

DESSULFURIZAÇÃO DE BIOGÁS NA AGROINDÚSTRIA: UM ESTUDO COMPARATIVO ENTRE MÉTODOS FÍSICO-QUÍMICOS E BIOLÓGICOS SOB AS CONDIÇÕES BRASILEIRAS

Rogério Paganini Valentini¹, Frederico Silva Moreira¹

¹Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, Brasil
(rogerio.valentini@ufms.br)

Resumo: Este estudo compara tecnologias de dessulfurização de biogás na agroindústria brasileira. Processos biológicos como microaeração são viáveis para reduções brutas (eficiência >90%). Como inovação físico-química, o complexo Ferro/Quitossana (Fe/CS), derivado de resíduos da carcinicultura, superou o padrão comercial Fe/EDTA: atingiu eficiência de ~99,9%, capacidade de absorção 10 vezes maior (8,476 mg/g) e reduziu o custo operacional em 88%, consolidando-se como rota promissora para o biometano.

Palavras-chave: Remoção de H₂S; Dessulfurização; purificação de biometano; Ferro/Quitossana; Fe/EDTA

INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com a crise energética mundial e os impactos ambientais decorrentes do uso intensivo de combustíveis fósseis têm impulsionado a busca por matrizes energéticas renováveis e sustentáveis.

Nesse cenário, o biogás emerge como uma alternativa estratégica, sendo o principal produto da biodigestão anaeróbia de resíduos orgânicos. Este biocombustível é composto majoritariamente por metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂), mas apresenta também componentes minoritários conhecidos como contaminantes, entre os quais se destaca o sulfeto de hidrogênio (H₂S).

O Brasil possui um potencial de geração de biogás vasto e ainda subutilizado, especialmente no setor agroindustrial. O estado do Paraná, por exemplo, destaca-se nacionalmente devido à sua forte vocação agrícola e à elevada produção de proteína animal, gerando resíduos de suinocultura, avicultura e bovinocultura que podem ser convertidos em energia elétrica, térmica ou veicular. Contudo, a viabilização do biogás como um produto comercial robusto enfrenta barreiras técnicas, sendo a presença de H₂S um dos principais entraves (Silva, 2022).

O H₂S é um gás incolor, altamente tóxico e corrosivo. Mesmo em baixas concentrações, sua presença causa o desgaste prematuro de motores, caldeiras e tubulações, além de reduzir o poder calorífico do biogás. Adicionalmente, sua combustão gera óxidos de enxofre (SO_x), que contribuem para a formação de chuva ácida e impactos negativos na saúde pública.

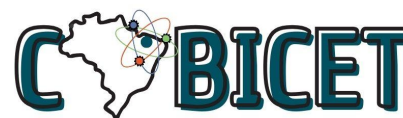
Para que o biogás atinja o *status* de biometano (substituto do gás natural), ele deve atender a normas rigorosas, como a Resolução ANP nº 8/2015, que limita o teor de H₂S a no máximo 10 mg/m³ (Angheben, 2017).

Dada a necessidade de purificação, diversas tecnologias de dessulfurização têm sido desenvolvidas, podendo ser classificadas em métodos biológicos e físico-químicos (Velichkova *et al.*, 2017). Enquanto os processos biológicos são frequentemente preferidos pelo baixo custo operacional e simplicidade, operando em condições de temperatura e pressão ambientes, os métodos físico-químicos (como absorção química e adsorção) oferecem maior seletividade e eficiência para atingir níveis de ultra pureza (Jeníček *et al.*, 2017).

O objetivo deste trabalho é realizar um estudo comparativo entre essas tecnologias, analisando suas vantagens, limitações e viabilidade econômica sob as condições específicas da agroindústria brasileira. A revisão abordará desde métodos convencionais (Zulkefli *et al.*, 2016), como a microaeração (Hines *et al.*, 2017) e a adsorção em carvão ativado (Choleva *et al.*, 2023), até inovações promissoras como o uso de complexos de ferro quelados com biopolímeros sustentáveis.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho fundamenta-se em uma abordagem qualitativa e exploratória, conduzida por meio de um levantamento sistemático da literatura científica e técnica sobre a dessulfurização de biogás no contexto agroindustrial.



A pesquisa de documentos foi realizada em bases de dados internacionais, e repositórios institucionais brasileiros, com ênfase na produção científica de universidades estaduais e federais. Foram buscadas palavras-chaves combinadas em português e inglês, incluindo: " H_2S remoção", "*biogas desulfurization*", "ferro quelado", "agroindústria" e "microaeração".

Os estudos foram selecionados com base na sua relevância para o cenário brasileiro e para a agroindústria, adotando-se alguns filtros específicos: pesquisas voltadas ao biogás proveniente de resíduos de suinocultura, avicultura e frigoríficos; tecnologias avaliadas quanto à sua capacidade de atingir os limites de H_2S estabelecidos pela Resolução ANP nº 8/2015 (máximo de 10 mg/m^3); por fim, a seleção de estudos que integram dados de escala de bancada com ensaios em unidades piloto ou de campo.

Para a construção do estudo comparativo, os dados extraídos das fontes foram categorizados em três pilares principais: desempenho técnico, viabilidade econômica e estabilidade operacional.

No desempenho técnico, foram compilados indicadores de eficiência de remoção (%), capacidade de absorção (q_b) e tempo de desativação (t_b) das soluções ou leitos.

No quesito "viabilidade econômica", analisou-se o custo operacional expresso em R\$ por m^3 de biogás tratado ou R\$ por grama de H_2S removido, permitindo confrontar métodos convencionais com inovações sustentáveis.

Por fim, no pilar da estabilidade operacional, considerou-se a complexidade de manutenção, riscos de segurança (como explosividade na microaeração) e o potencial de regeneração de reagentes.

As informações foram sintetizadas por meio de matrizes comparativas que confrontam o desempenho dos métodos biológicos (ex: filtros percoladores e microaeração) frente aos físico-químicos (ex: adsorção e absorção com ferro quelado). A análise crítica buscou identificar o "estado da arte" da dessulfurização sob as condições climáticas e econômicas do Brasil, visando propor recomendações tecnológicas para o setor produtivo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos resultados consolida os dados extraídos da literatura e de ensaios experimentais, permitindo uma visão crítica sobre o desempenho das tecnologias de dessulfurização no contexto da agroindústria brasileira. Esta seção está dividida em blocos temáticos para aprofundar cada tecnologia conforme a metodologia proposta.

Panorama das Tecnologias e Processos Biológicos

O biogás bruto gerado na agroindústria, especialmente a partir de dejetos suínos e avícolas, apresenta concentrações de H_2S que variam tipicamente entre 500 e 4000 ppm (Silva, 2022). Para que este gás seja viabilizado como biometano ou utilizado em motogeradores sem comprometer a integridade das partes metálicas, a remoção do enxofre é mandatória (Cattaneo *et al.*, 2023). No Brasil, os processos biológicos são vistos como alternativas altamente competitivas devido ao baixo custo de implantação e operação (Müller *et al.*, 2014).

A microaeração é apontada como o método mais simples e econômico para a dessulfurização primária na agroindústria brasileira. O processo consiste na injeção controlada de pequenas quantidades de ar (ou oxigênio puro) diretamente no biodigestor, permitindo que bactérias oxidantes de enxofre (como as do gênero *Thiobacillus*) convertam o H_2S em enxofre elementar (S_0). Conforme destacado por Müller *et al.* (2014), a estequiometria ideal para a injeção de ar varia entre 4% e 6% do volume de biogás produzido; sob essas condições, a eficiência de remoção pode ser superior a 90%.

Ainda segundo Müller *et al.* (2014), a principal vantagem da microaeração é a dispensa de sistemas complementares externos e o baixíssimo consumo de reagentes químicos. Entretanto, o método apresenta o risco de formar misturas explosivas se a concentração de oxigênio não for monitorada com rigor, além de promover a diluição do metano pelo nitrogênio (N_2) presente no ar injetado. No contexto brasileiro, a temperatura ambiente predominante entre 20 °C e 45 °C é ideal para a atividade enzimática microbiana, eliminando a necessidade de aquecimento artificial dos reatores e tornando o processo biológico extremamente viável economicamente.

Diferente da microaeração, o filtro de percolação (BTF) é um sistema externo onde o biogás passa por uma coluna preenchida com material inerte (como plástico ou cerâmica) que serve de suporte para o biofilme microbiano (Silva, 2022). Estes sistemas são robustos e capazes de tratar altas cargas de H_2S , operando com recirculação de uma fase líquida que fornece nutrientes aos microrganismos.

Ainda segundo Silva (2022), as eficiências relatadas na literatura variam de 65% a 98%, dependendo do tempo de residência e da carga de entrada. O principal gargalo identificado nos BTFs é o entupimento do leito causado pelo acúmulo de enxofre elementar sólido e excesso de biomassa, o que exige manutenções periódicas e sistemas de retrolavagem.

A Tabela 1 resume o comparativo técnico entre os dois métodos biológicos e outros processos, destacando a competitividade econômica da rota biológica frente ao tratamento não biológico que, segundo Müller *et al.* (2014), pode custar até R\$ 0,34 por m³ de biogás para baixas vazões.

Tabela 1. Comparativo técnico de processos de remoção de H₂S aplicáveis ao cenário brasileiro.

Tecnologia	Vantagens	Desafios/Desvantagens	Eficiência Típica
Microaeração	Baixo custo; sem reagentes; simples operação.	Risco de explosão; diluição com N ₂ .	> 90%
Filtros (BTF)	Suporta altas cargas; baixo consumo de energia.	Risco de entupimento do leito.	65% - 98%
Dosagem de Ferro	Simplicidade; evita H ₂ S no digestor.	Altera o pH; difícil dosagem; custo de reagente.	< 150 ppm

Processos Físico-Químicos – Adsorção e Absorção Convencional

Enquanto os métodos biológicos são amplamente adotados pela simplicidade, os processos físico-químicos são fundamentais quando o objetivo é atingir níveis de ultra pureza, como exigido para a produção de biometano ou para o uso em células a combustível (Silva, 2022). Esta seção analisa as tecnologias convencionais de adsorção e absorção, destacando o comportamento de materiais de baixo custo e soluções químicas tradicionais.

A adsorção é um dos processos mais eficazes para o polimento do biogás, operando geralmente em temperatura ambiente. O processo ocorre através da retenção das moléculas de H₂S nos poros do material sólido.

Bonatto *et al.* (2013) destaca que o carvão ativado comercial, seja de origem mineral (betume) ou vegetal (casca de coco), apresenta eficiências de remoção entre 90% e 100%. Ensaio de laboratório indicam que o carvão de origem mineral (CAG I) mantém a fase de remoção máxima por um tempo superior (até 170 minutos) em comparação ao carvão de casca de coco sob as mesmas condições de velocidade linear. No entanto, o alto custo de reposição e a dificuldade de regeneração *in situ* (exigindo temperaturas de até 500 °C) tornam o método oneroso para grandes volumes de gás.

Já a utilização de óxidos de ferro é uma das técnicas mais antigas, utilizando *pellets* de Fe₂O₃, lã de aço ou solos ricos em ferro. O mecanismo baseia-se na formação de sulfetos de ferro insolúveis (Fe₂S₃), que podem ser regenerados por aeração para formar enxofre elementar e óxido de ferro novamente (Raabe *et al.*, 2019).

Embora o investimento inicial seja baixo, Bonatto *et al.* (2013) demonstra que o óxido de ferro granular muitas vezes não atinge eficiências de 100% de remoção devido à sua natureza heterogênea e ao "efeito de bloqueio de poros" causado por impurezas estruturais.

A absorção química, por sua vez, envolve a transferência de massa do H₂S da fase gasosa para uma fase líquida reativa. Esta revisão bibliográfica analisou os principais sistemas de absorção química da atualidade: lavagem com água e aminas, dosagem de sais de ferro e soluções de ferro quelado.

Angheben (2017) destaca que o sistema conhecido como *Water Scrubbing* (lavagem com água) permite a remoção simultânea de CO₂ e H₂S, mas exige alta pressão e consome muita energia. Já Silva (2022) comenta que o uso de alcanolaminas (como MEA e MDEA) é altamente eficiente (até 99,8%), mas apresenta problemas como formação de espuma, corrosão das colunas e alto custo operacional.

Outra técnica de absorção é a adição direta de sais de ferro no biodigestor, como o cloreto férrico, sendo uma prática comum para precipitar o enxofre ainda na fase líquida (FeS), evitando que o H₂S vá para o biogás. Apesar de eficiente para reduções brutas, a dosagem correta é difícil segundo Müller *et al.* (2014), podendo alterar o pH do digestor, sendo uma operação cara a longo prazo.

As soluções de ferro quelado (Fe/EDTA), por sua vez, representam o padrão tecnológico para remoção seletiva. O EDTA atua como uma "gaiola" (ligante hexadentado) que estabiliza o íon ferro, permitindo que ele oxide o H₂S em enxofre elementar e seja posteriormente regenerado com ar. Angheben (2017) cita que ensaios com Fe/EDTA comercial atingiram

médias de remoção de 88% a 99% em sistemas de escala de bancada, embora demonstrem instabilidade operacional em longos períodos.

A Tabela 2 sintetiza o comparativo entre os métodos físico-químicos convencionais, evidenciando os desafios que motivam a busca por inovações sustentáveis na agroindústria.

Os dados indicam que o tratamento não biológico para pequenas vazões pode custar até R\$ 0,34 por m³ de biogás (Müller *et al.*, 2014). Esse patamar de custo, somado à complexidade de regeneração dos quelatos sintéticos, abre espaço para o desenvolvimento de alternativas baseadas em biopolímeros, como será discutido na próxima seção.

Tabela 2. Comparativo de processos físico-químicos convencionais para remoção de H₂S.

Tecnologia	Material/Reagente	Eficiência de Remoção	Custo Operacional (R\$/m ³)	Desvantagem Principal
Adsorção	Carvão Ativado	90 - 100%	Alto	Resíduo tóxico e alto custo de reposição.
Oxidação a Seco	Óxido de Ferro	Variável	Baixo/Médio	Baixa seletividade e saturação rápida.
Absorção Química	Solução Fe/EDTA	> 90%	Médio	Complexidade e custo do agente quelante.
Lavagem Química	Aminas (MDEA)	~100%	Muito alto	Corrosão e alto consumo de energia.

Inovação em Absorção Química – O Complexo Ferro/Quitosana (Fe/CS)

A busca por tecnologias de dessulfurização que aliem alta eficiência a baixo custo operacional levou ao desenvolvimento de complexos quelatos baseados em biopolímeros (Tabela 3). Diferente do padrão tecnológico convencional que utiliza o EDTA (ácido etilenodiaminotetracético), a inovação proposta foca no uso da quitosana como agente quelante para íons de ferro em solução.

A quitosana é um copolímero obtido a partir da desacetilação da quitina, um polissacarídeo abundante encontrado em carapaças de crustáceos, resíduo frequente da carcinicultura. Sua estrutura química apresenta uma alta densidade de grupos amina (–NH₂) nas posições C-2 e grupos hidroxila (–OH), que atuam como sítios ativos capazes de formar complexos estáveis com metais de transição, como o ferro.

Dentre as vantagens da quitosana frente ao EDTA comercial, Silva (2022) destaca a sua biodegradabilidade, baixa toxicidade e a capacidade de ser produzida a partir de um passivo ambiental. Além disso, o biopolímero atua como um polieletrólito catiônico em meios ácidos, facilitando a

interação com o íon sulfeto (S^{2–}) proveniente da dissociação do H₂S.

Para determinar a composição ideal do complexo absorvente, Silva (2022) utiliza o planejamento experimental Box-Behnken, avaliando a influência da concentração de ferro (CFe), quitosana (CCS) e ácido acético (CHAc) sobre a capacidade de absorção (qb). A análise estatística e o Gráfico de Pareto demonstraram que a concentração de ferro é a variável de maior impacto positivo na remoção de H₂S. Observou-se uma sinergia crucial entre os três componentes; o aumento simultâneo das concentrações potencializa a disponibilidade de sítios de coordenação e a estabilidade do complexo em pH ácido. O modelo quadrático validado apresentou um coeficiente de correlação $r^2=0,9325$, permitindo descrever adequadamente o comportamento do processo de absorção.

Os ensaios comparativos revelaram que o complexo de quitosana supera amplamente o desempenho das soluções sintéticas tradicionais. Enquanto soluções de Fe/EDTA comercial atingiram capacidades de absorção modestas, a condição otimizada do complexo Ferro/Quitosana (Ensaio B12.1) alcançou resultados excepcionais (Silva, 2022).

Tabela 3. Comparativo de desempenho e custo entre soluções queladas.

Parâmetro	<i>Fe/EDTA</i> Comercial	<i>Fe/Quitosana</i> (Ensaio B12)	<i>Fe/Quitosana</i> (Ensaio B12.1)
Capacidade de Absorção (q_b)	0,828 mg g ⁻¹	3,318 mg g ⁻¹	8,476 mg g ⁻¹
Tempo de Desativação (t_b)	~71 min*	893,34 min	> 1200 min
Eficiência de Remoção	~90%	99,28%	~99,9%
Custo (R\$/g H ₂ S removido)	R\$ 0,497	R\$ 0,096	R\$ 0,058

*Dados de literatura para sistemas similares em batelada.

Os dados mostram que a inovação com quitosana atingiu uma capacidade de absorção dez vezes superior à do EDTA. A análise econômica revelou que o complexo de quitosana apresenta uma viabilidade superior, com um custo de R\$ 0,058 por grama de H₂S removido. Este valor representa apenas 11,7% do custo operacional da solução comercial de Fe/EDTA (R\$ 0,497), demonstrando uma redução de gastos de mais de 88% para o produtor rural (Silva, 2022).

Ainda segundo Silva (2022), a estabilidade do complexo *Fe/CS* em temperatura ambiente e sua elevada seletividade o tornam a solução ideal para o refino de biogás no Brasil. Além da purificação, o uso do enxofre elementar resultante e da própria quitosana residual como fertilizantes agrega valor à cadeia produtiva, transformando o tratamento de resíduos em um ciclo de economia circular sustentável e altamente lucrativo para o produtor rural.

Para validar o potencial das soluções de ferro quelado, Silva (2022) conduz ensaios em uma unidade experimental instalada no município de Entre Rios do Oeste, Paraná. Utilizando biogás bruto proveniente da biodigestão de dejetos suínos, o sistema operou com uma coluna de absorção metálica de 1,79 m de altura sob condições de temperatura ambiente e pressão de 1 atm.

Os testes de campo demonstraram que o complexo Ferro/Quitosana (Fe/CS) mantém uma performance

robusta mesmo com as oscilações de vazão e concentração típicas de um sistema real. No Ensaio 1, com concentrações de alimentação de 427,75 ppm de H₂S, obteve-se uma eficiência média de 72,98% em período estável.

O Ensaio 3, baseado na condição otimizada em laboratório, tratou biogás com carga elevada (1707,39 ppm de H₂S) e alcançou a remoção de 0,96 g de H₂S por m³ de biogás, o melhor resultado em termos de massa de contaminante retirada no campo.

Um achado relevante dos testes de campo foi a capacidade do sistema em remover outras impurezas além do H₂S. No Ensaio 1, observou-se a remoção de 81,19% de monóxido de carbono (CO) e 71,39% de amônia (NH₃), indicando que o complexo quelato pode atuar como um agente de purificação multifuncional.

O diferencial competitivo da inovação paranaense utilizando a quitosana (biopolímero de resíduo da carcinicultura) frente ao padrão comercial *Fe/EDTA* é evidenciado na Tabela 4.

Os dados revelam que o complexo de quitosana não apenas possui uma capacidade de absorção dez vezes superior, mas opera com um custo que representa apenas 11,7% do valor gasto com *Fe/EDTA*. Para um mesmo teor de ferro, o custo do complexo convencional é oito vezes maior que o da alternativa sustentável (Silva, 2022).

Tabela 4. Comparativo de custos e capacidade de absorção entre soluções queladas.

Solução Absorvente	Capacidade de Absorção (q_b)	Custo por grama de H ₂ S removido
<i>Fe/EDTA</i> Comercial	0,828 mg g ⁻¹	R\$ 0,497
Complexo Ferro/Quitosana	8,476 mg g ⁻¹	R\$ 0,058

CONCLUSÃO

A remoção do sulfeto de hidrogênio (H_2S) é um passo mandatório e técnico-economicamente viável para a valorização do biogás no Brasil. As tecnologias analisadas demonstram que é possível atingir níveis de pureza elevados, compatíveis com as normas da ANP para biometano, utilizando soluções que se adaptam à realidade do produtor rural.

Os processos biológicos, especificamente a microaeração, consolidam-se como a principal estratégia de "baixo custo" para a dessulfurização primária. Sua simplicidade operacional e a ausência de reagentes químicos tornam essa técnica a porta de entrada para a purificação em pequenas e médias propriedades, aproveitando as condições climáticas favoráveis do Brasil, que dispensam gastos energéticos com o aquecimento de reatores.

No campo das inovações físico-químicas, o desenvolvimento do complexo Ferro/Quitosana (Fe/CS) representa um avanço disruptivo em relação aos quelatos sintéticos convencionais como o Fe/EDTA. Os resultados laboratoriais e de campo provam que o uso da quitosana, um biopolímero derivado de resíduos da carcinicultura, não apenas aumenta a capacidade de absorção em dez vezes, mas também reduz o custo operacional em aproximadamente 88%.

A viabilidade técnica do complexo Fe/CS foi validada em condições reais de campo, onde demonstrou robustez mesmo diante das oscilações de carga do biogás bruto, apresentando ainda a vantagem adicional de remover impurezas secundárias como a amônia e o monóxido de carbono.

Em suma, a combinação de métodos biológicos para reduções brutas com o refino via quelatos de base orgânica (Fe/CS) posiciona-se como a rota tecnológica mais promissora para a expansão do biometano no cenário nacional, aliando alta eficiência técnica, sustentabilidade ambiental e máxima competitividade econômica.

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS

ANGHEBEN, Antonio Augusto. Estudo da remoção de H_2S de biogás sob diferentes condições operacionais utilizando soluções contendo ferro em um sistema em escala de bancada. Dissertação de Mestrado em Tecnologias Ambientais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná,

Medianeira, 2017. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/3375>. Acesso em: 03/04/2026.

BONATTO, Isabela da Cruz; BECKER, Hugo Rohden; CASTILHOS JÚNIOR, Armando Borges de; BELLI FILHO, Paulo. III-211 – Testes de remoção de H_2S através de adsorção por carvão ativado e óxido de ferro. ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Goiânia, 2013. Disponível em: https://abes-dn.org.br/anais eletronicos/22_Download/TrabalhosCompletosPDF/III-211.pdf. Acesso em: 12/04/2026.

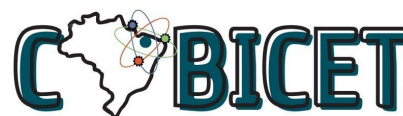
CATTANEO, Carlos R.; MUÑOZ, Raul; KORSHIN, Gregório V.; NADDEO, Vincenzo; BELGIORNO, Vincenzo; ZARRA, Tiziano. *Biological desulfurization of biogas: A comprehensive review on sulfide microbial metabolism and treatment biotechnologies*. Science of The Total Environment, v. 893, p. 164689, 2023. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37315597/>. Acesso em: 05/04/2026.

CHOLEVA, Evangelia; MITSOPOULOS, Anastasios; DIMITROPOULOU, Georgia; ROMANOS, George Em.; KOUVELOU, Evangelos P.; PILATOS, Georgios; STEFANIDIS, Stylianos D.; LAPPAS, Angelos; SFETSAS, Themistoklis. *Development of Biochar-Based Adsorbents for H_2S Removal from Biogas*. Preprints, 2023060589, 2023. Disponível em: https://www.preprints.org/manuscript/202306.0589?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 02/04/2026.

HINES, Margaret A.; CHOUDHURY, Abhinav; FELTON, Gary; LANSING, Stephanie A. *Hydrogen Sulfide Removal from Biogas through Micro-aeration*. College Park: University of Maryland Extension, 2017. Disponível em: <https://enst.umd.edu/sites/enst.umd.edu/files/files/documents/Extension/H2S-Microaeration.pdf>. Acesso em: 07/04/2026.

JENÍČEK, P.; HOREJŠ, J.; POKORNÁ-KRAYZELOVÁ, L.; BINDZAR, J.; BARTÁČEK, J. *Simple biogas desulfurization by microaeration – Full scale experience*. Anaerobe, v. 46, p. 41-45, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1075996417300021>. Acesso em: 05/04/2026.

MÜLLER, Ricardo; FEIDEN, Armin; MARQUES, F. S.; LÚCIO, Tenente; MARI, A. G.



Dessulfurização biológica de biogás nas condições ambientais do Brasil. Brazilian Journal of Biosystems Engineering, v. 8, n. 1, p. 08-12, 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/275239080_DESSULFURIZACAO_BIOLOGICA_DE_BIOGAS_NAS_CONDICOES_AMBIENTAIS_DO_BRASIL. Acesso em: 10/04/2026.

RAABE, Toni; MEHNE, Marcel; RASSER, Heidi; KRAUSE, Hartmut; KURETI, Sven. *Study on iron-based adsorbents for alternating removal of H₂S and O₂ from natural gas and biogas*. Chemical Engineering Journal, v. 371, p. 738-749, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894719308812>. Acesso em: 27/04/2026.

SILVA, Eliane Soares da. *Remoção de sulfeto de hidrogênio do biogás por solução de ferro quelado*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2022. Disponível em: <https://tede.unioeste.br/handle/tede/7820>. Acesso em: 08/04/2026.

VELICHKOVA, Rositsa; MARKOV, Detelin; SIMOVA, Iskra; PETROVA, Tsvetelina; NAYDENOVA, Iliyana; PACHEV, Vladimir. *A Review of the Technologies for Hydrogen Sulfide Removal and Utilization from Biogas Installations*. Proceedings of University of Ruse, v. 56, n. 1.2, p. 63-67, 2017. Disponível em: https://conf.uni-ruse.bg/bg/docs/cp17/1.2/1.2-18.pdf?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 16/04/2026.

ZULKEFLI, N. N.; MASDAR, M. S.; JAHIM, J.; MAJLAN, E. H. *Overview of H₂S Removal Technologies from Biogas Production*. International Journal of Applied Engineering Research, v. 11, n. 20, p. 10060-10066, 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Prem_Baboo/post/Size_of_hydrochar_activated_hydrochar_powder_or_granular_for_adsorption/attachment/5b081b0e4cde260d15e0ef4e/AS%3A630179336568841%401527257870542/download/ijaerv11n20_05.pdf?. Acesso em: 11/04/2026.