TECNOLOGIAS DE PURIFICAÇÃO DE BIOGÁS: UMA REVISÃO CRÍTICA DAS ROTAS CONVENCIONAIS E SUAS LIMITAÇÕES

Giovana Beatriz Frigato Barbosa[1], Alexandre Diório[1], Djeine Cristina Schiavon Maia[1]

[1]Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Brasil (ra12780@uem.br)

Resumo: Revisão crítica das tecnologias convencionais de purificação de biogás — absorção física e química, PSA/VPSA, membranas, criogenia e métodos biológicos — analisando princípios, eficiência, custos e limitações. Avalia-se a conformidade com a Resolução ANP n.º 906/2022 e padrões internacionais. Os *trade-offs* intrínsecos de cada tecnologia isolada justificam o desenvolvimento de metodologias híbridas como alternativa estratégica ao setor brasileiro de biometano.

Palavras-chave: biogás; biometano; *water scrubbing*; PSA; membranas; criogenia; métodos biológicos.

INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com as mudanças climáticas e a dependência de combustíveis fósseis tem impulsionado a busca por fontes alternativas de energia renovável. Nesse contexto, o biogás emerge como alternativa promissora, capaz de transformar resíduo orgânico em energia limpa ao mesmo tempo em que contribui para a gestão adequada de resíduo e mitigação de emissões de gases de efeito estufa (JAMEEL et al., 2024). Produzido pela digestão anaeróbia da biomassa em aterros sanitários, estações de tratamento, agroindústrias e propriedades rurais, o biogás bruto é composto em média por 50–75% de metano (CH_4) e 25–70% de dióxido de carbono (CO_2), além de contaminantes em concentrações menores, como sulfeto de hidrogênio (H_2S), amônia (NH_3), vapor d'água, siloxanos e partículas (BHARATHIRAJA et al., 2018).

Para viabilizar o aproveitamento do biogás como biometano — combustível para veículos, injeção na rede de gás natural ou geração de energia de alta eficiência — é imprescindível um processo de purificação que eleve a concentração de CH_4 a mais de 90% e reduza os contaminantes a níveis tolerados pelas normas regulatórias (MIGNOGNA et al., 2023). Cada tecnologia convencional disponível apresenta limitações específicas, e a compreensão profunda dessas restrições é fundamental para a seleção da rota mais adequada a cada contexto. Deste modo, este trabalho tem como objetivo apresentar uma revisão crítica das tecnologias convencionais de purificação de biogás, discutindo seus princípios, desempenhos, custos e limitações, e introduzindo o conceito de metodologias híbridas como resposta às inadequações das abordagens individuais.

CARACTERÍSTICA DO BIOGÁS E POTENCIAL ENERGÉTICO

O biogás é produzido pela degradação microbiana da matéria orgânica em ausência de oxigênio (BHARATHIRAJA et al., 2018). Sua composição varia significativamente conforme a origem da biomassa, as condições operacionais do biodigestor e o substrato empregado. O metano é o principal componente energético, com poder calorífico inferior de aproximadamente 35,8 MJ/Nm³ e superior de 39,8 MJ/Nm³ (JAMEEL et al., 2024). Na Tabela 1 pode ser observada a composição típica do biogás bruto.

Tabela 1. Composição típica do biogás bruto.

Componente	Concentração	Unidade
Metano (CH_4)	50–75	% Vol
Dióxido de carbono (CO_2)	25–70	% Vol
Vapor d'água (H_2O)	1–5 (saturado)	% Vol
Nitrogênio (N_2)	0–5	% Vol
Oxigênio (O_2)	0–2	% Vol
Sulfeto de Hidrogênio (H_2S)	0–10.000	ppm
Amônia (NH_3)	0–100	ppm
Siloxanos	0–50	mg/Nm³

Fonte: Adaptado de Bharathiraja et al. (2018) e Jameel et al. (2024).

As fontes de biogás no Brasil incluem resíduos agropecuários (54% do potencial nacional), setor sucroenergético (21%), resíduos sólidos urbanos (18%) e estações de tratamento de efluentes (7%) (MARCUCCI et al., 2025). Li et al. (2020) demonstraram que biogás de aterros sanitários apresenta maior concentração de CO_2 e contaminantes (H_2S: 100–10.000 ppm, siloxanos: 1–50 mg/Nm³) em comparação ao biogás de ETE, que exibe composição mais estável e maior teor de CH_4 (60–70%). Essa variabilidade determina diretamente a escolha da tecnologia de purificação mais adequada.

ESPECIFICAÇÕES DO BIOMETANO

O biometano é o biogás purificado com especificações técnicas que permitem seu uso como substituto do gás natural. No Brasil, a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) regulamenta o biometano por meio da Resolução ANP n.º 906/2022. Na Tabela 2 é apresentada a comparação entre as especificações brasileiras e internacionais (VIEIRA; LEAL, 2024; MIGNOGNA et al., 2023).

Tabela 2. Especificações do biometano: comparação internacional.

Parâmetro	**Brasil (ANP 906/2022)**	**Europa (EN 16723-1)**	**EUA**	**Unidade**
CH_4 (mínimo)	≥90,0	≥95,0	≥96,0	% mol
CO_2 (máximo)	≤3,0	≤2,5	≤2,0	% mol
O_2 (máximo)	≤0,8	≤1,0	≤0,5	% mol
H_2S (máximo)	≤10	≤5	≤5,7	mg/Nm³
Siloxanos (máximo)	≤0,04	≤10	–	mg/Nm³

Fonte: Adaptado de Vieira e Leal (2024) e Mignogna et al. (2023).

Observa-se que o Brasil adota exigência relativamente menor para o conteúdo mínimo de CH_4 (90%) em comparação à Europa (95%) e aos EUA (96%), refletindo uma adaptação às condições de produção e custos de purificação nacionais. Os limites para H_2S e siloxanos são rigorosos em todas as normas, dado o potencial de dano à infraestrutura de distribuição e aos equipamentos de uso final (VIEIRA; LEAL, 2024).

TECNOLOGIAS CONVENCIONAIS DE PURIFICAÇÃO

Absorção Física – Water Scrubbing

O *water scrubbing* baseia-se na maior solubilidade do CO_2 e H_2S em água em relação ao CH_4 (relação $CO_2/CH_4 \approx 26:1$). O biogás comprimido a 6–10 bar percola em contracorrente com água em coluna de absorção, alcançando remoção de 85–98% de CO_2 e produzindo biometano com 90–97% CH_4 (GALLONI; DI MARCOBERARDINO, 2024). A tecnologia é madura e estabelecida comercialmente, com múltiplos fornecedores globais. Suas principais limitações são o elevado consumo de água (0,1–0,5 m³/Nm³), as perdas de CH_4 por dissolução (1–2%) e a geração de efluente líquido acidificado que requer tratamento.

Absorção Química com Aminas

Solventes químicos como MEA, DEA e MDEA reagem seletivamente com CO_2, oferecendo alta eficiência de remoção (90–99%) e produto de alta pureza (>98% CH_4) mesmo em pressões mais baixas (NAEIJI et al., 2022; UPADHYAY et al., 2023). A

principal desvantagem é o elevado custo operacional decorrente do consumo energético de regeneração do solvente (0,30–0,40 kWh/Nm³) e da necessidade de pré-tratamento rigoroso para remoção de H_2S, que degrada quimicamente as aminas. A regeneração de solventes não ocorre sem consumação de vapor, tornando o processo dependente de fonte de calor.

Adsorção por Oscilação de Pressão (PSA/VPSA)

A tecnologia PSA utiliza materiais porosos sólidos — zeólitas 13X e 5A, carvão ativado e, mais recentemente, MOFs (metal-organic frameworks) — que adsorvem seletivamente CO_2, H_2S e impurezas em alta pressão (6–10 bar), liberando o CH_4 purificado. A regeneração ocorre por despressurização (PSA) ou aplicação de vácuo (VPSA). O sistema é completamente seco, modular e altamente automático, alcançando pureza de 95–98% CH_4 e recuperação de 88–94% (MAHMOUD et al., 2024; NEVES; SCHVARTZMAN, 2005). A principal limitação são as perdas de CH_4 durante a despressurização (2–4%) e a sensibilidade a contaminantes que podem deteriorar os adsorventes.

Separação por Membranas

Membranas poliméricas (acetato de celulose, poliimida, polissulfona) ou de matriz mista (com zeólitas ou MOFs incorporados) permitem a permeação seletiva do CO_2 por mecanismo de solução-difusão, enquanto o CH_4 é retido no retentato. Opera de forma contínua com biogás pressurizado a 6–25 bar, sem necessidade de regeneração cíclica (RODERO et al., 2024; CHEN et al., 2015). Vantagens incluem compacidade, simplicidade operacional e modularidade. As limitações são as perdas significativas de CH_4 no permeado (5–15%), degradação por H_2S e umidade, e vida útil restrita (5–10 anos). Sistemas de estágio único alcançam 90–94% CH_4 com recuperação de 85–92%.

Separação Criogênica

Baseia-se na separação dos componentes por liquefação ou solidificação seletiva em temperaturas extremamente baixas. Por anti-sublimação, o biogás é resfriado a −55°C a −60°C (15–30 bar), solidificando o CO_2 enquanto o CH_4 permanece na fase gasosa. Por destilação criogênica, opera-se entre −80°C e −160°C para produzir bio-GNL (HIDALGO; MARTÍN-MARROQUÍN, 2025). Alcança pureza superior a 99% CH_4 com recuperação de 96–98%, e produz CO_2 líquido de alta pureza (>95%) com potencial de comercialização. As desvantagens são o elevado CAPEX (600–1000 USD/Nm³/h), alto consumo energético (0,30–0,45 kWh/Nm³) e viabilidade restrita a plantas acima de 2000 Nm³/h.

Métodos Biológicos

Os métodos biológicos utilizam microrganismos para converter, oxidar ou assimilar contaminantes, especialmente CO_2 e H_2S. Bactérias oxidantes de enxofre (Thiobacillus, Acidithiobacillus) convertem H_2S em enxofre elementar com eficiência superior a 95%. Microalgas fotossintéticas (Chlorella, Spirulina) fixam CO_2 por fotossíntese, produzindo biomassa (UPADHYAY et al., 2023). Os reatores utilizados incluem biofiltros, *biotrickling filters*, fotobiorreatores fechados e lagoas de algas de alta taxa (HRAP). Vantagens: baixo consumo energético (0,05–0,15 kWh/Nm³), sustentabilidade com pegada de carbono reduzida e adequação ao clima tropical. Limitações: reações lentas, sensibilidade a variações ambientais, tempo de partida prolongado (60–90 dias) e dificuldade em alcançar alta pureza isoladamente (85–92% CH_4). Silveira (2024) e Castro (2022) realizaram estudos brasileiros validando sistemas biológicos em escala piloto nas condições subtropicais do sul do país.

COMPARAÇÃO ENTRE AS TECNOLOGIAS

A Tabela 3 sintetiza os principais parâmetros de desempenho das tecnologias convencionais analisadas.

A análise comparativa revela *trade-offs* significativos entre as tecnologias. A absorção química e a criogenia alcançam os maiores níveis de pureza, porém com os maiores custos operacionais e de capital, respectivamente. Membranas e PSA destacam-se pela modularidade e simplicidade, mas enfrentam desafios de recuperação de CH_4. Os métodos biológicos oferecem a melhor relação de sustentabilidade, porém são incapazes, isoladamente, de atingir as especificações da ANP 906/2022 para uso como GNV ou injeção em rede. Nenhuma tecnologia individual é otimizada em todos os critérios simultaneamente.

Tabela 3. Comparação das tecnologias convencionais de purificação de biogás.

Tecnologia	Pureza CH_4 (%)	Recuperação (%)	Energia (kWh/Nm³)	Vantagens	Limitações
Water Scrubbing	90–97	90–94	0,20–0,30	Madura, remove H_2S	Alto consumo de água
Absorção Química	96–99	92–95	0,30–0,40	Alta eficiência	Alto custo operacional
PSA/VPSA	95–98	88–94	0,18–0,28	Processo seco, modular	Perdas de CH_4
Membranas	90–96	85–92	0,15–0,25	Compacto, contínuo	Perdas significativas CH_4
Criogenia	>99	96–98	0,30–0,45	Puríssima, CO_2 líquido	CAPEX muito alto
Biológico	85–92	95–98	0,05–0,15	Sustentável, baixo custo	Lento, sensível

Fonte: Elaborado com base em Galloni e Di Marcoberardino (2024), Upadhyay et al. (2023) e Noor Yusuf e Almomani (2023).

INTRODUÇÃO AO CONCEITO DE METODOLOGIAS HÍBRIDAS

Os *trade-offs* inerentes às tecnologias convencionais isoladas constituem a principal motivação para o desenvolvimento de metodologias híbridas, que combinam dois ou mais processos de forma complementar para superar as limitações individuais. O conceito fundamenta-se na complementaridade tecnológica: cada tecnologia possui pontos fortes e fracos específicos, e sua combinação estratégica pode gerar um sistema com desempenho superior à soma das partes individuais (UPADHYAY et al., 2023; GALLONI; DI MARCOBERARDINO, 2024).

Por exemplo, as membranas são eficientes para a remoção em massa de CO_2, porém resultam em perdas expressivas de CH_4 e atingem purezas limitadas (90–94%) no estágio único. Sua combinação com PSA para polimento final (membrana + PSA) reduz o consumo energético total, eleva a recuperação de CH_4 para 92–96% e permite atingir 96–98% de pureza — superiores a qualquer tecnologia isolada (AGUILLOSO et al., 2024; CHEN et al., 2015). De forma semelhante, métodos biológicos podem realizar pré-tratamento de baixo custo para H_2S e CO_2, protegendo e prolongando a vida útil de membranas ou adsorventes nas etapas subsequentes (CASTRO, 2022; SILVEIRA, 2024).

Upadhyay et al. (2023) classificam as metodologias híbridas em três categorias: (i) físico-químicos híbridos, integrando duas ou mais tecnologias físico-químicas (ex.: membranas + PSA, absorção + adsorção, criogenia + membranas); (ii) biológico-físico-químico híbridos, combinando processos biológicos com tecnologias físico-químicas (ex.: biofiltro + PSA, microalgas + absorção); e (iii) multi-estágios da mesma tecnologia (ex.: PSA multiestágios com diferentes adsorventes). A seleção da configuração mais adequada depende da escala de produção, composição do biogás, requisitos de qualidade e disponibilidade de recursos locais. Dada a diversidade do contexto brasileiro, as metodologias híbridas representam uma alternativa estratégica para viabilizar o aproveitamento do potencial nacional de biogás estimado em 84,6 bilhões de Nm³/ano (GNPW GROUP, 2024).

Do ponto de vista econômico e operacional, as metodologias híbridas também demonstram vantagens relevantes. Estudos de análise tecno-econômica indicam que sistemas combinados podem reduzir o custo levelizado de produção de biometano em 15–30% em comparação às tecnologias isoladas de maior pureza, ao distribuir as etapas de separação entre processos de menor consumo energético unitário (NOOR YUSUF; ALMOMANI, 2023). Além disso, a flexibilidade operacional das configurações híbridas permite adaptar o processo às variações sazonais na composição do biogás, características especialmente relevantes no Brasil, onde as flutuações climáticas e agrícolas impactam diretamente a qualidade do substrato e, consequentemente, a eficiência dos sistemas de purificação (MARCUCCI et al., 2025).

CONCLUSÃO

As tecnologias convencionais de purificação de biogás apresentam limitações específicas que impedem sua otimização simultânea em eficiência, custo, consumo energético e sustentabilidade. A

absorção química oferece a mais alta eficiência, porém com elevado custo operacional. Membranas são compactas e modulares, mas implicam perdas significativas de CH_4. O PSA é processo seco e flexível, porém enfrenta perdas de metano na regeneração. A criogenia atinge pureza superior a 99%, mas exige grande escala e alto investimento. Os métodos biológicos são sustentáveis e de baixo custo, porém incapazes de atingir, isoladamente, as especificações exigidas pela ANP 906/2022 para uso veicular ou injeção em rede.

A compreensão aprofundada dessas limitações é fundamental para justificar a adoção de metodologias híbridas, que surgem como resposta estratégica às inadequações das tecnologias isoladas. No contexto brasileiro, caracterizado por clima tropical, ampla disponibilidade de biomassa, mercado em consolidação e marco regulatório recente (Lei n.º 14.993/2024), as configurações híbridas adaptadas às condições locais representam o caminho mais promissor para viabilizar o aproveitamento do vasto potencial nacional de biogás.

AGRADECIMENTOS

Ao Departamento de Engenharia Química da Universidade Estadual de Maringá e à orientadora Prof.ª Dr.ª Djeine Cristina Schiavon Maia, pelo suporte, orientação e contribuições ao longo do desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

AGUILLOSO, J. et al. Hybrid membrane-PSA processes for biogas upgrading. Separation and Purification Technology, v. 325, p. 124-136, 2024.

BHARATHIRAJA, B. et al. Biogas production – A review on composition, fuel properties, feed stock and principles of anaerobic digestion. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 90, p. 570-582, 2018.

BRASIL. Lei n.º 14.993, de 11 de setembro de 2024. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2024.

CASTRO, L. S. Sistema integrado de produção e purificação de biogás utilizando consórcio de microalgas e bactérias. Tese (Doutorado) – Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, 2022.

CESAR, A. S. et al. Metal oxide-modified activated carbons for enhanced biogas purification. Journal of Environmental Management, v. 342, p. 118-135, 2024.

CHEN, X. Y. et al. Recent advances in membrane-based biogas upgrading. Progress in Energy and Combustion Science, v. 48, p. 40-65, 2015.

GALLONI, E.; DI MARCOBERARDINO, G. Recent advances in biogas upgrading technologies. Energy Conversion and Management, v. 291, p. 117-142, 2024.

GNPW GROUP. Brazilian biogas market outlook 2024. São Paulo: GNPW Group, 2024.

HIDALGO, D.; MARTÍN-MARROQUÍN, J. M. Cryogenic biogas upgrading combined with membrane technology. Energy, v. 298, p. 131-147, 2025.

JAMEEL, A. et al. Biogas upgrading technologies: energetic, economic and environmental performance. Renewable Energy, v. 223, p. 120-138, 2024.

LI, H. et al. Biogas composition variability and its impact on purification technology selection. Bioresource Technology, v. 308, p. 123-134, 2020.

MAHMOUD, A. et al. Advanced adsorbent materials for PSA biogas upgrading. Chemical Engineering Journal, v. 485, p. 149-167, 2024.

MARCUCCI, D. J. et al. Regional biogas potential assessment in Paraná State, Brazil. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 195, p. 114-128, 2025.

MIGNOGNA, D. et al. Biogas and biomethane as renewable energy sources. Energy Reports, v. 9, p. 5615-5631, 2023.

NAEIJI, P. et al. Exergoeconomic analysis and comparison of cryogenic and chemical absorption for biogas upgrading. Energy, v. 245, p. 123-139, 2022.

NEVES, S. C.; SCHVARTZMAN, M. M. A. M. Pressure swing adsorption for biogas upgrading. Brazilian Journal of Chemical Engineering, v. 22, n. 3, p. 431-442, 2005.

NOOR YUSUF, A.; ALMOMANI, F. Hybrid biogas upgrading technologies: techno-economic and environmental assessment. Journal of Cleaner Production, v. 428, p. 139-156, 2023.

RODERO, M. R. et al. Advanced membrane materials for biogas purification. Membranes, v. 14, n. 5, p. 112-134, 2024.

SILVEIRA, J. P. Desenvolvimento de protótipo híbrido para purificação de biogás. Dissertação

(Mestrado) – Universidade do Vale do Taquari, Lajeado, 2024.

UPADHYAY, D. et al. Hybrid biogas upgrading systems: current status, challenges and future perspectives. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 186, p. 113-132, 2023.

VIEIRA, S. M. M.; LEAL, M. R. L. V. Biogas and biomethane in Brazil: regulatory framework, market dynamics and future prospects. Energy Policy, v. 195, p. 114-129, 2024.