

## **BIOGÁS: ANÁLISE DOS PONTOS POSITIVOS E NEGATIVOS E SUA CONTRIBUIÇÃO PARA ATINGIR OS OBJETIVOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (ODS)**

Glaucia Lorena Ferreira<sup>1</sup>  
Sandra Regina Masetto Antunes<sup>1</sup>  
Eder Carlos Ferreira de Souza<sup>1</sup>

*<sup>1</sup>Universidade Estadual de Ponta Grossa*

DOI: 10.47168/rbe.v29i4.832

### **RESUMO**

O crescimento populacional reflete-se no aumento da demanda energética, no esgotamento de recursos naturais, na geração de resíduos e no aumento da emissão de gases de efeito estufa. Estes fatores causam impactos ambientais e desequilíbrio do meio. Uma forma de minimizar esses impactos é o aproveitamento do biogás. Com o crescimento do número de unidades geradoras em território nacional, o objetivo dessa revisão é avaliar os pontos positivos do biogás, bem como os pontos negativos (presença de H<sub>2</sub>S no biogás), avaliando as técnicas disponíveis para a dessulfurização do biogás. A versatilidade de aplicação do biogás, aliada a possibilidade de gestão correta de resíduos orgânicos, contribui para a inserção e cumprimento dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS).

Palavras-chave: Análise SWOT; Bioenergia; Gestão de resíduos; Gestão ambiental; Dessulfurização.

### **ABSTRACT**

Population growth is reflected in increased energy demand, depletion of natural resources, waste generation and increased greenhouse gas emissions. These factors cause environmental impacts and imbalance in the environment. One way to minimize these impacts is to use biogas. With the growth of generating units in the national territory, the objective of this review is to evaluate the positive and negative points of biogas. As the H<sub>2</sub>S content is a constraint, one aim is to survey techniques for desulfurization (removal of H<sub>2</sub>S) from biogas. The versatility of biogas application, combined with the possibility of managing organic waste, contributes to the insertion and fulfillment of the Sustainable Development Goals (SDGs).

Keywords: SWOT analysis; Bioenergy; Waste management; Environmental management; Desulfurization.

## 1. INTRODUÇÃO

A globalização, o crescimento populacional e a exploração irresponsável dos recursos naturais têm contribuído para o acúmulo de poluentes no meio ambiente. Essas práticas resultaram em problemas ambientais graves, como aumento do efeito estufa, mudanças climáticas e chuva ácida.

A gestão sustentável de resíduos e a transição energética para fontes mais limpas e renováveis estão alinhadas com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), estabelecidos pela ONU, promovendo a proteção ambiental, eficiência no uso dos recursos naturais e a mitigação dos impactos negativos provenientes de atividades antrópicas. Ao adotar hábitos mais sustentáveis, segue-se na direção de um futuro mais próspero e equilibrado para as presentes e futuras gerações, sendo este um dos objetivos principais da educação ambiental. Nesse sentido, a geração e consumo de biogás tem influência direta em 12 dos 17 ODS, desde a matéria-prima utilizada para sua produção (proveniente de resíduos) até o uso final (energético, por exemplo).

Buscando converter o problema em oportunidade, a digestão anaeróbia da matéria orgânica resulta no biogás, um combustível renovável, rico em CH<sub>4</sub>, que pode ser utilizado como fonte de energia mecânica, térmica, elétrica, bem como para transformação em gás natural renovável (GNR).

Mesmo apresentando vantagens no uso e exploração do biogás, ainda existem desafios a serem superados para sua plena inserção na matriz energética. A presença de H<sub>2</sub>S no biogás é um desafio comum, uma vez que pode estar associado a problemas de corrosão, desgaste em motores e geradores, emissões ambientais e diminuição do valor energético do gás. Entretanto, existem diferentes tecnologias disponíveis para a remoção de H<sub>2</sub>S do biogás, incluindo absorção, adsorção e processos biológicos, sendo que estes processos minimizam os problemas associados à sua presença no biogás. Pensando nisso, o objetivo da presente revisão é realizar o mapeamento científico do panorama brasileiro do biogás, bem como sua aderência aos ODS, e a evolução das tecnologias disponíveis para a dessulfurização do biogás, apresentada na literatura.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foi realizado o mapeamento das publicações existentes sobre o biogás e as tecnologias disponíveis para remoção de H<sub>2</sub>S do biogás. Inicialmente foi realizada busca nas bases de periódicos: Scopus e

WoS (Web of Science), utilizando como palavras-chave a combinação: (“biogas”) AND (“desulfurization” OR “desulfurisation” OR “desulphurization” OR “desulphurisation”), sem levar em consideração dados duplicados. A busca foi realizada até o ano de 2023, retornando 675 registros na Scopus e 448 na WoS. No entanto, foi necessária a redução desses dados a partir de critérios de filtragem: foram desconsiderados livros, capítulos de livros e documentos de conferência, ou seja, foram considerados apenas *article* e *review*; foram considerados apenas os resultados no idioma inglês.

### 3. CONTEXTUALIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DO BIOGÁS

O crescimento populacional contribui significativamente para o consumo energético e geração de resíduos ricos em matéria orgânica, como por exemplo: (i) resíduos agrícolas: dejetos de animais, resíduos de ração, colheita e culturas energéticas; (ii) resíduos sólidos urbanos (RSU); (iii) subprodutos industriais: glicerina, resíduos de indústrias alimentícias ou de separadores de gordura (WELLINGER; MURPHY; BAXTER, 2013). O processo de digestão anaeróbia (Figura 1) surge como alternativa para o manejo e gerenciamento adequado desses resíduos, transformando-os em biogás.

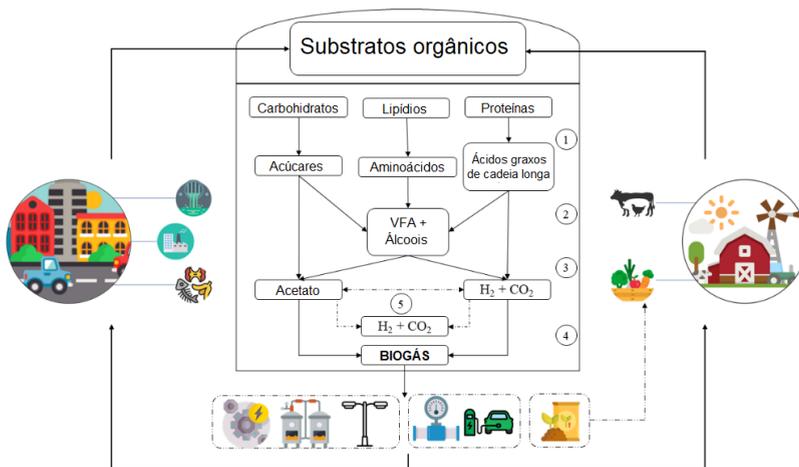


Figura 1 - Rota produtiva e aplicações do biogás e biometano

A conversão dos substratos em biogás é um processo bioquímico complexo, que envolve quatro etapas: (1) hidrólise, (2) acidogênese, (3) acetogênese e (4) metanogênese, nas quais há a interação da biomassa com um consórcio de microrganismos hidrolíticos, fermentativos, acetogênicos e metanogênicos que desempenham funções

distintas (MANYI-LOH et al., 2013).

Na primeira etapa, as substâncias orgânicas complexas (proteínas, carboidratos e lipídios) que não são facilmente metabolizadas por bactérias, são decompostas em monômeros solúveis, facilitando sua absorção pela parede celular das bactérias acidogênicas. A acidogênese, também chamada de fermentação, é uma etapa intermediária na qual as bactérias fermentativas convertem os monômeros solúveis em produtos terminais, como por exemplo, ácidos graxos voláteis (VFA), álcoois,  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2$ . Na terceira etapa, os microrganismos acetogênicos, produtores de  $\text{H}_2$ , metabolizam os materiais hidrolisados em ácido acético,  $\text{H}_2$  e  $\text{CO}_2$  (precursores do biogás). Finalmente, os produtos gerados na acidificação são transformados em  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$  (biogás) (LI; CHEN; WU, 2019).

O produto resultante deste complexo processo é o biogás bruto, que é constituído principalmente de  $\text{CH}_4$  (50% – 75%),  $\text{CO}_2$  (25% – 45%), traços de outros gases, como por exemplo,  $\text{N}_2$  e  $\text{O}_2$  (2% – 8%) e gases residuais ( $\text{H}_2$ ,  $\text{NH}_3$  e  $\text{H}_2\text{S}$ ). No entanto, sua composição é variada e dependente dos parâmetros operacionais (temperatura; pH; tempo de retenção hidráulica e taxa de carga orgânica; relação Carbono/Nitrogênio), tipo de biodigestor e as características do resíduo alimentado (PRAMANIKI et al., 2019; WELLINGER; MURPHY; BAXTER, 2013).

### 3.1 Panorama do biogás no Brasil

Em meados dos anos 2000 o biogás começou a despertar interesse como fonte combustível para geração de energia. Sua definição começou a permear de passivo ambiental para ativo energético (BLEY JR, 2015).

Um novo impulso à expansão do biogás no país veio quando o Ministério de Minas e Energia (MME) implantou o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas (PROINFA) – Lei nº 10.438/2002, atualizada pela Lei nº 10.762/2003. O objetivo do Programa, conforme Decreto nº 5.025/2004, foi aumentar a geração de energia elétrica a partir de três fontes: eólica, pequenas centrais hidrelétricas e biomassa (BRASIL, 2002, 2003, 2004). A partir destes incentivos, a instalação de novas unidades geradoras de biogás têm aumentado significativamente nos últimos anos (Figura 2).

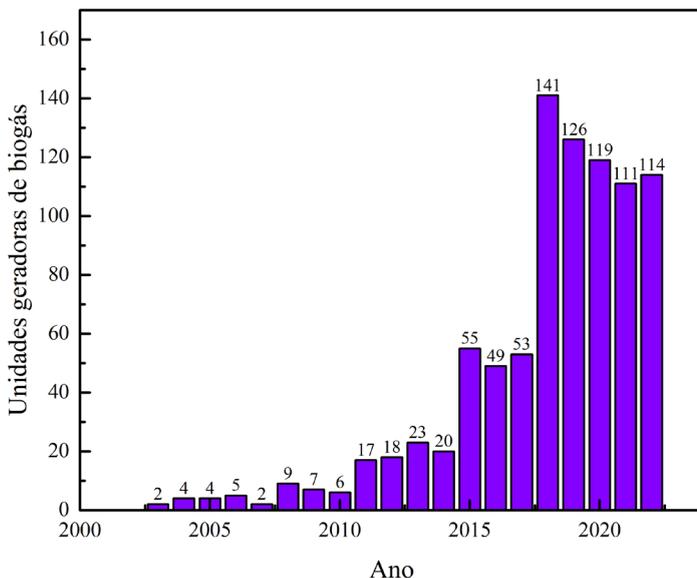


Figura 2 - Evolução no número de plantas de biogás em território nacional até o ano de 2022

No período de 2010 – 2017, a taxa anual de crescimento de plantas de biogás era de 30%, decorrente do desenvolvimento no conhecimento e entrada de novas tecnologias em território nacional. Esta evolução ainda pode ser observada entre os anos de 2018 – 2019, com crescimento de 31%. Já para o ano de 2022, houve crescimento de 22% quando comparado com o ano anterior, totalizando 885 plantas em operação no país (CIBIOGÁS, 2022a, 2023; UNIDO; CIBIOGÁS, 2021). Alguns eventos globais e nacionais (Tabela 1) podem ter contribuído direta para a expansão do biogás em território brasileiro.

O biogás é um valioso recurso energético, sendo utilizado na geração de energia térmica, elétrica, na alimentação de sistemas de refrigeração e, após o processo de upgrading (remoção de constituintes inertes ou de baixo valor, como CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S e H<sub>2</sub>O, por exemplo), pode ser injetado nas redes de gás natural ou ser usado como combustível veicular (biometano/gás natural renovável – GNR). No Brasil, a principal aplicação do biogás é na geração de energia elétrica (86%), seguido por energia térmica (11%), energia mecânica (0,7%) e como biometano/GNR (2,3%) (CIBIOGÁS, 2022b; EPA, 2022).

**Tabela 1 - Eventos globais e nacionais que contribuíram com a evolução do biogás no Brasil desde 2015**

Ano	Evento	Caráter	Características
2015	Foi adotada mundialmente a Agenda 2030	Global	Estabelecidos os 17 ODS para o Desenvolvimento Sustentável, (ALLEN; METTERNICHT; WIEDMANN, 2016).
	COP – 21	Global	Foi estabelecido o Acordo de Paris (sucessor do Protocolo de Kyoto), em que cada país concorda com o esforço comum de limitar o aquecimento global abaixo de 2°C, e eventualmente limitar o aumento da temperatura global a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais (WBA, 2018).
	Resolução ANP nº 8/2015, revogada pela Resolução ANP nº 906/2022	Nacional	Define o biogás e estabelece as especificações do biometano (ANP, 2015, 2022a).
2017	Resolução ANP nº 685/2017, revogada pela Resolução ANP nº 886/2022	Nacional	Estabelece regras para aprovação do controle da qualidade e a especificação do biometano, proveniente de aterros sanitários e de estações de tratamento de esgoto (ETE), para uso veicular (ANP, 2017, 2022b).
	Lei nº 13.576/2017 - Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio)	Nacional	Tem por objetivo contribuir para o cumprimento dos compromissos nacionais firmados no Acordo de Paris (BRASIL, 2017).
2020	PL nº 2193/2020 - Política Federal do Biogás e do Biometano	Nacional	Tem como intuito o desenvolvimento econômico mediante a gestão de resíduos, produção de combustíveis e o crescimento do mercado de biogás, biometano e biofertilizante (CÂMARA DOS DEPUTADOS, 2020).
2021	COP – 26	Global	Compromisso de reduzir 30% das emissões de CH4 até 2030, com base nos níveis de 2020 (MMA, 2022).
	Lei nº 14.134/2021 – Lei do Gás	Nacional	Institui as regras para o transporte de gás natural (GN) por meio de condutos, bem como, a importação e exportação de gás natural (GN) (BRASIL, 2021a).
	Decreto nº 10.712/2021	Nacional	Estabelece que o biometano e outros gases intercambiáveis com o gás natural (GN) devem passar por um tratamento regulatório equivalente ao gás natural (GN), e atendidas as especificações da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural (ANP) (BRASIL, 2021b).
2022	Lei nº 14.300/2022	Nacional	Marco legal para a micro e minigeração distribuída, ainda que já regulada pela ANEEL (BRASIL, 2022a).
	Decreto nº 11.003/2022	Nacional	Estabelece a Estratégia Federal de Incentivo ao Uso Sustentável de Biogás e Biometano (BRASIL, 2022b).

O Brasil é o país com maior potencial para geração de biogás no mundo, dispondo de grande diversidade de substratos e vasta extensão territorial. Estima-se que o país têm potencial teórico de geração de 84,6 bilhões de  $\text{Nm}^3 \text{ano}^{-1}$ . No entanto, considerando o recente cenário produtivo (2,8 bilhões de  $\text{Nm}^3 \text{ano}^{-1}$ ), o país aproveita apenas 3,3% desse potencial (CIBIOGÁS, 2022b).

Diversos estudos sobre o impacto de usinas de biogás estão sendo realizados, avaliando-se também o fator social, juntamente ao fator ambiental (CARVALHO et al., 2021). Outra forma de avaliar os impactos do biogás é fazer uma análise dos seus pontos fortes e pontos fracos.

#### 4. BIOGÁS: UMA ANÁLISE SWOT DOS PONTOS FORTES E PONTOS FRACOS

A análise SWOT tem sido amplamente utilizada nas pesquisas de planejamento energético. Isto porque auxilia na identificação, avaliação e entendimento das condições externas e internas da utilização de uma fonte energética. A análise SWOT estabelece basicamente dois pares de indicadores: (1) as forças (S) e fraquezas (W) são elementos internos (controláveis); (2) as ameaças (T) e oportunidades (O) são elementos externos (não controláveis) (MADURAI ELAVARASAN et al., 2020).

As forças (S) e oportunidades (O) são atributos positivos para alcançar os objetivos, enquanto as fraquezas (W) e ameaças (T) são atributos negativos. As forças (S) são o ativo empregado para eliminar as ameaças (W). Já as oportunidades (O) servem para superar as fraquezas (W) (KAMRAN; FAZAL; MUDASSAR, 2020). Nesse sentido, a contribuição da análise SWOT para o desenvolvimento sustentável do setor de biogás é: (i) construir as forças (S); (ii) explorar as oportunidades (O); (iii) mitigar as ameaças (T); (iv) ajustar/eliminar as fraquezas (W) (DYSON, 2004). As forças atuantes (S) e oportunidades (O) da utilização do biogás estão relacionadas na Tabela 2 e Tabela 3, respectivamente.

Tabela 2 - Análise dos pontos positivos (forças - S) no aproveitamento do biogás como fonte energética

Forças (S)		Referências
S01	Energia proveniente do tratamento de um passivo ambiental (resíduos da agricultura, pecuária e áreas urbanas). Descarte e destinação correta desses resíduos, evitando a contaminação do solo, água e ar.	(FIEP, 2016)
S02	Cogeração energética (energia mecânica, térmica, elétrica e veicular)	
S03	Redução da emissão de $\text{CH}_4$ da decomposição do material orgânico.	(PLANO, A.B.C, 2012)

**Tabela 2 - Análise dos pontos positivos (forças - S) no aproveitamento do biogás como fonte energética (cont.)**

Forças (S)		Referências
S04	Contribui para redução das emissões de GEEs.	(PLANO, A.B.C, 2012)
S05	A produção e uso de biogás proporciona redução nos custos com energia elétrica e insumos químicos.	
S06	Fonte adicional de renda para agricultores a partir da venda de eletricidade e calor.	(BRUDERMANN; MITTERHUBER; POSCH, 2015)
S07	Geração de empregos.	(OBAIDEEN et al., 2022)
S08	Aumento do acesso à energia nas áreas rurais proporciona maior qualidade na educação.	
S09	O processo de DA gera o digestato como subproduto. Pode ser usado como cama de animais e corretivo para solo (parte sólida); biofertilizante rico em nutrientes (parte líquida). Os produtos digeridos podem ser fonte de receita ou economia de custos.	(EPA, 2022)
S10	O tratamento de resíduos orgânicos reduz a propagação de doenças e odores.	(WBA, 2018)
S11	Recuperação de solos a partir da reciclagem de nutrientes, matéria orgânica e carbono.	
S12	Aumento do rendimento das culturas agrícolas a partir do uso de biofertilizante rico em nutrientes.	
S13	Fecha o ciclo produtivo de acordo com a economia circular a partir do uso de resíduos.	(XIMENES et al., 2021)

**Tabela 3 - Análise dos pontos positivos (oportunidades – O) no aproveitamento do biogás como fonte energética**

Oportunidades (O)		Referências
O01	Parceria entre órgãos governamentais, academia e setor privado para o desenvolvimento de tecnologias para o aproveitamento energético do biogás.	(FIEP, 2016)
O02	Contribui para o aumento da oferta de energias alternativas e descentralização energética.	
O03	Desenvolvimento de cursos de qualificação nos níveis técnicos, tecnológicos e superior.	
O04	Multifuncionalidade do biogás e do biofertilizante.	(BRUDERMANN; MITTERHUBER; POSCH, 2015)
O05	Desenvolvimento e crescimento regional, a partir da implementação do conceito de economia circular.	
O06	Mitigação das mudanças climáticas e cumprimento de agendas e compromissos internacionais.	(XIMENES et al., 2021)
O07	Chance de implementar cooperativas para a produção de biogás em escala local.	
O08	Potencial inexplorado de empresas agroalimentares em território nacional.	
O09	Aumentar a consciência global e nacional sobre a importância da implementação de metas relacionadas com o clima.	
O10	Fonte alternativa para fontes fósseis.	

Com relação à análise de pontos negativos à implantação do biogás (Tabela 4), identifica-se que elementos de gestão, estrutura, operação e manutenção interferem diretamente na difusão do biogás como fonte energética.

Tabela 4 - Análise dos pontos negativos ao aproveitamento do biogás como fonte energética

Ameaças (T)		Referências
T01	Produção e uso de outras fontes alternativas de energia.	(XIMENES et al., 2021)
T02	Baixa consciência social sobre o biogás.	
T03	Restrições legais ao uso de biofertilizante.	
Fraquezas (W)		Referências
W01	Em território nacional existem poucos fornecedores de equipamentos para produção de biogás.	(FIEP, 2016)
W02	Falta de conhecimento técnico e de mão-de-obra qualificada na área de bioprocessos e controle produtivo de biogás.	
W03	Altos custos de investimento e operação das plantas.	(BRUDERMANN; MITTERHUBER; POSCH, 2015)
W04	Protesto da comunidade local contra a existência de usinas de biogás nas proximidades de suas residências.	
W05	Dificuldades na gestão, controle e estabilização da tecnologia, uma vez que o biogás é gerado a partir de biomassas distintas.	(XIMENES et al., 2021)
W06	Não ter o controle direto do sistema.	
W07	Subsídios e concessões pouco desenvolvidos em território nacional.	
W08	Rendimentos diferentes na produção do biogás.	
W09	O biogás gerado possui em sua composição gases contaminantes, que causam corrosão (H <sub>2</sub> S) e diminuem o seu poder calorífico (CO <sub>2</sub> ). É necessária etapa de <i>upgrading</i> .	(AWE et al., 2017)

## 5. BIOGÁS: A PROBLEMÁTICA DA PRESENÇA DO H<sub>2</sub>S

### 5.1 Remoção do H<sub>2</sub>S do biogás

Pode inferir-se a partir das ameaças (T) e fraquezas (W) que, embora não seja componente da digestão anaeróbia, em alguns casos a etapa de sulfetogênese (Etapa 5 da Fig. 1) estará presente no meio reacional, ou seja, quando o meio possuir quantidades significativas de sulfato (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) este será reduzido por bactérias redutoras de sulfato (BRS ou MRS) em H<sub>2</sub>S (CASSINI; COELHO; PECORA, 2014; MADIGAN et al., 2016).

O H<sub>2</sub>S (CAS nº 7783-06-4) é um gás incolor, inflamável, extremamente nocivo ao meio ambiente e à saúde, e tem odor característico de ovo podre. É comumente chamado de gás de esgoto, gás sulfídrico ou gás de pântano. Além de ser gerado na decomposição bacteriana de materiais orgânicos, ocorre naturalmente em poços de petróleo, gás natural, atividades vulcânicas, fontes termais, águas subterrâneas,

bem como pode ser gerado em atividades antrópicas, como por exemplo, pela decomposição bacteriana de resíduos orgânicos de humanos e animais, processos de tratamento de curtume e produção de papel *kraft* (OSHA, 2005; WHO, 2003).

Os efeitos do H<sub>2</sub>S na saúde variam de acordo com o nível e tempo de exposição. Em baixos níveis de concentração é facilmente reconhecido por seu odor característico de “ovos podres”. No entanto, quando a exposição é contínua, ou em concentrações superiores a 100 ppm, a capacidade olfativa é temporariamente suprimida, dificultando assim uma pessoa sentir o cheiro do gás. Causa irritação nos olhos, nariz e garganta. Em concentrações moderadas pode causar maior irritação ocular e respiratória (tosse, dificuldade respiratória, líquido nos pulmões), dor de cabeça, tontura, náuseas e vômitos. As altas concentrações podem causar choque, convulsões, incapacidade respiratória, perda de consciência, coma e morte (GOVERNMENT OF ALBERTA, 2012; OSHA, 2005). No meio ambiente, se oxidado em grandes quantidades, em caldeiras ou em motores de combustão interna, o H<sub>2</sub>S se transforma em fonte de óxidos de enxofre (SO<sub>2</sub> e SO<sub>3</sub>, conhecidos como SO<sub>x</sub>), sendo liberados na atmosfera junto com gases de escape. A liberação de grandes concentrações de SO<sub>x</sub> pode prejudicar o crescimento e desenvolvimento de plantas, bem como, contribuir para o aumento da chuva ácida, que pode afetar ecossistemas sensíveis (EPA, 2023; PAGLINI; GANDIGLIO; LANZINI, 2022).

Além disso, a presença em nível traço pode afetar os equipamentos da cadeia produtiva do biogás, causando corrosão, incrustação e desgaste mecânico (WELLINGER; MURPHY; BAXTER, 2013). Portanto, dependendo da aplicação, o biogás necessita ser tratado. Basicamente o tratamento do biogás bruto envolve duas etapas: (i) filtragem, para remoção de elementos traço (remoção do H<sub>2</sub>S); (ii) purificação, para ajustar o poder calorífico (remoção do CO<sub>2</sub>) (RYCKE-BOSCH; DROUILLON; VERVAEREN, 2011).

O processo de dessulfurização (Tabela 5) pode ocorrer durante ou após a digestão anaeróbia, a partir de processos físicos, químicos ou biológicos (UNIDO, 2022).

Tabela 5 - Rotas tecnológicas para a dessulfurização do biogás

Técnica	Estágio	Processo
Microaeração	Durante a digestão anaeróbia	Biológico
Adição de agentes químicos	Durante a digestão anaeróbia	Químico
Absorção física e química	Após a digestão anaeróbia	Físico e Químico
Membranas	Após a digestão anaeróbia	Biológico
Biofiltro convencional (BF), filtro biológico (BTF) e biolavador (bioscrubber)	Após a digestão anaeróbia	Biológico
Adsorção	Após a digestão anaeróbia	Físico e Químico

A técnica de microaeração é baseada na conversão aeróbia do H<sub>2</sub>S em enxofre elementar (S<sub>8</sub>) a partir de um grupo de microrganismos sulfuroxidantes (*Thiobacillus*) (RYCKEBOSCH; DROUILLON; VERVAEREN, 2011). Apresenta eficiência superior a 90%, é de baixo custo, e pode ser realizada no próprio biodigestor, não havendo a necessidade de construção de unidade de dessulfurização (CABRAL, 2015; JENÍČEK et al., 2017). Como desvantagens da técnica podemos destacar: concentrações de 6%–12% de ar no biogás podem tornar a mistura explosiva, e pode inibir o processo de biodigestão. A oxidação do H<sub>2</sub>S pode gerar depósito de S<sub>8</sub> dentro do biodigestor, elevando o volume de lodo, o qual deve ser removido com frequência (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2022; RYCKEBOSCH; DROUILLON; VERVAEREN, 2011; WELLINGER; MURPHY; BAXTER, 2013).

Na técnica de adição de agentes químicos, o H<sub>2</sub>S pode ser reduzido com a adição de íons de ferro (Fe<sup>2+</sup> e Fe<sup>3+</sup>), na forma de cloreto de ferro (cloreto ferroso – FeCl<sub>2</sub> e cloreto férrico – FeCl<sub>3</sub>) e sulfato de ferro (FeSO<sub>4</sub>) (BRASIL, 2016; WELLINGER; MURPHY; BAXTER, 2013). Como vantagens do método temos: a adição de compostos de ferro não influencia negativamente a atividade biológica; ocorre aumento na produção de CH<sub>4</sub>; é positiva economicamente, com relação aos custos de investimento, pois, não há necessidade de instalações adicionais, apenas um tanque de alimentação para solução salina e um dosador (BRASIL, 2016). A desvantagem do método é que, dependendo das concentrações de H<sub>2</sub>S, os custos operacionais podem ser elevados, devido a altos consumos desses sais (BRASIL, 2016).

No processo de absorção física o H<sub>2</sub>S é dissolvido em água ou solventes orgânicos (AWE et al., 2017; KAPDI et al., 2005). Este método possui altas taxas de recuperação (99,9%) (FRARE; GIMENES; PEREIRA, 2009; KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2022; SCHOMAKER et al., 2000), mas apresenta um alto consumo de água e de produtos químicos, tornando o método menos atraente para plantas de pequena escala; outras desvantagens são a demanda energética para o bombeamento das soluções de lavagem e geração de efluente líquido que requer tratamento antes da disposição final (FRARE; GIMENES; PEREIRA, 2009; KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2022; SCHOMAKER et al., 2000).

A remoção de H<sub>2</sub>S por membranas é baseada no princípio de permeabilidade seletiva. O H<sub>2</sub>S é transportado através da membrana, enquanto o CH<sub>4</sub> fica retido (ALLEGUE; HINGE, 2014; IOVANE et al., 2014). Como desvantagem do método, estudos para H<sub>2</sub>S (H<sub>2</sub>S/CH<sub>4</sub>) são limitados pela toxicidade do gás e especificações de purificação mais altas, que dificilmente podem ser alcançadas apenas com o uso de membranas. Para obter alta separação, a quantidade de H<sub>2</sub>S deve ser baixa (≤1%) (PUDI et al., 2022).

A utilização de biofiltros contendo Bactérias Oxidantes de Enxofre (BOS) imobilizadas em um biofilme, na forma de um leito empacotado, permite a separação do  $H_2S$  como enxofre elementar ( $S_8$ ).

Uma técnica que apresenta estudos em número crescente é a adsorção, uma técnica baseada nas interações intermoleculares que ligam  $H_2S$  na superfície ativa de um sólido adsorvente, podendo ser classificada em fisissorção e quimissorção (ALLEGUE; HINGE, 2014; PAGLINI; GANDIGLIO; LANZINI, 2022).

No Brasil, no ano de 2019, 57% das unidades geradoras de biogás dispunham de sistemas para dessulfurização do biogás. As principais tecnologias eram: dessulfurização biológica (58%), absorção química (12%), adsorção em carvão ativado (9%) e limalha de ferro (6%) (MARTINEZ; BÜHRING; MÜLLER, 2019).

## 5.2 A problemática do $H_2S$ no biogás na literatura internacional

A pesquisa bibliográfica por “biogas” AND “desulfurization” OR “desulfurisation” OR “desulphurization” OR “desulphurisation” nas bases de dados resultou 516 registros na Scopus e 404 artigos na WoS. Após a junção das bases e exclusão dos documentos duplicados obteve-se 622 artigos. Desses artigos, observa-se que entre os anos de 1979–2007 não ocorreu produção científica significativa, no entanto, após esse período nota-se o crescimento no número de publicações. Ainda que possam ser observadas variações ao longo do tempo, percebe-se a tendência de crescimento da produção científica, cujo ápice foi atingido em 2022, quando foram publicados 66 artigos sobre o tema, cerca de 10,6% da produção total. Ainda pode ser verificada a taxa de crescimento percentual anual de 9,20%, com um incremento consolidado da produção científica nos últimos 15 anos, visto que aproximadamente 95% das publicações aconteceram nesse período.

Em relação à produção científica global, observa-se que a China (216) tem a maior frequência de publicações sobre esse tema, seguida de Espanha (87), Itália (45), Japão (39) Brasil (37) e Estados Unidos da América (37). Entretanto, no que se refere aos países mais citados, a Espanha (2653) apresenta a maior frequência de citações, seguida da China (1566) e Itália (1069). Observa-se ainda que a colaboração acontece em sua maioria entre autores do mesmo país, indicando a necessidade de maior interação entre a comunidade científica para a melhor difusão e desenvolvimento do tema. Com relação às afiliações das 819 entradas, das 10 de maior representatividade no número de publicações temos afiliações espanholas entre as quatro primeiras colocações: “Universitat Autònoma Barcelona”, “University of Valladolid”, “Universidad de Cádiz” e “Universitat Politècnica de Catalunya”, com um total de 75 publicações. Já com relação aos auto-

res mais relevantes, das 2003 entradas entre os 12 principais autores, nove autores são da Espanha: Cantero D, Gabriel D, Ramírez M, Almenglo F, FDZ-Polanco M, Gamisans X, Lafuente J, Díaz I e Muñoz R.

A nuvem de palavras (Figura 3) apresenta as palavras-chave mais citadas nos 622 artigos.



Figura 3 - Palavras mais frequentes obtidas da revisão bibliográfica sobre o tema biogás

As palavras-chave “hydrogen sulfide” (601), “sulfur” (466) e “methane” (216) representam os elementos que se deseja remover do sistema de biogás e o elemento de interesse, respectivamente. Já “bioreactor” (264) e “anaerobic digestion” (184) são palavras relacionadas com o processo de conversão da biomassa. Nesse sentido, a biomassa que aparece em destaque é vinculada a palavra-chave “sewage” (101). Por fim, ainda podem ser observadas palavras-chave “adsorption” (127) e “oxidation” (126) que estão relacionadas a processos de dessulfurização do biogás. A palavra “activated carbon” (76) aparece com menor frequência, sendo este adsorvente utilizado na remoção do  $H_2S$  no biogás.

## 6. BIOGÁS E OS ODS

O mundo enfrenta muitos desafios nas questões ambientais. Em setembro de 2015, líderes mundiais se reuniram na sede da Organização das Nações Unidas (ONU) a fim de decidir um plano de ação para erradicar a pobreza, proteger o planeta e garantir que a sociedade alcance paz e prosperidade. No entanto, a Agenda 2030, ou Agenda de Desenvolvimento Sustentável, só entrou em vigor no dia 1º de janeiro de 2016, com 17 ODS e 169 metas a serem cumpridas até

o ano de 2030 (UNODC, 2020).

A Agenda 2030 serve para orientar políticas públicas e esforços para o desenvolvimento local e global, exigindo mudanças para aumentar o bem-estar e prosperidade da sociedade, bem como abordar temas como a proteção ambiental e as mudanças climáticas. Nesse sentido, a sobrevivência e bem-estar são dependentes, em última instância, dos recursos naturais disponíveis no planeta (KATILA et al., 2019).

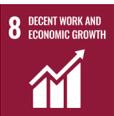
Sendo assim, a geração e uso do biogás/biometano converte o problema de um passivo ambiental em oportunidade de um ativo energético, mitigando problemas locais, regionais e globais, contribuindo para o desenvolvimento sustentável.

O biogás tem influência direta nos três pilares do ODS: econômico, social e ambiental, podendo ser enquadrado em 12 dos 17 ODS (Tabela 6) sendo as principais contribuições: aumento no uso de energia renovável, redução das mudanças climáticas, desenvolvimento da gestão de resíduos e criação de empregos (OBAIDEEN et al., 2022).

Tabela 6 - Contribuições do biogás para o desenvolvimento sustentável e cumprimento dos ODS (Objetivos de Desenvolvimento Sustentável) da ONU

ODS	Pilar do ODS	Contribuição do biogás Forças – S (Tabela 2) e Oportunidades – O (Tabela 3)
	Econômico	S05; S06; S07; S09.
	Econômico/Social	S10; S11; S12.
	Social	S03; S04; S10.
	Social	S08; O03.
	Ambiental	S10;

Tabela 6 - Contribuições do biogás para o desenvolvimento sustentável e cumprimento dos ODS (Objetivos de Desenvolvimento Sustentável) da ONU (cont.)

ODS	Pilar do ODS	CONTRIBUIÇÃO DO BIOGÁS Forças – S (Tabela 2) e Oportunidades – O (Tabela 3)
	Ambiental	S01; S02; O02; O10.
	Econômico	S07; O03; O05; O07.
	Econômico	O01; O03; O05; O07; O08.
	Social	S01; S03; S04; S07; S08; S10; S13; O02; O04; O05; O06.
	Ambiental	S01; S11; S13; O04.
	Ambiental	S03; S04; O02; O04; O06; O09.
	Ambiental	S11; S12.

No caso da problemática dos resíduos, o ODS 12 (Consumo e Produção Sustentáveis) incentiva a inclusão de práticas eficientes e sustentáveis de gestão de resíduos, incluindo sua redução, reciclagem e reutilização. A partir da redução da quantidade de resíduos orgânicos descartados e seu manejo correto, ocorre a impulsão deste objetivo. Além disso, os ODS 14 e 15 ressaltam a importância da conservação dos ecossistemas aquáticos e terrestres, envolvendo a diminuição da poluição e o incentivo da gestão sustentável dos recursos naturais.

O ODS 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima) realça a necessidade de redução das emissões de gases de efeito estufa (GEEs) e adoção de medidas frente as mudanças climáticas. A utilização do biogás/GNR contribui para a redução dos impactos negativos das atividades humanas em relação ao clima.

No que se refere ao suprimento da demanda e transição energética, principalmente para fontes de energia renovável, o ODS 7 (Energia Limpa e Acessível), busca ampliar o acesso a tais fontes, bem como, aumentar a eficiência energética. A digestão anaeróbia contribui para esse objetivo, uma vez que o biogás/GNR é uma fonte de energia limpa e renovável.

Já o ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura) é sustentado pela pesquisa e implantação de tecnologias da cadeia produtiva do biogás, que promovem a inovação e desenvolvimento de materiais/infraestruturas sustentáveis.

## 7. CONCLUSÕES

O aumento populacional, o desenvolvimento tecnológico e a demanda energética, aliados a outras atividades antrópicas, refletem na geração significativa de resíduos, seja em grandes centros urbanos ou no meio rural. Nesse sentido, se esses resíduos não receberem o manejo e gestão correta podem ocasionar impactos negativos à saúde e ao meio ambiente.

Os impactos negativos não são sentidos apenas em escala micro, são extrapolados à escala macro, ou seja, global. Pensando nisso, nos últimos anos têm-se percebido iniciativas visando a solução desses problemas, buscando alternativas para que o mundo e a sociedade se desenvolvam de maneira mais ambientalmente correta, limpa e sustentável.

Os ODS, propostos na Agenda 2030, são um conjunto de ações que visam a redução desses impactos negativos sob a sociedade. A geração e uso do biogás/biometano, um biocombustível, proveniente da biodigestão de matéria orgânica satisfaz diretamente 12 dos 17 ODS: 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 15.

Após realizar o levantamento bibliográfico e obter informações relacionadas aos fundamentos, aspectos históricos, perspectivas, aplicações e pontos positivos, fica claro que o biogás é uma fonte interessante para integrar a matriz energética nacional. No entanto, foi possível mapear também os pontos fracos, como por exemplo, a presença de H<sub>2</sub>S no biogás, que faz com que o uso do biogás ocorra de maneira lenta.

Nesse sentido, a comunidade científica busca meios de solucionar esse problema. O número de publicações relacionadas a desulfurização do biogás tem crescimento percentual anual de 9,20%. É

um tema multidisciplinar e estudado mundialmente, sendo os países de maior expressão a China, Espanha, Itália, Japão, Brasil e Estados Unidos da América; as universidades e autores espanhóis têm destaque.

A dessulfurização pode ocorrer durante ou após a digestão anaeróbia, e muitas técnicas são empregadas e estudadas. No entanto, a partir do mapeamento científico com a ferramenta de nuvem de palavras, foi possível observar maior evidência em estudos relacionados a oxidação do sulfeto a enxofre elementar e adsorção do H<sub>2</sub>S em adsorventes diversos.

## 8. AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro à pesquisa e pela bolsa de doutorado concedida; à Universidade Estadual de Ponta Grossa, por tornar possível o doutoramento da autora.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEGUE, L. B.; HINGE, J. Biogas upgrading Evaluation of methods for H<sub>2</sub>S removal. Danish technological institute, v. 31, p. 1-31, 2014.

ALLEN, C.; METTERNICHT, G.; WIEDMANN, T. National pathways to the Sustainable Development Goals (SDGs ): A comparative review of scenario modelling tools. Environmental Science and Policy, v. 66, p. 199–207, 2016.

ANP. Resolução ANP no 8, de 2 de fevereiro de 2015. Estabelece a especificação do Biometano contida no Regulamento Técnico ANP nº 1/2015. Brasil, 2015.

ANP. Resolução no 685, de 29 de junho de 2017. Estabelece as regras para aprovação do controle da qualidade e a especificação 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 em todo o território nacional. Brasil. 2017.

ANP. Resolução ANP no 906, de 18 de novembro de 2022. Dispõe sobre as especificações do biometano oriundo de produtos e resíduos orgânicos agrossilvopastoris e comerciais destinado ao uso veicular e às instalações residenciais e comerciais a ser comercializado em todo o território nacional. Brasil, 2022a.

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. Brasil, 2022b.

ARIA, M.; CUCCURULLO, C. Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, v. 11, p. 959–975, 2017.

AWE, O. W.; ZHAO, Y.; NZIHO, A.; MINH, D.P.; LYCZKO, N. A Review of Biogas Utilisation, Purification and Upgrading Technologies. *Waste and Biomass Valorization*, v. 8, p. 267–283, 2017.

BLEY JR, C. *Biogás a energia invisível*. 2. ed. São Paulo: CIBiogás-ER, 2015.

BRASIL. Lei no 10.438, de 26 de abril de 2002. Dispõe sobre a expansão da oferta de energia elétrica emergencial, recomposição tarifária extraordinária, cria o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), a Conta de Desenvolvimento Energético (CDE), dispõe sobre a universalização do serviço público de energia elétrica. Brasil, 2002.

BRASIL. Lei no 10.762, de 11 de novembro de 2003. Dispõe sobre a criação do Programa Emergencial e Excepcional de Apoio às Concessionárias de Serviços Públicos de Distribuição de Energia Elétrica. Brasil, 2003.

BRASIL. Decreto no 5.025, de 30 de março de 2004. Dispõe sobre o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica – PROINFA. Brasil, 2004.

BRASIL. *Biometano como combustível veicular*. 1. ed. Brasília: Ministério das Cidades, 2016.

BRASIL. Lei no 13.576, de 26 de dezembro de 2017. Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio). Brasil, 2017.

BRASIL. Lei no 14.134, de 8 de abril de 2021. Dispõe sobre as atividades relativas ao transporte de gás natural e sobre as atividades de escoamento, tratamento, processamento, estocagem subterrânea, acondicionamento, liquefação, regaseificação e comercialização de gás natural. Brasil, 2021a.

BRASIL. Decreto no 10.712, Dispõe sobre as atividades relativas ao transporte de gás natural e sobre as atividades de escoamento, tratamento, processamento, estocagem subterrânea, acondicionamento, liquefação, regaseificação e comercialização de gás natural. Brasil, 2021b.

BRASIL. Lei nº14.300, de 6 de janeiro 2022. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS). Brasil, 2022a.

BRASIL. Decreto nº11.003, de 21 de março de 2022. Institui a Estratégia Federal de Incentivo ao Uso Sustentável de Biogás e Biometano. Brasil, 2022b.

PLANO, A. B. C. Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2012.

BRUDERMANN, T.; MITTERHUBER, C.; POSCH, A. Agricultural biogas plants – A systematic analysis of strengths, weaknesses, opportunities and threats. *Energy Policy*, v. 76, p. 107–111, 2015.

CABRAL, C. B. G. Tecnologias de digestão anaeróbia com relevância para o Brasil: substratos, digestores e uso de biogás. 1. ed. Brasília: Ministério das Cidades, 2015.

CÂMARA DOS DEPUTADOS. PL nº2193, de 2020. Institui a Política Federal do Biogás e do Biometano. Brasil, 2020.

CARVALHO, M. L. F.; SANTOS, J. S.; OLIVEIRA, L. G. S.; NUNES, A. B. A. Impactos ambientais decorrentes do processo de instalação e operacionalização da Usina de Biogás GNR de Fortaleza (CE): a Educação Ambiental como via de transformação social. *Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA)*, v. 16, p. 227-247, 2021.

CASSINI, S. T.; COELHO, S. T.; GARCILASSO, V. P. Biogás–Biocombustíveis ANP. *Biocombustíveis no Brasil: fundamentos, aplicações e perspectivas*. Rio de Janeiro: Synergia, v. 1, p. 135-167, 2014.

CIBIOGÁS. BiogasMap. Disponível em: <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiODc2NTlhOGItOTc2Ny00ZDc1LWI5MTMtYjYwZTRiYyYjFiOWQ3liwidCI6ImMzOTg3Zml3LTQ5ODMtNDA2Ny1iMTQ2LTc3M-GU5MWE4NGViNSJ9&pageName=ReportSection6ed365e9760a-3c113b0d>>. Acesso em: 14 maio. 2022a.

CIBIOGÁS. Panorama do biogás no Brasil 2021. *CIBiogás (Brasil) Relatório Técnico nº001/2022*. Foz do Iguaçu: [s.n.].

CIBIOGÁS. Panorama do Biogás no Brasil 2022. *Relatório Técnico nº001/2023*. Foz do Iguaçu: [s.n.].

DYSON, R. G. Strategic development and SWOT analysis at the University of Warwick. *European Journal of Operational Research*, v. 152, n. 3, p. 631–640, 2004.

EPA. How Does Anaerobic Digestion Work ? Disponível em: <<https://www.epa.gov/agstar/how-does-anaerobic-digestion-work>>. Acesso em: 4 out. 2022.

EPA. Sulfur Dioxide Basics What is SO<sub>2</sub> and how does it get in the air ? Disponível em: <<https://www.epa.gov/so2-pollution/sulfur-dioxide-basics#:~:text=What are the environmental effects,which can harm sensitive ecosystems.>>. Acesso em: 31 maio. 2023.

FIEP. Oportunidades da Cadeia Produtiva de Biogás para o Estado do Paraná. Curitiba: Senai, 2016.

FRARE, L. M.; GIMENES, M. L.; PEREIRA, N. C. Process of sulfidric acid removal from biogas. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 14, p. 167-172, 2009.

GOVERNMENT OF ALBERTA. H<sub>2</sub>S, the killer. [s.l.: s.n.].

IOVANE, P.; NANNA, F.; DING, Y.; BIKSON, B.; MOLINO, A. Experimental test with polymeric membrane for the biogas purification from CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S. Fuel, v. 135, p. 352–358, 2014.

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.

KAMRAN, M.; FAZAL, M. R.; MUDASSAR, M. Towards empowerment of the renewable energy sector in Pakistan for sustainable energy evolution: SWOT analysis. Renewable Energy, v. 146, p. 543–558, 2020.

KAPDI, S. S.; VIJAY, V. K.; RAJESH, S. K.; PRASAD, R. Biogas scrubbing, compression and storage: perspective and prospectus in Indian context. Renewable Energy, v. 30, p. 1195–1202, 2005.

KATILA, P.; COLFER, C. J. P.; JONG, W.; GALLOWAY, G.; PACHECO. P. WINKEL, G. Sustainable Development Goals: Their Impacts on Forests and People. Cambridge University Press, 2019.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato. Embrapa Suínos e Aves. Concórdia: 2022

LI, Y.; CHEN, Y.; WU, J. Enhancement of methane production in anaerobic digestion process: A review. Applied Energy, v. 240, p. 120–137, abr. 2019.

MADIGAN, M. T.; MARTINKO, J. M.; BENDER, K. S.; BUCKLEY, D. H.; STAHL, D. A. Microbiologia de Brock. 14. ed. Porto Alegre: Artmed, 2016.

ELAVARASAN, R. M.; AFRIDHIS, S.; VIJAYARAGHAVAN, R. R.; SUBRAMANIAM, U.; NURUNNABI, M. SWOT analysis: A framework for comprehensive evaluation of drivers and barriers for renewable energy development in significant countries. *Energy Reports*, v. 6, p. 1838–1864, 2020.

MANYI-LOH, C. E.; MAMPHWELI, S. N.; MEYER, E. L.; OKOH, A.; MAKAKA, G.; SIMON, M. Microbial anaerobic digestion (bio-digesters) as an approach to the decontamination of animal wastes in pollution control and the generation of renewable energy. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 10, p. 4390–4417, 2013.

MARTINEZ, D. G.; BÜHRING, G. M. B.; MÜLLER, R. Panorama de tecnologias aplicadas no agronegócio de biogás e biometano. Brasília: 2019

MCTI. Portaria MCTI no 5.109, de 6 de agosto de 2021. Define as prioridades, no âmbito do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, no que se refere a projetos de pesquisa, de desenvolvimento de tecnologias e inovações, para o período 2021 a 2023. Brasil, 2021.

MMA. PROGRAMA NACIONAL METANO ZERO. Institui o Programa Nacional de Redução de Metano de Resíduos Orgânicos – Metano Zero. Brasil, 2022.

OBAIDEEN, K. et al. Biogas role in achievement of the sustainable development goals: Evaluation, Challenges, and Guidelines. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, v. 131, p. 104207, 2022.

OSHA. Hydrogen Sulfide (H<sub>2</sub>S). Disponível em: <[https://www.osha.gov/sites/default/files/publications/hydrogen\\_sulfide\\_fact.pdf](https://www.osha.gov/sites/default/files/publications/hydrogen_sulfide_fact.pdf)>. Acesso em: 21 fev. 2023.

PAGLINI, R.; GANDIGLIO, M.; LANZINI, A. Technologies for Deep Biogas Purification and Use in Zero-Emission Fuel Cells Systems. *Energies*, v. 15, p. 3551, 2022.

PRAMANIKA, S. K.; SUJA, F. B.; ZAIN, S. M.; PRAMANIK, B. K. The anaerobic digestion process of biogas production from food waste : Prospects and constraints. *Bioresource Technology Reports*, v. 8, p. 100310, 2019.

PUDI, A.; REZAEI, M.; SIGNORINI, V.; ANDERSSON, M. P.; BASCHETTI, M. G.; MANSOURI, S. S. Hydrogen sulfide capture and removal technologies: A comprehensive review of recent developments and emerging trends. *Separation and Purification Technology*, v. 298, p. 121448, 2022.

RYCKEBOSCH, E.; DROUILLON, M.; VERVAEREN, H. Techniques for transformation of biogas to biomethane. *Biomass and Bioenergy*, v. 35, p. 1633–1645, 2011.

SCHOMAKER, A.; BOERBOOM, A. A. M.; VISSER, A. PFEIFER, A. E. Anaerobic digestion of agro-industrial wastes: information networks and technical summary on gas treatment - Report No.: FAIR-CT 96-2083 (DG12-SSMI)31. 2020

UN. Sustainable Development Goals (SDGs). Disponível em: <<https://unric.org/en/united-nations-sustainable-development-goals/>>. Acesso em: 2 jun. 2023.

UNIDO. Guia Técnico Tecnologias para dessulfurização do biogás. Brasília: [s.n.].

UNIDO; CIBIOGÁS. Sistemas de Biogás e Biometano: Percepções de mercado no Brasil e no exterior. Brasília: [s.n.].

UNODC. A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Disponível em: <<https://www.unodc.org/lpo-brazil/pt/crime/embaixadores-da-juventude/conhea-mais/a-agenda-2030-para-o-desenvolvimento-sustentvel.html>>. Acesso em: 2 jun. 2023.

WBA. The contribution of Anaerobic Digestion and Biogas towards achieving the UN Sustainable Development Goals. [s.l: s.n.].

WELLINGER, A.; MURPHY, J.; BAXTER, D. (Ed.). The biogas handbook: science, production and applications. Elsevier, 2013.

WHO. Concise International Chemical Assessment Document 53 HYDROGEN SULFIDE : HUMAN HEALTH ASPECTS. Geneva: [s.n.].

XIMENES, J.; SIQUEIRA, A.; KOCHANSKA, E. Valorisation of Agri-and Aquaculture Residues via Biogas Production for Enhanced Industrial Application. *Energies*, v. 14, p. 2519, 2021.