

O BIOMETANO NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA: DETERMINAÇÃO DE SILOXANOS NO BIOGÁS

Thiago Honório Leandro^{*}

Dr. Cristiano Morita Barrado^{**}

Dr. Albethmeiry Teixeira de Figueredo^{**}

Resumo: O biogás e o biometano representam alternativas energéticas renováveis de grande relevância no contexto da transição energética global. No Brasil, a Lei do Combustível do Futuro e o Programa Nacional de Descarbonização do Produtor e Importador de Gás Natural e de Incentivo ao Biometano reforçam o compromisso do país com a descarbonização da matriz energética. A ampla disponibilidade de resíduos agropecuários, agroindustriais e urbanos confere ao Brasil elevado potencial para produção de biogás, estimado pela ABiogás (2021) em 84,6 bilhões de metros cúbicos anuais, embora apenas 3% desse potencial seja atualmente explorado. Entretanto, para o aproveitamento energético do biogás em aplicações veiculares, residenciais, industriais e biometano, é fundamental garantir sua qualidade e pureza, o que exige a remoção de contaminantes gerados durante a biodigestão anaeróbia. Dentre esses contaminantes, os siloxanos destacam-se por sua baixa concentração e pela dificuldade analítica de detecção, especialmente em matrizes gasosas complexas, como o biogás proveniente de aterros e esgoto. A presença de siloxanos pode causar danos a motores e equipamentos, comprometendo a viabilidade técnica e econômica do uso do biometano em larga escala. Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo identificar e analisar os principais desafios, métodos de amostragem e análises relacionados à determinação e monitoramento de siloxanos no biogás para produção de biometano. A metodologia consistiu de pesquisa bibliográfica sistemática, com base na revisão de artigos científicos e documentos técnicos. Foram mapeadas as principais técnicas de amostragem e métodos analíticos empregados, como GC-MS, GC-FID, GC-PID e AAS. Os resultados apontam tendências promissoras de técnicas sensíveis e acessíveis, além de evidenciar lacunas tecnológicas e desafios que limitam a interiorização do biometano. Assim, a principal contribuição deste estudo é oferecer uma atualização do estado da arte sobre a análise química de siloxanos no biogás como foco à consolidação do biometano como vetor estratégico na transição energética nacional.

Palavras-chave: Biogás; Biometano; Siloxanos; Análises Químicas.

^{*} Discente do curso de Especialização em Análises Química Ambientais, Instituto de Química – UFCAT: thiagohleandro@gmail.com.

^{**} Docentes do Instituto de Química – UFCAT: cristiano@ufcat.edu.br, alberth@ufcat.edu.br.

INTRODUÇÃO

A relevância atribuída ao biogás e ao biometano aumentou significativamente nos últimos anos, à medida que mais países reconhecem seu potencial como proposta estratégica na transição energética para sistemas sustentáveis (IEA, 2025).

Vários fatores estão impulsionando esse crescimento. Primeiramente, a necessidade de acelerar a descarbonização da matriz energética mundial, somado com a crescente ênfase para mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE). Ademais, os países têm ampliado a atenção ao conceito de economia circular, ao reconhecerem que a produção de biogás permite o aproveitamento e a valorização de resíduos e rejeitos orgânicos. Além disso, o desenvolvimento da matriz do biogás pode contribuir para o crescimento econômico de áreas rurais (IEA, 2025). Diante disso, o Brasil, com sua vasta capacidade de geração de resíduos orgânicos, possui um potencial significativo para a produção desses biocombustíveis.

O biogás é produzido a partir da digestão anaeróbia da matéria orgânica, proveniente de resíduos agroindustriais, agropecuários, e do saneamento, como aterros sanitários e Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) (BRASIL, 2022). A purificação ou *upgrading* do biogás, elevando a concentração de metano acima de 90%, resulta no biometano, um gás com características similares ao gás natural e que pode ser injetado na rede de gasodutos (ANP, 2022).

O cenário brasileiro conta com mais de 1.600 plantas de biogás cadastradas, e uma produção de biometano que atingiu 667 milhões de Nm³ em 2024, com previsão de triplicar até o final de 2026, considerando as novas autorizações para comercialização, um crescimento estimado de 193% entre 2024 e 2026 (CIBIOGÁS, 2024). A Lei nº 14.993/2024, conhecida como a Lei Combustível do Futuro, reforça essa tendência, estabelecendo metas obrigatórias para a inserção do biometano na rede de gás natural, consolidando a necessidade de um rigoroso controle de qualidade.

Apesar do potencial, a qualidade do biogás e do biometano é constantemente ameaçada pela presença de contaminantes, sendo os siloxanos um dos mais prejudiciais quando destinado para aproveitamento energético. Esses compostos voláteis, presentes em baixas concentrações causam a formação de depósitos abrasivos de dióxido de silício (SiO₂) em equipamentos de conversão de energia,

como motores, trocadores de calor e turbinas, resultando em falhas operacionais e altos custos de manutenção (VIEIRA, 2022).

A determinação e o monitoramento dos siloxanos são, portanto, necessárias para garantir a segurança e a viabilidade econômica da produção de biometano. A complexidade da matriz gasosa do biogás e a natureza traço dos contaminantes impõem desafios analíticos e logísticos, especialmente para a interiorização da produção em pequenos e médios produtores.

Neste contexto, o presente visa compreender os desafios relacionados as análises químicas para detecção e monitoramento de siloxanos no biogás. O estudo se propõe a realizar uma revisão bibliográfica sobre o panorama atual do biogás, observando as principais metodologias de amostragem e análises químicas para siloxanos e o panorama regulatório no Brasil, oferecendo uma contribuição científica para a consolidação do biometano como vetor estratégico para a transição energética nacional.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O Biogás e o Biometano: Fundamentos e o Cenário Brasileiro

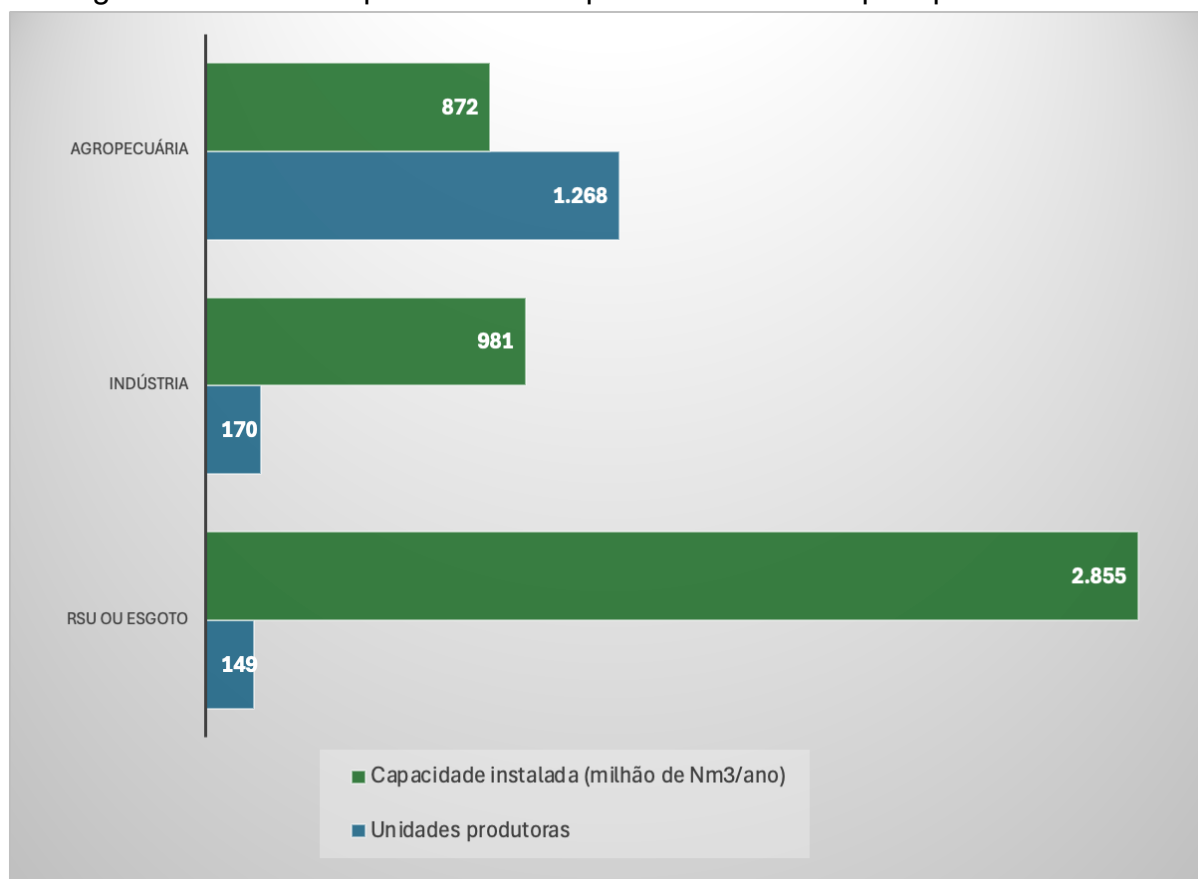
O Panorama do Biogás no Brasil elaborado pelo Centro Internacional de Energias Renováveis - CIBiogás, em 2024, mostra que o cenário atual da produção e uso energético do biogás no país conta com 1.633 plantas de biogás cadastradas com capacidade instalada em operação de 4,7 bilhões Nm^3/ano . Diante disso, o Brasil detém o potencial de produzir 84,6 bilhões de Nm^3/ano de biogás. Os estados com maior número de unidades produtoras são: Paraná (490), Minas Gerais (361), Santa Catarina (130), São Paulo (127) e Goiás (122) (CIBIOGÁS, 2024).

O Panorama ainda revela um crescimento no número de plantas cadastradas, principalmente nos últimos cinco anos, fato este diretamente relacionado as condições favoráveis ao setor no Brasil somado aos avanços regulatórios, recentemente, sancionados (CIBIOGÁS, 2024).

Outra característica marcante do Panorama 2024 é quanto ao volume de produção de biogás por tipo de substrato. Conforme mostrado na Figura 1, a maior parte da produção de biogás no país é proveniente de resíduos sólidos urbanos (RSU)

ou esgoto com 60% da capacidade produtiva instalada do país; seguida pela indústria, com 21% do volume total, enquanto a agropecuária representa 19% do volume total.

Figura 1 – Unidades produtoras e capacidade instalada por tipo de substrato



Fonte: Elaborado pelo autor com dados de CIBIOGÁS (2024).

Contudo, a agropecuária representa o maior número de unidades produtoras do país, ou seja, existe um grande número de plantas de biogás de pequeno porte, que levam o setor a apresentar a menor capacidade produtiva instalada quando comparado ao demais setores. Esse cenário reforça a importância que deve ser dada para o avanço à interiorização, abrangendo principalmente pequenos e médios produtores, quando se refere aos substratos oriundos da agropecuária para a geração de biogás no Brasil.

A Associação Brasileira do Biogás – ABiogás (2020), define o biogás como “uma mistura de gases produzida pela decomposição biológica de matéria orgânica na ausência de oxigênio”. A composição química do biogás é constituída, principalmente, de: metano, CH₄ (40 – 75%); dióxido de carbono, CO₂ (15 – 60%); água (5 – 10%); sulfeto de hidrogênio, H₂S (0 – 0,02%); e outros compostos-traços,

como siloxanos (0 – 0,06%) (ABIOGÁS, 2021). Contudo, essa composição pode variar dependendo do substrato de origem utilizado no processo de digestão. Pode ocorrer a partir de matérias-primas como resíduos agroindustriais/sucroenergético (vinhaça, torta de filtro, bagaço e palha), agropecuários (abatedouros e dejetos animais) e urbanos/saneamento (esgoto sanitário, resíduos sólidos urbanos em aterros) (ABIOGÁS, 2020).

O biometano, é o produto obtido a partir da purificação ou *upgrading* do biogás, esse processo aumenta o teor de metano pela retirada de contaminantes como o sulfeto de hidrogênio (H_2S), o dióxido de carbono (CO_2), e compostos-traços como siloxanos, vapor de água, nitrogênio (N_2) e hidrogênio (H_2), obtendo um gás com poder calorífico superior (PCS) comparável ao do gás natural (ABIOGÁS, 2021).

Contexto Regulatório

Para a comercialização do biometano e sua utilização em veículos, residências, indústrias e comércio ele deve atender às especificações estabelecidas pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - ANP, conforme as Resoluções ANP nº 886/2022 e nº 906/2022.

Ademais, novas diretrizes têm surgido com o objetivo de impulsionar a produção e uso de biocombustíveis no Brasil. A Lei nº 14.134/2021, conhecida como a Nova Lei do Gás, vem com o objetivo de modernizar o setor de gás natural no Brasil, visando aumentar a concorrência, atrair investimentos e reduzir custos; também possibilitou que o biometano possa ser injetado em toda rede de gasodutos permitindo o atendimento da demanda nacional com um gás natural renovável e verde. Adicionalmente, a Lei Combustível do Futuro (Lei nº 14.993/2024), estabeleceu um novo marco regulatório para o setor de biocombustíveis. Por fim, em 2025 foi sancionada a Lei nº 15.103/2025, a qual institui o Programa de Aceleração da Transição Energética – PATEN, que visa ampliar o acesso ao crédito para promoção da modernização da infraestrutura energética nacional.

Diante desse arcabouço legal e do aumento da concentração de siloxanos no biogás, o foco desse trabalho reside no estudo desses compostos. Nesse sentido, orienta-se pelo que preconiza a ANP através da Resolução Nº 886/2022, que

estabelece as especificações do controle de qualidade do biometano oriundo de aterros sanitários e de ETE destinado ao uso veicular e às instalações residenciais, industriais e comerciais, com destaque para os siloxanos conforme destacado no artigo 5º da referida resolução:

Art. 5º Os produtores de biometano deverão realizar as análises dos teores de siloxanos, clorados e fluorados em laboratório próprio ou de terceiros que possua:

I - acreditação dos ensaios de que trata o caput ou de qualquer outro ensaio segundo a norma ABNT NBR ISO/IEC 17025, pela Coordenação Geral de Acreditação (Cgcre) do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro), e cadastro no órgão ambiental competente; ou

II - sistema de gestão da qualidade implementado que atenda, no mínimo, os requisitos definidos no Anexo III.

§ 1º A documentação referente aos requisitos de que trata o inciso II do caput deverá estar à disposição da ANP.

§ 2º A frequência de análise dos teores de siloxanos, clorados e fluorados deve ser:

I - mensal, quando o resultado da última determinação for menor ou igual a setenta e cinco por cento do valor limite; ou

II - semanal, quando o resultado da última determinação for maior que setenta e cinco por cento do valor limite (ANP, 2022a).

Os Siloxanos no Biogás: Caracterização, Fontes e Riscos Operacionais

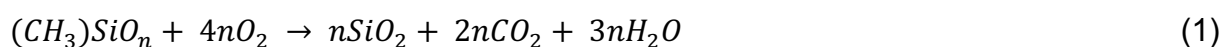
Dentre os componentes indesejáveis presentes no biogás, existem os siloxanos que impedem a aplicação direta do biogás. Recentemente, uma atenção especial vem sendo dada a esses compostos devido o aumento da concentração dos mesmos no biogás (INSTITUTO 17, 2022). Eles têm sido expressivamente encontrados nos resíduos urbanos e em águas residuárias. Isso se deve ao fato de

que os siloxanos são compostos voláteis amplamente utilizados na composição de produtos de consumo como desodorantes, cosméticos, detergentes, lubrificantes, agentes antiespumantes, tintas, produtos farmacêuticos e na medicina (SANTOS *et al.*, 2022; INSTITUTO 17, 2022).

Os siloxanos presentes no esgoto doméstico não são degradados durante a digestão anaeróbica e, devido à sua elevada afinidade com partículas sólidas e à alta volatilidade, acabam sendo incorporados ao biogás (INSTITUTO 17, 2022).

Os siloxanos, são moléculas com uma estrutura de oxigênio-silício (Si-O-Si), onde cada átomo de Si carrega dois grupos orgânicos, principalmente grupos metil, etil ou fenil. Dependendo de sua massa molecular, os siloxanos podem ser classificados como metilsiloxanos voláteis lineares (Lz) ou cíclicos (Dz), polidimetilsiloxanos (PDMS) ou poliétermetilsiloxanos (PEMS) e entre estes, os metilsiloxanos voláteis (MSVs), em especial, o octametilcyclotetrassiloxano (D₄) e o decametilciclopentassiloxano (D₅) são os mais frequentemente encontrados no biogás. O D₄ representa aproximadamente 60% do total de siloxanos no biogás de aterros e lodos de esgoto. O D₄ e D₅ juntos representam até 90% do total de siloxanos encontrados no biogás de aterros ou esgoto (GOMES *et al.*, 2025; RUILING *et al.*, 2017).

Os siloxanos representam um risco operacional relevante, pois, durante a combustão do biogás em altas temperaturas, ocorre a quebra da ligação Si-C, com formação de dióxido de silício e silicatos, conforme a reação mostrada na Equação 1.



Esses compostos, de natureza cerâmica e abrasiva, depositam-se nas superfícies internas de equipamentos como câmaras de combustão, turbinas, motores, compressores e trocadores de calor, provocando aumento do desgaste, redução da vida útil dos componentes e perda de eficiência operacional, em razão da obstrução de passagens e da diminuição da transferência de calor. Além disso, em determinadas condições de temperatura e pressão, os compostos de silício orgânico podem polimerizar, formando depósitos pastosos nas paredes dos equipamentos (GOMES *et al.*, 2025; INSTITUTO 17, 2022).

Esses efeitos comprometem os sistemas de geração de energia, por isso o monitoramento e o controle das concentrações de siloxanos são essenciais tanto para atender às especificações dos fabricantes de equipamentos quanto aos limites estabelecidos pela Resolução ANP nº 886/2022 para o biogás e o biometano provenientes de ETEs e RSU, o que reforça a importância da análise desses compostos também na produção do biometano (GOMES *et al.*, 2025; INSTITUTO 17, 2022).

Principais Metodologias de Amostragem de Siloxanos em Biogás e Biometano

A determinação de siloxanos em biogás e biometano constitui um dos maiores desafios analíticos associados ao aproveitamento energético desse setor, sobretudo em razão das baixas concentrações em que esses compostos se encontram e de suas propriedades físico-químicas, como elevada volatilidade e forte afinidade por superfícies sólidas (SANTOS *et al.*, 2022).

Nesse contexto, as metodologias de amostragem e análise assumem papel central, sendo frequentemente apontadas na literatura como o principal gargalo para a obtenção de resultados confiáveis e reprodutíveis. Erros nessa etapa podem comprometer toda a cadeia de monitoramento, controle de qualidade e tomada de decisão tecnológica, especialmente quando se trata de adequar o biogás para conversão em biometano ou para uso direto em sistemas de geração de energia (SANTOS *et al.*, 2022; AGARWAL *et al.*, 2025).

A etapa de amostragem é particularmente crítica, pois os siloxanos tendem a se volatilizar facilmente e a se adsorver nas paredes de recipientes e dispositivos de coleta. Assim, os métodos empregados devem minimizar perdas, evitar contaminações e preservar a composição original do gás até o momento da análise. Entre as metodologias disponíveis, destacam-se quatro abordagens principais: absorção em fase líquida por meio de lavadores de gás (*impingers*), tubos de adsorção em fase sólida, sacos de amostragem e *canisters* (recipientes de metal), cada qual com vantagens, limitações e níveis distintos de aplicabilidade (SANTOS *et al.*, 2022; GOMES *et al.*, 2025).

As metodologias de amostragem de siloxanos na fase gasosa classificam-se em diretas e indiretas. As metodologias diretas dispensam etapas de extração e preparo da amostra, o que reduz a propagação de erros analíticos, além de serem mais rápidas e simples, permitindo a coleta do gás como um todo, incluindo os siloxanos e os demais componentes do biogás, como ocorre no uso de *canisters* e sacos de amostragem. Já as metodologias indiretas baseiam-se na extração dos siloxanos a partir da passagem do gás por meios líquidos ou sólidos, como nos casos de *impingers* e tubos de adsorção. No contexto brasileiro, apenas as metodologias indiretas com *impingers* e tubos de adsorção possuem normatização, conforme as normas ABNT NBR 16560/2017 e NBR 16561/2017 (ARRHENIUS *et al.*, 2019; PIECHOTA, 2021; SANTOS *et al.*, 2022; GOMES *et al.*, 2025).

O método de amostragem por *impingers* (borbulhadores) baseia-se na absorção dos siloxanos em solventes orgânicos, como hexano, metanol ou tolueno, por meio do borbulhamento do gás. Trata-se do método de referência normatizado pela ABNT NBR 16560. Sua principal vantagem reside na elevada eficiência de captura e na compatibilidade direta com técnicas cromatográficas. Entretanto, apresenta desafios operacionais, como a necessidade de resfriamento para evitar a volatilização do solvente, o manuseio de substâncias orgânicas tóxicas que requer o uso de equipamento de proteção individual e uma logística mais complexa para transporte e armazenamento das amostras, o que pode limitar sua aplicação em trabalhos de campo remotos e/ou extensos (ABNT, 2017a; SANTOS *et al.*, 2022; GOMES *et al.*, 2025).

Os tubos de adsorção em fase sólida representam uma alternativa amplamente empregada devido à sua praticidade e portabilidade. Nesse método, o gás passa por um tubo preenchido com materiais adsorventes, como carvão ativado, sílica gel ou polímeros porosos do tipo Tenax, capazes de reter os siloxanos presentes na corrente gasosa. Entre as principais vantagens estão a facilidade de uso em campo e a dispensa de solventes durante a coleta. Contudo, esses sistemas estão sujeitos ao risco de saturação do adsorvente, conhecido como *breakthrough*, especialmente quando volumes elevados de gás ou concentrações mais altas de siloxanos são amostrados. (SILVA, 2020; PIECHOTA, 2021; GOMES *et al.*, 2025).

Os sacos de amostragem, como os confeccionados em Tedlar® *bag*, baseiam-se na coleta direta do gás e apresentam custo relativamente baixo e simplicidade

operacional. No entanto, estudos apontam que a estabilidade dos siloxanos nesse tipo de recipiente é limitada, ocorrendo perdas significativas por adsorção nas paredes do saco em poucas horas após a coleta. Essa limitação compromete a confiabilidade dos resultados, restringindo o uso desse método a situações muito específicas ou a análises qualitativas preliminares (SANTOS et al., 2022; AGARWAL et al., 2025).

Os *canisters* de aço inoxidável consistem em recipientes rígidos nos quais o gás é coletado sob vácuo. Essa metodologia apresenta elevada estabilidade da amostra, baixo risco de adsorção e possibilidade de reutilização do equipamento, sendo considerada uma das mais robustas para amostragem de compostos traço em gases. Em contrapartida, o alto custo inicial dos *canisters* e a necessidade de procedimentos rigorosos de limpeza para evitar contaminação cruzada limitam sua adoção em larga escala, especialmente em aplicações rotineiras ou com recursos financeiros limitados (ARNOLD; KAJOLINNA, 2010; INSTITUTO 17, 2022; GOMES et al., 2025).

Técnicas Analíticas para Quantificação de Siloxanos no Biogás e suas Implicações

Após a etapa de amostragem, a quantificação dos siloxanos requer técnicas analíticas capazes de identificar e quantificar esses compostos que estão em concentrações muito baixas. A cromatografia gasosa é amplamente reconhecida como uma técnica robusta, confiável e mais utilizada para a análise de siloxanos em amostras de biogás e biometano. A técnica tem como fundamento a separação dos compostos voláteis analisados, o que possibilita a quantificação de cada componente de interesse nos sistemas de detecção acoplados (INSTITUTO 17, 2022).

Nessa técnica, a amostra é introduzida no cromatógrafo de gasoso e conduzida por um gás inerte, denominado gás de arraste, ao longo de uma coluna de separação até o detector. A separação dos componentes ocorre em função das diferentes interações estabelecidas entre os analitos e a fase estacionária da coluna de separação em contraste com sua afinidade pela fase móvel gasosa. Após a separação, cada componente é direcionado ao sistema de detecção, que converte o sinal químico em um cromatograma. Nesse registro, os picos obtidos correspondem

à resposta do detector e são proporcionais à concentração dos respectivos componentes presentes na amostra. O intervalo de tempo compreendido entre a injeção da amostra e a separação máxima de cada analito é denominado tempo de retenção, sendo característico de cada substância sob condições experimentais definidas. Esse tempo depende diretamente de variáveis como o tipo de coluna cromatográfica, a temperatura do injetor e da coluna, bem como a vazão do gás de arraste, sendo esses fatores fundamentais tanto para a identificação quanto para a quantificação dos compostos analisados (RAHMAN *et al.*, 2015).

Entre os detectores mais empregados na análise de siloxanos destacam-se o espectrômetro de massas e o detector de ionização por chama. A espectrometria de massas apresenta elevada seletividade, permitindo a identificação individual dos diferentes tipos de siloxanos, além de alta sensibilidade, possibilitando a determinação desses compostos em concentrações traço (RAHMAN *et al.*, 2015; INSTITUTO 17, 2022). A Cromatografia Gasosa acoplada à Espectrometria de Massas (GC-MS) permite a separação cromatográfica dos diferentes tipos de siloxanos, como D4 e D5, que são encontrados em maior quantidade no biogás oriundo de RSU e ETEs, bem como sua identificação e quantificação individualizada, o que é fundamental para avaliações detalhadas de risco operacional e para o controle de qualidade do biogás e do biometano (SILVA, 2020; AGARWAL *et al.*, 2025). Entretanto, a GC-MS constitui um sistema analítico mais complexo, com custos elevados tanto de aquisição do equipamento, quanto de operação e manutenção. Contudo, esse é o método analítico recomendado pela NBR 16560 para a quantificação de siloxanos após amostragem por *impingers*.

Uma alternativa é o uso da Cromatografia Gasosa com Detector de Ionização de Chama (GC-FID). Esse método caracteriza-se por maior robustez operacional, simplicidade de manutenção e menor custo, quando comparado a GC-MS. Estudos desenvolvidos pelo Instituto 17 (2022) mostraram que é viável fazer ajustes no método desenvolvido em GC-MS e realizar a transferência para a GC-FID, desde que sejam consideradas e respeitadas as particularidades operacionais e analíticas inerentes a esse tipo de detector (INSTITUTO 17, 2022).

Outrossim, especialmente em contextos que demandam respostas mais rápidas, a determinação do silício total por espectrometria de absorção atômica (AAS) tem sido utilizada. Essa abordagem fornece uma estimativa global da concentração

de compostos de silício orgânico presentes no gás, sem discriminar os diferentes tipos de siloxanos. Embora menos detalhada, essa técnica pode ser útil como ferramenta de triagem ou monitoramento preliminar, sobretudo quando associada a um cenário com limites operacionais (SANTOS et al., 2022).

Outra proposta foi desenvolvida por Arnold e Kajolinna (2010) que conduziram um estudo experimental de monitoramento *on-line* para detectar siloxanos e outros contaminantes em biogás gerados em aterros e estações de tratamento na Finlândia. O método experimental desenvolvido pelos pesquisadores baseia-se na combinação da GC-PID e um analisador de gás FT-IR (Espectroscopia por Infravermelho com Transformada de Fourier) multicomponente para monitoramento *on-line* da matriz do biogás em campo. Para quantificar os siloxanos, compostos orgânicos voláteis (VOCs) e o sulfeto de hidrogênio (H_2S), os pesquisadores utilizaram um cromatógrafo gasoso (GC) portátil (Perkin Elmer Photovac Voyager). Este sistema contava com uma configuração de três colunas (incluindo Supelcowax 10™ e Carboxen B) e um detector de fotoionização (PID). O equipamento FT-IR foi utilizado para determinar as concentrações dos componentes principais, como metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), além da amônia (NH_3). A análise dos espectros foi realizada por meio de software específico e referências de gases de testes produzidos em laboratório. As medições de campo foram realizadas *in loco* em seis locais: dois aterros sanitários em operação, um aterro desativado e três plantas de biogás de diferentes portes e com diferentes tipos de alimentação, permitindo capturar as flutuações nas concentrações de siloxanos conforme as condições do processo. Em casos específicos onde alguns compostos não podiam ser detectados pelo GC-PID, as amostras foram coletadas em tubos adsorventes (Tenax TA) e analisadas posteriormente em laboratório via GC-MS. A integração dessas tecnologias permitiu a obtenção de informações instantâneas e simultâneas sobre a qualidade do gás e a presença de contaminantes, mostrando a viabilidade de uma metodologia de monitoramento contínuo, *in situ*.

A correta caracterização das concentrações de siloxanos é essencial para subsidiar a escolha do método para remoção desses compostos. Essa etapa é indispensável para a conversão do biogás em um biometano de qualidade ou para seu uso seguro em sistemas de geração de energia (BRASIL, 2015).

As tecnologias de remoção, ou *clean-up*, incluem principalmente processos de adsorção em leitos fixos, frequentemente utilizando carvão ativado ou materiais porosos especializados, cuja eficiência depende diretamente da concentração de siloxanos, do volume de gás tratado e da viabilidade econômica do sistema.

Portanto, as metodologias de amostragem e análise de siloxanos não devem ser compreendidas apenas como etapas laboratoriais isoladas, mas como componentes estratégicos para um sistema de gestão da qualidade do biometano produzido a partir do biogás. Esses fatores trazem impactos diretos para a aplicação do biometano visando sua garantia operacional com eficiência energética, durabilidade dos equipamentos, conformidade regulatória e sustentabilidade no aproveitamento energético do biogás (BRASIL, 2015; PIECHOTA, 2021).

MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho caracteriza-se como uma revisão bibliográfica sistemática, com o objetivo de mapear e analisar o estado da arte sobre as principais metodologias de análise de siloxanos em biogás e biometano, com foco na aplicabilidade e nos desafios para o cenário brasileiro.

A estratégia de busca para a pesquisa foi conduzida em bases de dados científicas reconhecidas, como Scielo, Google Acadêmico e repositórios de universidades brasileiras, no período compreendido entre 2020 e 2025, priorizando a literatura mais recente e relevante para a área. As palavras-chave utilizadas nas buscas foram combinações, utilizando operadores booleanos, dos seguintes termos, em português e inglês: “siloxanos” AND “biogás” AND “análise”; “siloxanos” AND “biometano” AND “amostragem”; “siloxanes” AND “biogas” AND “sampling”; e “ABNT NBR 16560”.

Em relação aos critérios de seleção e análise, foram selecionados artigos científicos, teses, dissertações e normas técnicas que abordassem diretamente: i) a caracterização e os impactos dos siloxanos; ii) metodologias de amostragem (*impingers*, tubos de adsorção, *canisters* e sacos de amostragem); iii) técnicas analíticas para quantificação (GC-MS, GC-FID, AAS e GC-PID); e iv) o contexto regulatório, desafios e fronteiras tecnológicas para a matriz brasileira de biogás.

O material coletado foi analisado, sintetizando as informações para identificar as principais métodos de análises químicas, fronteiras tecnológicas e os desafios técnicos e econômicos na detecção de siloxanos no biogás para produção de biometano, conforme proposto no objetivo do estudo.

RESULTADOS

Os resultados da revisão bibliográfica confirmam a criticidade do monitoramento de siloxanos para a expansão segura do mercado de biometano no Brasil, especialmente após a promulgação da Lei do Combustível do Futuro (BRASIL, 2024). A análise dos estudos recentes revelou um consenso sobre os desafios e apontou inovações promissoras.

Em se tratando de desafios técnicos e econômicos, tem-se como principal desafio técnico a etapa de amostragem (SANTOS *et al.*, 2022). A natureza volátil e a baixa concentração dos siloxanos exigem métodos que garantam a integridade da amostra, minimizando perdas por adsorção ou degradação. Embora a amostragem por *impingers* seja o método normatizado pela ABNT NBR 16560, ela apresenta desvantagens logísticas, como a necessidade de manuseio e transporte de solventes orgânicos e o resfriamento da amostra.

Do ponto de vista econômico, o alto custo dos equipamentos analíticos de referência, como o GC-MS, e a necessidade de pessoal técnico qualificado, representam uma barreira significativa para a implementação de rotinas de monitoramento em pequenos e médios produtores e também em cooperativas. Ademais, a aplicação prática das metodologias de análise no Brasil é dificultada pela dispersão geográfica das plantas, adicionalmente, a carência de laboratórios acreditados são dificuldades podem limitar a interiorização do biometano no Brasil, um dos objetivos da política energética nacional (SANTOS, 2022; BUENO *et al.* 2025).

Os estudos indicam que a inovação para a matriz do biogás se concentra no desenvolvimento de métodos de amostragem portáteis, e na busca por sistemas de monitoramento contínuo em campo. Esses sistemas, embora de alto custo inicial, são cruciais para a gestão, em tempo real, da qualidade do biogás, permitindo a

otimização dos processos de remoção e garantindo a conformidade do biometano injetado na rede.

CONCLUSÕES

A consolidação do biometano como vetor estratégico na transição energética brasileira é indissociável do rigor técnico na determinação de siloxanos no biogás, uma vez que a integridade analítica desse processo é o que garante a viabilidade e segurança operacional do biocombustível.

Desse modo, o presente trabalho, por meio de uma revisão sistemática, alcançou seu objetivo ao mapear as principais metodologias de análise de siloxanos considerando os desafios e fronteiras tecnológicas para garantir a qualidade do biometano no cenário energético brasileiro atual.

A principal conclusão é que, embora a NBR 16560 forneça um método robusto, por *impingers*, os desafios logísticos e econômicos para sua aplicação em larga escala, especialmente em pequenos e médios produtores, são significativos. Isso cria uma lacuna tecnológica que está sendo preenchida por inovações, as quais consideram o uso de tubos de adsorção modificados e o desenvolvimento de sistemas de monitoramento contínuo.

A contribuição científica deste estudo reside em consolidar o estado da arte e destacar a necessidade de pesquisas futuras focadas no desenvolvimento e validação de métodos de amostragem e análises de baixo custo e alta portabilidade; implementação de estudos exploratórios de aplicabilidade de novos materiais adsorventes no contexto das matrizes de biogás brasileiras; e por fim, programas de incentivo à criação de laboratórios regionais especializados e acreditados para análise de siloxanos, possibilitando a interiorização do biometano.

Em síntese, a expansão do setor depende da superação de barreiras regulatórias, logísticas e, crucialmente, da qualidade do gás com o avanço na padronização e na acessibilidade das análises químicas de siloxanos. Esse é um passo fundamental para garantir que o biometano cumpra seu papel estratégico como alternativa viável e segura na matriz energética brasileira.

REFERÊNCIAS

- AGARWAL, A. et al. From proof to practice – Sampling and analysis for siloxanes in biogas. **Bioresource Technology**, v. 399, p. 122585, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2025.132463>.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Resolução ANP No. 886**, de 29 de setembro de 2022, Estabelece a Especificação e as Regras para Aprovação do Controle da Qualidade do Biometano Oriundo de Aterros Sanitários e de Estações de Tratamento de Esgoto Destinado ao Uso Veicular e às Instalações Residenciais, Industriais e Comerciais, a ser Comercializado no Território Nacional; Diário Oficial da União (DOU), Brasília, ed. 186, de 29/09/2022, p. 47. 2022a.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Resolução ANP nº 906**, de 18 de novembro de 2022, Dispõe sobre as Especificações do Biometano Oriundo de Produtos e Resíduos Orgânicos Agrossilvipastoris e Comerciais Destinado ao Uso Veicular e às Instalações Residenciais e Comerciais a ser Comercializado em Todo o Território Nacional; Diário Oficial da União (DOU), Brasília, de 24/11/2022. 2022b.
- ARNOLD, M.; KAJOLINNA, T. Development of on-line measurement techniques for siloxanes and other trace compounds in biogas. **Waste Management**, v. 30, n. 6, p. 1011-1017, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.11.030>.
- ARRHENIUS, K.; FISCHER, A.; BÜKER, O. Methods for sampling biogas and biomethane on adsorbent tubes after collection in gas bags. **Applied Sciences**, v. 9, n. 6, 1171, 2019. <https://doi.org/10.3390/app9061171>.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16560**: Biogás e biometano – Determinação de siloxanos por cromatografia em fase gasosa e amostragem com impingers. Rio de Janeiro, 2017a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16561**: Biometano - Determinação de siloxanos por cromatografia em fase gasosa e amostragem com tubo de dessorção térmica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO BIOGÁS (ABiogás); CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS (CIBiogás). **O Potencial Brasileiro do Biogás**.

2020. Disponível em: https://abiogas.org.br/wp-content/uploads/protectedfiles/6390e394c734a95f3032a2da_NOTA-TECNICA_POTENCIAL_ABIOGAS.pdf. Acesso em: dez. 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO BIOGÁS (ABiogás); CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS (CIBiogás). **Purificação do Biogás**. 2021. Disponível em: https://abiogas.org.br/wp-content/uploads/protectedfiles/6390e010fff0622dd8caa248_nota-tecnica-purificacao-biogas-vf.pdf. Acesso em: dez. 2025.
- BRASIL. **Decreto nº 11.003, de 22 de março de 2022**. Institui a Estratégia Federal de Incentivo ao Uso Sustentável de Biogás e Biometano. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 23 mar. 2022.
- BRASIL. **Lei nº 14.134**, de 8 de abril de 2022. Dispõe sobre as atividades relativas ao transporte de gás natural [...]. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ano 159, n. 66, p. 1-5, 9 abr. 2021.
- BRASIL. **Lei nº 14.993**, de 8 de outubro de 2024. Dispõe sobre a promoção da mobilidade sustentável de baixo carbono e a captura e a estocagem geológica de dióxido de carbono; e altera a Lei nº 9.478, de 6 de agosto de 1997, e a Lei nº 10.303, de 31 de outubro de 2001. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 9 out. 2024.
- BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogás. **Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto**; organizadores, Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ); autores, Bruno Silveira ... [et al.]. – Brasília, DF : Ministério das Cidades, 2015. Disponível em: <https://www.giz.de/en/downloads/probiogas-guia-etes.pdf>. Acesso em: dez. 2025.
- BUENO, C. S. *et al.* Biogas upgrading to biomethane in Brazil: Networks, technologies, and industrial pathways. **Sustainable Futures**, Volume 10, 101423. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2025.101423>.
- CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS – BIOGÁS (CIBIOGÁS). **Panorama do Biogás no Brasil 2024**. Relatório Técnico nº 001/2024 – Foz do Iguaçu, CIBiogás, 2024. Disponível em: https://abiogas.org.br/wp-content/uploads/protectedfiles/6390e010fff0622dd8caa248_nota-tecnica-purificacao-biogas-vf.pdf.

- [content/uploads/2025/06/PANORAMA-DO-BIOGAS-2024.pdf](#). Acesso em: dez. 2025.
- CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS (CIBiogás). **Panorama do Biogás no Brasil**. 2024. Disponível em: [https://abiogas.org.br/wp-content/uploads/2025/06/PANORAMA-DO-BIOGAS-2024.pdf](#). Acesso em: dez. 2025.
- GOMES, C. M. B. *et al.* Da Amostragem à Purificação: Metodologias e Técnicas para Avaliação de Siloxanos no Biogás. **Química Nova**, 48(4), 2025. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20250093>.
- INSTITUTO 17. **Avanços em métodos de amostragem e análise de siloxanos em biogás e biometano**. Programa de Energia para o Brasil – BEP. Relatório técnico 04-2022. São Paulo/SP: Instituto 17, 2022. Disponível em: [https://abiogas.com.br/wp-content/uploads/protectedfiles/Avanços%20em%20métodos%20de%20amostragem%20e%20análise%20de%20siloxanos%20em%20biogás%20e%20biometano%20\(2022\).pdf](https://abiogas.com.br/wp-content/uploads/protectedfiles/Avanços%20em%20métodos%20de%20amostragem%20e%20análise%20de%20siloxanos%20em%20biogás%20e%20biometano%20(2022).pdf). Acesso em: dez. 2025.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Renewables 2025: Analysis and Forecast to 2030**. Paris: IEA, 2025. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/renewables-2025>. Acesso em: dez. 2025.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL (UNIDO). **Roadmap tecnológico do Biogás**. Brasília/DF, 2020.
- PIECHOTA, G. Siloxanes in biogas: approaches of sampling procedure and GC-MS method determination. **Molecules**, v. 26, n. 7, 1953, 2021. <https://doi.org/10.3390/molecules26071953>.
- RAHMAN, M. M. *et al.* Basic Overview on Gas Chromatography Columns. *In Analytical Separation Science*. 2015. <https://doi.org/10.1002/9783527678129.assep024>.
- RUILING, G.; SHIKUN, C.; ZIFU, L. Research progress of siloxane removal from biogas. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 10, n. 1, 2017. <https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20171001.3043>.
- SANTOS, J. M. B. *et al.* Metodologias de amostragem de siloxanos em biogás e biometano: análise crítica e aplicabilidade no cenário brasileiro. **Engenharia**

Sanitária e Ambiental, v. 27, n. 6, p. 1063-1074, 2022.

<https://doi.org/10.1590/S1413-415220210174>.

VIEIRA, J. F. G. **Perfil dos siloxanos em biogás e biometano gerados em aterro sanitário**. 2022. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.