

ROTAS TECNOLÓGICAS PARA PRODUÇÃO DE BIOMETANO: UMA REVISÃO NARRATIVA INTEGRADA ENTRE DIGESTÃO ANAERÓBIA E UPGRADING

Mamiule de Siqueira¹, Frederico Silva Moreira¹

¹Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande-MS, Brasil
(m.siqueira@ufms.br)

Resumo: A produção de biometano integra digestão anaeróbia e *upgrading*, etapas frequentemente analisadas de forma dissociada. Este estudo avalia a influência da codigestão e do pré-tratamento na qualidade do biogás e na viabilidade das tecnologias de purificação. A revisão narrativa indica que variáveis como teor de metano, vazão e presença de contaminantes condicionam o desempenho técnico e econômico do processo, evidenciando a necessidade de uma abordagem integrada

Palavras-chave: biogás; biometano; *upgrading*; codigestão; viabilidade

INTRODUÇÃO

O aumento das emissões de gases de efeito estufa, em especial do metano (CH₄), apresenta-se como um dos principais desafios ambientais contemporâneos, em função de seu elevado potencial de aquecimento global em comparação ao dióxido de carbono. Aliado a isso, observa-se uma expansão contínua da geração de resíduos orgânicos em escala global, impulsionada pelo crescimento populacional, urbanização e intensificação das atividades agroindustriais. A gestão inadequada desses resíduos constitui uma fonte relevante de emissões de metano (Hosseini *et al.*, 2024).

A valorização energética de resíduos por meio da digestão anaeróbia apresenta-se como uma estratégia eficaz para mitigação de emissões, permitindo a conversão da matéria orgânica em biogás rico em metano, ou seja, combustível de alto poder calorífico (Hao *et al.*, 2020; Kasinath *et al.*, 2021; Cucina *et al.*, 2021).

O biogás, gerado a partir da digestão anaeróbia de resíduos orgânicos, constitui a base para a produção de biometano, que envolve sua purificação por meio do processo de *upgrading*, no qual são removidos dióxido de carbono e contaminantes, elevando o teor de metano a níveis compatíveis com aplicações energéticas mais nobres (Hosseini; Denayer, 2022; Cristiani *et al.*, 2023; Di Profio *et al.*, 2023).

Na etapa de purificação, diferentes tecnologias têm sido desenvolvidas e aplicadas, como adsorção por variação de pressão (PSA), separação por membranas, processos de *scrubbing* e técnicas criogênicas, cada uma com diferentes níveis de eficiência, consumo energético e custo operacional

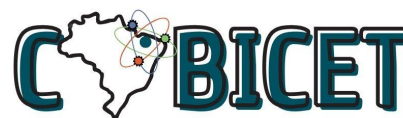
(Hosseini *et al.*, 2023; Aworanti *et al.*, 2023; Rodero *et al.*, 2024; Biswas *et al.*, 2025).

Diversas estratégias têm sido propostas para otimizar a etapa biológica, destacando-se a codigestão de diferentes substratos e a aplicação de pré-tratamentos físicos, químicos e térmicos, com o objetivo de aumentar a biodegradabilidade da matéria orgânica e maximizar a produção de metano, e assim, minimizar processos e custos de separação das moléculas existentes no gás resultante (Hao *et al.*, 2020; Akhilar *et al.*, 2021; Kalita *et al.*, 2023; Mrosso *et al.*, 2023).

Apesar dos avanços tecnológicos, a literatura científica apresenta uma abordagem predominantemente fragmentada na análise das etapas envolvidas na produção de biometano. Estudos voltados à digestão anaeróbia concentram-se principalmente na maximização da produção de metano, avaliando o efeito de diferentes substratos, estratégias de codigestão e pré-tratamentos sobre o rendimento e a estabilidade do processo (Hao *et al.*, 2020; Pasciucco *et al.*, 2023; Ibro *et al.*, 2024; Ayantokun *et al.*, 2026).

Por outro lado, pesquisas sobre *upgrading* tendem a focar na eficiência das tecnologias de purificação, no consumo energético e nos custos associados, frequentemente desconsiderando a variabilidade e a qualidade do biogás (Cristiani *et al.*, 2023; Di Profio *et al.*, 2023; Hosseini *et al.*, 2023; Biswas *et al.*, 2025).

As análises técnico-econômicas disponíveis na literatura avaliam, em sua maioria, tecnologias de forma isolada, sem considerar de maneira sistêmica a influência das condições operacionais da digestão sobre o desempenho dos sistemas de purificação, o



que limita a compreensão sistêmica da cadeia de produção de biometano (Rodero *et al.*, 2024; Biswas *et al.*, 2025; Tin *et al.*, 2026). Soma-se a isso a predominância de estudos conduzidos em contextos com maior maturidade tecnológica e infraestrutura consolidada, o que pode restringir a aplicabilidade direta dos resultados em cenários de países emergentes, caracterizados por maior variabilidade de resíduos e limitações operacionais (Cordova *et al.*, 2026; Sahota *et al.*, 2026; Dimande *et al.*, 2026).

Dessa forma, identifica-se uma lacuna relevante na literatura relacionada à ausência de abordagens integradas que considerem, de forma sistêmica, a relação entre a etapa de digestão anaeróbia e o desempenho das tecnologias de *upgrading*. Em particular, há escassez de estudos que analisem como estratégias de otimização da digestão, como codigestão e pré-tratamento, influenciam a qualidade do biogás produzido, incluindo teor de metano, presença de contaminantes e estabilidade operacional, e, consequentemente, condicionam a eficiência, o consumo energético, o *methane slip* e a viabilidade econômica dos processos de purificação (Hosseini; Denayer, 2022; Aworanti *et al.*, 2023; Rodero *et al.*, 2024).

Diante desse contexto, o presente estudo tem como objetivo analisar a influência das estratégias de pré-tratamento e codigestão na qualidade do biogás e sua implicação no desempenho técnico e na viabilidade das tecnologias de *upgrading* para produção de biometano.

MATERIAL E MÉTODOS

A presente pesquisa caracteriza-se como uma revisão narrativa estruturada, de natureza qualitativa e analítica, desenvolvida a partir de levantamento bibliográfico realizado em bases de dados científicas nacionais e internacionais, com o objetivo de examinar comparativamente as condições de viabilidade da produção de biometano a partir da integração entre as etapas de digestão anaeróbia e *upgrading* do biogás, considerando a influência das estratégias de pré-tratamento e codigestão sobre a qualidade do biogás.

As buscas foram realizadas nas bases Scopus, *Web of Science*, *ScienceDirect* e *Google Scholar*, utilizando descritores em língua inglesa combinados por operadores booleanos, com recorte temporal de 2020 a 2026, de modo a abranger o desenvolvimento recente das tecnologias de digestão anaeróbia e purificação de biogás.

Foram empregados descritores relacionados ao objeto de estudo, com destaque para combinações como: ("*anaerobic digestion*" AND "*codigestion*" AND "*methane yield*"), ("*biogas upgrading*" AND "*biomethane*" AND "*purification technologies*"),

("pretreatment" AND "*anaerobic digestion*" AND "*biogas production*") e ("*biomethane*" AND "*techno-economic analysis*" AND "*upgrading*"), elaboradas de modo a contemplar as dimensões técnica, econômica e operacional do problema investigado.

Foram incluídos estudos que abordassem aspectos relacionados à produção de biogás por digestão anaeróbia, estratégias de pré-tratamento e codigestão, composição e qualidade do biogás, tecnologias de *upgrading* e análise de viabilidade técnico-econômica da produção de biometano, com ênfase em estudos experimentais, modelagens, análises técnico-econômicas e revisões especializadas.

Foram excluídos estudos que apresentassem foco exclusivo em geração elétrica a partir de biogás sem análise de purificação, textos sem acesso ao conteúdo completo, publicações não revisadas por pares, e trabalhos cujo foco recaísse sobre processos de produção de hidrogênio, gaseificação ou outras rotas termoquímicas não relacionadas à digestão anaeróbia.

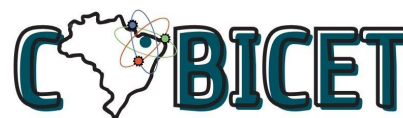
Os estudos foram selecionados por meio de triagem baseada em título, resumo e leitura completa, considerando critérios como aderência ao tema, relevância metodológica e contribuição para a análise multidimensional. Aproximadamente 30 estudos, provenientes dos dois conjuntos bibliográficos, foram analisados e subsidiaram a construção da análise comparativa apresentada neste artigo.

Após a etapa de seleção, os estudos foram organizados em categorias analíticas correspondentes a estratégias de otimização da digestão anaeróbia (codigestão e pré-tratamento), considerando a produção e a qualidade do biogás (rendimento, composição e estabilidade) e tecnologias de *upgrading* (PSA, membranas, *scrubbing* e processos criogênicos), considerando o desempenho e a viabilidade (eficiência, *methane slip*, consumo energético e custos).

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O biogás é composto principalmente por metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂), além de contaminantes como sulfeto de hidrogênio (H₂S), vapor d'água, amônia e compostos orgânicos voláteis, cuja presença varia conforme o tipo de resíduo e as condições operacionais do processo (Hagos *et al.*, 2026). Em sistemas de digestão anaeróbia, a composição do gás depende diretamente das características do substrato, da eficiência microbiológica e da estabilidade do processo (Cucina *et al.*, 2021; Kasinath *et al.*, 2021).

A produção de biogás é diretamente influenciada pela composição dos resíduos, relação C/N, teor de



umidade e presença de compostos potencialmente inibidores. Estudos experimentais demonstram que a codigestão, que consiste na combinação de diferentes substratos orgânicos em um mesmo processo de digestão anaeróbia, pode aumentar significativamente o rendimento de metano ao promover sinergia entre substratos e melhorar o equilíbrio nutricional do sistema (Hao *et al.*, 2020; Kasinath *et al.*, 2021; Cucina *et al.*, 2021; Mrosso *et al.*, 2023; Kalita *et al.*, 2023).

Apesar disso, a introdução de determinados substratos, especialmente ricos em lipídios ou enxofre, pode elevar a carga de contaminantes e afetar a estabilidade do processo, evidenciando a necessidade de análise concomitante entre produção e composição do gás (Ibro *et al.*, 2024; Pasciucco *et al.*, 2023).

Para fins de valorização energética, quatro variáveis são determinantes: vazão de biogás, concentração de metano, presença de contaminantes e estabilidade temporal da produção. A vazão de biogás define a escala do projeto, influenciando o dimensionamento dos sistemas de digestão e purificação, além da viabilidade econômica das tecnologias empregadas (Aworanti *et al.*, 2023; Rodero *et al.*, 2024). O teor de metano condiciona diretamente o potencial energético do biogás e a eficiência das etapas de separação de CO₂, sendo um parâmetro central na escolha das tecnologias de upgrading (Hosseini *et al.*, 2023; Biswas *et al.*, 2025).

A estabilidade temporal da produção é outro fator crítico, pois variações na vazão e na composição do biogás afetam o desempenho operacional dos sistemas de purificação, especialmente em tecnologias sensíveis como PSA e membranas (Di Profio *et al.*, 2023; Cristiani *et al.*, 2023).

Já a presença de contaminantes, como H₂S, umidade e siloxanos, amplia a necessidade de etapas adicionais de tratamento, aumentando custos operacionais e podendo comprometer a integridade dos equipamentos (Hosseini; Denayer, 2022).

Em sistemas de aterro sanitário, a geração de biogás apresenta elevada variabilidade temporal, sendo influenciada pela idade da massa aterrada, teor de umidade, temperatura e eficiência do sistema de coleta. A literatura indica que a produção de metano tende a aumentar na fase metanogênica, mas a eficiência de captura e a qualidade do gás podem variar significativamente, impactando a disponibilidade real de gás para aproveitamento energético (Sahota *et al.*, 2026).

A etapa de *upgrading* do biogás consiste na remoção de dióxido de carbono (CO₂) e de contaminantes, com o objetivo de elevar a concentração de metano a níveis superiores a 95%, compatíveis com aplicações

como injeção em rede de gás natural, uso veicular ou substituição de combustíveis fósseis em processos industriais.

Diferentemente da digestão anaeróbia, cuja variabilidade é intrínseca ao processo biológico, o *upgrading* caracteriza-se como uma etapa físico-química controlada, cujo desempenho depende diretamente das condições de entrada do biogás (Hosseini; Denayer, 2022; Cristiani *et al.*, 2023).

Diversas tecnologias têm sido desenvolvidas para a purificação do biogás, destacando-se os processos de adsorção por variação de pressão (PSA), separação por membranas, *scrubbing* (absorção física ou química) e processos criogênicos. Cada uma dessas rotas apresenta diferentes níveis de eficiência, consumo energético, sensibilidade à composição do gás e custos operacionais, sendo a escolha tecnológica fortemente condicionada às características do biogás (Di Profio *et al.*, 2023; Aworanti *et al.*, 2023; Rodero *et al.*, 2024).

A tecnologia PSA baseia-se na absorção seletiva de CO₂ em materiais sólidos sob alta pressão, permitindo a obtenção de biometano com elevada pureza. Trata-se de um processo amplamente difundido, com relativa robustez operacional, porém sujeito a perdas de metano associadas às etapas de regeneração dos adsorventes, fenômeno conhecido como *methane slip*, que impacta negativamente a eficiência energética e a viabilidade econômica do sistema. Além disso, o desempenho do PSA é sensível à presença de contaminantes e à variabilidade da composição do biogás, exigindo etapas prévias de tratamento (Hosseini *et al.*, 2023; Biswas *et al.*, 2025).

Os sistemas baseados em membranas utilizam diferenças de permeabilidade entre gases para promover a separação de CO₂ e CH₄, sendo caracterizados por elevada modularidade e flexibilidade operacional. No entanto, sua eficiência depende da composição do gás de entrada, especialmente da concentração inicial de metano e da presença de contaminantes, que podem reduzir a seletividade e comprometer a vida útil das membranas (Di Profio *et al.*, 2023; Cristiani *et al.*, 2023).

Os processos de *scrubbing*, baseados na absorção de CO₂ em água (*water scrubbing*) ou soluções químicas, apresentam elevada eficiência de remoção e maior tolerância a variações na composição do biogás. Contudo, tais sistemas demandam consumo significativo de energia e, no caso de soluções químicas, podem implicar custos adicionais relacionados ao uso e regeneração de reagentes (Aworanti *et al.*, 2023; Rodero *et al.*, 2024).

Os processos criogênicos baseiam-se na liquefação seletiva dos componentes do biogás em baixas temperaturas, permitindo a obtenção de biometano de alta pureza e potencialmente na forma líquida. Apesar de sua elevada eficiência, essa tecnologia apresenta alto custo de capital (CAPEX) e elevado consumo energético, sendo mais adequada para projetos de maior escala e com biogás de composição relativamente estável (Biswas *et al.*, 2025).

Independentemente da tecnologia empregada, o desempenho do *upgrading* é condicionado por parâmetros como eficiência de separação, consumo energético e perdas de metano (*methane slip*), sendo este último um fator crítico tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental. Perdas de metano representam não apenas redução da eficiência do sistema, mas também emissões de um gás com elevado potencial de aquecimento global, o que compromete o balanço ambiental da produção de biometano (Hosseini; Denayer, 2022; Aworanti *et al.*, 2023).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da síntese da literatura revisada, propõe-se um *framework* conceitual que integra as etapas de digestão anaeróbia e *upgrading*, destacando a qualidade do biogás como variável de conexão entre o processo biológico e o desempenho das tecnologias de purificação, demonstrado na Figura 1.

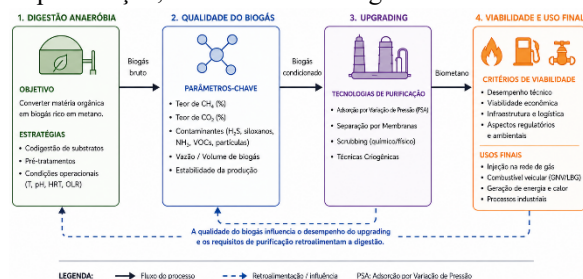


Figura 1. Framework conceitual da produção de biometano.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A escolha da rota de purificação do biogás não deve ser tratada como uma solução padronizada, mas como uma alternativa tecnológica condicionada por escala, qualidade do gás de entrada, finalidade do biometano, disponibilidade de infraestrutura e exigências regulatórias. A literatura comparativa indica que tecnologias como separação por membranas, *water scrubbing*, *amine scrubbing* e PSA podem ser tecnicamente viáveis, mas sua vantagem relativa depende de condições específicas do projeto.

A separação por membranas tende a apresentar vantagem relativa quando se busca modularidade, menor complexidade de instalação e adaptação a diferentes escalas. Essa interpretação é coerente com

estudos recentes que apontam avanços relevantes em materiais e configurações de membranas, reduzindo perdas de metano e ampliando sua competitividade técnica.

No entanto, essa superioridade é condicional, se o biogás possuir carga elevada de contaminantes, umidade ou instabilidade de composição, a tecnologia pode demandar pré-tratamento rigoroso e múltiplos estágios, elevando custos e consumo energético (Hosseini *et al.*, 2023; Rodero *et al.*, 2024).

O PSA permanece como rota madura e robusta, especialmente para projetos com vazão relativamente estável e controle adequado de contaminantes. Sua limitação principal está associada ao *methane slip* e à sensibilidade dos adsorventes a impurezas, o que exige remoção prévia de H₂S, umidade e partículas. Assim, sua competitividade depende menos da pureza final isolada e mais da regularidade operacional do sistema (Hosseini; Denayer, 2022; Aworanti *et al.*, 2023).

O *water scrubbing* caracteriza-se pela robustez e simplicidade operacional, sendo particularmente interessante em contextos nos quais se busca uma tecnologia consolidada e relativamente tolerante a variações de composição do gás. Entretanto, sua aplicação pode ser limitada pela disponibilidade de água, necessidade de tratamento do efluente e exigências ambientais locais.

Já o *amine scrubbing* tende a ser tecnicamente vantajoso quando se exige elevada pureza e baixo *methane slip*, mas apresenta maior complexidade operacional e dependência de insumos, regeneração de solvente e disponibilidade de calor (Hosseini; Denayer, 2022; Aworanti *et al.*, 2023).

A rota criogênica apresenta elevado potencial técnico, especialmente quando há interesse em liquefação do biometano ou recuperação de CO₂ de alta pureza. Contudo, seu maior CAPEX, maior consumo energético e maior complexidade operacional restringe sua adequação a projetos de maior escala, com gás de entrada mais estável e mercados capazes de absorver produtos de maior valor agregado (Hosseini; Denayer, 2022; Aworanti *et al.*, 2023).

Com o objetivo de sistematizar as diferenças entre as principais tecnologias de purificação do biogás, apresenta-se, na Tabela 1, uma matriz comparativa construída a partir da síntese da literatura revisada. A matriz organiza as rotas de *upgrading* segundo critérios técnicos e operacionais relevantes, incluindo eficiência de purificação, *methane slip*, consumo energético, custo de investimento, complexidade operacional, escala de aplicação e exigência de tratamento prévio.

Tabela 1. Matriz comparativa das principais rotas de upgrading de biogás.

Critério	PSA	Membranas	Water scrubbing	Amine scrubbing	Criogênico
Eficiência de purificação	Alta, mas dependente da qualidade do gás e adsorvente	Alta, especialmente em múltiplos estágios	Alta e com tecnologia consolidada	Muito alta, com elevada pureza final	Muito alta
Methane slip	Pode ser relevante, especialmente na regeneração	Pode ser baixo em sistemas modernos de múltiplos estágios	Geralmente moderado	Baixo	Baixo, mas dependente do arranjo
Consumo energético	Moderado, associado à compressão e ciclos de adsorção	Moderado, associado à compressão	Moderado, associado à compressão e circulação de água	Menor eletricidade, mas pode demandar calor para regeneração	Alto, devido à refrigeração
Custo de investimento	Médio	Médio a competitivo em baixa/média escala	Médio	Médio a alto	Alto
Complexidade operacional	Média	Média	Baixa a média	Média a alta	Alta
Escala mínima	Melhor em média escala	Flexível; boa modularidade	Média escala	Média a grande escala	Grande escala
Exigência de tratamento prévio	Alta para H ₂ S, umidade e partículas	Alta para H ₂ S, umidade e contaminantes que afetam membranas	Moderada; H ₂ S pode exigir remoção adicional	Alta, sobretudo para proteção do solvente	Alta

Fonte: Elaborada pelo autor com base em Hosseini *et al.* (2022), Aworanti *et al.* (2023), Hosseini *et al.* (2023), Rodero *et al.* (2024) e Biswas *et al.* (2025).

A viabilidade das rotas de valorização do biogás para obtenção de biometano depende da interação entre fatores técnicos, econômicos, infraestruturais e regulatórios. Esses fatores não atuam de forma isolada. A qualidade do biogás influencia o custo do *upgrading*, a escala condiciona o CAPEX específico, a disponibilidade de infraestrutura define o mercado possível e o ambiente regulatório, pode tornar uma rota tecnicamente viável economicamente atrativa ou, inversamente, inviabilizá-la (Rodero *et al.*, 2024; Biswas *et al.*, 2025; Aworanti *et al.*, 2023).

À luz de critérios técnicos, os fatores mais determinantes são a vazão de biogás, o teor de metano, a estabilidade temporal da produção e a presença de contaminantes. A vazão define a escala mínima do projeto e condiciona o dimensionamento dos sistemas de purificação e aproveitamento energético (Aworanti *et al.*, 2023). Projetos com baixa vazão tendem a apresentar maior custo específico por unidade de energia produzida, enquanto sistemas com fluxo contínuo e previsível favorecem a adoção de tecnologias mais intensivas em capital. O teor de metano influencia diretamente o potencial energético do biogás e a demanda de remoção de CO₂ exigida no *upgrading*, sendo um parâmetro crítico na seleção tecnológica (Hosseini *et al.*, 2023; Cristiani *et al.*, 2023).

A estabilidade temporal da produção constitui outro fator crítico, uma vez que variações na vazão e na composição do biogás afetam o desempenho operacional das tecnologias de purificação,

especialmente aquelas baseadas em PSA e membranas (Di Profio *et al.*, 2023; Cristiani *et al.*, 2023). Já a presença de contaminantes, como H₂S, umidade e siloxanos, amplia a necessidade de pré-tratamento, eleva custos operacionais e pode comprometer a integridade dos equipamentos (Hosseini; Denayer, 2022).

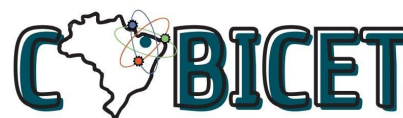
Na dimensão econômica, os principais fatores são o custo de investimento (CAPEX), o custo operacional (OPEX) e a dependência de escala. Estudos técnico-econômicos indicam que o CAPEX associado às tecnologias de *upgrading* é significativo, especialmente quando consideradas etapas de compressão, remoção de contaminantes e controle operacional (Rodero *et al.*, 2024; Biswas *et al.*, 2025).

O OPEX, por sua vez, é fortemente influenciado pelo consumo energético, reposição de insumos e perdas de metano (*methane slip*), que impactam diretamente a eficiência e a rentabilidade do sistema (Aworanti *et al.*, 2023; Hosseini; Denayer, 2022). A escala emerge como um fator transversal, uma vez que projetos maiores tendem a diluir custos fixos e justificar tecnologias mais complexas, como absorção química ou processos criogênicos, enquanto projetos de menor porte favorecem soluções modulares, como membranas (Biswas *et al.*, 2025).

Na dimensão infraestrutural, a viabilidade depende da existência de mercado consumidor, rede de distribuição de gás, logística de transporte e possibilidades de uso final do biometano. Estudos indicam que a proximidade entre produção e consumo energético é determinante para reduzir custos logísticos e aumentar a competitividade do biometano frente a combustíveis fósseis (Aworanti *et al.*, 2023; Rodero *et al.*, 2024).

Do ponto de vista regulatório, a produção de biometano é condicionada por normas de qualidade do gás, requisitos de segurança, padrões de injeção em rede e instrumentos econômicos associados à transição energética. Políticas públicas, incentivos à descarbonização e mecanismos de precificação de carbono têm sido apontados como fatores decisivos para viabilizar projetos que, em condições puramente de mercado, apresentariam baixa atratividade econômica (Biswas *et al.*, 2025; Hosseini *et al.*, 2023).

A interdependência entre esses fatores é central. Um biogás com elevada concentração de metano, mas baixa vazão, pode não justificar economicamente sistemas avançados de purificação. Da mesma forma, um projeto com grande volume de biogás, porém com alta carga de contaminantes ou instabilidade operacional, pode demandar pré-tratamentos adicionais, reduzindo sua competitividade. Por outro lado, contextos regulatórios favoráveis podem



compensar limitações técnicas ou econômicas, reforçando a necessidade de uma análise integrada (Rodero *et al.*, 2024; Aworanti *et al.*, 2023).

A análise da literatura evidencia que, embora haja avanços significativos nas tecnologias de digestão anaeróbia e *upgrading* de biogás, persistem lacunas relevantes que limitam a compreensão holística da viabilidade da produção de biometano. Essas lacunas podem ser classificadas em três dimensões principais: geográfica, empírica e metodológica.

Observa-se uma predominância de estudos conduzidos em países desenvolvidos, especialmente na Europa, onde há maior maturidade tecnológica, infraestrutura consolidada de gás natural e políticas públicas estruturadas para incentivo ao biometano. Trabalhos como os de Rodero *et al.* (2024) refletem esse contexto, com análises baseadas em sistemas operacionais estáveis e condições de mercado favoráveis. Essa concentração geográfica implica limitações na transferência direta dos resultados para países emergentes, nos quais a disponibilidade e heterogeneidade de resíduos, a infraestrutura energética e as condições regulatórias diferem significativamente.

Estudos mais recentes (Sahota *et al.*, 2026; Dimande *et al.*, 2026; Cordova *et al.*, 2026) indicam que, nesses contextos, desafios como variabilidade do biogás, limitações logísticas e ausência de redes de gás natural podem alterar substancialmente a viabilidade das rotas tecnológicas.

Outra lacuna relevante refere-se à escassez de dados empíricos em escala plena. Grande parte dos estudos sobre digestão anaeróbia baseia-se em ensaios laboratoriais, como testes de potencial bioquímico de metano (BMP), ou em sistemas piloto, com condições controladas. Embora esses estudos sejam fundamentais para compreender o comportamento dos substratos e otimizar processos, eles não capturam plenamente a complexidade de sistemas reais (Hao *et al.*, 2020; Kasinath *et al.*, 2021; Kalita *et al.*, 2023).

Da mesma forma, estudos de *upgrading* frequentemente utilizam modelagens ou análises teóricas para avaliar desempenho e custos, com menor disponibilidade de dados operacionais contínuos em plantas industriais (Aworanti *et al.*, 2023; Biswas *et al.*, 2025). Aspectos como variabilidade temporal da produção, degradação de materiais, perdas de metano (*methane slip*) e custos reais de operação são frequentemente sub-representados.

A lacuna mais relevante identificada refere-se à abordagem metodológica adotada na literatura. Observa-se que os estudos tendem a analisar de forma isolada as etapas da cadeia de produção de

biometano. Pesquisas sobre digestão anaeróbia concentram-se na maximização do rendimento de metano e na estabilidade do processo (Cucina *et al.*, 2021; Mrosso *et al.*, 2023; Ibro *et al.*, 2024), enquanto estudos de *upgrading* focam na eficiência das tecnologias de purificação, consumo energético e custos associados (Hosseini *et al.*, 2023; Cristiani *et al.*, 2023).

Entretanto, há escassez de abordagens que integrem essas etapas, considerando simultaneamente variáveis técnicas, econômicas, infraestruturais e regulatórias. Mesmo estudos técnico-econômicos mais avançados (Rodero *et al.*, 2024; Biswas *et al.*, 2025) frequentemente assumem condições ideais ou simplificadas para o biogás de entrada, desconsiderando a influência da variabilidade e da qualidade do gás produzido na digestão.

CONCLUSÃO

A produção de biometano a partir do biogás tem se consolidado como uma alternativa estratégica no contexto da transição energética e da mitigação de emissões de gases de efeito estufa. Nesse cenário, o presente estudo teve como objetivo analisar a influência das estratégias de pré-tratamento e codigestão na qualidade do biogás e suas implicações no desempenho técnico e na viabilidade das tecnologias de *upgrading*.

A partir da revisão narrativa estruturada realizada, verificou-se que a produção de biometano deve ser compreendida como um conjunto interconectado, no qual a etapa de digestão anaeróbia e os processos de purificação estão intrinsecamente conectados.

Os resultados evidenciam que variáveis como vazão de biogás, teor de metano, estabilidade temporal da produção e presença de contaminantes exercem influência direta sobre a eficiência das tecnologias de *upgrading*, o consumo energético e as perdas de metano (*methane slip*).

A análise comparativa demonstrou ainda que não há uma rota tecnológica universalmente superior, sendo a escolha condicionada à escala do projeto, à qualidade do biogás e ao contexto infraestrutural e regulatório. Dessa forma, conclui-se que a viabilidade da produção de biometano não pode ser adequadamente avaliada a partir de análises isoladas das tecnologias de purificação.

Em consonância com o objetivo proposto, o estudo demonstra que a qualidade do biogás constitui uma variável central na tomada de decisão tecnológica, atuando como elo entre o desempenho da digestão anaeróbia e a eficiência dos processos de *upgrading*.

Assim, a adoção de abordagens integradas se mostra essencial para a avaliação técnica e econômica das

rotas de produção de biometano, superando a fragmentação observada na literatura.

Como perspectivas para trabalhos futuros, recomenda-se o desenvolvimento de estudos empíricos em escala real, com monitoramento contínuo das variáveis operacionais e de desempenho ao longo de toda a cadeia produtiva.

Adicionalmente, destaca-se a necessidade de aplicação de modelos integrados que incorporem simultaneamente dimensões técnicas, econômicas, infraestruturais e regulatórias, bem como a ampliação de estudos em contextos de países emergentes, nos quais a variabilidade dos resíduos e as limitações de infraestrutura representam desafios adicionais para a viabilidade do biometano.

AGRADECIMENTOS

O presente estudo foi realizado com apoio da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS/MEC – Brasil e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (Capes) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- AKHIAR, Afifi; GUILAYN, Felipe; TORRIJOS, Michel; BATTIMELLI, Audrey; SHAMSUDDIN, Abd Halim; CARRÈRE, Hélène. *Correlations between the Composition of Liquid Fraction of Full-Scale Digestates and Process Conditions*. *Energies*, v. 14, n. 4, p. 971, 12 fev. 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/4/971>. Acesso em: 26/03/2026.
- AWORANTI, Oluwafunmilayo Abiola *et al.* *Enhancing and upgrading biogas and biomethane production in anaerobic digestion: a comprehensive review*. *Frontiers in Energy Research*, v. 11, p. 1170133, 23 jun. 2023. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/energy-research/articles/10.3389/fenrg.2023.1170133/full>. Acesso em: 02/04/2026.
- AYANTOKUN, Ayandeji Sunday *et al.* *Comparative TEA–LCA of CHP, Biomethane, and Hybrid Biogas Utilization Pathways for Poultry Manure with Fruit and Vegetable Waste Co-Digestion Systems*. *Sustainability*, v. 18, n. 3, p. 1483, 2 fev. 2026. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/18/3/1483>. Acesso em: 20/04/2026.
- BISWAS, Rahul; AHMADI, Vafa; UMMETHALA, Raghunandan; MOZUNDER, Salatul Islam; ARYAL, Nabin. *Recent advances in electrochemical carbon dioxide reduction strategies in biogas upgrading and biomethane production*. *Chemical Engineering Journal*

Advances, v. 22, p. 100722, maio, 2025. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666821125000195>. Acesso em: 05/04/2026.

- CORDOVA, Stephanie S. *et al.* *What is the climate and economic impact of incorporating food-grade CO₂ production in biomethane production plants? A Swedish case study*. *Energy Reports*, v. 15, p. 108903, jun. 2026. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484725007814>. Acesso em: 01/05/2026.

- CRISTIANI, Lorenzo; LEOBELLO, Lorenzo; ZEPELLI, Marco; VILLANO, Mariana. *Role of C/N ratio in a pilot scale Microbial Electrolysis Cell (MEC) for biomethane production and biogas upgrading*. *Renewable Energy*, v. 210, p. 355–363, jul. 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148123004998>. Acesso em: 12/04/2026.

- CUCINA, Mirko; PEZZOLLA, Daniela; TACCONI, Chiara; GIGLIOTTI, Giovanni. *Anaerobic co-digestion of a lignocellulosic residue with different organic wastes: Relationship between biomethane yield, soluble organic matter and process stability*. *Biomass and Bioenergy*, v. 153, p. 106209, out. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0961953421002452>. Acesso em: 11/04/2026.

- DI PROFIO, Pietro *et al.* *Emerging green strategies for biogas upgrading through CO₂ capture: From unconventional organic solvents to clathrate and semi-clathrate hydrates*. *Journal of Molecular Liquids*, v. 391, p. 123196, dez. 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167732223020020>. Acesso em: 11/04/2026.

- DIMANDE, Diana; MIHALYI-SCHNEIDER, Bettina; HARASEK, Michael; WUKOVITS, Walter. *Environmental assessment of enhanced biomethane production from biogas via membrane-based upgrading*. *Biomass and Bioenergy*, v. 210, p. 109021, jul., 2026. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953426000966>. Acesso em: 25/04/2026.

- HAGOS, Gebrehiwot Kunom; MISGANAW, Wondalem Golie; BELETE, Fentahun Abebaw; GEBEREHIET, Godif Alene. *Sustainable enhancement of biogas production using integrated process optimization and low-cost upgrading techniques*. *Discover Environment*, v. 4, n. 1, p. 119, 13 mar. 2026. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s44274-026-00640-4>. Acesso em: 19/04/2026.



- HAO, Jiahou; DE LOS REYES III, Francisco L.; HE, Xia. *Fat, oil, and grease (FOG) deposits yield higher methane than FOG in anaerobic co-digestion with waste activated sludge*. Journal of Environmental Management, v. 268, p. 110708, ago., 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S030147972030640X>. Acesso em: 11/04/2026.
- HOSSEINI, Seyed Saeid; DENAYER, Joeri F. M. *Biogas upgrading by adsorption processes: Mathematical modeling, simulation and optimization approach – A review*. Journal of Environmental Chemical Engineering, v. 10, n. 3, p. 107483, jun., 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213343722003566>. Acesso em: 09/04/2026.
- HOSSEINI, Seyed Saeid; TABAR, Mohammad Azadi; VANKELECOM, Ivo F. J.; DENYER, Joeri F. M. *Progress in high performance membrane materials and processes for biogas production, upgrading and conversion*. Separation and Purification Technology, v. 310, p. 123139, abr., 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586623000473>. Acesso em: 09/04/2026.
- HOSSEINI, Tara; CULLEY, Sam A.; ZECCHIN, Aaron; MAIER, Holger R.; ASHMAN, Peter J. *Impact of co-digestion and degree of centralization on the yield and viability of biomethane production: A case study in regional Australia*. Energy Conversion and Management: X, v. 22, p. 100585, abr., 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590174524000631>. Acesso em: 08/04/2026.
- IBRO, Mohammed Kelif; ANCHA, Venkata Ramayya; LEMMA, Dejene Beyene. *Biogas Production Optimization in the Anaerobic Codigestion Process: A Critical Review on Process Parameters Modeling and Simulation Tools*. Journal of Chemistry, v. 2024, p. 1–25, 8 abr., 2024. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2024/4599371>. Acesso em: 02/05/2026.
- KALITA, Saurav; OHLSSON, Jonas A.; POTTER, Hanna Karlsson; NORDBERG, Åke; SANDGREN, Mats; HANSSON, Per-Anders. *Energy performance of compressed biomethane gas production from co-digestion of Salix and dairy manure: factoring differences between Salix varieties*. Biotechnology for Biofuels and Bioproducts, v. 16, n. 1, p. 165, 3 nov., 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1186/s13068-023-02412-1>. Acesso em: 12/04/2026.
- KASINATH, Archana; FUDALA-KSIAZEK, Sylwia; SZOPINSKA, Malgorzata; BYLINSKI, Hubert; ARTICHOWICZ, Wojciech; REMISZEWSKA-SKWAREK, Anna; LUCZKIEWICZ, Aneta. *Biomass in biogas production: Pretreatment and codigestion*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 150, p. 111509, out., 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032121007887>. Acesso em: 13/04/2026.
- MROSSO, Register; KIPLAGAT, Joseph; MECHA, Achisa C. *Anaerobic Codigestion of Tuber Waste and Fruit Waste: Synergy and Enhanced Biogas Production*. International Journal of Chemical Engineering, v. 2023, p. 1–10, 19 abr., 2023. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2023/6637249>. Acesso em: 10/04/2026.
- PASCIUCCO, Francesco; FRANCINI, Giovanni; PECORINI, Isabella; BACCIOLI, Andrea; LOMBARDI, Lidia; FERRARI, Lorenzo. *Valorization of biogas from the anaerobic co-treatment of sewage sludge and organic waste: Life cycle assessment and life cycle costing of different recovery strategies*. Journal of Cleaner Production, v. 401, p. 136762, maio, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623009204>. Acesso em: 10/04/2026.
- RODERO, María Del Rosario; MUÑOZ, Raúl; GONZÁLEZ-SÁNCHEZ, Armando; RUIZ, Héctor A.; QUIJANO, Guillermo. *Membrane materials for biogas purification and upgrading: Fundamentals, recent advances and challenges*. Journal of Environmental Chemical Engineering, v. 12, n. 5, p. 114106, out. 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213343724022371>. Acesso em: 08/04/2026.
- SAHOTA, Shivali; GEOGHEGAN, Cathal; O'DONOGHUE, Cathal. *Probabilistic techno-economic assessment of large-scale anaerobic digestion plants for biomethane production: de-risking biomethane futures*. Energy Conversion and Management, v. 356, p. 121316, maio, 2026. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890426002852>. Acesso em: 19/04/2026.
- TIN, Kyu Kyu; TAWEEPRED, Wirach; KUMAR, Anil. *Review of material and energy balance techniques for optimized biogas production in biomethanation plants*. Next Materials, v. 10, p. 101505, jan., 2026. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2949822825010238>. Acesso em: 10/04/2026.