular no setor. Concluiu-se que a utilização da vinhaça para produção de biogás representa alternativa viável para transformar passivos ambientais em ativos energéticos, ampliando a competitividade e a sustentabilidade da cadeia sucroenergética brasileira.

Palavras-chave: Biodigestão. Bioenergia. Sustentabilidade.

ABSTRACT

This study analyzed biogas production from vinasse, a liquid residue generated in large volumes during ethanol production, highlighting its energy potential and environmental implications for the sugarcane industry. The relevance of the topic was associated with the need to expand the use of renewable sources and reduce impacts resulting from the inadequate management of agro-industrial effluents. The objective was to understand how anaerobic digestion can transform vinasse into an energy resource, identifying operational factors, applicable technologies, and environmental benefits linked to the process. The methodology adopted was based on a qualitative and descriptive literature review, consulting scientific articles, academic papers, technical reports, and specialized sectoral databases. The results demonstrated that biodigestion reduced the organic load of vinasse and enabled the generation of biogas with potential for thermal, electrical, and biomethane use. It was found that variables such as temperature, pH, organic load, and reactor type directly influenced productive efficiency, with high-rate anaerobic systems being the most promising. It was also found that the energy recovery from vinasse favored industrial sustainability, contributed to the mitigation of greenhouse gas emissions, and strengthened the concept of a circular economy in the sector. It was concluded that the use of vinasse for biogas production represents a viable alternative to transform environmental liabilities into energy assets, expanding the competitiveness and sustainability of the Brazilian sugarcane energy chain.

Keywords: Biodigestion. Bioenergy. Sustainability.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
1.1. Justificativa	10
1.2. Objetivo Geral.....	10
1.3. Objetivos Específicos.....	10
1.4. PROBLEMA DE PESQUISA	10
2. METODOLOGIA	11
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
3.1. Indústria sucroenergética e geração de vinhaça.....	14
3.2. Características físico-químicas da vinhaça e seus impactos ambientais	15
3.3. Fundamentos da digestão anaeróbia aplicada à vinhaça.....	16
3.4. Tecnologias de reatores na produção de biogás a partir da vinhaça	17
3.5. Potencial energético e benefícios ambientais do biogás de vinhaça	18
3.6 Viabilidade econômica da produção de biogás a partir da vinhaça	19
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	20
REFERÊNCIAS.....	22

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por fontes energéticas sustentáveis tem impulsionado a busca por alternativas capazes de reduzir a dependência de combustíveis fósseis, sobretudo em países com forte vocação agroindustrial. Nesse cenário, o Brasil destaca-se pela relevância da cana-de-açúcar como matéria-prima estratégica, cuja cadeia produtiva possibilita a geração de diversos produtos energéticos. Castro (2018) destaca que a produção de energia a partir da cana ocorre tanto pela sacarose quanto por seus subprodutos, evidenciando o papel central do setor sucroenergético na matriz energética nacional.

Sob a ótica ambiental, a produção de etanol está diretamente associada à geração de resíduos líquidos de elevada carga orgânica, dentre os quais se destaca a vinhaça. Brito (2021) descreve que esse efluente é produzido em grande volume durante a destilação do etanol, apresentando características que exigem tratamento adequado antes de sua disposição. A autora evidencia que a elevada quantidade gerada torna insuficiente a utilização exclusiva na fertirrigação, demandando alternativas tecnológicas para reduzir impactos ambientais e ampliar possibilidades de reaproveitamento.

Em consonância com essa problemática, a digestão anaeróbia surge como uma das principais rotas tecnológicas para o tratamento da vinhaça, possibilitando simultaneamente a redução da carga poluidora e a geração de energia renovável. Garcia (2018) analisa o potencial energético da vinhaça e verificou que a biodigestão promove conversão eficiente da matéria orgânica em biogás, contribuindo para a diminuição das emissões de gases de efeito estufa. O estudo demonstrou que o aproveitamento energético do resíduo fortalece a integração entre sustentabilidade ambiental e eficiência industrial.

Em complemento, a produção de biogás a partir da vinhaça apresenta potencial significativo para geração de energia elétrica, especialmente em regiões com elevada produção de etanol. Castro (2018) avaliou o cenário do estado de Minas Gerais e identificou que o biogás proveniente da biodigestão pode representar incremento relevante na geração de bioeletricidade. O autor destaca que esse aproveitamento contribui para diversificação da matriz energética e fortalecimento da autonomia energética no setor sucroenergético.

Sob tal perspectiva, o potencial econômico e ambiental do biogás também se relaciona à possibilidade de substituição de combustíveis fósseis e geração de créditos de carbono. Costa Filho (2024) demonstrou que a produção de biometano a partir da vinhaça pode reduzir

significativamente as emissões de carbono, além de gerar retorno financeiro por meio de ativos ambientais. O autor indicou que a utilização desse recurso apresenta elevada eficiência na mitigação de impactos ambientais associados ao uso de fontes tradicionais de energia.

1.1. JUSTIFICATIVA

A relevância deste estudo justificou-se pela necessidade de compreender alternativas capazes de conciliar crescimento industrial, aproveitamento de subprodutos e preservação ambiental. A vinhaça, embora seja tradicionalmente destinada à fertirrigação, apresenta elevado potencial para geração de biogás por meio da digestão anaeróbia, permitindo agregar valor à cadeia sucroenergética.

Além da produção de energia renovável, esse aproveitamento contribui para a redução da carga orgânica do efluente e para a mitigação dos impactos ambientais decorrentes do manejo inadequado, fortalecendo práticas alinhadas à economia circular e à transição energética.

1.2.OBJETIVO GERAL

Diante desse contexto, o objetivo geral consistiu em analisar o potencial energético da produção de biogás a partir da vinhaça e suas implicações ambientais na indústria sucroenergética.

1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos, buscou-se identificar as principais características da vinhaça como substrato para digestão anaeróbia, examinar os fatores operacionais e tecnológicos que influenciaram a eficiência do processo e discutir os benefícios ambientais e econômicos decorrentes do aproveitamento energético desse subproduto.

Diante dessas considerações, torna-se necessário aprofundar a análise das condições operacionais e tecnológicas que influenciam a produção de biogás a partir da vinhaça, considerando aspectos ambientais, energéticos e econômicos. A compreensão integrada desses fatores possibilita identificar soluções mais eficientes para o aproveitamento do resíduo no contexto da indústria sucroenergética brasileira, contribuindo para o desenvolvimento sustentável e para a consolidação de uma matriz energética mais limpa e diversificada.

1.4.PROBLEMA DE PESQUISA

De que maneira a produção de biogás a partir da vinhaça pode contribuir para o aproveitamento energético e para a redução dos impactos ambientais na indústria sucroenergética, considerando as condições operacionais e tecnológicas necessárias para a eficiência do processo?

2. METODOLOGIA

A pesquisa caracterizou-se como revisão bibliográfica, de abordagem qualitativa e natureza descritiva, voltada à análise do potencial energético da vinhaça e de suas implicações ambientais na indústria sucroenergética. Tal procedimento mostrou-se adequado por permitir a reunião e interpretação crítica de produções científicas e técnicas já consolidadas sobre o tema, favorecendo a compreensão integrada dos aspectos tecnológicos, energéticos e ambientais relacionados à produção de biogás.

A obtenção dos dados ocorreu por meio de levantamento em fontes secundárias, constituídas por artigos científicos, trabalhos de conclusão de curso, dissertações, relatórios institucionais e bases especializadas do setor sucroenergético. Entre as principais fontes consultadas estiveram publicações indexadas em periódicos acadêmicos, documentos técnicos da Companhia Nacional de Abastecimento, dados estatísticos da plataforma UnicaData e estudos nacionais voltados à biodigestão da vinhaça e ao aproveitamento energético de resíduos agroindustriais.

Para a seleção do material, adotaram-se como critérios de inclusão estudos relacionados diretamente à digestão anaeróbia da vinhaça, produção de biogás, características físico-químicas do efluente, tecnologias de reatores anaeróbios e impactos ambientais associados ao manejo desse resíduo. Foram priorizadas produções com pertinência temática, consistência metodológica e contribuição técnica para o desenvolvimento da pesquisa. Materiais duplicados, documentos sem aderência ao objeto investigado ou sem respaldo técnico-científico foram desconsiderados.

A organização dos dados ocorreu mediante leitura exploratória, seguida de leitura analítica das obras selecionadas. Na etapa exploratória, identificaram-se os textos mais relevantes ao problema de pesquisa. Em seguida, na leitura analítica, extraíram-se informações referentes a parâmetros operacionais, potencial de geração energética, vantagens ambientais, limitações técnicas e aplicações industriais da biodigestão da vinhaça.

A análise dos dados foi desenvolvida por meio de interpretação comparativa e síntese temática. Os resultados encontrados nas diferentes fontes foram confrontados quanto às

convergências e divergências existentes, permitindo identificar fatores determinantes para a eficiência do processo e tendências observadas na literatura especializada. A partir dessa sistematização, estruturaram-se as discussões apresentadas no trabalho, relacionando os achados aos objetivos propostos e ao contexto atual da sustentabilidade energética no setor sucroenergético.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A produção de cana-de-açúcar no Brasil apresenta elevada relevância econômica e energética, posicionando o país entre os maiores produtores mundiais dessa cultura. Conab (2025) estimou a produção nacional em aproximadamente 663,4 milhões de toneladas para a safra 2025/2026, evidenciando a magnitude do setor sucroenergético. Esse volume expressivo está diretamente associado à ampla área cultivada e às condições climáticas favoráveis, que permitem alta produtividade agrícola em diferentes regiões do território nacional.

Tabela 1 – Produção de cana-de-açúcar por região no Brasil (safra 2025/2026)

Região	Área cultivada (ha)	Produção (milhões de toneladas)	Produtividade (t/ha)
Nordeste	920.000	57,7	62,7
Centro-Oeste	1.800.000	148,6	80,4
Sudeste	5.400.000	434,5	80,6
Sul	491.000	33,8	68,7

Fonte: Adaptado de Conab (2025).

Os dados referentes à produção podem apresentar variações conforme a metodologia adotada por diferentes instituições. Aeb (2025) indicou que o volume processado na última safra alcançou cerca de 716,4 milhões de toneladas, valor superior às estimativas oficiais, refletindo diferenças nos critérios de contabilização e abrangência dos levantamentos. Tal divergência demonstra a necessidade de análise crítica das fontes, considerando que cada instituição utiliza parâmetros próprios de coleta e consolidação de dados.

Em complemento, sistemas de monitoramento como o UnicaData (2025) e análises setoriais realizadas por consultorias especializadas indicaram valores intermediários próximos de 680 milhões de toneladas, reforçando a consistência da posição brasileira no cenário global. Diante desse cenário, evidencia-se que, apesar das variações numéricas, há convergência quanto à liderança do país na produção de açúcar e à segunda colocação na

produção de etanol, atrás apenas dos Estados Unidos, cuja produção é predominantemente baseada no milho.

No âmbito da distribuição territorial, a produção de cana-de-açúcar apresenta forte concentração regional, com predominância da região Sudeste. Conab (2025) indicou que essa região concentra cerca de 5,4 milhões de hectares cultivados e responde por aproximadamente 434,5 milhões de toneladas produzidas, com produtividade média superior a 80 toneladas por hectare. Tal desempenho está associado à infraestrutura consolidada, à mecanização avançada e à proximidade de polos industriais.

A comparação entre os dados apresentados pela Conab (2025), pela AEB (2025) e pela plataforma UnicaData (2025) evidencia divergências metodológicas relacionadas aos critérios de contabilização da produção nacional. Apesar das diferenças quantitativas, observa-se consenso quanto ao crescimento contínuo do setor sucroenergético e à ampliação do potencial de geração de resíduos passíveis de aproveitamento energético.

Em contraste, a região Centro-Oeste também se destaca pelo crescimento acelerado da cultura, impulsionado pela expansão da fronteira agrícola. Conab (2025) apontou que a região cultiva cerca de 1,8 milhão de hectares, com produção aproximada de 148,6 milhões de toneladas e produtividade média de 80,4 toneladas por hectare. Esse avanço reflete investimentos em tecnologia e integração com a produção de etanol de milho, ampliando a diversificação da matriz energética.

Sob outra perspectiva, a região Nordeste apresenta menor produtividade média quando comparada às regiões Centro-Sul, o que está associado a fatores climáticos e estruturais. Conab (2025) registrou produção de cerca de 57,7 milhões de toneladas em uma área de aproximadamente 920 mil hectares, com produtividade média de 62,7 toneladas por hectare. Apesar disso, a região mantém importância histórica e social na produção canavieira brasileira.

A região Sul possui participação mais restrita na produção nacional, embora apresente índices produtivos relevantes. Conab (2025) indicou que a região cultiva cerca de 491 mil hectares e produz aproximadamente 33,8 milhões de toneladas, com produtividade média de 68,7 toneladas por hectare. Esse cenário evidencia a diversidade regional da produção e a adaptação da cultura a diferentes condições edafoclimáticas.

No que se refere à produção de derivados, o Brasil mantém liderança global na produção de açúcar e ocupa posição de destaque na produção de etanol. Segundo UnicaData (2025) registra-se que, na safra 2024/2025, foram produzidas aproximadamente 44 milhões de

toneladas de açúcar e 36,1 bilhões de litros de etanol, sendo a maior parte oriunda da cana-de-açúcar.

O país também se destaca como principal exportador de açúcar no mundo, consolidando sua presença no comércio exterior. Diante desse cenário UnicaData (2025) demonstrou que exportações atingiram 23,1 milhões de toneladas de açúcar, gerando receitas expressivas em moeda estrangeira. Além disso, o Brasil exportou mais de um bilhão de litros de etanol, ampliando sua participação no mercado global de biocombustíveis.

Tabela 2 – Produção de açúcar e etanol no Brasil (safra 2024/2025)

Produto	Quantidade produzida
Açúcar	44 milhões de toneladas
Etanol total	36,1 bilhões de litros
Etanol de cana	28,9 bilhões de litros
Etanol de milho	7,2 bilhões de litros
Etanol anidro	13,9 bilhões de litros
Etanol hidratado	22,2 bilhões de litros

Fonte: UnicaData (2025).

Em consonância com a evolução tecnológica, a cadeia produtiva da cana-de-açúcar tem incorporado o aproveitamento de resíduos como estratégia de sustentabilidade. A Conab (2025) destaca que o bagaço é amplamente utilizado na cogeração de energia elétrica, enquanto a vinhaça vem sendo progressivamente direcionada à biodigestão para produção de biogás. Essa abordagem amplia a eficiência do sistema produtivo e reduz impactos ambientais.

A integração do etanol de milho à cadeia sucroenergética reforça a diversificação da matriz produtiva a UnicaData (2025) apontou que aproximadamente 25% do etanol produzido no Brasil já é oriundo do milho, permitindo a coprodução de subprodutos como óleo e farelo proteico utilizados na alimentação animal.

Por fim, o aproveitamento integral da cana-de-açúcar evidencia o avanço do conceito de biorrefinaria, no qual diferentes produtos e subprodutos são explorados de forma integrada. A Conab (2025) ressaltou que a utilização de resíduos para geração de energia, produção de biometano e fabricação de biofertilizantes contribui para a sustentabilidade e eficiência global do sistema. Tal configuração reforça o papel estratégico da cana-de-açúcar na transição para uma matriz energética mais limpa e diversificada.

3.1. INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA E GERAÇÃO DE VINHAÇA

Inicialmente, convém situar a relevância da indústria sucroenergética para a matriz energética brasileira, dado que concentra parcela expressiva da produção mundial de etanol. Moraes (2015, p. 889) observou que o avanço tecnológico das usinas ampliou a eficiência industrial, mas manteve elevado volume de efluentes, entre os quais a vinhaça se destaca pela proporção gerada por litro de etanol produzido. Segundo o autor, a relação varia entre dez e quinze litros de vinhaça para cada litro de etanol, o que evidencia o desafio ambiental associado ao setor.

No âmbito do processo industrial, a vinhaça resulta da destilação do vinho fermentado e apresenta composição rica em matéria orgânica e em minerais como potássio, cálcio e magnésio. Mathias (2015, p. 4) discutiu que o uso tradicional da vinhaça na fertirrigação reduziu custos agrônômicos, embora não tenha eliminado preocupações ambientais decorrentes da carga orgânica elevada. O autor enfatizou que o manejo inadequado pode comprometer corpos d'água superficiais e subterrâneos, especialmente quando há ausência de controle sobre volumes aplicados no solo.

Em vista disso, pesquisadores passaram a explorar alternativas de tratamento capazes de reduzir a carga poluidora e transformar o efluente em fonte energética. Silva (2016, p. 2) relatou que a digestão anaeróbia despontou como solução estratégica ao combinar a remoção de matéria orgânica com a produção de biogás, permitindo que o resíduo ganhasse valor econômico dentro do conceito de biorrefinaria. A autora ressaltou que a adoção dessa rota tecnológica está alinhada às políticas de descarbonização no setor de biocombustíveis.

3.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DA VINHAÇA E SEUS IMPACTOS AMBIENTAIS

Sob tal perspectiva, compreender a composição da vinhaça torna-se fundamental para avaliar seu comportamento nos sistemas de tratamento. Segundo Sales (2022, p. 18), o efluente apresenta demanda química de oxigênio acima de 80.000 mg/L, pH ácido entre 3,5 e 5,0 e elevada concentração de sólidos voláteis. Esse perfil contribui para o potencial poluidor, uma vez que o lançamento in natura é capaz de reduzir drasticamente o oxigênio dissolvido em corpos receptores, afetando ecossistemas aquáticos.

Importa frisar que a aplicação contínua de vinhaça no solo, mesmo quando utilizada como fonte de nutrientes, pode provocar salinização e acidificação em áreas de cultivo. Brito (2021, p. 27) analisa áreas fertirrigadas no Nordeste e identificou aumento gradual nos teores de potássio e condutividade elétrica do solo, indicando a necessidade de monitoramento

constante. De acordo com o autor, o manejo adequado deve considerar variáveis como profundidade do lençol freático, textura do solo e taxa de aplicação por hectare.

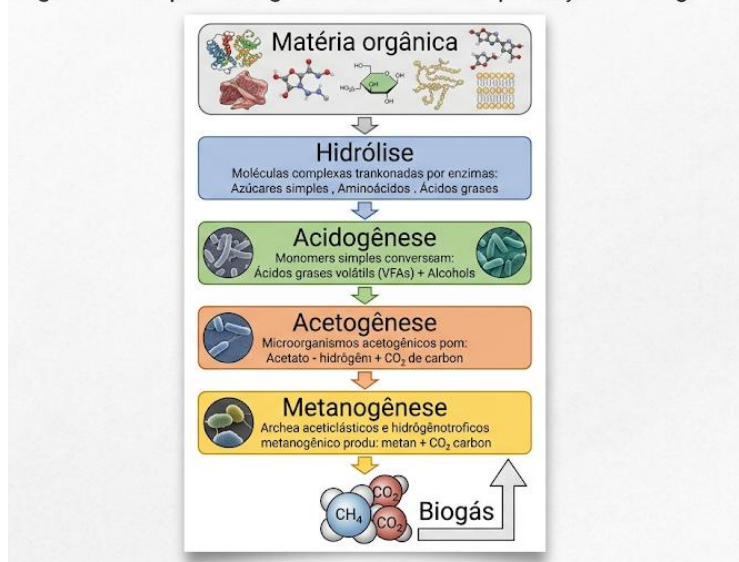
Não obstante, estudos recentes reforçaram que os impactos ambientais podem ser mitigados quando a vinhaça passa por digestão anaeróbia antes de seu uso agrícola. Costa Filho (2024, p. 33) observou que o digestato proveniente do processo apresenta menor carga orgânica e maior estabilidade química, favorecendo o controle ambiental e reduzindo riscos de contaminação. O pesquisador destaca que a pré-digestão agrega segurança ao manejo e abre caminho para a valorização energética do biogás.

3.3. FUNDAMENTOS DA DIGESTÃO ANAERÓBIA APLICADA À VINHAÇA

Em complemento, a digestão anaeróbia apresenta etapas bioquímicas bem definidas, que envolvem a conversão de matéria orgânica em metano e dióxido de carbono. Moraes (2015, p. 893) descreve que o processo passa pelas fases de hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, cada uma controlada por grupos específicos de microrganismos. A autora explicou que a estabilidade do sistema depende do equilíbrio entre essas populações, além de parâmetros como temperatura, alcalinidade e carga orgânica.

Convém destacar que a operação de reatores pode ocorrer em faixas mesofílicas ou termofílicas, sendo que ambas apresentam vantagens específicas. Silva (2016, p. 5) indicou que a faixa mesofílica, entre 30 °C e 40 °C, tende a oferecer maior estabilidade operacional, enquanto a faixa termofílica, próxima de 55 °C, proporciona maior velocidade de reação, embora exija maior rigor no controle de temperatura. Conforme a autora, a escolha da faixa operacional depende das condições técnicas da usina e da disponibilidade de calor residual.

Figura 1 – Etapas da digestão anaeróbia na produção de biogás



FONTE: Elaborado pelos autores com o auxílio do Google Gemini, 2026

Por conseguinte, o desempenho da digestão é influenciado por fatores como o tempo de retenção hidráulica, a relação entre nutrientes, a presença de compostos inibidores e o tipo de reator empregado. Sousa (2017, p. 12) analisa modelos matemáticos aplicados a reatores UASB utilizando vinhaça e verificou que a produção de metano aumenta significativamente quando há controle adequado da alcalinidade. O autor observou que ajustes na recirculação do lodo também contribuem para a manutenção do equilíbrio microbiológico.

A digestão anaeróbia consiste em um processo biológico realizado por microrganismos na ausência de oxigênio, responsável pela degradação da matéria orgânica e pela produção de biogás. Esse processo ocorre em diferentes etapas bioquímicas integradas, sendo elas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese.

Na fase de hidrólise, compostos orgânicos complexos, como carboidratos, proteínas e lipídios, são convertidos em moléculas menores, facilitando sua assimilação pelos microrganismos. Em seguida, na acidogênese, ocorre a formação de ácidos orgânicos, álcool, hidrogênio e dióxido de carbono.

Posteriormente, na etapa de acetogênese, os compostos produzidos anteriormente são transformados principalmente em ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono, substâncias fundamentais para a última fase do processo. Por fim, na metanogênese, bactérias arqueias metanogênicas convertem esses compostos em metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), formando o biogás.

O metano representa o principal componente energético do biogás, sendo responsável pelo seu poder calorífico. Em geral, a composição média do biogás proveniente da digestão anaeróbia da vinhaça apresenta aproximadamente 55% a 70% de metano, 30% a 45% de dióxido de carbono e pequenas concentrações de sulfeto de hidrogênio (H_2S), vapor d'água e outros gases traço.

A eficiência da produção de CH_4 depende diretamente do equilíbrio microbiológico e do controle operacional do sistema, especialmente em relação à temperatura, pH, alcalinidade e carga orgânica aplicada ao reator. Alterações nessas variáveis podem comprometer a atividade das arqueias metanogênicas e reduzir significativamente o rendimento energético do processo.

3.4. TECNOLOGIAS DE REATORES NA PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA VINHAÇA

No âmbito das rotas tecnológicas, diversos reatores vêm sendo aplicados ao tratamento da vinhaça em escala laboratorial, piloto e industrial. Souza (2020, p. 5) avaliou o potencial de produção de biogás no estado de São Paulo e destaca que modelos UASB e IC apresentam rendimentos promissores, especialmente quando operados com carga orgânica entre 10 e 15 kg DQO/m³.dia. O estudo mostrou que a configuração do reator influencia diretamente o volume de biogás e a qualidade do metano.

Em vista disso, reatores de leito expandido e de manta de lodo ganharam relevância por apresentarem elevada taxa de remoção de matéria orgânica e boa retenção de biomassa. Silva (2016, p. 7) apontou que o desempenho desses sistemas está associado à formação de grânulos bacterianos capazes de suportar cargas elevadas sem perda de eficiência. A autora ressaltou que o uso de biomassa granular representa avanço significativo na operação de reatores anaeróbios no setor sucroenergético.

Sob tal perspectiva, a digestão termofílica também tem sido explorada como alternativa para aumentar o rendimento de metano. Costa Filho (2024, p. 40) registrou que temperaturas mais elevadas potencializam a taxa de conversão, embora exijam sistemas de isolamento térmico e controle rigoroso. Para o pesquisador, a decisão entre operação mesofílica ou termofílica deve considerar a disponibilidade de vapor ou calor residual gerado pela própria usina.

3.5. POTENCIAL ENERGÉTICO E BENEFÍCIOS AMBIENTAIS DO BIOGÁS DE VINHAÇA

Por fim, estudos têm enfatizado que o biogás proveniente da vinhaça constitui vetor energético relevante para o setor de biocombustíveis. Moraes (2015, p. 895) avaliou cenários de substituição de combustíveis fósseis por biogás em usinas de cana-de-açúcar e constatou que o aproveitamento energético pode suprir parte significativa do consumo térmico e elétrico interno. O trabalho destaca ainda que a purificação do biogás possibilita sua conversão em biometano, ampliando o leque de aplicações.

Convém destacar que a adoção da digestão anaeróbia contribui também para a mitigação de impactos ambientais. Mathias (2015, p. 9) relatou que a captura e o uso do metano reduzem consideravelmente as emissões de gases de efeito estufa, além de diminuir a carga orgânica da vinhaça antes de sua aplicação no solo. O autor evidencia que o processo contribui para metas de sustentabilidade e integra-se às diretrizes do RenovaBio, reforçando o papel estratégico do biogás na transição energética.

Em vista disso, a literatura recente oferece base sólida para considerar a digestão anaeróbia da vinhaça como alternativa técnica e ambientalmente viável, com potencial de promover ganhos energéticos, agronômicos e ecológicos no contexto da biorrefinaria da cana-de-açúcar.

3.6 VIABILIDADE ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA VINHAÇA

Além dos benefícios ambientais, a produção de biogás a partir da vinhaça apresenta importante potencial econômico para o setor sucroenergético. O aproveitamento energético desse subproduto permite que as usinas reduzam gastos com combustíveis fósseis e ampliem sua autonomia energética, tornando o processo produtivo mais eficiente e competitivo.

Nesse contexto, o biogás pode ser utilizado na geração de energia elétrica e térmica dentro da própria usina, diminuindo custos operacionais relacionados ao consumo de diesel, gás natural e energia adquirida da rede elétrica. Em alguns casos, o excedente energético pode ser comercializado, gerando fonte adicional de receita para a indústria.

Outro aspecto relevante refere-se ao aproveitamento do biogás após seu processo de purificação. A remoção de componentes como dióxido de carbono, sulfeto de hidrogênio, vapor d'água e outras impurezas resulta na obtenção do biometano, combustível renovável com elevado teor de metano e propriedades semelhantes às do gás natural. Essa característica permite sua utilização em veículos agrícolas, no transporte da cadeia produtiva e em processos industriais, reduzindo o consumo de combustíveis fósseis, os custos operacionais e as emissões de gases de efeito estufa.

Além da produção de energia renovável, a digestão anaeróbia reduz a emissão de metano para a atmosfera ao capturar esse gás durante o tratamento da vinhaça, convertendo-o em fonte energética. Essa redução das emissões favorece a participação das usinas em programas de descarbonização e amplia as oportunidades de obtenção de créditos de carbono, agregando valor econômico ao processo. Nesse contexto, a adoção dessa tecnologia fortalece a competitividade do setor sucroenergético e acompanha as diretrizes nacionais de transição energética e sustentabilidade industrial.

Entretanto, apesar das vantagens econômicas observadas, a implantação de biodigestores em escala industrial ainda demanda elevados investimentos iniciais, além de custos relacionados ao monitoramento operacional, manutenção dos sistemas e capacitação

técnica. Dessa forma, a viabilidade econômica depende de fatores como escala de produção, eficiência do sistema, disponibilidade de financiamento e incentivos governamentais.

A comparação entre estudos voltados à biodigestão da vinhaça demonstra que usinas de maior porte tendem a apresentar retorno financeiro mais rápido, especialmente quando integram a produção de biogás à cogeração de energia e à produção de biometano. Em contrapartida, unidades menores ainda enfrentam dificuldades relacionadas ao elevado custo de implantação e à limitação de infraestrutura tecnológica.

Diante desse cenário, observa-se que o aproveitamento da vinhaça para produção de biogás apresenta potencial para transformar um passivo ambiental em ativo econômico, fortalecendo a sustentabilidade e a competitividade da indústria sucroenergética brasileira.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise desenvolvida ao longo do trabalho permite compreender que a produção de biogás a partir da vinhaça constitui alternativa tecnicamente viável e ambientalmente relevante para a indústria sucroenergética brasileira. Os resultados indicam que o desempenho do processo está diretamente associado ao controle de variáveis operacionais, como temperatura, pH, carga orgânica e tempo de retenção hidráulica, além da escolha adequada do tipo de reator.

Nesse sentido, sistemas como os reatores anaeróbios de alta taxa, especialmente o modelo UASB, demonstraram maior eficiência na conversão da matéria orgânica em metano, desde que operados sob condições estáveis e monitoradas.

Os achados evidenciaram que o aproveitamento energético da vinhaça permite não apenas a geração de biogás com potencial de substituição de combustíveis fósseis, mas também contribui significativamente para a redução da carga poluidora do efluente. Tal condição favorece o controle ambiental nas usinas, reduz riscos de contaminação do solo e dos recursos hídricos e fortalece práticas sustentáveis alinhadas à economia circular. Além disso, a integração da biodigestão ao processo produtivo amplia a eficiência energética do setor e cria oportunidades econômicas associadas à geração de bioenergia e à valorização de resíduos.

No que se refere aos objetivos propostos, verificou-se que foram plenamente alcançados, uma vez que foi possível identificar as principais condições operacionais e arranjos tecnológicos que influenciam a produção de biogás, bem como discutir os impactos ambientais relacionados ao manejo da vinhaça. A investigação permitiu consolidar

informações relevantes sobre o tema, evidenciando a importância do controle operacional e da adoção de tecnologias adequadas para maximizar a eficiência do processo e minimizar impactos negativos ao meio ambiente.

Apesar dos avanços apresentados, algumas limitações foram identificadas ao longo do desenvolvimento do trabalho, especialmente em relação à dependência de dados secundários e à variação metodológica entre diferentes estudos analisados. A ausência de padronização nos parâmetros operacionais e nas condições experimentais dificultou comparações diretas entre resultados, evidenciando a necessidade de maior uniformidade nas abordagens futuras. Além disso, a limitação de estudos aplicados em escala industrial com dados atualizados restringe a análise mais aprofundada da viabilidade econômica em diferentes contextos produtivos.

A continuidade das investigações sobre o tema mostra-se fundamental para o avanço tecnológico do setor, especialmente no que se refere à otimização de reatores, ao aprimoramento do controle operacional e à integração da produção de biogás com outras rotas energéticas. Estudos futuros podem explorar a aplicação de novas tecnologias, a utilização de co-digestão com outros resíduos agroindustriais e a avaliação econômica detalhada em diferentes cenários produtivos, ampliando o potencial de utilização da vinhaça como fonte energética.

Além dos benefícios técnicos e ambientais já observados, a produção de biogás a partir da vinhaça apresenta potencial estratégico para o futuro da matriz energética brasileira. Considerando a elevada capacidade produtiva do setor sucroenergético nacional, o aproveitamento energético desse subproduto pode contribuir significativamente para a ampliação da oferta de energia renovável e para a redução da dependência de combustíveis fósseis.

Nesse contexto, o Brasil possui condições favoráveis para consolidar-se como referência internacional na produção de bioenergia associada ao aproveitamento de resíduos agroindustriais, especialmente devido à dimensão de sua cadeia sucroenergética e à disponibilidade contínua de matéria-prima. A integração entre produção de etanol, geração de biogás e produção de biometano fortalece o conceito de economia circular e amplia a sustentabilidade do setor.

Entretanto, para que esse potencial seja plenamente explorado, torna-se necessária a ampliação de investimentos em infraestrutura, inovação tecnológica e capacitação técnica, além da implementação de políticas públicas e incentivos voltados à expansão da biodigestão em escala industrial. Medidas relacionadas ao financiamento de tecnologias limpas,

valorização dos créditos de carbono e estímulo à transição energética podem favorecer a adoção mais ampla desses sistemas pelas usinas brasileiras.

Dessa forma, conclui-se que o aproveitamento da vinhaça para produção de biogás representa não apenas uma alternativa de tratamento ambientalmente adequada, mas também uma estratégia promissora para o fortalecimento da bioeconomia, da segurança energética e do desenvolvimento sustentável no Brasil.

REFERÊNCIAS

BRITO, S. S. **Produção de biogás a partir da vinhaça**. 2021. 47 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Desenvolvimento Regional) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2021.

CASTRO, R. A. **Análise da produção de biogás a partir da vinhaça na região de Minas Gerais**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Energia) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Portal de informações agropecuárias: cana-de-açúcar**. Disponível em: <https://portaldeinformacoes.conab.gov.br/safra-serie-historica-cana-de-acucar.html>. Acesso em: 08 out. 2025.

COSTA FILHO, A. M. F. **Potencial de produção de biometano a partir da vinhaça no estado de Alagoas**. 2024. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental e Sanitária) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2024.

GARCIA, M. L. **Avaliação do potencial energético da vinhaça para produção de biogás**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018.

MATHIAS, M. C. P. P.; MATHIAS, J. F. C. M.; DUQUE, D. V. A. Biogas from sugarcane vinasse: environmental, energy and regulatory issues for a political agenda in Brazil. In: ENCONTRO NACIONAL DE ECONOMIA POLÍTICA, 20., 2015, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu: Sociedade Brasileira de Economia Política, 2015. p. 1–12.

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**, v. 44, p. 888–903, 2015.

SALES, N. G. S. **Avaliação da vinhaça como substrato no biodigestor**. 2022. 51 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental) – Universidade de Brasília, Brasília, 2022.

SILVA, C. E. F. et al. Anaerobic biodigestion of sugarcane vinasse under mesophilic conditions. **Ambiente & Água**, v. 11, n. 1, p. 1–12, 2016.

SOUSA, E. A. F.; FERREIRA, D. C.; SILVA, M. B. Produção de biogás a partir da vinhaça por simulação computacional em reator UASB. **Enciclopédia Biosfera**, v. 14, n. 26, p. 1–15, 2017.

SOUZA, R. O. et al. Estimativa do potencial de produção de biogás a partir da digestão anaeróbia de vinhaça no estado de São Paulo, safra 2018/2019. In: CONGRESSO SUL-AMERICANO DE RESÍDUOS SÓLIDOS, 3., 2020, Vitória. **Anais [...]**. Vitória: IBEAS, 2020. p. 1–9.

UNICADATA. **Observatório da cana e bioenergia**. Disponível em: <https://unicadata.com.br/>. Acesso em: 08 out. 2025.