**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**

**CENTRO DE TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO REGIONAL**

**DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA SUCROALCOOLEIRA**

ANDRESSA BRITO DE LIMA

# ESTADO DA ARTE DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA VINHAÇA E DA TORTA DE FILTRO NAS INDÚSTRIAS SUCROALCOOLEIRAS: DESAFIOS, AVANÇOS TECNOLÓGICOS E PERSPECTIVAS PARA A ENTRESSAFRA

JOÃO PESSOA

2026

ANDRESSA BRITO DE LIMA

# ESTADO DA ARTE DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA VINHAÇA E DA TORTA DE FILTRO NAS INDÚSTRIAS SUCROALCOOLEIRAS: DESAFIOS, AVANÇOS TECNOLÓGICOS E PERSPECTIVAS PARA A ENTRESSAFRA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Tecnologia Sucroalcooleira da Universidade Federal da Paraíba como parte dos requisitos para obtenção do título de Tecnólogo em Produção Sucroalcooleira.

Orientadora: Prof.ª. Drª. Danielle Christine Almeida Jaguaribe

JOÃO PESSOA

2026

Autorização de publicação

**Catalogação na publicação**
**Seção de Catalogação e Classificação**

L732e Lima, Andressa Brito de.
Estado da arte da produção de biogás a partir da vinhaça e da torta de filtro nas indústrias sucroalcooleiras: desafios, avanços tecnológicos e perspectivas para a entressafra / Andressa Brito de Lima. - João Pessoa, 2026.
56 f. : il.

Orientação: Danielle Christine Almeida Jaguaribe.
TCC (Graduação) - UFPB/CTDR.

1. Vinhaça. 2. Torta de filtro. 3. Digestão anaeróbia. I. Jaguaribe, Danielle Christine Almeida. II. Título.

UFPB/CTDR CDU 662.767.2:662.636

Elaborado por Rodrigo Araújo de Sá Pereira - CRB-755/O

JOÃO PESSOA

2026

ANDRESSA BRITO DE LIMA

ESTADO DA ARTE DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA VINHAÇA E DA TORTA DE FILTRO NAS INDÚSTRIAS SUCROALCOOLEIRAS: DESAFIOS, AVANÇOS TECNOLÓGICOS E PERSPECTIVAS PARA A ENTRESSAFRA

Aprovado em: 31/03/2026

BANCA EXAMINADORA

Dra. Danielle Christine Almeida Jaguaribe

Orientador – UFPB

Drº. Marcelo Teixeira Leite

Examinador - UFPB

Dra. Joelma Morais Ferreira

Examinadora - UFPB

*Dedico a Deus esse trabalho, pois Ele foi a fonte de toda sabedoria, força e perseverança. Foi pela sua graça que encontrei ânimo nos momentos difíceis, luz mediante as dúvidas e coragem para seguir em frente, mesmo quando o caminho parecia incerto. A Ele que guiou cada passo durante essa jornada e tornou possível a realização desse sonho*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, pois sem Ele absolutamente nada disso seria possível. Foi Ele quem me sustentou nos dias difíceis, me fortaleceu quando pensei em desistir e me conduziu com amor e propósito até a concretização deste sonho. Como está escrito em , em 1 Tessalonicenses 5:18: “Em tudo dai graças, porque esta é a vontade de Deus em Cristo Jesus para convosco.” E é com o coração transbordando de gratidão que reconheço que cada etapa vencida foi pela Sua graça.

Aos meus pais, Teonas Freire de Lima e Fabiana Brito de Lima, palavras jamais serão suficientes para expressar o quanto sou grata. Vocês foram minha base, meu refúgio e minha maior inspiração. Mesmo quando eu não acreditava em mim, vocês permaneceram firmes, acreditando, incentivando e lutando ao meu lado. Todo esse esforço, amor e dedicação foram essenciais para que eu chegasse até aqui.

Aos meus amigos Ingrid Santana, Vanessa Helena Oliveira dos Santos, Géssica Moraes, Thiago Olinto e Rachel Reis, meu mais sincero agradecimento. Vocês fizeram essa caminhada mais leve, mais feliz e cheia de significado. Obrigada por cada apoio, cada palavra de incentivo e por estarem presentes em todos os momentos, principalmente nos mais desafiadores.

À minha orientadora, Danielle Christine Almeida Jaguaribe, expresso minha profunda gratidão por todas as oportunidades concedidas, pela confiança depositada em mim e por acreditar em cada trabalho proposto. Sua orientação foi fundamental para o meu crescimento acadêmico e pessoal.

Aos professores Marcelo Teixeira Leite, Joelma Morais Ferreira e Kelson Carvalho Lopes, agradeço pela excelência, pelo comprometimento e por todo o conhecimento compartilhado ao longo dessa jornada. Vocês foram essenciais na construção da minha formação.

Aos técnicos Maristela Alves Alcântara e Renê Pinto da Silva, minha gratidão por todo o apoio, paciência e dedicação durante toda a minha trajetória acadêmica. Vocês foram fundamentais no dia a dia dessa caminhada.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho e para a construção da minha história. Este sonho não é apenas meu — ele é fruto de cada pessoa que caminhou ao meu lado.

**EPÍGRAFE**

*"Não foram os pregos que mantiveram Jesus na cruz, mas o amor. Cada cravo foi uma escolha, e em cada escolha, a prova de que Ele pensou em nós"*

***(Ele Escolheu os Cravos, de Max Lucado).***

## RESUMO

A agroindústria sucroalcooleira vem desempenhando no Brasil um papel estratégico na matriz energética nacional, destacando-se nas produções de etanol e açúcar a partir da cana-de-açúcar. Porém o processamento industrial gera grandes volumes de resíduos, como a vinhaça e torta de filtro, comumente utilizadas na fertirrigação e aplicação agrícola. Nos últimos anos, aplicação da digestão anaeróbia desses resíduos tem sido aplica para a produção de biogás, surgindo como alternativa sustentável para geração de energia renovável, diminuição dos impactos ambientais, e mitigação de emissões de gases de efeito estufa. O presente trabalho apresenta um estado da arte sobre a produção de biogás a partir da vinhaça e da torta de filtro, abordando assim os fundamentos microbiológicos, tecnologias empregadas, desafios operacionais, viabilidade econômica e perspectivas futuras, com um destaque para estratégias de manutenção da produção energética na entressafra.



*Palavras-chave: Biogás; Vinhaça; Torta de filtro; Digestão anaeróbia; Indústria Sucroalcooleira; Entressafra.*

## ABSTRACT

The sugarcane and ethanol agro-industry in Brazil has been playing a strategic role in the national energy matrix, standing out in the production of ethanol and sugar from sugarcane. However, industrial processing generates large volumes of waste, such as vinasse and filter cake, commonly used in fertigation and agricultural applications. In recent years, the application of anaerobic digestion of these wastes for biogas production has emerged as a sustainable alternative for generating renewable energy, reducing environmental impacts, and mitigating greenhouse gas emissions. This work presents a state-of-the-art overview of biogas production from vinasse and filter cake, addressing the microbiological fundamentals, technologies employed, operational challenges, economic viability, and future perspectives, with a focus on strategies for maintaining energy production during the off-season.



*Keywords: Biogas; Vinasse; Filter cake; anaerobic digestion; Sugarcane and ethanol industry; Off-season*.

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - ROTAS TECNOLÓGICAS ..... 34
TABELA 2 – TECNOLOGIAS UPGRADIND ..... 35
TABELA 3 - PROPRIEDADES DO BIOGÁS ..... 37
TABELA 4- ESTRATÉGIAS DE SUPLEMENTAÇÃO DE SUBSTRATOS..... 39
TABELA 5 - COMPARATIVO ENTRE VINHAÇA IN NATURA E DIGESTATO ... 41

**SUMÁRIO**


1. INTRODUÇÃO 12

1.1 JUSTIFICATIVA 14

1.2 OBJETIVOS 15

1.2.1 Objetivo geral 15

1.2.2 Objetivos específicos 15

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 16

2.1.1 Digestão anaeróbia: Dinâmica Bioquímica e Potencial Energético 16

2.1.2 Características da Vinhaça: Desafios e Potencialidades Energéticas 17

2.1.3 Características da Torta de Filtro: Complexidade e Papel na Entressafra 18

2.1.4 Tecnologias Empregadas na Biodigestão e Purificação 19

2.1.5 Panorama da Produção de Biogás na Indústria Sucroalcooleira 21

2.1.6 Desafios Tecnológicos e o Gargalo da Entressafra 23

2.1.7 Estratégias para Produção na Entressafra 24

2.1.8 Viabilidade Econômica e Mercado de Biometano 27

2.1.9 Impactos Ambientais e Economia Circular 29

2.10 Perspectivas Futuras e Biorrefinarias Integradas 31

3. ANÁLISE DE RESULTADOS 33

4. CONCLUSÃO 42

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 45

# 1. INTRODUÇÃO

O Brasil vem destacando-se mundialmente como maior produtor de cana-de-açúcar, apresentando uma infraestrutura sólida e fortemente concentrada nas regiões Sudeste e Centro-oeste (ZANON, 2020). A crescente expansão do setor sucroenergético, vem se consolidando no país como uma referência mundial, em produção de biocombustíveis, com foco para o etanol, sendo fundamentado o modelo de biorrefinarias integradas que buscam o aproveitamento total da biomassa (EMBRAPA, 2013).

O crescimento do processamento industrial acarreta a geração excessiva de resíduos líquidos e sólidos, o que vem se tornando um desafio ambiental e processual crítico para as unidades produtoras. O manuseio desses subprodutos é o ponto chave, para uma evolução do setor em direção à sustentabilidade plena e ao cumprimento dos objetivos de descarbonização (EMBRAPA, 2024).

Dentre os resíduos sólidos gerados no processo industrial, destaca-se a torta de filtro, por sua elevada concentração de matéria orgânica, fósforo e micronutrientes, sendo produzida durante o processo de clarificação do caldo de cana (ZAMBONI, 2021). Embora possua valor agronômico, sua disposição em larga escala exige uma logística complexa e monitoramento constante.

A vinhaça, o principal efluente resultante da destilação do etanol, configura-se, como um dos maiores nocivos do setor, devido a sua elevada carga de matéria orgânica e volume excessivo produzido. Conforme detalhado por Poveta (2015) e Marques (2016), o volume do efluente produzido pode chegar à proporção de 10 a 15 litros para cada litro de etanol produzido, exigindo assim estratégias de manuseio que transcenda a tradição da fertirrigação. Embora ambos sejam utilizados na fertirrigação, estudos apontam que a biodigestão anaeróbia é uma alternativa superior, possibilitando a geração de bioenergia, produção de biogás, mitigação de carga poluidora, e redução de gases do efeito estufa através de processos controlados (CIBIOGÁS, 2025).

A transição tecnológica para o biometano caracteriza-se como um avanço estratégico, tendo em vista que este combustível, após o processo de purificação,

apresenta propriedades semelhantes ao gás natural. Segundo dados da Empresa de Pesquisa Energética (2025) e da Confederação Nacional do Transporte (2025), essa semelhança permite a sua aplicação diretamente em frotas de transporte e redes de distribuição, podendo substituir derivados de petróleo, agregando assim um valor econômico aos resíduos.

Conforme mencionado pelo NIPE/UNICAMP (2025), um dos principais diferenciais dessa rota tecnológica, reside na sua aplicação durante a entressafra. Ao aplicar o biogás proveniente da armazenagem e tratamento da torta de filtro e da vinhaça, as usinas e destilarias, podem garantir a continuidade da geração de biometano e energia, mesmo durante a interrupção da moagem, combatendo a sazonalidade característica do setor sucroalcooleiro.

Contudo, a viabilidade financeira e técnica, de projetos como esse ainda precisa ser demonstrado a longo prazo, mesmo mediante as oscilações de mercado. O BNDES (2024) e o Portal do Biogás (2025) ressaltam que, apesar de benefícios, a inserção enfrenta diversos desafios processuais e econômicos, consideráveis, especialmente devido ao alto custo de investimento inicial nas plantas de biodigestão e unidades de purificação.

Em complemento esse contexto, o ambiente institucional brasileiro, tem avançado, para fornecer o suporte necessário, por meio de incentivos à descarbonização. A Política Nacional de Biocombustíveis, o RenovaBio, implementou os Créditos de Descarbonização (CBIOs), que funcionam como um aporte financeiro para usinas, que comprova a eficiência ambiental e energética (ANP, 2025).

Além do RenovaBio, a Lei nº 14.300/2022 (Marco Legal da Geração Distribuída), permitiu a segurança jurídica necessária para que as unidades produtoras possam expandir seus parques de geração. Essa legislação promove o aproveitamento de resíduos para autossuficiência energética e permitindo a comercialização de excedentes a rede elétrica (SENADO FEDERAL, 2022; MAYER BROWN, 2022).

O avanço dos estudos vem mostrando o desenvolvimento de reatores mais eficazes e apropriados à realidade nacional. Estudos recentes com reatores anaeróbios de alta taxa têm mostrado como aperfeiçoar a transformação da vinhaça em energia, proporcionando a redução do tempo de retenção e promovendo a estabilidade do

processo (SANTANA JUNIOR, 2025).

A implementação dessas soluções possibilita que a indústria sucroalcooleira atue como uma central de energia renovável interrupta, sendo capaz de atender demandas de mobilidade e de eletricidade de forma descentralizada mesmo durante os meses de entressafra (ONU BRASIL, 2021).

Dessa maneira o presente estudo analisa o estado da arte da produção de biogás a partir da torta de filtro da vinhaça, investigando como os avanços tecnológicos em reatores de alta taxa e sistemas de purificação, permitem superar, desafios operacionais e econômicos referentes ao setor sucroenergético. A pesquisa foca na consolidação do biometano como uma rota técnica viável para a sustentabilidade energética, reforçando seu potencial de aproveitamento como uma alternativa estratégica, para assim garantir a continuidade processual, e oferta de biocombustíveis, especialmente durante o período de entressafra.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A crescente geração de resíduos na agroindústria sucroalcooleira, especialmente a vinhaça e a torta de filtro, tem se tornado um desafio ambiental e operacional relevante. Embora esses subprodutos sejam tradicionalmente utilizados na fertirrigação, seu uso indiscriminado pode ocasionar impactos ambientais, como contaminação do solo e emissão de gases de efeito estufa.

Nesse contexto, a digestão anaeróbia surge como uma alternativa promissora para o tratamento desses resíduos, permitindo a produção de biogás como fonte de energia renovável. Além de contribuir para a mitigação de impactos ambientais, essa tecnologia possibilita a valorização de subprodutos agroindustriais, alinhando-se aos princípios da economia circular e da transição energética.

Entretanto, apesar do avanço das pesquisas, ainda existem desafios técnicos e operacionais, especialmente relacionados à eficiência do processo, ao tratamento da torta de filtro e à manutenção da produção durante a entressafra. Dessa forma, torna-se fundamental reunir e analisar o estado atual do conhecimento científico sobre o tema.

Assim, este trabalho justifica-se pela necessidade de compreender os avanços, limitações e perspectivas da produção de biogás a partir da vinhaça e da torta de filtro,

contribuindo para o desenvolvimento de soluções mais eficientes e sustentáveis no setor sucroenergético.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

Analisar o estado da arte da produção de biogás a partir da vinhaça e da torta de filtro, com foco nos avanços tecnológicos,, desafios operacionais e estratégias para a entressafra . Busca-se demonstrar como a integração tecnológica da biodigestão anaeróbia da vinhaça e da torta de filtro, aliada ao refino de biometano e ao uso de digestato, pode converter passivos ambientais em ativos estratégicos, promovendo a descarbonização da frota agrícola e o fechamento do ciclo de economia circular no campo.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Comparação de Tecnologias de Digestão: Analisar a eficiência dos reatores UASB e CSTR na conversão de vinhaça e torta de filtro em biogás;
- Validação do Refino (Upgrading): Avaliar métodos de purificação, como as membranas seletivas, para transformar o biogás em biometano dentro das normas da ANP;
- Continuidade Operacional: Definir estratégias de estocagem de biomassa para manter a produção energética constante durante a entressafra;
- Ciclo de Nutrientes: Comparar o valor fertilizante do digestato em relação à vinhaça in natura, focando na substituição de insumos minerais (NPK);
- Viabilidade e Sustentabilidade: Quantificar a redução de emissões de Gases de Efeito Estufa e o ganho financeiro com a substituição do diesel e a geração de Créditos de descarbonização.

# 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1.1 Digestão anaeróbia: Dinâmica Bioquímica e Potencial Energético

O progresso das usinas sucroenergéticas em direção ao modelo de biorrefinaria integrada coloca a digestão anaeróbia como a sustentação para a recuperação de recursos. Conforme citado pela Embrapa (2013), esse processo, possibilita converter passivos ambientais em ativos com potencial energético com alto valor agregado, visão essa reforçada poucos anos depois por Poveda (2015), que analisou o biogás como ferramenta para viabilidade econômica. Para Kunz, Steinmetz e Amaral (2019) a digestão anaeróbia deve ser entendida não somente como um tratamento, mas como um meio biotecnológico fundamental para a economia circular no campo.

O sucesso dessa tecnologia depende da sincronia entre quatro etapas bioquímicas, a primeira trata-se da hidrólise, que atua na quebra de polímeros complexos. Conforme estudado por Zamboni (2021) essa fase costuma ser limitante, quando se trata de um substrato rico em fibras, como o caso da torta de filtro. Gerardi (2003) complementa que, sem uma hidrólise eficiente, as fases posteriores se se tornam desabastecidas de monômeros simples, comprometendo a capacidade da produção de metano.

Posteriormente, vem a acido gênese, que transforma os monômeros em ácidos graxos e alcoóis. Segundo Santana (2018) alertou que a alta velocidade dessa etapa pode causar quedas repentinas de pH, especialmente em resíduos de degradação rápida como o caso da vinhaça. Para evitar tal inibição a UFTM (2024) sugere que o controle rígido da carga orgânica é a única maneira de manter o equilíbrio do complexo microbiano.

A terceira etapa vem acetogênese, funcionando como uma ponte metabólica. Conforme foi descrito Kunz, Steinmetz e Amaral (2022), a produção de acetato e hidrogênio, depende de uma estreita cooperação bacteriana, onde o acúmulo de hidrogênio interrompe a reação. Por fim, na metanogênese, as arqueas transformam esses produtos em metano. Conforme estudado por Marques (2016), afirma-se que uso de reatores de alta taxa como o UASB potencializa essa fase final, ao fixar a biomassa presente de maneira eficiente.

O biogás resultante desse processo é constituído principalmente por metano e dióxido de carbono, está no centro de uma mudança de paradigma. A Empresa de Pesquisa Energética (2024) observa que o setor, vem deixando de apenas queimar o gás, para produzir

eletricidade, mas passando a produzir biometano. Conforme aponta a ANP (2024) essa transição, é motivada pelo RenovaBio, que valoriza a substituição de combustíveis fosseis por rotas de menor impacto ambiental.

As flutuações sazonais na disponibilidade de cana desafiam a manutenção dos reatores. Segundo Godoi et al. (2019), a oscilação na oferta de substrato desestabiliza a microbiota, exigindo a adoção da codigestão como estratégia mitigadora. O NIPE/Unicamp (2025) afirma que a integração entre a torta de filtro e vinhaça, é a peça fundamental para preencher a lacuna produtiva durante o período de entressafra das usinas.

A nível regulamentatório, as novas diretrizes trazidas pela lei nº 14.300/2022, obrigam as usinas a buscarem suas máximas eficiências técnicas. Segundo o Portal Solar (2025) e GNPW (2024) ressaltam que os projetos de biogás agora necessitam de maior sofisticação para assim garantir, um retorno sobre o investimento dentro das novas regras de geração.

Casos de sucesso, como os relatados pela Raízen (2024), comprovam que a tecnologia já atingiu escala comercial plena. No entanto, a Embrapa (2024) pontua que o próximo passo do processo é a democratização dessas soluções para unidades de médio e pequeno porte, garantindo que o biogás chegue a toda a cadeia produtiva.

### 2.1.2 Características da Vinhaça: Desafios e Potencialidades Energéticas

A vinhaça, efluente produzido em grandes proporções na destilação do etanol, hoje é o principal vetor de produção de biogás no Brasil. Conforme a Embrapa (2013), sua elevada carga orgânica a torna um substrato de excelência. Contudo, Fuess e Garcia (2014), alertam, que a aplicação direta no solo, sem o tratamento apropriado pode gerar impactos graves ao solo, como a lixiviação de nutrientes para o lençol freático.

A Demanda Química de Oxigênio da vinhaça pode atingir 150.000 mg/L, refletindo seu imenso valor energético. Segundo analisado por Marques (2016), essa alta concentração orgânica solúvel favorece o crescimento rápido de metanogênicas. Kiani et al. (2022) reforça que a biodigestão elimina riscos de anoxia em corpos d’água, transformando o nocivo ambiental em uma oportunidade de geração de energia limpa.

Processualmente a acidez e altas temperaturas da vinhaça são empecilhos que exigem gestão precisa. Conforme Gomes (2025) em seus estudos demonstrou que o resfriamento e a diluição controlada são estratégias vitais para evitar choque térmico ou toxicidade, por sais nas

arqueas. Sendo complementado pela Unifesp (2024), ressaltando que o monitoramento do pH é o indicador mais sensível para evitar colapsos nos reatores.

A concentração da vinhaça para fins logísticos é outro tema recorrente. Conforme defendido por Santos (2025), embora a evaporação reduza os custos com transporte, ela aumenta o investimento da usina. A UFABC (2025) pondera que as unidades industriais devem avaliar o ponto de equilíbrio entre concentrar os resíduos ou fertirrigar o digestato tratado.

A variação na composição da vinhaça, é influenciada pela matéria-prima trata-se de um fator de instabilidade discutido por Godoi et al. (2019). Para redução desse efeito Cocal (2024) e o BNDES (2024) apontam que uso de tanques de equalização e conversão para biometano, possibilita uma maior previsibilidade na entrega energética, atendendo à demanda interna de frotas agrícolas.

Ao fim do processo, o que resta é o digestato. Fuess e Garcia (2014) detalham que a biodigestão, não mantém apenas o valor fertilizante da vinhaça, como melhora, reduzindo a carga orgânica e poluente. A Embrapa (2025) valida que esse subproduto tratado é a base para uma agricultura mais sustentável, fechando o ciclo do potássio de maneira eficiente.

O impacto econômico é valorizado pelo Renovabio. Conforme ANP (2024) e o Portal Energia e Biogás (2024). O biogás da vinhaça é um dos maiores propulsores da pontuação de eficiência das usinas, promovendo receitas através da comercialização de CBIOs.

### 2.1.3 Características da Torta de Filtro: Complexidade e Papel na Entressafra

A torta de filtro trata-se de um resíduo sólido proveniente da purificação do caldo, representa um “estoque” energético para as usinas. Para a Embrapa (2013) e Menezes (2023), sua importância reside nos altos índices de fósforo e em sua facilidade de armazenamento. A Cocal (2024) reforça que, ao contrário da vinhaça, a torta pode ser mantida em pátios para suprir o biodigestor quando o período de moagem para.

Contudo sua estrutura física é mais complexa. Zamboni (2021) explica que o alto teor de fibras lignocelulósicas exige um tempo de retenção biológica maior. O NIPE/Unicamp (2025) e o Portal Energia e Biogás (2025) são de comum acordo que a hidrólise da torta de filtro é um grande desafio tecnológico para manter as taxas de produção elevadas.

Em conotações químicas, a torta de filtro atua como um regulador nutricional. Segundo notou Santana Junior (2018) a presença da torta de filtro equilibra a relação Carbono Nitrogênio, fundamental para evitar a inibição por amônia. A UFTM (2024) e Kunz, Steinmetz e Amaral

(2022). Reafirmam que a codigestão torna o sistema mais resiliente a choques de carga orgânica

A codigestão com a vinhaça resolve problemas reológicos da torta. Conforme analisado pela Unifesp (2024), a vinhaça serve como veículo de transporte para os sólidos da torta, evitando assim entupimentos. Segundo pontuado por Marques (2016) essa sinergia maximiza o rendimento de metano, tornando o projeto mais atrativo financeiramente.

Dificuldades como a presença de areia na torna, proveniente da colheita, são mencionados pela Embrapa (2022), como causas de desgastes em equipamentos. Segundo a Raízen (2022) e a Neves (2023) o Estado da arte, exige a instalação de separadores de sólidos inorgânicos para proteger a integridade dos biodigestores de larga escala.

Perspectivas para o futuro, segundo o CNPEM (2025) e a Empresa de Pesquisa Energética (2023), envolvem o uso de enzimas para acelerar a biodegradação da torta. Essa inovação permitiria reatores menores e de maior eficiência. Para a Embrapa (2025) e o BNDES (2024), o resultado será um biofertilizante sólido-líquido de alta desempenho, mitigando drasticamente a dependência de insumos químicos importados pelas usinas.

### 2.1.4 Tecnologias Empregadas na Biodigestão e Purificação

Para a seleção da arquitetura para a biodigestão tecnológica no setor sucroalcooleiro, um fator determinante é a viabilidade do projeto. Conforme Kunz, Steinmetz e Amaral (2019), a configuração do reator deve respeitar a reologia do substrato: para resíduos líquidos como a vinhaça os reatores de alta taxa, consolida-se como solução mais viável. Marques reforça que o reator UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) é o “padrão ouro” no Brasil, pois possibilita que a biomassa microbiana se organize em grânulos densos, evitando o arraste de microrganismos, permitindo tratar grandes volumes em espaços reduzidos.

Contudo, a evolução tecnológica, aponta a necessidade de sistemas mais densos, devido à alta complexidade da Vinhaça. Gomes (2025) menciona que, embora o UASB, seja eficiente, ele pode sofrer variações bruscas de carga orgânica. Nesse sentido reator CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor) ganham espaço, quando o foco é a codigestão com sólidos. Conforme analisado por Zamboni (2021), o CSTR garante uma mistura completa que impossibilita a sedimentação da torta de filtro, garantindo que o consócio microbiano tenha acesso contínuo aos nutrientes fibrosos do bagacilho.

A otimização térmica é outro divisor de águas tecnológico. Santana Junior (2018) discute a transição dos regimes mesofílicos para termofílicos (operando acima de 50 ºC). Embora o regime termofílico exija um controle maior, de consumo de energia, ele acelera drasticamente a cinética de degradação da matéria orgânica. Para as usinas, isso significa que a possibilidade de utilizar reatores menores par processar a mesma quantidade de vinhaça, mitigando o investimento inicial em infraestrutura civil, conforme destacado pela Empresa de Pesquisa Energética (2023).

Na área da torta de filtro, a dificuldade tecnológica, reside na hidrólise das fibras. O NIPE/Unicamp e o CNPEM (2025) demonstra que o estado da arte envolve o uso de pré-tratamentos enzimáticos ou químicos para quebrar a estrutura da lignina. Sem esse passo, a torta exige tempo de retenção hidráulica muito longo, encarecendo assim o processo. Kunz, Steinmetz e Amaral (2023) destacam que a tecnologia de separação de sólidos é fundamental par remover areia e impurezas minerais antes que estas causem danos abrasivos aos sistemas de agitação dos reatores.

A purificação do biogás para biometano consolida-se como o salto tecnológico mais transformador da última década. A Empresa de Pesquisa Energética (2024) destaca que tecnologias como Water Scrubbing ou Membranas de Separação, são fundamentais para elevar a taxa de concentração de metano acima de 95%. Santos (2025) reforça que essa pureza é o que permite ao biometano atender as especificações da ANP para uso veicular. Esse refino permite transformar o biogás de um insumo para alimentação de caldeiras para um combustível nobre, capaz de substituir o diesel em motores conforme validado pela GNPW (2024).

Além das configurações clássicas, este estudo aponta para uso de reatores de dois estágios, como uma solução para a instabilidade bioquímica. Conforme explicado por Kunz, Stein e Amaral (2023), separar fisicamente as fases de hidrólise e acidogênese da metanogênese permite que cada grupo de microrganismos opere mediante ao seu pH ideal. Essa estratégia é particularmente importante para a torta de filtro, pois como observado por Zamboni (2021) o primeiro reator pode ser melhorado para a degradação de fibras lignocelulósicas, enquanto o segundo garante uma produção de metano estável e pura.

No que diz respeito à hidrodinâmica, o desenvolvimento de reatores anaeróbios horizontais de alta taxa, tem se mostrado uma alternativa promissora para evitar o acúmulo de sólidos. Santana Junior (2018) mostra que o fluxo em série nesses sistemas melhora a eficiência de

remoção da DQO, reduzindo os riscos de “curtos-circuitos” hidráulicos. A UFTM (2024) completa essa visão ao demonstrar que a simulação computacional desses fluxos possibilita prever zonas de estagnação, garantindo que a vinhaça e a torta permaneçam, o tempo necessário para a completa conversão biológica.

Por fim, a tecnologia de membranas para o upgraind do biogás atingiu um nível de maturidade que possibilitou a recuperação de quase 99% do metano contido no biogás bruto. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (2024), o uso de membranas de polímero vítreo oferece uma vantagem processual por não exigir uso de água ou produtos químicos, facilitando a instalação em usinas localizadas em regiões com escassez hídrica. Santos (2025) reforça que essa eficiência tecnológica é o que viabiliza a conformidade com as normas da ANP (2024), possibilitando que o biometano sucroenergético compita em pé de igualdade com o gás natural fóssil em termos de poder calorífico.

### 2.1.5 Panorama da Produção de Biogás na Indústria Sucroalcooleira

A integração da produção de biogás no ecossistema das usinas brasileiras marca o surgimento da Biorrefinaria 4.0. A Embrapa (2013) já visualizava que o resíduo deixaria de ser um problema de descarte para tornar-se o foco da estratégia energética. Hoje, o parâmetro é de crescimento acelerado, sendo liderados por grandes grupos como a Raízen (2024), que utiliza biodigestão em larga escala para abastecer tanto sua rede elétrica como suas frotas logísticas, consolidando a viabilidade do modelo em larga escala (Neves, 2023).

As localizações geográficas das plantas estão concentradas em sua maioria em São Paulo e Mato Grosso do Sul, reflete a maturidade do cluster sucroenergético nessas regiões. A cocal (2024) é um exemplo emblemático, tendo implementado o primeiro gasoduto dedicado unicamente ao biometano no mundo. Segundo o NovaCana (2023), a infraestrutura possibilita que as usinas atendam cidades vizinhas e indústrias locais, variando a receita para além dos commodities açúcar e etanol.

A análise crítica ao setor mostra que a viabilidade econômica é sustentada por um tripé: energia elétrica, biometano e biofertilizantes. Poveda (2015) reforça que a eletricidade gerada ao biogás é estratégica, pois ocorre de maneira constante (despachável), diferentemente da solar ou eólica. Além disso, o BNDES (2024) aponta que a substituição do diesel por biometano na frota própria reduz a exposição das usinas à oscilação dos preços do petróleo, criando um “hedge” natural dos custos.

O papel das CBIOs na perspectiva atual é decisivo. Conforme a ANP (2024) e o Insper Agro Global (2025), a produção de biogás melhora o índice de intensidade de carbono da usina pelo programa RenovaBio. Significa que cada metro cúbico de metano produzido a partir da vinhaça e da torta de filtro, a usina ganha direito de emitir mais créditos para venda no mercado financeiro, aumentando o lucro líquido da operação como corroborado pelo Portal Energia Biogás (2024).

Instituições como ONU (2021) e CIBiogás (2025) reforçam que o panorama brasileiro é observado mundialmente como um laboratório de descarbonização. O uso do digestato como fertilizante, por exemplo, fecha o ciclo do fósforo e potássio. Fuess e Garcia (2014) e a Embrapa (2025) validam que a economia circular aplicada à vinhaça biodigerida mitiga a necessidade de importação de adubos minerais, tornando a agricultura brasileira menos dependente de fatores geopolíticos externos.

A expansão do panorama produtivo também é impulsionada pela criação de polos regionais de biogás, que buscam a melhoria da logística de distribuição. O BNDES (2024) reforça que a concentração de usinas em clusters, facilita a criação de redes de biometano integradas, onde o excedente de unidade pode suprir a demanda de frotas terceirizadas. Esse modelo de "condomínio energético", discutidos pela CIBiogás (2025), reduz o risco do investimento e atrai investidores institucionais que procuram ativos alinhados às metas de descarbonização global da ONU (2021).

Do ponto de vista econômico, a análise de custo-benefício tem se mostrado cada vez mais favorável devido á internalização das externalidades ambientais. Poveta (2015) e a Empresa de Pesquisa Energética (2023) observam que, ao contabilizar a economia com multas ambientais e a redução na compra de fertilizantes nitrogenados, o payback de uma planta de biogás reduziu-se de maneira significativa nos últimos anos. A Neves (2023) reforça que essa rentabilidade é ampliada pela venda dos créditos de carbono no mercado voluntário, uma fonte de receita que complementa aos CBIOs do RenovaBio.

A diversificação da aplicação do biogás também abre portas para a produção de hidrogênio verde () por reforma a vapor do metano. O CNPEM (2025) Empresa de Pesquisa Energética (2023) indica que as usinas sucroenergéticas possuem a infraestrutura ideal para se tornarem os principais hubs de hidrogênio do país. Conforme reforçado pelo CIBiogás (2025) essa rota tecnológica, embora ainda em fase de escala piloto, posiciona o biogás de torta e vinhaça

como peça fundamental na estratégia nacional de transição energética para setores de difícil descarbonização, como a indústria siderúrgica e transporte marítimo.

### 2.1.6 Desafios Tecnológicos e o Gargalo da Entressafra

Apesar do otimismo, os estudos revelam desafios técnicos que limitam a expansão total da tecnologia. O manejo da vinhaça, por exemplo, sofre com a alta concentração de sulfatos. Marques (2016) e a Unifesp (2024) detalham que a redução do sulfato em sulfeto de hidrogênio por bactérias competidoras pode inibir as arqueas metanogênicas e causar corrosão severa nos equipamentos. O controle do pH e a remoção de no biogás bruto são, portanto, custos operacionais (OPEX) que não podem ser subestimados (Empresa de Pesquisa Energética, 2023).

A instabilidade biológica causada pela formação de espuma nos reatores é outro desafio recorrente. Kiani et al. (2022) observa que as propriedades surfactantes da vinhaça combinadas com a agitação, podem transbordar os biodigestores, causando paradas não programadas. Além disso, o acúmulo de ácidos graxos não voláteis é um parâmetro de risco, se a carga orgânica não for ajustada em tempo real, o sistema “azedará”, exigindo assim, meses para a recuperação da biomassa ativa, conforme alertado por Gomes (2025).

Contudo o gargalo mais crítico é a entressafra canavieira. Como a biodigestão depende de um fluxo contínuo de alimento para os microrganismos, a parada de moenda entre dezembro e março cria um vácuo de matéria-prima. (Zanon, 2024) e o NIPE/Unicamp (2025) classificam esse período como a maior dificuldade para contratos de fornecimento firme de gás. Sem substrato fresco, a produção de biogás reduz drasticamente, tornando ciosos os investimentos em purificação e compressão.

Para resolver esse problema, a presente estudo, foca na estocagem estratégica. Santos (2025) e a UFABC (2025) discutem a concentração da vinhaça via evaporação, possibilitando seu armazenamento para uso gradual na entressafra. Simultaneamente, a Cocal (2025) e a Forbes (2025), investem na codigestão da torta de filtro estocada e até outros resíduos agroindustriais. Essa “dieta da substituição” é o que permitirá que plantas de biogás operem durante os 365 dias do ano, assegurando assim a estabilidade necessária para o mercado de biometano.

Por fim, a questão das impurezas minerais encontradas na torta de filtro, provenientes da colheita mecanizada permanece como um desafio de engenharia. A Embrapa (2024) reforça

que o excesso de terra e areia reduz o volume útil dos biodigestores e destrói selos mecânicos de bombas. A solução para esse gargalo, conforme a Raízen (2022) e a Geo Bio Gas&Carbon (2023), passa por sistemas de limpeza a seco da cana e decantadores de alta eficiência, tecnologias que ainda demandam alto CAPEX, mas que são essenciais para a longevidade das plantas de biogás.

Para redução dos riscos de inibição metabólica, o estudo em monitoramento utiliza sensores de ácidos graxos voláteis (AGVs) em tempo real. Gomes (2025) aponta que as detecções precoces de picos de ácido propiônico podem evitar o "azedamento" do reator, possibilitando intervenções automáticas na taxa de alimentação. A Unifesp (2024) acrescenta que o uso de modelos matemáticos de simulação ajuda a prever o comportamento do substrato frente a variações térmicas, garantindo que a eficiência da metanogênese não caia durante noites mais frias, comuns nas regiões do Sudeste.

Outra dificuldade persistente e o gerenciamento de nitrogênio amoniacal total (NAT), que pode se tornar tóxico em altas concentrações, especialmente na codigestão de torta de filtro. Kunz, Steinmetz e Amaral (2022) sugerem que o controle da temperatura e pH é a ferramenta mais eficaz para manter a amônia em sua formação não ionizada, menos prejudicial às arqueas. Marques (2016) afirma que o desenvolvimento de microrganismos aclimatados a altos teores de nitrogênio é uma fronteira de pesquisa que pode aumentar a carga de orgânica suportada pelos biodigestores atuais.

A questão logística de entressafra exige um planejamento de biomassa que vai muito além dos resíduos da cana. A Cocal (2025) e a Forbes (2025) mencionam a integração com culturas de inverno ou resíduos de milho como estratégia para sustentar o biodigestor durante os meses sem moagem de cana. Segundo NIPE/Unicamp (2025) essa visão Multibiomassa transforma a planta de biogás em uma unidade industrial independente da safra canavieira, resolvendo o problema da ociosidade dos ativos e garantindo o fluxo de biometano e CBIOs permaneça ininterrupto durante todo o ano (ANP, 2024; Zanon 2024).

### 2.1.7 Estratégias para Produção na Entressafra

A descontinuidade no fornecimento dos resíduos durante a entressafra é historicamente, a maior entrave para a viabilidade de contratos de longo prazo no setor. Segundo o NIPE/Unicamp (2025) e Zanon (2024), a operação de um biodigestor não pode ser interrompida repentinamente, pois a morte da microbiota anaeróbia exigiria meses para voltar

ao sistema. Para contornar essa limitação, a Cocal (2025) e a Forbes (2025) apontam que a torta de filtro, devido à sua baixa taxa de degradação inicial, atua como uma reserva energética, ideal, podendo ser armazenada em pátios e dosada conforme a necessidade térmica do reator.

A dinâmica microbiológica durante a troca de substratos durante a entressafra exige precisão cirúrgica no monitoramento. Kunz, Steinmetz e Amaral (2022) apontam que a transição de uma dieta baseada exclusivamente em vinhaça para uma mistura com torta de filtro deve ser gradual para evitar choque osmótico e a inibição das arqueas metanogênicas. A Embrapa (2013) e o Jornal Unicamp reforça que a manutenção de uma carga orgânica mínima é vital para que a população de microrganismos permaneça ativa, garantindo que o biogás continue sendo produzido mesmo sem o fluxo constante da destilaria.

A logística de armazenamento da vinhaça também evoluiu como uma estratégia complementar para os meses de seca. Santos (2025) e a UFABC (2025) discutem a técnica de concentração por evaporação, que reduz o volume do efluente em até 90%, facilitando sua guarda em tanques pulmão. Essa vinhaça concentrada, embora exija alto investimento em evaporadores permite que a usina armazene o potencial metanogênico de tosa sua safra, liberando-o de forma controlada durante a entressafra. Para a Raízen (2024), essa estratégia, é o que possibilita a operação flat da planta de biometano, fundamental para atender à demanda de postos e indústrias.

Além da torta de filtro e da vinhaça concentrada, a codigestão com palha da cana pré-tratada surge como uma fronteira tecnológica bem estruturada. O NIPE/Unicamp (2025) sugere que uso de extrusão mecânica ou hidrólise térmica na palha da libera açúcares complexos que prolongam a fase de metanogênese quando a vinhaça falta. Entretanto Zamboni (2021) alerta que o excesso de lignina da palha pode aumentar o tempo de retenção hidráulica, exigindo reatores de maior volume. O equilíbrio entre líquidos e sólidos é o que define, segundo a GIZ (2025) a estabilidade do sistema durante a parada da safra,

A implementação com substratos de culturas de inverno, como o milho, é uma solução estratégica citada pela NovaCana (2023) e pelo BNDES (2024). Ao processar o milho para etanol durante a entressafra de cana, a usina gera um novo tipo de vinhaça que mantém o biodigestor alimentado. Essa alternância de resíduos, validada pela Embrapa (2024), cria um ecossistema produtivo ininterrupto que protege o capital investido. A planta de Biogás deixa de ser um acessório da safra para tornar-se uma unidade industrial autônoma e resiliente.

O uso de dejetos animais em sistemas de codigestão também ganha força como estratégia de estabilização. Segundo o CIBiogás (2025), a inserção de esterco bovino ou suíno fornece nitrogênio suplementar e microrganismos que enriquecem o lodo anaeróbio. Santana Junior (2018) afirma que essa diversificação biológica atua como um seguro contra as variações químicas da vinhaça. Para usinas que possuem confinamento de gado próximo, essa integração fecha o ciclo da proteína e da energia de maneira exemplar e sustentável.

A digitalização dos sistemas de monitoramento de estoques de biomassa possibilita que os gestores planejem a alimentação do digestor com antecedência. A Unifesp (2024) destaca que softwares de predição conseguem calcular a curva de decaimento da produção de biogás conforme o substrato disponível. Isso possibilita que a usina decida se deve comprar biomassa de terceiros ou reduzir a carga do reator programada. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (2023), essa previsibilidade é o que diferencia os projetos de biogás modernos das antigas lagoas de tratamento de resíduos.

Um fator crítico argumentado por Marques (2026) é a manutenção do pH durante o período de entressafra com o uso da torta estocada. A decomposição natural da torta de filtro no pátio pode deixá-la acida, exigindo correção com cal ou cinzas antes da entrada no reator. Kunz, Steinmetz e Amaral (2019) afirmam que a instrumentação para controle de alcalinidade é indispensável quando a biomassa principal muda drasticamente de perfil. A análise laboratorial frequentemente da torta estocada é, portanto, um procedimento operacional padrão nas plantas de Biogás.

A viabilidade de manter a planta funcionando na entressafra também está ligada ao mercado de biometano veicular. Conforme destaca a CNT (2024), as frotas agrícolas convertidas para gás não podem parar durante a entressafra, pois são utilizadas no preparo do solo e plantio. O Portal Energia e Biogás (2025) ressalta que a produção contínua de biogás elimina a necessidade de comprar diesel externo para as operações. Assim a estocagem de vinhaça e torta concentrada gera uma receita direta de caixa no período em que a usina não está faturando com a produção de açúcar e etanol.

A perspectiva de usar polímeros biodegradáveis para selar as pilas de torta de filtro garante a integridade da matéria orgânica. A Embrapa (2025) mostra que o controle de umidade e temperatura nos pátios de estocagem garante o alto rendimento de biogás meses após a colheira. Para o Insper Agro Global (2025), o sucesso da entressafra depende menos da tecnologia de biodigestão e mais da inteligência logística aplicada aos resíduos. A usina do

futuro será essencialmente, uma gestora eficiente de fluxos de biomassas e estoques de energia química.

### 2.1.8 Viabilidade Econômica e Mercado de Biometano

A viabilidade econômica do biogás no setor sucroenergético transicionou de uma análise baseado em custos evitados, para uma geração de receita indireta. Poveta (2015) reforça que o custo nivelado de produção do biometano de vinhaça é um dos ais competitivos mundialmente. Isso se deve à concentração de biomassa em um único local, o que elimina custos com transporte de matéria-prima.

O retorno sobre o investimento (ROI) é fortemente impulsionado pela substituição do diesel na logística pesada. Santos (2025) e a GNPW (2024), calculam que trocar o combustível fóssil pelo biometano em caminhões de transbordo pode mitigar os custos das usinas em até 20%. Essa independência em relação à Petrobras e às variações do dólar protege a margem de lucro da usina. Além disso, a Raízen (2024) reforça que o biometano reduz o desgaste de bicos injetores e filtros, reduzindo o custo de manutenção preventiva da frota agrícola.

A análise dos mercados de Créditos de Descarbonização é fundamental para entender a atratividade financeira desses projetos. A ANP (2024) e o Insper Agro Global (2025) explicam que a biodigestão eleva a nota de eficiência ambiental das usinas no RenovaBio de forma exponencial. O Portal Energia e Biogás (2024) reforçam que essa receita financeira sustentável muitas vezes paga o custo operacional da planta. Transforma um nocivo ambiental em um ativo financeiro negociável em bolsa é o grande diferencial competitivo das biorefinarias modernas.

Contudo o alto CAPEX (investimento inicial) ainda representa uma barreira para grupos menores. A GIZ (2025) e a Neves (2023) observam que a infraestrutura de purificação e compressão exige uma escala para ser rentável. A Empresa de Pesquisa Energética (2024) corrobora que o novo marco legal para o gás facilita à injeção em redes de distribuição em redes de distribuição estaduais, possibilitando a venda para indústrias distantes. Essa relação com a malha nacional de gás mitiga o risco comercial, assegurando que todo volume produzido seja escoado e faturado mensalmente.

A monetização do biogênico, subproduto da purificação, surge como uma nova fronteira econômica secundária. O NIPE/Unicamp (2025) e a NovaCana (2023) abordam a venda desse gás para indústrias de bebidas e para o setor de refrigeração industrial. Esse aproveitamento

integral de gases transforma o que era uma perda no processo em uma fonte adicional de lucro. Para a Cocal (2024), essa diversificação de portfólio é o que torna a planta de biogás resiliente às flutuações do preço internacional do açúcar.

O mercado voluntário de carbono também oferece oportunidades para usinas que superam as metas do RenovaBio. Raízen (2022) e Geo bio gas&carbon (2023) reforçam que multinacionais de tecnologia e alimentos pagam prêmios por biometano "Net Zero" para descarbonizar suas operações. Esse mercado premium, conforme pontua o Portal do Biogás (2023), gera uma receita em moeda forte que blinda a usina contra crises internas. A sustentabilidade ambiental, portanto, deixou de ser um custo ético para se tornar o motor da rentabilidade industrial.

O acesso a linhas de financiamento verde com juros reduzidos é outra vantagem competitiva. O BNDES (2024) e a UFABC (2025) reforçam que projetos de biogás e biometano têm prioridade em fundos de desenvolvimento sustentável. Esse "dinheiro barato" permite que as usinas invistam em tecnologias de ponta com um período de amortização mais curto. Conforme o Portal Solar (2025), a infraestrutura energética descentralizada melhora o balanço das usinas, tornando-as mais atraentes para o mercado de capitais e emissão de debêntures verdes.

A viabilidade econômica também deve considerar a economia com fertilizantes químicos. Fuess e Garcia (2014) e a Embrapa (2025) validam que o digestato estabilizado reduz a necessidade de comprar cloreto de potássio e fosfatos importados. Em tempos de crises geopolíticas que afetam o preço dos insumos agrícolas, ter uma fonte própria de fertilizante é uma vantagem estratégica imensa. A UFTM (2024) destaca que essa economia circular protege a usina contrachoques de custo no campo, garantindo a produtividade do canavial.

No cenário de expansão do biometano, a criação de "gasodutos virtuais" permite atender frotas de terceiros. A Cocal (2024) exemplifica isso ao abastecer caminhões de transportadoras regionais, criando uma linha de negócio. A CNT (2024) ressalta que o setor de transporte rodoviário está ávido por combustíveis renováveis para cumprir metas de ESG. Assim, a usina deixa de ser apenas uma unidade produtiva para se tornar um posto de abastecimento regional estratégico, diversificando sua base de clientes finais.

O biogás atua como um fator de estabilização do fluxo de caixa da usina. Conforme analisa a Forbes (2025), enquanto açúcar e etanol sofrem com a sazonalidade e preços de bolsa, o biometano oferece contratos de fornecimento constante. Essa previsibilidade é o que atrai

grandes grupos multinacionais para o setor sucroenergético brasileiro. Para o GNPW (2024), o biogás não é apenas uma solução ambiental, mas a âncora financeira que permite a modernização e a perenidade das usinas no novo cenário de transição energética global.

### 2.1.9 Impactos Ambientais e Economia Circular

A transformação da vinhaça e da torta de filtro via biodigestão representa o ápice da bioeconomia circular aplicada à cana. Fuess e Garcia (2014) reforçam que a aplicação direta de vinhaça in natura pode causar desequilíbrios na microbiota do solo e acidificação. Ao passar pelo biodigestor, a Demanda Química de Oxigênio é reduzida em até 90%, resultando em um biofertilizante estabilizado e seguro. A Embrapa (2025) valida que esse tratamento preserva as propriedades físicas do solo, evitando a lixiviação excessiva de potássio para os lençóis freáticos.

A redução das mudanças climáticas é o impacto ambiental mais direto e mensurável dessa tecnologia. Conforme a ONU (2021) e o CIBiogás (2025), as antigas lagoas abertas de vinhaça são fontes emissoras de metano e óxido nitroso, gases de alto potencial de aquecimento global. A captura desses gases em biodigestores fechados impede que poluentes cheguem à atmosfera, gerando energia limpa no processo. Kiani et al. (2022) reforça que essa redução de pegada de carbono é essencial para que o etanol brasileiro mantenha sua liderança nos mercados globais de baixo carbono.

A regeneração do solo via digestato de torta de filtro é um avanço destacado pela Embrapa (2024) e pelo CNPEM (2025). A torta biodigerida atua como um condicionador de solo que melhora a retenção de água e a porosidade, combatendo a compactação. Essa sinergia descrita pela Raízen (2022) fecha o ciclo do carbono de forma positiva: o carbono fixado pela fotossíntese da cana retorna ao solo em forma de matéria orgânica estável. Esse processo é um dos pilares da agricultura regenerativa que o setor sucroenergético busca consolidar mundialmente.

Além dos ganhos químicos, a biodigestão elimina passivos sociais e sanitários nas regiões produtoras. O Portal Energia e Biogás (2024) e o Podcast Biogás (2025) discutem como o tratamento anaeróbio controlado elimina odores desagradáveis e reduz a proliferação de moscas-dos-estábulos. Esses insetos são um grande problema para a pecuária vizinha, e sua redução melhora o relacionamento da usina com a comunidade local. A Unicamp (2025)

valida que a remoção de compostos orgânicos voláteis durante a fermentação é a melhor forma de mitigar o impacto visual e sensorial das usinas.

A economia circular se estende à gestão hídrica da unidade industrial. A UFABC (2025) aponta que o uso de digestato tratado permite uma fertirrigação mais precisa, reduzindo o volume de água captado dos rios. Como o digestato é menos poluente, ele pode ser aplicado em doses mais eficientes sem risco de saturação do solo. Segundo o BNDES (2024), esse gerenciamento avançado protege a bacia hidrográfica regional e garante a sustentabilidade da moagem mesmo em anos de estresse hídrico severo, cada vez mais comuns devido às mudanças climáticas.

O reaproveitamento da areia e das impurezas minerais retiradas da torta de filtro também faz parte do ciclo ambiental moderno. A Embrapa (2024) sugere que esse material mineral inerte, após a lavagem, pode ser usado em obras civis internas da usina ou manutenção de estradas rurais. Isso evita a abertura de novas jazidas e reduz o descarte de resíduos inertes em aterros industriais. Para a Raízen (2022), o conceito de "resíduo zero" é o objetivo final da integração entre moenda, destilaria e planta de biogás.

No campo da biodiversidade, a substituição de adubos sintéticos por biofertilizantes digestato reduz a emissão de óxido nitroso no campo. Kunz, Steinmetz e Amaral (2022) observam que os fertilizantes de base nitrogenada sintética têm alta energia incorporada em sua produção. Ao produzir o próprio fertilizante, a usina diminui drasticamente suas emissões de escopo. A UFTM (2024) ressalta que essa transição para insumos biológicos favorece a fauna edáfica (microrganismos do solo), tornando o ecossistema do canavial mais equilibrado e resiliente a pragas.

A produção de biometano para frotas próprias elimina o uso de diesel, combustível que gera emissões de material particulado e óxidos de enxofre. A CNT (2024) pontua que o biometano é um combustível "limpo" no ponto de queima, melhorando a qualidade do ar nas frotas agrícolas que operam próximas a centros urbanos. O Insper Agro Global (2025) afirma que essa descarbonização logística é um dos pontos mais bem avaliados por certificadoras internacionais. A usina passa a ser vista não apenas como produtora de álcool, mas como uma prestadora de serviços ambientais para o planeta.

A análise crítica do ciclo de vida da cana, feita pela Embrapa (2025), mostra que o biogás é o elemento que permite atingir a "emissão negativa". Quando o liberado na queima do metano é capturado ou quando o digestato sequestra carbono no solo, a conta final de GEE pode ser

menor que zero. Esse cenário é o que a Cocal (2025) busca em sua planta "Net Zero". Para o CIBiogás (2025), essa é a maior contribuição ambiental do setor para o cumprimento das metas brasileiras no Acordo de Paris e na Agenda 2030 da ONU.

O impacto ambiental positivo gera uma valorização da terra agrícola. Zanon (2024) observa que solos tratados com biofertilizantes orgânicos mantêm sua produtividade por mais décadas sem degradação química. Essa valorização do patrimônio imobiliário da usina é um benefício ambiental de longo prazo muitas vezes ignorado nos balanços financeiros de curto prazo. Para a Forbes (2025) e o BNDES (2024), a economia circular é o seguro de vida do agronegócio frente aos desafios climáticos do século XXI, garantindo solo fértil e energia limpa para as próximas gerações.

## 2.10 Perspectivas Futuras e Biorrefinarias Integradas

O futuro do biogás no Brasil será ditado pela fusão entre biotecnologia avançada e inteligência artificial. A Unifesp (2024) e a UFTM (2024) indicam que o "Estado da Arte" envolverá o uso de gêmeos digitais (Digital Twins) dos biodigestores para otimizar a produção em tempo real. Sensores detectarão picos de acidez segundos após a alimentação, permitindo ajustes automáticos que evitam paradas biológicas. Essa digitalização, segundo o CNPEM (2025), garantirá que a eficiência metanogênica atinja o limite teórico, reduzindo perdas e aumentando a rentabilidade operacional.

A integração com a economia do Hidrogênio Verde () é a perspectiva mais disruptiva citada pela EPE (2023) e pelo CIBiogás (2025). O biometano pode ser reformado para produzir hidrogênio com baixíssima pegada de carbono, especialmente se o do processo for capturado (rota Bio-). Conforme o Roadmap Tecnológico de Hidrogênio da EPE (2023), as usinas de cana se tornarão os principais hubs de hidrogênio do interior do país. Essa rota permitirá abastecer caminhões elétricos a célula de combustível e até aeronaves no futuro (SAF - Sustainable Aviation Fuel).

Outra tendência forte é o aproveitamento total do biogênico separado na purificação do biogás. O NIPE/Unicamp (2025) e a NovaCana (2023) discutem o uso desse gás em estufas agrícolas para acelerar a fotossíntese ou na indústria de alimentos e bebidas. Atualmente, o é apenas liberado na atmosfera; no futuro, ele será liquefeito e comercializado como um produto de alto valor. Essa diversificação transforma a usina em uma unidade industrial de emissão negativa, atraindo subsídios internacionais e investimentos de fundos soberanos.

No campo da microbiologia, a engenharia de consórcios microbianos promete reatores capazes de degradar lignina de forma mais acelerada. Santana Junior (2018) e Kunz, Steinmetz e Amaral (2022) preveem o uso de inóculos sintéticos customizados para digerir bagacilho e palha em tempos recordes. Isso permitirá a construção de reatores muito menores e mais baratos que os atuais CSTR, democratizando a tecnologia para usinas de menor porte. A biotecnologia sintética será, portanto, o motor da eficiência energética nas próximas duas décadas.

A descentralização energética através de micro-redes (microgrids) inteligentes é uma perspectiva levantada pelo Portal Solar (2025) e pela GNPW (2024). O biogás funcionará como a bateria firme para equilibrar a intermitência da energia solar e eólica no campo. Em períodos de nuvens ou falta de vento, os biodigestores aumentam a geração para manter a rede estável. Essa simbiose entre renováveis tornará as áreas rurais totalmente independentes da rede elétrica nacional, aumentando a resiliência produtiva contra apagões e falhas de transmissão.

A expansão do biometano veicular chegará ao setor de máquinas agrícolas de forma massiva. A CNT (2024) e a Cocal (2024) projetam tratores e colhedoras saindo de fábrica 100% movidos a gás renovável. O fim do diesel na agricultura brasileira é uma meta ambiciosa, mas que o biogás de vinhaça torna tecnicamente possível. Para a Raízen (2022), o objetivo é atingir a neutralidade carbônica em toda a cadeia de suprimentos, do plantio à entrega do etanol no porto, usando o próprio resíduo como combustível de transporte.

A internacionalização dos créditos de carbono gerados pelo biogás é outra tendência citada pelo Insper Agro Global (2025). Através da tecnologia de blockchain, a rastreabilidade do biometano brasileiro será auditável globalmente, permitindo a venda de RECs (Certificados de Energia Renovável) para empresas na Europa ou Ásia. Essa conexão com o mercado global de sustentabilidade trará um fluxo constante de capital estrangeiro para o agronegócio brasileiro. O biogás deixará de ser um gás de resíduo para se tornar uma "commodities ambiental" transacionada mundialmente.

O uso do digestato como base para a produção de organominerais granulados é uma perspectiva promissora para a indústria de fertilizantes. A Embrapa (2025) e a UFTM (2024) indicam que, ao secar e enriquecer o digestato da torta, a usina cria um produto estocável que pode ser vendido para outras culturas agrícolas. Isso elimina a dependência exclusiva da aplicação via fertirrigação em canaviais próprios. A usina passa a competir no mercado de

fertilizantes, gerando uma nova e lucrativa unidade de negócio baseada em economia circular extrema.

A regulamentação para o uso de biometano em substituição ao GLP industrial e residencial abrirá novos nichos de mercado. Conforme o Portal Energia e Biogás (2024), o biometano poderá ser "engarrafado" e vendido para comunidades rurais, substituindo o botijão de petróleo. Essa democratização do acesso à energia limpa no campo tem um forte componente social de governança (ESG). A Unicamp (2025) reforça que projetos de biogás com impacto social positivo têm mais facilidade de aprovação em órgãos de licenciamento e aceitação pública.

A usina sucroenergética caminha para se tornar a "Biorrefinaria de Carbono Zero". Para a Forbes (2025) e o BNDES (2024), o biogás é a peça do quebra-cabeça que une rentabilidade, preservação ambiental e inovação tecnológica. A transição energética brasileira não ocorrerá via baterias de lítio, mas sim através da química verde dos resíduos do campo. O biogás de vinhaça e torta de filtro é, definitivamente, o combustível que alimentará a neoindustrialização sustentável do Brasil no século XXI.

## 3. ANÁLISE DE RESULTADOS

O ponto de partida para a viabilidade do biogás reside na escolha da arquitetura do reator. A análise dos estudos demonstra que a vinhaça, por sua característica líquida e alta carga orgânica solúvel, demanda sistemas que privilegiem o tempo de retenção de biomassa em detrimento do volume total. A Tabela 1 sintetiza as principais rotas tecnológicas disponíveis, sendo baseadas em dados de Kunz, steinmetz e Amaral (2019), evidenciando que o reator UASB consolidou-se como o "padrão-ouro" para o efluente de destilaria.

A eficiência de remoção de DQO no UASB, situada entre 70% e 85%, reflete a capacidade das arqueas metanogênicas de se organizarem em grânulos densos. Conforme pontuado por Marques (2016) e Gomes (2025), essa granulação impede o arraste de microrganismos, permitindo que a usina processe volumes massivos de vinhaça em áreas reduzidas. Todavia, a discussão técnica revela que a sensibilidade ao pH e à temperatura exige sistemas de monitoramento em tempo real para evitar a inibição ácida.

Em contrapartida, reatores CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor) apresentam uma versatilidade indispensável para a codigestão. Embora o custo energético de agitação seja superior, sua capacidade de homogeneizar a torta de filtro

um resíduo fibroso e sólido impede a formação de "zonas mortas" no reator. Como destaca Zamboni (2021), a mistura completa é o que garante que as enzimas hidrolíticas quebrem a lignina da cana, disponibilizando açúcares para a fase de acidogênese.

**Tabela 1 - Rotas Tecnológicas**

| Tecnologias | Substrato Ideal | Vantagens | Limitações | Eficiências (DQO) |
|---|---|---|---|---|
| **UASB** | Vinhaça | Compacta; alta densidade Biológica | Sensível a sólidos e pH | 70% à 85% |
| **CSTR** | Vinhaça + Torta | Mistura Total | Alto consumo elétrico | 60% à 80% |
| **Lagoa coberta** | Vinhaça Bruta | Baixo investimento (CAPEX) | Baixa eficiência; ocupa área | 40% à 60% |
| **Batelada (dry)** | Torta de Filtro | Simplicidade operacional | Carga e descarga lenta | Variável |

Fonte: autoria própria, 2026.

A análise crítica dos estudos aponta que as lagoas cobertas, embora baratas, representam um modelo em declínio. A baixa eficiência de conversão e a dificuldade de controle térmico resultam em uma produção de biogás instável, o que inviabiliza contratos de fornecimento de biometano. Para a Raízen (2024) e a Cocal (2024), a previsibilidade energética é um ativo financeiro superior ao baixo custo de implantação, justificando o investimento em reatores de aço inox ou concreto armado com isolamento térmico.

A temperatura de operação emerge como um dos parâmetros mais discutidos. O regime termofílico (acima de 50°C) acelera a cinética de reação, permitindo reatores menores. Contudo, Santana Junior (2018) alerta que a microbiota termofílica é mais frágil a variações de carga. A maioria das usinas brasileiras opta pelo regime mesofílico (35°C a 40°C) devido à maior resiliência biológica e facilidade de resfriamento da vinhaça, que sai da destilaria a temperaturas próximas à fervura.

A codigestão entre vinhaça e torta de filtro não é apenas uma conveniência logística, mas uma sinergia bioquímica. A torta fornece nitrogênio e micronutrientes que muitas vezes faltam na vinhaça pura, equilibrando a relação Carbono/Nitrogênio. Segundo a UFTM (2024), esse equilíbrio reduz a toxicidade por amônia livre, permitindo que as arqueas metanogênicas operem em sua taxa máxima de crescimento, elevando o rendimento específico de metano por tonelada de resíduo.

A dinâmica da hidrólise na torta de filtro é identificada como a etapa limitante do processo. A presença de ceras e polímeros lignocelulósicos exige tempos de retenção hidráulica mais longos. Estudos do CNPEM (2025) sugerem que o uso de pré-tratamentos enzimáticos ou hidrotérmicos pode reduzir o TRH em até 30%, tornando o processo mais rentável. Essa inovação é crucial para que as plantas de biogás consigam processar toda a torta gerada na safra sem a necessidade de reatores gigantescos.

O monitoramento de Ácidos Graxos Voláteis surge como o indicador de saúde mais confiável. Quando a produção de ácidos supera a capacidade de consumo das metanogênicas, o reator azeda. A Unifesp (2024) propõe o uso de algoritmos de inteligência artificial para cruzar dados de pH, AGVs e temperatura, permitindo intervenções automáticas na alimentação do reator. Essa digitalização é o que diferencia as plantas modernas de "Estado da Arte" dos sistemas artesanais do passado.

A tecnologia de biodigestão no Brasil atingiu a maturidade técnica. A dificuldade atual, conforme pontua a Embrapa (2024), não é mais "se funciona", mas "como otimizar". A integração dos reatores UASB com sistemas de pós-tratamento de efluentes permite que a usina atinja o fechamento completo do ciclo hídrico, recuperando água para reuso industrial e gerando um fertilizante concentrado de alto valor comercial. A transformação do biogás bruto em biometano é o divisor de águas econômico do setor.

A Tabela 2 detalha as tecnologias de upgrading (purificação), comparando os princípios físicos que permitem a remoção de $CO_2$ e $H_2S$. Os estudos indicam que a tecnologia de membranas de separação física lidera a preferência no mercado sucroenergético devido à sua modularidade e facilidade de operação remota.

As membranas de polímero vítreo funcionam pela diferença de permeabilidade: o e o atravessam a fibra mais rapidamente que o. A eficiência dessa tecnologia, conforme a EPE (2024), permite alcançar purezas superiores a 98% de metano. Além disso, a ausência de químicos e baixo consumo de água coloca as membranas como a opção mais sustentável, alinhada aos critérios ESG (Environmental, Social, and Governance) que regem os investimentos globais atualmente (Forbes, 2025).

**Tabela 2 – Tecnologias upgraind**

| **Tecnologias** | **Princípios de Ação** | **Recuperação $CH_4$** | **Consumo de Insumos** | **Observação** |
|---|---|---|---|---|
| Membranas | Permeação seletiva | > 98% | Baixo (Eletricidade) | Alta modularidade e pureza |
| *Water Scrubbing* | Solubilidade em água | ~97% | Alto (Água) | Robusta remove $H_2$ |
| PSA | Adsorção | ~96% | Médio | Consolidado; |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | física | | (Zeólitas) | exige pré-tratamento |
| Aminas | Absorção química | > 99% | Alto (Calor/ Solvente) | Máxima pureza; OPEX elevado |

Fonte: autoria própria, 2026.

O Water Scrubbing aparece como uma alternativa viável para usinas com abundância de recursos hídricos e excedente de energia elétrica. Embora consuma mais água, sua capacidade de remover contaminantes de forma simultânea simplifica o processo. No entanto, o Portal Energia e Biogás (2024) ressalta que o tratamento da água de descarte do scrubber é um custo oculto que deve ser contabilizado no balanço financeiro da planta.

A tecnologia PSA (Pressure Swing Adsorption) é valorizada pela sua confiabilidade histórica, mas enfrenta desafios no setor sucroenergético devido à presença de compostos orgânicos voláteis no biogás de vinhaça, que podem contaminar as peneiras moleculares. A discussão técnica promovida pelo BNDES (2024) sugere que o PSA é mais eficiente em plantas de biogás de aterro sanitário do que em biorrefinarias agroindustriais, onde a variabilidade do gás é maior.

A remoção de Sulfeto de Hidrogênio é, sem dúvida, o maior desafio operacional. O enxofre presente na vinhaça, se não removido, ataca metais e vedações. A análise dos dados de Santos (2025) mostra que o uso de filtros biológicos de enxofre (bio-trickling filters) pode reduzir o custo de remoção em 60% comparado ao uso exclusivo de carvão ativado. Essa economia no OPEX é vital para manter a competitividade do biometano frente ao diesel importado.

O conceito de "Gás de Intercâmbio" é central para a estratégia da ANP (2024). Para que o biometano seja injetado em gasodutos, ele deve ser indistinguível do gás natural fóssil. Isso exige que, além da pureza, o biometano tenha seu ponto de orvalho e Índice de Wobbe rigorosamente controlados. A falha nesses parâmetros impediria a usina de acessar a malha nacional de gás, limitando seu mercado apenas ao uso veicular local.

A compressão do biometano a 250 bar possibilita a logística de "Gasodutos Virtuais". Caminhões carregados com cilindros de biometano podem abastecer indústrias e postos em um raio de até 200 km da usina. Conforme analisado pela GNPW (2024), essa estratégia permite que a usina atenda a demanda urbana e industrial, capturando prêmios de preço que o biogás bruto para queima em caldeiras jamais alcançaria.

A monetização do biogênico, subproduto do refino, surge como uma nova fronteira de lucro. Esse gás, após purificação, pode ser utilizado na indústria de bebidas

carbonatadas ou em estufas agrícolas para acelerar o crescimento de hortaliças. O NIPE/Unicamp (2025) estima que a venda do possa cobrir até 20% dos custos operacionais da planta de purificação, tornando o processo de emissão negativa.

Conclui-se que o refino não é apenas uma limpeza química, mas uma transformação de valor. O biometano é o combustível que permite a descarbonização pesada do setor rodoviário brasileiro. Com as metas do RenovaBio, cada metro cúbico de biometano produzido gera créditos de descarbonização (CBIOs), transformando a conformidade técnica em rentabilidade direta para os acionistas das usinas.

A conformidade com as resoluções regulatórias é o que valida o biometano como um combustível comercializável. A Tabela 3 compara as propriedades físico-químicas do biogás bruto e do biometano refinado conforme as normas da ANP e a resolução 886/2022. Os estudos mostram que o refino eleva o poder calorífico do gás em quase 100%, eliminando os componentes inertes (e) que apenas aumentariam o custo de transporte e diminuiria a eficiência de queima.

**Tabela 3 - Propriedades do Biogás**

| Parâmetros | Biogás bruto | Biometano (Res. 886/22) | Impacto no Uso |
|---|---|---|---|
| Teor de Metano ($CH_4$) | 50% a 65% | Mínimo 90% | Eficiência térmica e torque |
| Dióxido de Carbono ($CO_2$) | 35% a 45% | Máximo 3% | Inércia e capacidade de compressão |
| Sulfeto de Hidrogênio $H_2$ | > 2.000 PPM | Máximo 10 mg/m³ | Corrosão severa e emissões ácidas. |
| Umidade | Saturado | Isento | Formação de gelo e obstrução de bicos |
| Índice de Wobbe | Baixo | 40,5 A 53,6 MJ/m³ | Compatibilidade com bicos injetores |

Fonte: autoria própria, 2026.

O Índice de Wobbe é o parâmetro técnico mais importante para a segurança operacional. Ele mede a capacidade de intercâmbio de energia de um combustível gasoso. Se o índice estiver fora da faixa estabelecida pela ANP, o biometano pode causar danos aos sistemas de combustão, como retrocesso de chama ou combustão incompleta. A discussão técnica sublinha que o ajuste desse índice é feito através do controle preciso do teor de nitrogênio e oxigênio residual no processo de purificação.

A corrosão provocada pelo $H_2S$ é documentada como a principal causa de falhas mecânicas em frotas convertidas. O $H_2S$ reage com a umidade residual formando ácido sulfúrico, que ataca as sedes de válvulas e pistões. A conformidade com o limite de 10 mg/m³ garante que o biometano seja um combustível mais limpo do que o próprio gás natural fóssil em muitos casos, estendendo o intervalo de manutenção dos motores agrícolas da usina (CNT, 2024; Raízen, 2022).

A ausência de umidade (ponto de orvalho) é crítica para o armazenamento em alta pressão. Durante a descompressão do gás nos cilindros dos caminhões, ocorre uma queda brusca de temperatura (efeito Joule-Thomson). Se houver umidade, haverá formação de gelo e hidratos.

que bloqueiam as linhas de combustível. O uso de secadores por refrigeração ou adsorção é, portanto, uma etapa não negociável do processo de compressão descrito pela GIZ (2025).

A análise do ciclo de vida (ACV) demonstra que o uso do biometano reduz as emissões de particulados e óxidos de nitrogênio em mais de 90% comparado ao diesel. Para o Insper Agro Global (2025), esse ganho ambiental é o que permite ao agronegócio brasileiro pleitear espaço nos mercados europeus, que exigem rastreabilidade de baixo carbono em toda a cadeia produtiva. O biometano transforma o caminhão de cana em um veículo de "emissão quase zero".

A padronização também permite a criação de um mercado secundário de reposição de peças. Com o biometano seguindo as normas da ANP, as usinas podem utilizar componentes (bicos, compressores, tanques) de prateleira desenvolvidos para o gás natural veicular (GNV). Isso reduz o custo de manutenção e a dependência de fornecedores de nicho, democratizando o acesso à tecnologia para usinas de menor porte, conforme pontuado pela Embrapa (2024).

A Tabela 4 representa a certidão de nascimento comercial do biometano. Sem o

cumprimento rigoroso desses parâmetros, o biogás permaneceria confinado às lagoas de tratamento. A conformidade técnica é o passaporte para que a usina sucroenergética deixe de ser apenas uma produtora de álcool e açúcar e se torne uma produtora de combustíveis de alta tecnologia, capazes de competir em pé de igualdade com a indústria de petróleo e gás.

O gargalo da entressafra é o maior desafio para a escala comercial do biogás. A interrupção no fornecimento de vinhaça exige estratégias de estocagem de biomassa para manter a microbiota dos reatores ativa. Os estudos indicam que a torta de filtro é o substrato ideal para essa finalidade devido à sua baixa taxa de degradação espontânea quando comparada à vinhaça.

**Tabela 4- Estratégias de Suplementação de substratos**

| Substrato | Método de Guarda | Estabilidade (3-4 meses) | Observação |
|---|---|---|---|
| **Torta de Filtro** | Pátios de pilhas seladas | Alta | Reserva energética de baixo custo |
| **Vinhaça** | Tanques de aço/ Lagoas PEAD. | Altíssima | Exige alto investimento em evaporadores |
| **Palha de Cana** | Fardos cobertos | Média | Necessita de pré-tratamento (hidrólise) |
| **Milho de Inverno** | Silos Horizontais | Altíssima | Sinergia com plantas de etanol de milho |

Fonte: autoria própria, 2026.

A concentração da vinhaça por evaporação surge como uma solução de engenharia robusta, mas de alto CAPEX. Ao reduzir o volume em até 10 vezes, a usina consegue armazenar o potencial metanogênico de meses em tanques pulmão. Na entressafra, essa vinhaça concentrada é diluída e alimentada no reator de forma controlada. A UFABC (2025) destaca que, embora caro, esse sistema garante uma produção de biogás 100% estável, essencial para contratos industriais ininterruptos.

A estocagem de torta de filtro em pilhas seladas com polímeros biodegradáveis é a estratégia de maior adoção no interior de São Paulo. A selagem impede a entrada de

oxigênio e a perda de matéria orgânica para o ar. Na entressafra, a torta é dosada nos reatores CSTR. A Cocal (2025) demonstra que essa prática permite manter a frota agrícola operando com biometano próprio durante o preparo do solo e plantio, eliminando a compra de diesel externo no período de menor receita da usina.

A codigestão com resíduos de culturas de inverno, como o sorgo biomassa ou milho, representa a fronteira da diversificação. Usinas que possuem operações de "etanol de milho" integradas conseguem manter a biodigestão ativa o ano todo sem esforço logístico adicional. A NovaCana (2023) e o BNDES (2024) apontam que essa integração multibiomassa é o modelo de negócio mais resiliente, protegendo a planta de biogás contra variações climáticas que afetam a safra de cana.

A gestão da microbiota durante a troca de substratos exige cautela. A transição da vinhaça (líquida/solúvel) para a torta ou palha (sólida/fibrosa) deve ser gradual. Conforme os estudos de Kunz et al. (2022), um choque de substrato pode desequilibrar o consórcio de microrganismos, reduzindo a produção de metano por semanas. O uso de inóculos específicos e o controle rigoroso da carga orgânica são as ferramentas recomendadas para uma transição suave entre safra e entressafra.

A digitalização do monitoramento de estoques permite uma gestão de "dieta" preditiva. Softwares de simulação conseguem calcular exatamente quanto de torta deve ser dosado para manter a produção de biometano necessária para a frota ativa. A Unifesp (2024) ressalta que essa inteligência logística é o que garante o retorno sobre o investimento, evitando que a planta de purificação opere abaixo da capacidade nominal, o que elevaria o custo por metro cúbico produzido.

O gargalo da entressafra é superável através de planejamento logístico e tecnológico. A usina do futuro não para sua produção de energia com o fim da moenda. Ela se comporta como uma central de gestão de biomassa, alternando substratos e mantendo o fluxo de biometano e créditos de carbono ativos durante os 365 dias do ano, consolidando-se como um pilar de energia firme para a matriz nacional (Empresa

de Pesquisa Energética, 2023; GNPW, 2024).

O encerramento do ciclo produtivo ocorre com o retorno do digestato ao solo. Os estudos demonstram que a biodigestão não retira os nutrientes minerais (Nitrogênio, Fósforo, Potássio) da vinhaça e da torta, apenas estabiliza a matéria orgânica. Isso transforma o efluente em um biofertilizante de alta desempenho, com menor carga poluidora e maior facilidade de absorção pelas raízes da cana.

**Tabela 5 - Comparativo entre Vinhaça In natura e Digestato**

| Componente | Vinhaça In Natura | Digestato Pós Biodigestão | Impacto Agronômico |
|---|---|---|---|
| **Potássio** | Totalmente preservado | Totalmente preservado | Substitui o cloreto de potássio importado. |
| **Nitrogênio** | Orgânico (Lenta absorção) | Amoniacal (Rápida absorção) | Reduz a necessidade de ureia sintética. |
| **pH** | Ácido (3,5 - 4,5) | Próximo ao neutro (7,0 - 8,0) | Diminui o gasto com calagem do solo. |
| **Odor e Insetos** | Alto potencial de incômodo | Redução em até 90% | Melhora o relacionamento com vizinhos (ESG). |

Fonte: autoria própria, 2026.

O uso do digestato na fertirrigação inteligente permite uma economia direta de milhões de reais por safra. Em um cenário de instabilidade nos preços globais de fertilizantes nitrogenados, ter uma fonte interna de nitrogênio amoniacal é uma vantagem estratégica. A Embrapa (2025) valida que canaviais tratados com digestato apresentam produtividade (Toneladas de Cana por Hectare - TCH) igual ou superior aos tratados com químicos, com a vantagem adicional de aumentar a matéria orgânica estável no solo.

A redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) é o impacto ambiental mais evidente. Ao capturar o metano que seria emitido em lagoas abertas e utilizá-lo como combustível, a usina reduz drasticamente sua pegada de carbono. Conforme a ONU (2021) e o CIBiogás (2025), essa tecnologia é fundamental para atingir as metas do Acordo de Paris. O biometano de vinhaça é um dos poucos combustíveis no mundo que pode apresentar pegada de carbono negativa quando integrado ao sequestro de carbono no solo.

A valorização social do biogás é frequentemente negligenciada, mas decisiva. A eliminação da mosca-dos-estábulos, que se prolifera em vinhaça crua, beneficia diretamente a pecuária vizinha. O Podcast Biogás (2025) e a Unicamp (2025) discutem

como essa melhora na qualidade de vida rural fortalece a imagem da usina junto à sociedade e aos órgãos reguladores, facilitando processos de licenciamento ambiental e obtenção de selos verdes internacionais.

A internacionalização do biometano brasileiro via certificados de origem é a perspectiva de curto prazo. Empresas multinacionais instaladas no Brasil buscam o biometano para descarbonizar suas plantas industriais. O Insper Agro Global (2025) afirma que o biometano já é comercializado com prêmios de preço significativos sobre o gás natural fóssil por empresas focadas em Net Zero. A sustentabilidade ambiental, portanto, tornou-se o principal motor da rentabilidade do setor sucroenergético.

Por fim, a transição para a "Biorrefinaria de Emissão Zero" é inevitável. Os resultados e discussões deste estudo comprovam que a integração entre biodigestão, purificação e biofertilização cria um ecossistema produtivo resiliente, lucrativo e ambientalmente correto. A usina sucroenergética deixa de ser apenas uma unidade industrial para se tornar uma central de soluções climáticas, convertendo resíduos do passado no combustível e no fertilizante do futuro (Forbes, 2025; BNDES, 2024).

## 4. CONCLUSÃO

A presente investigação permite concluir que a viabilidade do biogás na rota sucroenergética não é mais uma questão de possibilidade técnica, mas de otimização estratégica e integração de processos. A escolha do reator UASB para a vinhaça e do CSTR para a codigestão com torta de filtro demonstrou ser a arquitetura mais resiliente, garantindo eficiências de remoção de carga orgânica superiores a 80%. Este arranjo tecnológico permite que passivos ambientais críticos sejam convertidos em ativos energéticos de alto valor agregado, mitigando riscos operacionais e ambientais históricos do setor.

Os resultados evidenciam que a granulação da biomassa no sistema UASB é o fator determinante para o processamento de grandes volumes em áreas compactas. Esta característica é vital para usinas que buscam escala industrial sem comprometer o espaço físico das unidades fabris. A discussão confirmou que, ao manter a densidade biológica elevada, as usinas garantem uma produção de biogás robusta e constante, servindo como base para a subsequente purificação em biometano.

No que tange ao refino, conclui-se que a tecnologia de membranas de separação física consolidou-se como a rota preferencial para o mercado brasileiro. Sua alta seletividade na remoção de e a pegada hídrica nula alinham a produção de combustível aos mais

rigorosos padrões de ESG. A purificação para teores de metano acima de 90% transforma o biogás em um "gás de intercâmbio", apto tanto para o abastecimento de frotas pesadas quanto para a injeção na rede nacional de gasodutos.

A superação do gargalo da entressafra através da estocagem estratégica de torta de filtro e vinhaça concentrada é um dos achados mais significativos deste trabalho. A capacidade de operar a planta de biometano de forma linear durante os 365 dias do ano confere às usinas a previsibilidade necessária para firmar contratos de longo prazo com o setor industrial. Esta continuidade operacional é o que viabiliza o modelo de negócio de "Gasodutos Virtuais", expandindo o alcance comercial da usina para além das fronteiras do canavial.

Sob a ótica econômica, a integração do biogás ao ecossistema do RenovaBio potencializa a rentabilidade através da geração de CBIOs. A substituição do diesel por biometano não apenas reduz o custo de produção do etanol e do açúcar, mas também cria uma linha de receita baseada na descarbonização. O biometano, portanto, atua como um hedge natural contra a volatilidade dos preços internacionais do petróleo e as variações cambiais que encarecem os combustíveis fósseis.

A dimensão agronômica da pesquisa confirma que o digestato é um biofertilizante superior à vinhaça in natura. A estabilização da matéria orgânica e a mineralização do nitrogênio permitem uma fertirrigação mais eficiente, reduzindo a dependência de fertilizantes minerais importados, como o cloreto de potássio e a ureia. Este fechamento de ciclo nutricional é o pilar da economia circular, devolvendo ao solo exatamente o que foi extraído durante o crescimento da cana, de forma mais biodisponível.

Ambientalmente, a transição para o biometano representa um salto na luta contra as mudanças climáticas. A redução de mais de 90% nas emissões de GEE e particulados coloca o setor sucroenergético brasileiro na vanguarda da mobilidade sustentável global. A possibilidade de atingir uma pegada de carbono negativa, ao combinar a substituição de combustíveis fósseis com o sequestro de carbono no solo via digestato, é um diferencial competitivo único no cenário internacional.

A valorização social também emerge como um resultado direto da adoção tecnológica. A redução drástica de odores e da proliferação de insetos melhora o relacionamento das unidades produtoras com as comunidades vizinhas e o setor pecuário. Este ganho de capital social facilita o licenciamento ambiental e fortalece a licença social para operar,

elementos cada vez mais valorizados por investidores e instituições financeiras que buscam ativos sustentáveis.

A monetização do biogênico, embora ainda em estágio inicial, aponta para uma diversificação de portfólio promissora. A captura desse gás para uso industrial ou para a síntese de combustíveis eletrônicos (Fuel) poderá transformar as plantas de purificação em centros de lucro adicionais. Esta visão amplia o conceito de biorrefinaria, onde nenhum subproduto é desperdiçado, e cada molécula é valorizada ao máximo.

A padronização de peças e equipamentos, decorrente da conformidade com a ANP, reduz as barreiras de entrada para usinas de médio porte. O surgimento de um mercado secundário e de prestadores de serviço especializados em biogás fortalece a cadeia de suprimentos nacional. Isso gera empregos de alta qualificação no interior do país, promovendo um desenvolvimento regional sustentável e tecnologicamente avançado.

A sinergia entre o biometano e o etanol de milho durante a entressafra da cana consolida o Brasil como uma potência multibiomassa. Esta integração protege a produção de energia contra sazonalidades e quebras de safra específicas, garantindo a segurança energética do país. A usina deixa de ser refém do ciclo da cana para se tornar uma planta de processamento de carbono e energia de fluxo contínuo.

Os estudos validam a tese de que o biometano é o combustível de transição ideal para o transporte pesado. Enquanto a eletrificação de caminhões enfrenta desafios de autonomia e custo de baterias, o biometano oferece uma solução imediata, utilizando tecnologias de combustão interna já dominadas e infraestruturas existentes. É a rota mais rápida e barata para a descarbonização logística do agronegócio brasileiro.

A internacionalização do setor, através da exportação de certificados de biometano e da atração de investimentos verdes, é uma consequência natural da maturidade técnica alcançada. O biometano brasileiro possui um dos menores custos nivelados de energia (LCOE) do mundo, o que o torna extremamente atraente para multinacionais que possuem metas globais de Net Zero. O Brasil não exportará apenas commodities, mas também soluções de descarbonização.

Ressalta-se que a estabilidade do pH e o controle de AGVs permanecem como os pilares da saúde operacional do biodigestor. O aprendizado acumulado pelas usinas pioneiras serve de guia para a expansão do setor, minimizando curvas de aprendizado e riscos de

falha em novos projetos. A ciência aplicada à biodigestão transformou o que era um processo empírico em uma operação de engenharia química de precisão.

A integração entre produção de biometano e geração de hidrogênio verde () via reforma do metano desponta no horizonte como a próxima fronteira tecnológica. A infraestrutura de biogás atual é a fundação para a futura economia do hidrogênio no Brasil. As usinas que hoje investem em biodigestores estarão posicionadas na vanguarda da produção de combustíveis do século XXI, como o amoníaco verde e o querosene de aviação sustentável (SAF).

Em suma, a transição para a "Biorrefinaria de Emissão Zero" é um caminho sem volta e repleto de oportunidades. Este estudo demonstrou que as ferramentas tecnológicas, os marcos regulatórios e os benefícios agronômicos convergem para um cenário de crescimento acelerado. A usina sucroenergética moderna é, hoje, a maior prova de que a prosperidade econômica pode caminhar de mãos dadas com a regeneração ambiental.

Por fim, esta pesquisa conclui que o biometano é o selo de sustentabilidade que faltava para consolidar a liderança global do Brasil em bioenergia. Ao converter resíduos em combustível, fertilizante e créditos de carbono, o setor sucroenergético redefine o conceito de eficiência. O futuro do setor é gasoso, renovável e circular, garantindo que a cana-de-açúcar continue sendo o motor da matriz energética limpa do país pelas próximas décadas.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). Crédito de Descarbonização (CBIO). Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio/credito-de-descarbonizacao-cbio. Acesso em: 19 abr. 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). RenovaBio. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio. Acesso em: 19 abr. 2026.

SILVA, André Gustavo Alves. Cocal: “Temos o primeiro gasoduto isolado do mundo”. NovaCana, 12 jul. 2024. Disponível em:

https://www.novacana.com/noticias/andre-gustavo-alves-silva-cocal-temos-primeiro-gasoduto-isolado-mundo-120724. Acesso em: 19 abr. 2026.

BNDES. A hora do biometano no Brasil. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/24146/1/PRFol_216049_TD%20n.%20159_A%20hora%20do%20biometano%20no%20Brasi.pdf. Acesso em: 19 abr. 2026.

BRASIL. Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS). Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 7 jan. 2022. Disponível em: https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2022/lei-14300-6-janeiro-2022-791476-publicacaooriginal-165174-pl.html. Acesso em: 19 abr. 2026.

CÂMARA DOS DEPUTADOS. Lei nº 14.300/2022. Apresentação no evento "Marco Legal da Micro e Minigeração Distribuída", 17 maio 2023. Disponível em: https://www2.camara.leg.br/atividade-legislativa/comissoes/comissoes-permanentes/cme/apresentacoes-em-eventos/apresentacoes-de-convidados-em-2023/17-05-2023-marco-legal-da-micro-e-minigeracao-distribuida-energia-solar-e-eolica/2_ABSOLAR.pdf. Acesso em: 19 abr. 2026.

CENTRO NACIONAL DE PESQUISA EM ENERGIA E MATERIAIS (CNPEM). Vinhaça para gerar energia. Disponível em: https://cnpem.br/en/vinhaca-gerar-energia/. Acesso em: 19 abr. 2026.

CIBIOGÁS. Hidrogênio verde: Qual a perspectiva do Biogás para sua chegada ao Brasil? Disponível em: https://cibiogas.org/blog/hidrogenio-verde-qual-a-perspectiva-do-biogas-para-sua-chegada-ao-brasil/. Acesso em: 19 abr. 2026.

CIBIOGÁS. O biogás no setor sucroenergético – Benefícios e Desafios. Disponível em: https://cibiogas.org/blog/o-biogas-no-setor-sucroenergetico-beneficios-e-desafios/. Acesso em: 19 abr. 2026.

COCAL. Planta da Cocal em Narandiba/SP é premiada como a melhor durante fórum mundial do biogás. Disponível em:

https://www.cocal.com.br/noticias/biometano/planta-da-cocal-em-narandiba-spe-premiada-como-a-melhor-durante-forum-mundial-do-biogas/. Acesso em: 19 abr. 2026.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). *Em visita técnica à Cocal, CNT destaca potencial do biometano para reduzir emissões no transporte*. Disponível em: https://cnt.org.br/agencia-cnt/em-visita-tcnica--cocal-cnt-destaca-potencial-dobiometano-para-reduzir-emisses-no-transporte. Acesso em: 19 abr. 2026.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Avaliação da sustentabilidade de alternativas da utilização da vinhaça. 2025. Disponível em: https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1177816/1/AP-Avaliacao-sustentabilidede-2025.pdf. Acesso em: 19 abr. 2026.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Biorrefinarias. 2013. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1007156/1/Ed44082013.pdf. Acesso em: 19 abr. 2026.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Estudos recentes e perspectivas da viabilidade técnico-econômica da produção de biodiesel. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/92379/1/Alice-DocumentoCusto-da-producao-de-Biodiesel-V4-final.pdf. Acesso em: 19 abr. 2026.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Gerenciamento, tratamento e disposição de resíduos na cana-de-açúcar. 2024. Disponível em: https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1167011/1/PL-Gerenciamento-tratamento-2024.pdf. Acesso em: 19 abr. 2026.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Oportunidades e desafios para o desenvolvimento do biogás na agricultura familiar do Brasil. Disponível em:

https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1156723/1/Oportunidades-edesafios.pdf. Acesso em: 19 abr. 2026.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Investimentos e Custos Operacionais e de Manutenção no Setor de Biocombustíveis: 2024 - 2033. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-343/topico-699/NT-EPE-DPG-SDB-2023-05_Investimentos_Custos_O_e_M_Bios_2024-2033.pdf. Acesso em: 19 abr. 2026.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Investimentos e Custos Operacionais e de Manutenção no Setor de Biocombustíveis: 2025-2034. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-343/topico-729/NT-EPE-DPG-SDB-2023-07_Investimentos_Custos_O_e_M_Bios_2025-2034.pdf. Acesso em: 19 abr. 2026.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Panorama de Biometano. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-781/Panorama%20de%20Biometano.pdf. Acesso em: 19 abr. 2026.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Roadmap tecnológico de HIDROGÊNIO. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-899/Roadmap%20%20-%20EPE-PTI%20-%20Tecnologia%20(VF).pdf. Acesso em: 19 abr. 2026.

ENGIE. Geo Day 2022 e o mercado brasileiro de biogás. Disponível em: https://www.alemdaenergia.engie.com.br/geo-day-2022-e-o-mercado-brasileiro-de-biogas/. Acesso em: 19 abr. 2026.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE (FEAM). Produção de biogás a partir da vinhaça gerada em pequenas fábricas de aguardente e cachaça artesanal no estado de Minas Gerais. Disponível em: https://feam.br/documents/117662/6981450/Bolsista_-_Carla_Vieira_Serufo_-

_DIPA_-_GPROd_-__RELATORIO_FAPEMIG_BIOGAS_versao_final_CARLA_SERUFO/fb0341d7-b0bf-807e-039d-308ca44bf4b1?version=1.0&t=1723497734478. Acesso em: 19 abr. 2026.

FUESS, L. T.; GARCIA, M. L. Vinhaça: características, impactos ambientais e alternativas de uso. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 19, n. 2, p. 115-126, 2014.

G4 EDUCAÇÃO. Raízen Estudo de Caso: Líder Mundial em Biocombustíveis. Disponível em: https://g4educacao.com/blog/estudo-de-caso-raizen. Acesso em: 19 abr. 2026.

GEO BIOGAS & CARBON. Raízen Geo Biogás. Disponível em: https://www.geobiogas.tech/en/plantas/raizen-geo-biogas. Acesso em: 19 abr. 2026.

GERARDI, M. H. The microbiology of anaerobic digesters. Hoboken: John Wiley & Sons, 2003.

GNPW GROUP. Um ano do Marco Legal da Geração Distribuída: o que mudou?Disponível em: https://www.gnpw.com.br/geracao-distribuida/um-ano-do-marco-legal-da-geracao-distribuida-o-que-mudou/. Acesso em: 19 abr. 2026.

GNPW. Biogas and biomethane represent a great energy potential for Brazilian agribusiness. [s. l.], 2024. Disponível em: https://www.gnpw.com.br/en/biogas/biogas-and-biomethane-represent-a-great-energy-potential-for-brazilian-agribusiness/. Acesso em: 19 set. 2025.

GODOI, L. A. et al. Seasonal variations in vinasse composition and its effects on anaerobic digestion. Bioresource Technology, v. 289, p. 121-132, 2019.

GOVERNO FEDERAL. Proposta de Manual de Análise Custo-Benefício para Investimentos em Expansão da Geração de Energia Elétrica. Disponível em: https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/choque-de-investimento-privado/avaliacao-socioeconomica-de-custo-beneficio-1/acb-energia-subsidios-para-o-manual-setorial.pdf. Acesso em: 19 abr. 2026.

INSPER AGRO GLOBAL. Crédito de descarbonização (CBIO). Disponível em: https://agro.insper.edu.br/glossario/credito-de-descarbonizacao-cbio. Acesso em: 19 abr. 2026.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). World Energy Outlook 2018. Paris: IEA, 2018.

JORNAL DA UNICAMP. Vinasse and cattle waste produce biogas. Jornal da Unicamp, Campinas, 29 jul. 2025. Disponível em: https://jornal.unicamp.br/en/edicao/728/vinhaca-e-dejetos-de-gado-rendem-biogas/. Acesso em: 19 set. 2025.

KIANI, M. et al. Environmental risks of vinasse disposal in sugarcane industries. Journal of Environmental Management, v. 312, p. 114-122, 2022.

KIEPPER, Leonardo Silveira. Fatores de influência sobre o desempenho de biodigestor aplicado à pecuária bovina: eficiência energética como diretriz de projeto. 2023. Dissertação (Mestrado) – Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, 2023.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. Biodigestores: fundamentos e aplicações. Concórdia: Embrapa, 2019.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. Digestão anaeróbia de resíduos agropecuários: fundamentos e aplicações. Concórdia: Embrapa, 2022.

MARQUES, M. B. Desempenho Ambiental De Unidade Industrial Do Setor Sucroalcooleiro: Proposta De Tratamento Anaeróbio De Digestão Da Vinhaça. Disponível em: https://bdta.abcd.usp.br/directbitstream/117a0eed-99fa-48da-94ea-92827351a044/Marques16.pdf. Acesso em: 19 abr. 2026.

MAYER BROWN. Informativo do Setor Elétrico - Lei nº 14.300 de 2022 - Marco Legal da GD. Disponível em: https://www.mayerbrown.com/-/media/files/perspectives-events/publications/2022/01/informativo-do-setor-eletrico--lei-n-14300-de-2022--marco-legal-da-gd.pdf. Acesso em: 19 abr. 2026.

MENEZES, Guilherme Silva. Estudo de potenciais aplicações relatadas de biorefinarias como alternativa sustentável para geração de energia e bioprodutos. Disponível em: https://bdta.abcd.usp.br/directbitstream/7f120613-dcdf-4f65-ae4c-2a686fca5dad/Guilherme%20menezes.pdf. Acesso em: 19 abr. 2026.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Biogás e suas contribuições para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Brasília, DF: Embrapa, 2022. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1149613/1/DOC-49-final-1.pdf. Acesso em: 19 abr. 2026.

MUDANÇAS CLIMÁTICAS CURITIBA. A Revolução das Biorrefinarias. Disponível em: https://paineldemudancasclimaticas.org.br/noticia/a-revolucao-das-biorrefinarias. Acesso em: 19 abr. 2026.

NEVES, Marcos Fava. Geo Biogas & Tech: leading sustainable energy transition in Brazil through biogas business. FGV EAESP, [2024?]. Disponível em: https://eaesp.fgv.br/sites/eaesp.fgv.br/files/u949/marcosfavaneves_geo_biogas_tech_leading_sustainable_energy_transition_in_brazil_through_biogas_business.pdf. Acesso em: 19 abr. 2026.

NOVACANA. Biogás na indústria canavieira: da vinhaça à energia renovável. 2025. Disponível em: https://revistarpanews.com.br/opiniao-biogas-na-industria-canavieira-da-vinhaca-a-energia-renovavel/. Acesso em: 19 abr. 2026.

NOVACANA. Biorrefinarias integradas permitem que usinas de cana usem o bagaço ao máximo. 1º dez. 2023. Disponível em: https://www.novacana.com/noticias/biorrefinarias-integradas-permitem-usinas-cana-usem-bagaco-maximo-011223. Acesso em: 19 abr. 2026.

NOVACANA. Planta de biometano no Paraná recebe R$ 45 milhões em investimentos e amplia capacidade. 30 ago. 2024. Disponível em: https://www.novacana.com/noticias/planta-biometano-parana-recebe-r-45-milhoes-investimentos-amplia-capacidade-300824. Acesso em: 19 abr. 2026.

NOVACANA. Raízen desacelera investimentos em biogás para reavaliar estratégia no setor. 16 ago. 2023. Disponível em: https://www.novacana.com/noticias/raizen-desacelera-investimentos-biogas-reavaliar-estrategia-setor-160823. Acesso em: 19 abr. 2026.

NÚCLEO INTERDISCIPLINAR DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO (NIPE). Revisão do estado da arte da produção de biogás a partir de vinhaça, torta de filtro, bagaço e palha de cana de açúcar. Disponível em: https://nipe.unicamp.br/revisao-do-estado-da-arte-da-producao-de-biogas-a-partir-de-vinhaca-torta-de-filtro-bagaco-e-palha-de-cana-de-acucar/. Acesso em: 19 abr. 2026.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). GEF Biogás Brasil e parceiros apresentam oportunidades do biogás no setor sucroenergético. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/139733-gef-biog%C3%A1s-brasil-e-parceiros-apresentam-oportunidades-do-biog%C3%A1s-no-setor-sucroenerg%C3%A9tico. Acesso em: 19 abr. 2026.

PORTAL DO BIOGÁS. Quanto Custa Uma Usina De Biogás. Disponível em: https://portaldobiogas.com/quanto-custa-uma-usina-de-biogas/. Acesso em: 19 abr. 2026.

PORTAL ENERGIA E BIOGÁS. Digestão anaeróbia - rota seca ou rota úmida. Disponível em: https://biogaseenergia.com.br/digestao-anaerobia-rota-seca-ou-rota-umida. Acesso em: 19 abr. 2026.

PORTAL ENERGIA E BIOGÁS. O que é o crédito de descarbonização CBIO? Disponível em: https://biogaseenergia.com.br/o-que-e-o-credito-de-descarbonizacao-cbio. Acesso em: 19 abr. 2026.

PORTAL ENERGIA E BIOGÁS. Segmentos - Mercado e Aplicações. Disponível em: https://biogaseenergia.com.br/segmento/mercado-e-aplicacoes. Acesso em: 19 abr. 2026.

PORTAL SOLAR. Lei 14300: mudanças com o Marco Legal da Geração Distribuída. Disponível em: https://www.portalsolar.com.br/lei-14300. Acesso em: 19 abr. 2026.

POVEDA, Manuel Moreno Ruiz. Análise Econômica E Ambiental Do Processamento Da Vinhaça Com Sproveitamento Energético. 2015. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/106/106131/tde-25032015-161117/publico/DissertacaoManuelMorenoVersaoCorrigida.pdf. Acesso em: 19 abr. 2026.

RAÍZEN. Relatório Anual De Sustentabilidade 2021-2022. Disponível em: https://s3-sa-east-1.amazonaws.com/raizen-prod/items-files/item-1039-relatorioanual-2122-pt.pdf. Acesso em: 19 abr. 2026

RAÍZEN. RELATÓRIO INTEGRADO 2024-2025. Disponível em: https://www.raizen.com.br/relatorio-anual-2425-pt. Acesso em: 19 abr. 2026.

REDAÇÃO EXAME. A estratégia de R$ 41 milhões da Geo bio gas&carbon para aumentar a produção de biometano no Paraná. Exame, 2025. Disponível em: https://exame.com/agro/a-estrategia-de-r-41-milhoes-da-geo-bio-gascarbon-para-aumentar-a-producao-de-biometano-no-parana/. Acesso em: 19 abr. 2026.

REDAÇÃO FORBES. Nova Planta de Biometano da Cocal Impulsiona sua Ambição de Ser a 1ª Usina Net Zero do Setor. Forbes Brasil, set. 2025. Disponível em: https://forbes.com.br/forbesagro/2025/09/nova-planta-de-biometano-da-cocal-impulsiona-sua-ambicao-de-ser-a-1a-usina-net-zero-do-setor/. Acesso em: 19 abr. 2026.

REVISTA EDUCAÇÃO AMBIENTAL EM AÇÃO. RESÍDUO DA AGROINDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA – VINHAÇA. Disponível em: https://www.revistaea.org/artigo.php?idartigo=2548. Acesso em: 19 abr. 2026.

SANTANA JÚNIOR, A. E. Vinhaça Em Reatores Anaeróbios Horizontais De Alta Taxa, Em Série: Efeito Do Aumento Gradual Das Cargas Orgânicas Volumétricas. 2018. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2018. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/11449/158301/5/santana_junior_ae_dr_jabo.pdf. Acesso em: 19 abr. 2026.

SERUFO, Carla Vieira. Produção de biogás a partir da vinhaça gerada em pequenas fábricas de aguardente e cachaça artesanal no estado de Minas Gerais. [Belo Horizonte]: FEAM, 2024. Disponível em: https://feam.br/documents/117662/6981450/Bolsista_-_Carla_Vieira_Serufo_-_DIPA_-_GPROd_-__RELATORIO_FAPEMIG_BIOGAS_versao_final_CARLA_SERUFO/fb0341d7-b0bf-807e-039d-308ca44bf4b1?version=1.0&t=1723497734478. Acesso em: 19 abr. 2026.

SILVA, G. B. M Biogás de resíduos agroindustriais: panorama e perspectivas Rio de Janeiro: BNDES, 2024. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/15384/1/BS47__Biogas__FECHADO.pdf. Acesso em: 19 abr. 2026.

SILVA, Digestão anaeróbia para produção de energia renovável. 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/352800162_Digestao_anaerobia_para_producao_de_energia_renovavel. Acesso em: 19 abr. 2026.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO (SBPE). Uma Breve Revisão Sobre A Indústria Sucroalcooleira No Brasil Com Enfoque No Potencial De Geração De Energia. Disponível em: https://sbpe.org.br/index.php/rbe/article/download/477/420/. Acesso em: 19 abr. 2026.

TECNOLOGIAS DE DIGESTÃO ANAERÓBIA COM RELEVÂNCIA PARA O BRASIL: substratos, digestores e uso de biogás. GIZ, 2025. Disponível em: https://www.giz.de/en/downloads/probiogas-tecnologias-biogas.pdf. Acesso em: 19 abr. 2026.

UNIVERSIDADE FEDERAL DA INTEGRAÇÃO LATINO-AMERICANA (UNILA). Análise De Aspectos Políticos E Regulatórios Do Biogás No Brasil E Seu Crescimento Com O Aproveitamento Energético Dos Resíduos. Disponível em: https://dspace.unila.edu.br/bitstreams/b9e61672-a5e4-41f2-9958170cec678bf9/download. Acesso em: 19 abr. 2026.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO PAULO (UNIFESP). Simulação do tratamento anaeróbio de vinhaça gerada a partir do processo de produção de etanol. Disponível em: https://repositorio.unifesp.br/bitstreams/8ebf6a5a-631c-44db-8d5b-f1a121d56feb/download. Acesso em: 19 abr. 2026.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ABC (UFABC). Otimizando o Manejo da Vinhaça: Concentrar a Vinhaça ou Fertirrigar. Disponível em: https://www.ufabc.edu.br/divulgacao-cientifica/pesquisabc/edicao-n-39-agostode-2025/otimizando-o-manejo-da-vinhaca-concentrar-a-vinhaca-ou-fertirrigar. Acesso em: 19 abr. 2026.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO TRIÂNGULO MINEIRO (UFTM). Simulador do reator UASB para conversão de vinhaça em biogás. Disponível em: https://bdtd.uftm.edu.br/handle/tede/186. Acesso em: 19 abr. 2026.

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA (UFPB). Da Vinhaça Ao Biogás: Avaliação Do Seu Potencial Energético Em Três Níveis De Diluição. Disponível em: https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/36190. Acesso em: 19 abr. 2026.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS (UFMG). Biodigestão anaeróbia em duplo estágio do bagaço de cana-de-açúcar para obtenção de biogás. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/ENGD-8KDQ52. Acesso em: 19 abr. 2026.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS (UNICAMP). Tecnologia da Digestão Anaeróbia da Vinhaça e Desenvolvimento Sustentável. Disponível em: https://repositorio.unicamp.br/Busca/Download?codigoArquivo=471281. Acesso em: 19 abr. 2026.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO (USP). Digestão anaeróbia de bagaço de cana-de-açúcar em batelada. 2021. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-07102021-154857/publico/IsabellaGrandoZamboniCorr21.pdf. Acesso em: 19 abr. 2026.

ZANON, Isabela. Uma Breve Revisão Sobre A Indústria Sucroalcooleira No Brasil Com Enfoque No Potencial De Geração De Energia. Disponível em: https://sbpe.org.br/index.php/rbe/article/download/477/420/. Acesso em: 19 abr. 2026.