SENSORES DE BAIXO CUSTO APLICADOS AO MONITORAMENTO DE METANO EM BIOGÁS: UMA REVISÃO DA LITERATURA

Melissa Manuely Mindelo de Sousa[1], Risete Maria Queiroz Leão Braga[1], Carlos Antônio Neves[1], Jaqueline Sarmento dos Santos[1], Tiago Moisés Valle Freitas[1]

[1] *Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil (melissasousa2211@gmail.com)*

Resumo: Este trabalho apresenta uma revisão da literatura sobre o uso de sensores de baixo custo para o monitoramento do metano no biogás. Foram analisados oito estudos, publicados entre 2019 e 2024. O sensor MQ-4 foi o mais empregado, mostrando-se viável para medição em tempo real, porém limitado pela umidade, pela sensibilidade cruzada, pela corrosão e pela baixa seletividade. Apontam-se como melhorias a calibração com gás padrão, a proteção física e o uso combinado de sensores.
Palavras-chave: biogás; sensores MQ; metano; digestão anaeróbia; calibração de sensores

INTRODUÇÃO

O biogás, gerado pela digestão anaeróbia de resíduos orgânicos, constitui uma fonte de energia renovável de crescente interesse no contexto da transição energética e da valorização de resíduos. É um gás composto predominantemente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), além de gases minoritários, como o sulfeto de hidrogênio (H_2S), sendo o teor de metano o principal indicador de sua qualidade energética (Angelidaki et al., 2018).

O monitoramento da composição do biogás é tradicionalmente realizado por cromatografia gasosa, técnica reconhecida por sua precisão, porém associada a elevado custo de aquisição e manutenção, necessidade de operação especializada e baixa portabilidade (Araujo et al., 2024). Tais características limitam sua aplicação em sistemas de pequena escala e em contextos de recursos limitados, nos quais a medição contínua e em campo é desejável. Nesse cenário, sensores de gás de baixo custo, em particular os da série MQ, têm sido investigados como alternativa acessível para a detecção de metano (Furuta et al., 2022).

Os sensores MQ, baseados na tecnologia de semicondutor de óxido metálico (MOS, do inglês *metal oxide semiconductor*), funcionam por meio da variação da resistência elétrica de um elemento sensível de dióxido de estanho (SnO_2) na presença de determinados gases (Furuta et al., 2022). Entre suas vantagens, destacam-se o baixo custo, a facilidade de integração com plataformas microcontroladas, como o Arduino, e a possibilidade de medição em tempo real (Yang et al., 2019). Quando adequadamente calibrados, esses dispositivos podem alcançar acurácia aceitável em relação a instrumentos de referência em aplicações de alta concentração de metano (Nagahage; Nagahage; Fujino, 2021).

Em contrapartida, sua aplicação enfrenta limitações relevantes. A resposta dos sensores é bastante influenciada pela temperatura e pela umidade, condição crítica em digestores, cujos gases costumam estar saturados de vapor d'água, podendo reduzir significativamente a sensibilidade do dispositivo (Molleman et al., 2024; Furuta et al., 2022). A relação entre tensão e concentração é não linear, exigindo calibração cuidadosa, uma vez que curvas obtidas de datasheets tendem a apresentar desempenho insatisfatório em condições reais (Rahma; Suweni Muntini; Sugriwan, 2024). Soma-se a isso a sensibilidade cruzada a outros gases presentes no biogás, como o H_2S, que pode interferir na resposta ao metano (Butturini; Fonollosa, 2022), a corrosão dos componentes decorrente da exposição direta ao biogás, que compromete a durabilidade dos sensores (Iswanto et al., 2021), e a deriva de longo prazo decorrente do envelhecimento do sensor, ainda pouco caracterizada na literatura, inclusive em sensores MOS análogos, como o TGS2611 (Shah et al., 2023). Como estratégia de mitigação, estudos recentes têm explorado a calibração assistida por aprendizado de máquina, sobretudo para ampliar a faixa de detecção dos sensores em baixas concentrações (Mitchell; Cox; Lewis, 2024).

Esse conjunto de potencialidades e limitações evidencia a importância de compreender melhor o desempenho dos sensores MQ no contexto do biogás. No entanto, ainda são poucos os trabalhos que reúnem e comparam diferentes sensores, métodos de calibração e suas respectivas limitações.

Diante disso, este trabalho apresenta uma revisão da literatura sobre o uso de sensores MQ de baixo custo no monitoramento de metano em sistemas de biogás, com o objetivo de mapear os principais sensores empregados, os métodos de calibração adotados, os

sistemas microcontrolados utilizados e as principais limitações reportadas nos estudos.

MATERIAL E MÉTODOS

A presente pesquisa foi desenvolvida por meio de uma revisão da literatura com foco em sensores de baixo custo aplicados ao monitoramento de biogás, com ênfase na detecção de metano. As etapas de seleção dos estudos são apresentadas na Figura 1, cujo fluxograma foi adaptado do modelo PRISMA 2020 (Page et al., 2021).

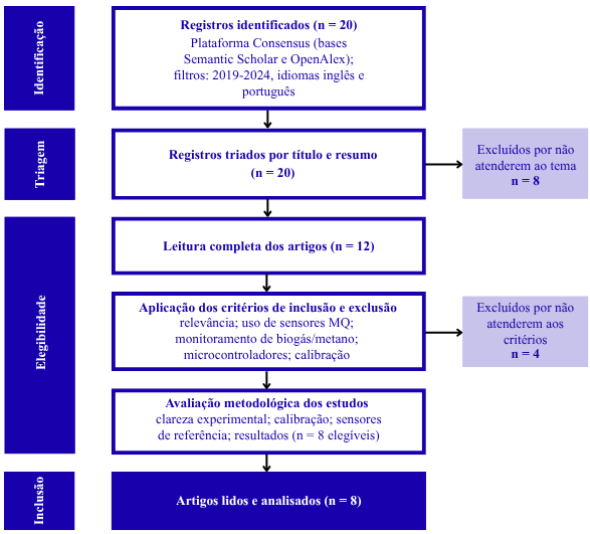

Figura 1. Fluxograma da seleção dos estudos, adaptado de Page et al. (2021).

O levantamento bibliográfico foi realizado por meio da plataforma Consensus (CONSENSUS, 2026), uma ferramenta de busca acadêmica assistida por inteligência artificial que agrega literatura indexada em bases de dados como *Semantic Scholar* e *OpenAlex*, permitindo a recuperação semântica de literatura científica relevante. Foram utilizadas combinações das palavras-chave "*biogas sensor*", "MQ", "*methane detection*" e "*low-cost gas sensor*", visando identificar estudos relacionados ao uso de sensores MQ aplicados à detecção de metano em sistema de biogás.

Como critérios de refinamento, foram considerados artigos publicados entre 2019 e 2024, em inglês e português, priorizando estudos com relevância temática relacionados ao monitoramento de biogás, sistemas microcontrolados e metodologias de calibração de sensores. Destaca-se que a plataforma Consensus retorna, por padrão, os artigos de maior relevância semântica para a consulta realizada, e não a totalidade dos estudos disponíveis sobre o tema (CONSENSUS, 2026). Dessa forma, o conjunto inicial de registros corresponde ao recorte priorizado pela ferramenta, o que constitui uma limitação inerente ao método de busca adotado.

A partir da busca, foram identificados 20 estudos potencialmente relevantes. Na etapa de triagem, foram lidos os títulos e resumos, e 8 trabalhos foram excluídos por não apresentarem relação direta com o tema proposto, restando 12 artigos. Em seguida, esses artigos foram submetidos à leitura completa e avaliados conforme os critérios de inclusão e exclusão previamente definidos.

Os critérios de inclusão contemplaram estudos envolvendo sensores MQ aplicados à detecção de metano, ao monitoramento de biogás, microcontroladores e procedimentos de calibração experimental. Foram excluídos trabalhos sem metodologia experimental clara, artigos sem dados relevantes para análise e estudos fora do contexto de monitoramento de biogás. Após a aplicação desses critérios, foram excluídos mais 4 trabalhos, resultando em 8 artigos selecionados para a análise final, os quais foram utilizados para comparar as metodologias de calibração, os tipos de sensores empregados, os sistemas microcontrolados utilizados e as principais limitações observadas nos estudos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os estudos selecionados para esta revisão foram organizados no Quadro 1, que apresenta os autores, títulos, objetivos e sensores utilizados em cada trabalho, permitindo uma visão panorâmica das abordagens metodológicas adotadas na literatura sobre monitoramento de gases em sistemas de biogás e detecção de vazamentos.

Quadro 1. Estudos selecionados para a revisão da literatura.

Autor(es)	Objetivo	Sensores
Yang et al. (2019)	Validar dispositivo portátil de baixo custo para medir a composição de metano no biogás	MQ-4; BME280
Rojas-Escobar et al. (2019)	Calibrar sensores para quantificar CH_4 e H_2 em tempo real na saída de biorreatores de fluxo contínuo	MQ-4; MQ-8
Fakra et al. (2020)	Desenvolver sistema simples e de baixo custo para medir altas concentrações de gases na gaseificação de biomassa	MQ-4; MQ-8; BME280
Nagahage, Nagahage e Fujino (2021)	Avaliar sistema de monitoramento contínuo de metano com amostragem multicanal	TGS2611; MQ-4; SHT3x
Iswanto et al. (2021)	Desenvolver sistema de monitoramento de biogás com sensores MQ e Arduino Mega 2560	MQ-4; MG-811; MQ-136; termopar tipo K
Negara et al. (2024)	Monitorar em tempo real CH_4 e H_2S em digestores anaeróbios por 21 dias	MQ-4; MQ-136; termopar tipo K
Ainur Rahma, Suweni Muntini e Sugriwan (2024)	Comparar o desempenho dos sensores na detecção de metano e avaliar a confiabilidade de cada um	TGS2611; MQ-4; DHT11
Mukhtarov et al. (2024)	Comparar a seletividade e o desempenho dos sensores na detecção de metano e outros gases	MQ-2; MQ-4

Nota: MQ-4, TGS2611 e MQ-2 detectam metano (o MQ-2 também GLP, propano e hidrogênio); MQ-8 (hidrogênio); MG-811 (dióxido de carbono); MQ-136 (sulfeto de hidrogênio); BME280, SHT3x e DHT11 (temperatura e umidade); termopar tipo K (temperatura).

Fonte: elaborado pelos autores (2026).

A análise dos estudos apresentados no Quadro 1 evidencia que o sensor MQ-4 (metano) foi o mais amplamente empregado nas pesquisas, sendo utilizado nos oito trabalhos analisados, o que reflete sua popularidade decorrente ao baixo custo, e facilidade de integração com microcontroladores e sensibilidade ao metano. Em todos os casos, os sistemas foram integrados a plataformas Arduino ou equivalentes, o que reforça a tendência de desenvolvimento de soluções acessíveis e portáteis para o monitoramento de gases em contextos em que equipamentos convencionais, como cromatógrafos gasosos, são inviáveis economicamente ou operacionalmente. Os resultados obtidos pelos pesquisadores indicam, de modo geral, que esses sensores são viáveis para aplicações de monitoramento em tempo real, embora apresentem limitações técnicas que variam conforme a metodologia adotada, o tipo de gás analisado e as condições ambientais de operação.

Yang et al. (2019) demonstraram que o MQ-4, integrado ao Arduino UNO, respondeu linearmente a concentrações de metano entre 4.000 e 110.000 ppm, com erro absoluto médio de 0,69 ± 0,55% em relação ao cromatógrafo a gás. O sistema custou US$ 37 e confirmou durabilidade após 10 meses de uso, tendo como limitação a necessidade de secagem prévia do gás, pois a umidade reduz significativamente o desempenho do sensor.

Rojas-Escobar et al. (2019) ao calibrarem os sensores MQ-4 e MQ-8 (hidrogênio) para biorreatores de fluxo contínuo para o biogás, obtiveram curvas exponenciais com R^2 de até 0,9993, identificando 52% de CH_4 e 23% de H_2 em amostras reais em menos de uma hora. Contudo, o MQ-8 exigiu cerca de dez minutos de ventilação entre medições para retornar à linha de base, inviabilizando o monitoramento contínuo.

Fakra et al. (2020) compararam três técnicas de amostragem para os sensores MQ-4 e MQ-8. Uma com câmara fechada hermeticamente, na segunda o gás era injetado diretamente nos sensores em ambiente aberto e a terceira uma cápsula parcialmente fechada. Os resultados demonstraram que a última técnica foi a mais eficaz. O método alcançou R^2 de 0,9973(CH_4) e 0,9472 (H_2), erros absolutos médios de 0,40% e 0,84%, e linearidade para até 20% de CH_4 e 13,33% de H_2. Como restrições, destacaram a necessidade de calibração prévia com gás padrão e a dependência do volume da cápsula para o desempenho ótimo.

Nagahage, Nagahage e Fujino (2021) propuseram a metodologia mais robusta da revisão, integrando os sensores TGS2611 (metano) e MQ-4 em uma câmara de vácuo automatizada com amostragem multicanal. O TGS2611 superou o MQ-4 em todas as faixas, registrando NRMSE entre 0,07 e 0,12 para concentrações de 3% a 7% de CH_4, enquanto o MQ-4 saturou por exceder seu limite de detecção. Embora validado por uma operação contínua de dois meses em digestores anaeróbios, o custo superior do TGS2611 (US$ 35,84 vs. US$ 1,29 do MQ-4) pode limitar sua adoção em larga escala.

Ainur Rahma, Suweni Muntini e Sugriwan (2024) também confirmaram a superioridade do TGS2611 sobre o MQ-4 em uma comparação direta: o primeiro apresentou erro relativo entre 0,169% e 0,348%, contra 14,97% a 25,12% do segundo. O resultado reforça que o desempenho do MQ-4 depende da metodologia de calibração e das condições de amostragem.

Iswanto et al. (2021) integraram quatro sensores ao Arduino Mega 2560 para monitoramento de biorreatores de biogás, obtendo desvio padrão de 5,0 e linearidades entre 0,17% e 1,19%. A limitação mais crítica foi a corrosão acelerada dos componentes pela exposição direta ao biogás, exigindo substituição antes do terceiro experimento e evidenciando a necessidade de proteção em ambientes corrosivos.

Negara et al. (2024) monitoraram CH_4 e H_2S em digestores anaeróbicos por meio dos sensores MQ-4 e MQ-136, respectivamente, integrados ao microcontrolador ATmega 2560 (plataforma Arduino), por 21 dias contínuos. A concentração máxima de metano no substrato de esterco bovino puro (3.488 ppm) foi superior à do substrato misto (1.624 ppm). Os autores apontaram como principais lacunas a ausência de um instrumento de referência para validação e a faixa de medição restrita à capacidade nominal dos sensores.

Por fim, Mukhtarov et al. (2024) realizaram uma análise comparativa entre os sensores MQ-2 e MQ-4 na faixa de 300 a 10.000 ppm, evidenciando diferenças em sua seletividade. O MQ-2 apresenta ampla sensibilidade a gases combustíveis como GLP, propano, metano e hidrogênio, enquanto o MQ-4 é otimizado especificamente para metano e gás natural. Na detecção de metano, ambos produziram resultados equivalentes utilizando uma razão de calibração de 9,83 em ar limpo. Como limitação, o estudo destaca a sensibilidade cruzada de ambos os sensores, cuja interferência varia segundo o modelo e as concentrações ambientais. Essa característica é relevante em ambientes de biogás, onde múltiplos gases coexistem simultaneamente, podendo comprometer a seletividade das medições e introduzir erros na quantificação do gás alvo caso não sejam adotadas estratégias de calibração e filtragem.

CONCLUSÃO

Esta revisão analisou oito estudos publicados entre 2019 e 2024 sobre o uso de sensores de baixo custo da série MQ integrados a microcontroladores para o

monitoramento de metano em sistemas de biogás. De modo geral, os resultados mostram que esses sensores são uma alternativa viável e acessível aos equipamentos convencionais, como os cromatógrafos a gás, especialmente em locais onde o custo elevado desses instrumentos inviabiliza seu uso.

O sensor MQ-4 foi o mais utilizado nos estudos e apresentou bom desempenho para detecção de metano quando combinado com técnicas adequadas de calibração e controle de umidade. Os demais sensores da série, como o MQ-8 para hidrogênio e o MQ-136 para sulfeto de hidrogênio, mostraram-se igualmente úteis quando empregados em conjunto com o MQ-4, ampliando a capacidade de monitoramento dos sistemas desenvolvidos.

As limitações mais frequentes identificadas foram a sensibilidade cruzada dos sensores a outros gases presente no ambiente, a corrosão causada pela exposição prolongada ao biogás, a ausência de comparação com instrumentos de referência em parte dos trabalhos e a faixa de detecção limitada dos sensores em sua configuração padrão. Para contornar essas questões, os estudos apontam como necessárias a calibração periódica com gás padrão, a proteção física dos componentes e o uso combinado de múltiplos sensores.

Conclui-se que os sistemas baseados em sensores MQ e Arduino são soluções promissoras para o monitoramento de biogás em pequena escala, mas ainda precisam avançar em precisão, durabilidade e seletividade para serem adotados de forma mais ampla em aplicações industriais e de campo.

REFERÊNCIAS

ANGELIDAKI, Irini; TREU, Laura; TSAPEKOS, Panagiotis; LUO, Gang; CAMPANARO, Stefano; WENZEL, Henrik; KOUGIAS, Panagiotis G. Biogas upgrading and utilization: current status and perspectives. **Biotechnology Advances**, v. 36, n. 2, p. 452-466, 2018.

AINUR RAHMA, Mellynia; SUWENI MUNTINI, Melania; SUGRIWAN, Iwan. Methane (CH4) Detection System Using The TGS2611 Sensor and MQ-4 Sensor. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 2780, n. 1, p. 012034, jun. 2024.

ARAUJO, Matheus N.; VARGAS, Sarah R.; SOARES, Laís A.; TRINDADE, Laís F.; FUESS, Lucas T.; ADORNO, Maria Angela T. Rapid method for determination of biogas composition by gas chromatography coupled to a thermal conductivity detector (GC-TCD). **International Journal of Environmental Analytical Chemistry**, v. 104, n. 20, p. 8690-8707, 2024.

BUTTURINI, Andrea; FONOLLOSA, Jordi. Use of metal oxide semiconductor sensors to measure methane in aquatic ecosystems in the presence of cross-interfering compounds. Limnology and Oceanography: Methods, v. 20, p. 710-720, 2022.

CONSENSUS. How Consensus works. 2026. Disponível em: https://help.consensus.app/en/articles/9922673-how-consensus-works. Acesso em: 21 maio 2026.

FAKRA, Damien Ali Hamada; DOLLY, ARMEL Sylvain Andriatoavina; Ny Aina Manitra Nany Razafindralambo; KAMIL, abdallah Amarillis; ANDRIAMAMPIANINA, José Marie Michel. A simple and low-cost integrative sensor system for methane and hydrogen measurement. **Sensors International**, v. 1, p. 100032, 1 jan. 2020.

FURUTA, Daniel; SAYAHI, Tofigh; LI, Jinsheng; WILSON, Bruce; PRESTO, Albert A.; LI, Jiayu. Characterization of inexpensive metal oxide sensor performance for trace methane detection. **Atmospheric Measurement Techniques**, v. 15, p. 5117-5128, 2022.

ISWANTO; MA'ARIF, Alfian; KEBENARAN, Bilah; MEGANTORO, Prisma. Design of gas concentration measurement and monitoring system for biogas power plant. **Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science**, v. 22, n. 2, p. 726–732, 2021.

MITCHELL, Hazel Louise; COX, Simon J.; LEWIS, Hugh G. Calibration of a low-cost methane sensor using machine learning. Sensors, v. 24, n. 4, art. 1066, 2024.

MOLLEMAN, Bastiaan; ALESSI, Enrico; PASSANITI, Fabio; DALY, Karen. Evaluation of the applicability of a metal oxide semiconductor gas sensor for methane emissions from agriculture. Information Processing in Agriculture, v. 11, n. 4, p. 573-580, 2024.

MUKHTAROV, Farrukh; Nurmaxamad, Jo'rayev, Sanjar Zokirov; Munira Sadikova; Azamatjon Muhammadjonov e Nargizakhon Iskandarova. Analysis of automation through sensors through gas sensors in different directions. *In*: E3S WEB OF CONFERENCES. **E3S Web Conf.** EDP Sciences, 2024.

NAGAHAGE, Isura Sumeda Priyadarshana; NAGAHAGE, Ekanayaka Achchillage Ayesha Dilrukshi; FUJINO, Takeshi. Assessment of the applicability of a low-cost sensor–based methane monitoring system for continuous multi-channel

sampling. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 193, n. 8, p. 509, 23 jul. 2021.

NEGARA, I. Gede Artha, Daud Simon Anakottapary, Ida Bagus Gde Widiantara, and Luh Putu Ike Midiani. Integrated microcontroller mq sensors for monitoring biogas: Advancements in methane and hydrogen sulfide detection. **Jurnal Teknosains**, v. 13, n. 2, p. 140–151, 19 maio 2024.

PAGE, Matthew J. et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. BMJ, v. 372, art. n71, 2021.

ROJAS-ESCOBAR, Silvino; GONZÁLEZ-CONTRERAS, Brian; JARAMILLO-QUINTERO, Patricia and GUEVARA-GARCÍA, José Antonio. Low-cost method for quantification of hydrogen and methane in continuous flow bioreactors. **Journal of Research and Development**, v. 5, n. 16, p. 1-6, 2019.

SHAH, Adil; LAURENT, Olivier; LIENHARDT, Luc; BROQUET, Grégoire; RIVERA MARTINEZ, Rodrigo; ALLEGRINI, Elisa; CIAIS, Philippe. Characterising the methane gas and environmental response of the Figaro Taguchi Gas Sensor (TGS) 2611-E00. **Atmospheric Measurement Techniques**, v. 16, n. 13, p. 3391-3419, 2023.

YANG, Shunchang Shunchang Yang, Yikan Liu a,NaWua, Yingxiu Zhang, Spyros Svoronos, Pratap Pullammanappallil. Low-cost, Arduino-based, portable device for measurement of methane composition in biogas. **Renewable Energy**, v. 138, p. 224–229, 2019.