

Purificação de Biogás a partir de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) por adsorção

Janks Karbdala Leal de Paiva

*Dissertação apresentada à Escola Superior Agrária de
Bragança para obtenção do Grau de Mestre em Tecnologia
Ambiental no âmbito da dupla diplomação com a Centro
Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca
(CEFET/RJ)*

Orientado por

DSc. José António Correia Silva

DSc. Ronney Arismel Mancebo Boley

Esta dissertação inclui as críticas e sugestões feitas pelo Júri

**Bragança
2024**

Resumo

O estudo desenvolvido no Instituto Politécnico de Bragança (IPB) investigou as técnicas de aproveitamento e tratamento dos gases liberados a partir da digestão anaeróbia. Inicialmente foi realizada uma revisão sistemática da literatura sobre o processo de atualização, ou seja, transformação do biogás em biometano, tomando como referência o método Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) associada com análise bibliométrica. Posteriormente, foi desenvolvida uma análise experimental aplicando o método baseado Pressure swing adsorption (PSA), método de purificação ainda pouco popular comercialmente, utilizado principalmente na remoção do CO₂ e outros gases componentes do biogás. Desse modo, o trabalho avaliou a remoção do CO₂ no PSA utilizando um tipo específico de carvão ativado, conhecido como peneira molecular de carbono (CMS - Carbon Molecular Sieve). Essa análise permitiu entender a capacidade de adsorção de CO₂ e a afinidade do CMS-3K com o metano. A busca na base Web of Science resultou um elevado número de documentos, refinados a artigos sobre atualização de biogás com peneira molecular de carbono em colunas PSA. Foi possível inferir que a partir de 2018, as publicações aumentaram significativamente, impulsionadas pelos eventos internacionais pautados na preocupação climática e necessidade de promover uma economia de baixo carbono. Ademais, realizou-se uma análise detalhada conduzida, usando um método específico de processamento de dados bibliográficos, permitindo uma compreensão ampla do cenário. Identificou-se colaborações acadêmicas entre os principais países foram identificadas, promovendo a troca de conhecimento e tecnologia, podendo inferir que as relações entre os países, influenciadas por fatores históricos, econômicos e culturais, desempenham um papel importante na colaboração científica. A pesquisa destaca que a técnica de PSA utilizando peneiras moleculares de carbono é uma alternativa promissora para a purificação do biogás em biometano, embora ainda pouco difundida. O desenvolvimento e a aplicação dessa tecnologia podem melhorar a gestão de resíduos sólidos urbanos, gerar um combustível renovável versátil e reduzir as emissões de gases de efeito estufa, promovendo assim um desenvolvimento sustentável e contribuindo para a transição energética global.

Palavras-chave: PRISMA; Bibliometria; Biometano; CMS-3K; Gás de aterro; *Pressure Swing Adsorption*.

Abstract

The study conducted at the Polytechnic Institute of Bragança (IPB) investigated techniques for harnessing and treating gases released from anaerobic digestion. Initially, a systematic literature review was conducted on the upgrading process, i.e., the transformation of biogas into biomethane, using the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) method associated with bibliometric analysis. Subsequently, an experimental analysis was developed applying the Pressure Swing Adsorption (PSA) method, a purification method still not widely popular commercially, mainly used in the removal of CO₂ and other gas components from biogas. Thus, the study evaluated CO₂ removal in PSA using a specific type of activated carbon known as Carbon Molecular Sieve (CMS). This analysis allowed understanding the CO₂ adsorption capacity and the affinity of CMS-3K with methane. A search in the Web of Science database yielded a high number of documents, refined to articles on biogas upgrading with carbon molecular sieves in PSA columns. It was possible to infer that since 2018, publications have increased significantly, driven by international events focused on climate concern and the need to promote a low-carbon economy. Furthermore, a detailed analysis was conducted using a specific bibliographic data processing method, allowing a comprehensive understanding of the scenario. Academic collaborations among key countries were identified, promoting knowledge and technology exchange, suggesting that relationships between countries, influenced by historical, economic, and cultural factors, play an important role in scientific collaboration. The research highlights that the PSA technique using carbon molecular sieves is a promising alternative for biogas purification into biomethane, although still not widely disseminated. The development and application of this technology can improve urban solid waste management, generate versatile renewable fuel, and reduce greenhouse gas emissions, thus promoting sustainable development and contributing to global energy transition.

Keywords: PRISMA; Bibliometrics; Biomethane; CMS-3K; Landfill gas; *Pressure Swing Adsorption*.

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus familiares e amigos que me ajudaram a permanecer firme ao longo dessa longa jornada e para todos aqueles que queiram aprender sobre o tema em questão.

Agradecimentos

Esses poucos parágrafos são curtos para expressar a imensa gratidão a todas as pessoas que contribuíram para minha formação acadêmica e profissional até o momento. Assim, peço desculpas para aqueles que não forem citados nesse texto, contudo sou grato por todos os ensinamentos e experiências que contribuíram para eu me tornar uma pessoa melhor.

Agradeço primeiramente ao meu pai, Janks de Paiva, e minha mãe, Graziela Pinto Leal, por todo esforço e paciência dedicada à minha formação pessoal. Ao meu irmão, Kalaime Leal de Paiva, que sempre me apoiou nesse período. Aos meus avós paternos (Eny Faria Paiva e Francisco de Assis Paiva) e maternos (Zenilda Pinto Leal e Wilson Guimarães Leal) que sempre contribuíram muito para o meu bem-estar e me incentivaram a chegar mais longe. Aos meus tios e tias que contribuíram com excelentes dicas para eu me tornar um aluno exemplar e um grande profissional, em especial ao meu tio Kary de Paiva, Daniela Russio e Francieny de Paiva. Agradeço a minha linda namorada que sempre esteve comigo me apoiando e sendo paciente nos momentos mais difíceis da vida, Natália de Oliveira Santos Fernandes.

Agradeço meu orientador Prof. Dr. José Antônio Correia Silva por me acolher no Instituto Politécnico de Bragança (IPB), colaborando no meu processo de formação profissional e técnico. Ao meu coorientador Prof. Dr. Ronney Arismel Mancebo Boloy por ter me acompanhado desde a entrada no CEFET/RJ até o momento. Agradeço ao grande profissional e pesquisador Dr. Adriano Henrique que me acolheu e me instruiu durante o desenvolvimento de toda a parte experimental do trabalho no CIMO/ESTIG. Ao Prof. Dr. Marcelo Borges Rocha e Dr. Marcelo Rodrigues dos Anjos, que me abriram as portas para iniciação científica e o mundo acadêmico. Ao grande Prof. Dr. Jorge Luiz Paes Rios que me aproximou ao universo da engenharia no Clube de Engenharia no Rio de Janeiro. Agradeço a todos os professores do ciclo básico, médio e curso preparatório que de alguma forma contribuíram para eu me tornar uma pessoa melhor e útil para o mundo.

Agradeço também aos meus amigos Igor Magalhães, Vitor Conceição, Cauli Bernardinello, Arthur Magalhães, Victor Garcia e Mariana Monteiro por encaramos o desafio de mudarmos para outra cidade ainda muito jovens em busca de educação de qualidade, e por todos os momentos felizes e difíceis que vivemos juntos naquela época.

Agradeço aos meus amigos e amigas, Jeferson Calixto, Iury Oliveira, Thalia Oliveira, Maíra Malvão, Isadora Rosa, Isabelle Naideg, Josué Ramos e Pedro Malvão por tornarem meus dias de folga em Paraty-RJ mais divertidos. Agradeço meus companheiros e companheiras de instituição que tornaram meus dias mais divertidos e tiveram ombridade em diversos trabalhos e atividades em grupo que contribuíram para a conclusão desse curso, Marina Vilaro, Rafael Sousa, André Haubrichs, Guilherme Neves, Joyce Lopes, Gabriela Munaro, Cecília Alves e Yasmin Neder.

Por fim, agradeço ao Instituto Politécnico de Bragança (IPB) e ao CEFET-RJ por serem grandes instituições de formação tecnológica e profissional que me concederam excelentes oportunidades acadêmicas e profissionais ao longo dessa jornada de formação.

Se cheguei até aqui foi porque me apoiei nos ombros dos gigantes

(Newton, 1676).

ÍNDICE GERAL

1 INTRODUÇÃO.....	14
2 OBJETIVOS.....	17
2.1 OBJETIVO GERAL	17
2.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3 REVISÃO DA LITERATURA.....	17
3.1 PRINCIPAIS POLUENTES ATMOSFÉRICOS	18
3.2 BIOGÁS.....	19
3.3 APLICAÇÕES DO BIOGÁS	20
3.4 PROCESSO DE ATUALIZAÇÃO DO BIOGÁS.....	23
3.5 BIOMETANO	23
3.6 APLICAÇÕES DO BIOMETANO	24
3.7 ADSORÇÃO	25
3.8 TÉCNICAS DE ADSORÇÃO.....	26
3.9 CARVÃO ATIVADO	27
3.10 PENEIRA MOLECULAR DE CARBONO - <i>CARBON MOLECULAR SIEVE</i> (CMS)	29
3.11 ADSORÇÃO POR VARIAÇÃO DE PRESSÃO - <i>PRESSURE SWING</i> <i>ADSORPTION</i> (PSA)	31
4 MATERIAIS E MÉTODOS	34
4.1 ANÁLISE QUALITATIVA VIA MÉTODO PRISMA	34
4.2 ANÁLISE QUANTITATIVA VIA REVISÃO BIBLIOMÉTRICA	35
4.3 PARTE EXPERIMENTAL	36
4.3.1 LOCAL DE REALIZAÇÃO DOS EXPERIMENTOS.....	36
4.3.2 ADSORVENTE E ADSORVATO.....	36
4.3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	38
5 RESULTADOS	42
5.1 PANORAMA DAS PUBLICAÇÕES SOBRE ATUALIZAÇÃO DE BIOGÁS UTILIZANDO CMS-3K NO <i>PRESSURE SWING ADSORPTION</i> (PSA)	42
5.1.1 ANÁLISE CRONOLÓGICA DAS PUBLICAÇÕES	42
5.1.2 ANÁLISE DAS PUBLICAÇÕES POR PAÍS.....	43
5.1.3 ANÁLISE GERAL DAS PALAVRAS-CHAVE DA PUBLICAÇÃO	46
5.1.4 INDICADOR DE FATOR DE IMPACTO DAS REVISTAS	49
5.1.5 ÁREAS DE PESQUISA	50
5.2 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA: MÉTODO PRISMA.....	52

5.3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	59
5.3.1 EQUILÍBRIO DE ADSORÇÃO DO CO ₂	59
5.3.2 CURVAS DE RUPTURA COM MISTURA DE CO ₂ E CH ₄	61
6 DISCUSSÃO.....	64
7 CONCLUSÃO.....	68
7.1 LIMITAÇÕES DA PESQUISA	70
7.2 RECOMENDAÇÕES DE PESQUISAS FUTURAS	70
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Fontes de produção e aplicações para o biogás	24
Figura 2: Processo de Adsorção.....	25
Figura 3: Possíveis formas das isothermas de adsorção.....	26
Figura 4: Exemplo de Pressure swing adsorption (PSA).....	32
Figura 5: Desenho esquemático da configuração experimental usada para realizar experimentos inovadores de um e vários componentes para medir o equilíbrio de adsorção.....	39
Figura 6: Número de documentos publicados por ano	43
Figura 7: Número de documentos por país.....	44
Figura 8: Coperação entre países.....	46
Figura 9: Ocorrências de palavras-chave do autor.....	49
Figura 10: Áreas de pesquisa mais relevantes.....	51
Figura 11: Fluxograma PRISMA para os registros incluídos na revisão.....	52
Figura 12: Curvas de Ruptura.....	60
Figura 13: Isoterma de equilíbrio de adsorção do CO ₂	61
Figura 14: Curvas de ruptura de misturas binárias de CO ₂ /CH ₄ (RUN 2_1).....	62
Figura 15: Curvas de ruptura de misturas binárias de CO ₂ /CH ₄ (RUN 2_2).....	62
Figura 16: Curvas de ruptura de misturas binárias de CO ₂ /CH ₄ (RUN 2_3).....	63
Figura 17: Curvas de ruptura de misturas binárias de CO ₂ /CH ₄ (RUN 2_4).....	63
Figura 18: Visualização de sobreposição de palavra-chave do autor.....	66

ÍNDICE DE IMAGEM

Imagem 1: Pipeline de biogás do Aterro Sanitário de Vila do Conde, distrito do Porto.....	21
Imagem 2: Microscopia Electrónica de Varrimento (MEV) de diferentes formas do carvão ativado.....	28
Imagem 3: Pellets cilíndricos de CMS-3K.....	29
Imagem 4: Peneira Molecular de Carbono do tipo CMS-3K.....	37
Imagem 5: Cilindros de gases do CIMO/ESTIG.....	38
Imagem 6: Configuração Experimental CIMO/ESTIG.....	39
Imagem 7: Coluna de adsorção.....	40

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Composição do biogás a partir de diferentes fontes.....	22
Tabela 2: Propriedades texturais do CMS-3K.....	30
Tabela 3: Ocorrência das palavras-chave do autor.....	48
Tabela 4: Indicador de Fator de Impacto.....	50
Tabela 5: Levantamento das empresas que utilizam o processo de PSA....	54
Tabela 6: Revisão da literatura método PRISMA.....	55
Tabela 7: Condições experimentais para medir curvas de ruptura do CO ₂ no CMS-3K.....	59
Tabela 8: Condições experimentais para medir curvas de ruptura de misturas binárias de CO ₂ /CH ₄ no CMS-3K.....	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AD	Anaerobic Digestion (Digestão Anaeróbia)
AIE	Agência Internacional de Energia
CCS	Carbon Capture and Storage (Captura e Armazenamento de Carbono)
CCUS	Carbon Capture, Utilization, and Storage (Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono)
CMS	Carbon Molecular Sieve
CNG	Compressed Natural Gas (Gás Natural Comprimido)
GEE	Gases de Efeito Estufa
GN	Gás Natural
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LFG	Landfill Gas (Gás de Aterro Sanitário)
ONU	Organização das Nações Unidas
Pipeline	Sistema de transporte de fluidos por tubulação
PRISMA	Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses
PSA	Pressure Swing Adsorption
RNG	Renewable Natural Gas (Gás Natural Renovável)
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
UE	União Europeia
UNEP	United Nations Environment Programme (Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente)
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change (Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima)

UNIDADES DE MEDIDA

%	porcentagem
°C	graus Celsius
Bar	Barra (unidade de pressão)
BTU	Unidade Térmica Britânica
g/L	grama por litro
g/mol	grama por mol
g	grama
kg/m³	quilograma por metro cúbico
kg	quilograma
KWh	quilowatt-hora
kW	quilowatt
L	litro
m/s	metro por segundo
m³	metro cúbico
MJ	Megajoule
mol/L	mole por litro
ppm	partes por milhão
ppmv	partes por milhão por volume

1 INTRODUÇÃO

A urbanização acelerada e o crescimento populacional nas últimas décadas têm gerado um aumento substancial na produção de resíduos sólidos urbanos (RSU), fato que configura um desafio para a gestão sustentável de resíduos (Reza, 2023). Dentro desta matriz de resíduos, a fração orgânica, que representa uma parcela significativa dos RSU que é em particular muito problemática devido ao seu rápido processo de decomposição, resultando na geração de metano (CH_4), um gás de efeito estufa (GEE) com potencial de aquecimento global 25 vezes maior que o dióxido de carbono (CO_2). Dessa forma, a gestão inadequada dos resíduos orgânicos intensifica as emissões de gases de efeito estufa e representa uma subutilização de um recurso com alto potencial energético (Pörtner et al., 2022).

Diante dessa situação, a utilização de novas tecnologias com o objetivo de prevenir, mitigar e remediar os efeitos adversos ocasionados pelos GEE imprescindível para alcançar o desenvolvimento sustentável e atingir as metas climáticas. Assim, a utilização de fontes energéticas de baixo carbono são benéficas para o meio ambiente, além disso, oferecem distintas oportunidades de solucionar os problemas ambientais. Sendo assim, o aproveitamento dos biocombustíveis, energias renováveis e implementação de práticas pautadas na economia circular oferecem significativas vantagens socioambientais, que vão desde a redução das emissões de gases de efeito estufa, substituição de combustíveis fósseis, incremento da eficiência na geração de energia e desenvolvimento econômico baseado na sustentabilidade (Mignogna et al., 2023).

Uma alternativa para conter a problemática das emissões ocorre através do processo de aproveitamento dos efluentes residuais gasosos. O biogás, composto principalmente por metano (CH_4), 45 – 75% em volume, e dióxido de carbono (CO_2), surge como uma alternativa sustentável para evitar a emissão de gases para atmosfera. Esse gás de baixo carbono pode ser amplamente utilizado em diferentes áreas, a exemplo, na geração de calor para geração de energia, eletricidade e em atividades domésticas, como cozinha e aquecimento. No entanto, para ampliar a utilização deste recurso, este precisa passar pelo processo de purificação (atualização) para vir a se converter em

biometano, com um maior grau de pureza, posteriormente, esse gás pode ser utilizado como combustível (Bakkaloglu & Hawkes, 2024).

Nesse contexto, a geração de biogás se torna um caminho socioambiental e econômico atrativo para os países que possuem aterro sanitário, aterro controlado ou lixões. Uma vez que o esse gás biológico surge da degradação de matéria orgânica por microrganismos anaeróbicos, em um processo conhecido como digestão anaeróbica. Por conseguinte, os principais produtos resultantes deste processo são o CO₂ e CH₄, juntamente com impurezas como sulfeto de hidrogênio, siloxanos, água, oxigênio, nitrogênio e partículas em suspensão. A aplicação de técnicas de separação e purificação desse recurso derivado dos resíduos, amplia as utilizações dos diferentes gases produzidos na degradação da matéria orgânica presente nos resíduos sólidos urbanos (Sales Silva et al., 2022).

A realização da separação de gases pode ser efetuada a partir de técnicas distintas, como a adsorção, absorção, destilação fracionada, membranas, difusão e criogenia. No entanto, a adsorção apresenta um vasto leque de aplicações distintas na indústria. Desse modo, a adsorção é definida como uma operação de transferência de massa que estuda a habilidade de certos sólidos em concentrar na sua superfície determinadas substâncias existentes em fluidos líquidos ou gasosos, permitindo a separação desses componentes (Ferreira et al., 2014). Esse processo pode utilizar a peneira molecular de carbono como material adsorvente, uma vez que é um adsorvente disponível comercialmente com alta área de superfície e distribuição uniforme de poros (Shen et al., 2021).

O processo de adsorção por variação de pressão, Pressure Swing Adsorption – PSA, com carvão ativado representa uma metodologia de vanguarda para a remoção de gases poluentes em fluxos gasosos industriais. O carvão ativado, com sua extraordinária área superficial e porosidade intrínseca, proporciona uma capacidade de adsorção superior para uma ampla variedade de poluentes gasosos. No ciclo PSA, o gás poluente é pressurizado e direcionado através de um leito de carvão ativado, onde as moléculas indesejadas são eficientemente capturadas na superfície do adsorvente. Subsequentemente, a redução da pressão permite a desorção dos poluentes adsorvidos, facilitando sua remoção do sistema. Este ciclo contínuo de pressurização e depressurização assegura a regeneração do carvão ativado e mantém uma purificação constante e eficaz do gás tratado (Li et al., 2023).

Dentre os diferentes tipos de carvão ativado existentes que podem ser implementados no processo do PSA, o trabalho teve como foco estudar a utilização da peneira molecular de carbono (*Carbon Molecular Sieve – CMS*). Esse elemento possui algumas vantagens quando comparado a outros materiais. Assim, esse elemento conta com uma arquitetura microporosa otimizada que oferece uma seletividade excepcional para o oxigênio e nitrogênio. Além da eficiência na separação gasosa, destaca-se pela resiliência mecânica e rápida regeneração durante ciclos de despressurização. Dessa forma, a versatilidade operacional desse elemento permite a sua aplicação em diversas indústrias, como na produção de nitrogênio e purificação do biogás (Smith, Brown, & Lee, 2023).

Os crescentes desafios relacionados à sustentabilidade energética e ambiental, torna a busca por fontes de energia renováveis uma prioridade global inegável. Neste contexto, a atualização do biogás em biometano através de técnicas de adsorção surge como uma alternativa remoção de gases, a exemplo o CO₂. Este estudo propõe uma abordagem inovadora para a purificação do biogás, explorando o uso do carvão ativado CMS-3K no processo de adsorção por variação de pressão (PSA) para produção de biometano. A escolha do CMS-3K como adsorvente se baseia em sua eficiência comprovada na separação de gases e sua versatilidade operacional. Portanto, essa pesquisa procura contribuir para o avanço da tecnologia de purificação de biogás, através de tecnologias ainda pouco exploradas para solucionar as problemáticas da área ambiental. Dessa forma, o presente trabalho teve por objetivo estudar a técnica de adsorção de gases, utilizando o método PSA com peneira molecular de carbono (CMS-3K) para remover o CO₂ do biogás proveniente dos resíduos orgânicos.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a técnica de separação de gases contidos no biogás proveniente de resíduos orgânicos, utilizando o método de adsorção PSA contendo o carvão ativado do tipo CMS-3K para remover o CO₂ do biogás.

2.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Realizar uma análise sistemática da literatura sobre a atualização do biogás com carvão ativado (CMS-3K) por meio do método PRISMA de modo a elucidar o emprego dessa técnica na remoção de CO₂.
- b) Desenvolver uma análise bibliométrica sobre a atualização do biogás com carvão ativado (CMS-3K) com a finalidade de elucidar o emprego dessa técnica na remoção de CO₂.
- c) Analisar as diferentes aplicações do biogás proveniente do gás de aterro.
- d) Avaliar experimentalmente a capacidade de adsorção da peneira molecular de carbono (CMS-3K) na remoção de CO₂ do biogás.

3 REVISÃO DA LITERATURA

A gestão inadequada dos resíduos sólidos urbanos tornou-se um problema crescente em todo o mundo, resultando em significativos impactos ambientais. O aumento populacional e o consumo exacerbado têm contribuído para a produção elevada de resíduos, cuja destinação final muitas vezes é inadequada. A decomposição desses resíduos em aterros sanitários e lixões é uma fonte significativa de gases de efeito estufa (GEE) que contribuem para a intensificação do aquecimento global (Wilson et al., 2021). Além disso, a má gestão dos resíduos sólidos contamina o solo e os recursos hídricos, ameaçando a biodiversidade e a saúde pública (Yang et al., 2018). Soluções como reciclagem, compostagem e valorização energética de resíduos são essenciais para mitigar esses impactos. No entanto, a implementação dessas práticas ainda é limitada em muitas regiões devido a barreiras econômicas, tecnológicas e políticas. Portanto, aprimorar a gestão dos resíduos sólidos e promover a valorização energética são medidas fundamentais para promover o desenvolvimento sustentável.

Desse modo, os resíduos sólidos urbanos (RSU) possuem um papel importante na produção do gás de aterro, ou seja, gases oriundos da degradação dos resíduos orgânicos. Dessa forma, o crescimento da população nas diferentes partes do mundo implica em uma maior geração de RSU, que muitas vezes não são descartados da maneira correta. Os resíduos orgânicos ou alimentares constituem entre 42% e 69% dos RSU ao nível mundial. Assim, tornam-se um grande vilão ambiental, porque a decomposição da matéria orgânica acarreta a liberação de metano na atmosfera terrestre. Por isso, o aproveitamento desse gás surge como uma alternativa de valorização de resíduos e promove a redução das emissões de GEE (Triviño-Pineda et al., 2024).

Os aterros sanitários representam uma das principais formas de gestão de resíduos sólidos urbanos, projetados com sistemas de controle ambiental para mitigar impactos adversos. No contexto da produção de biogás, os aterros sanitários assumem importância singular devido à decomposição anaeróbica dos resíduos orgânicos, resultando na geração de gases com potencial de aproveitamento. Desse modo, alguns estudos recentes exploram as oportunidades e os desafios associados à exploração do potencial de biogás em aterros sanitários como uma fonte promissora de energia renovável (Bai et al., 2021). Portanto, a implementação de tecnologias avançadas de captura e aproveitamento de biogás em aterros sanitários emerge como uma estratégia essencial para a mitigação dos impactos ambientais dos GEE e a transição para uma economia de baixo carbono.

3.1 PRINCIPAIS POLUENTES ATMOSFÉRICOS

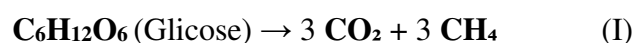
Os gases de efeito estufa (GEE) constituem uma variedade de substâncias atmosféricas de fundamental importância no contexto das mudanças climáticas globais, exercendo um papel determinante no fenômeno do aquecimento global. Além do dióxido de carbono (CO_2), os principais GEE incluem o metano (CH_4), o óxido nitroso (N_2O), o ozônio (O_3) troposférico e os gases fluorados. No entanto, o CO_2 se destaca tanto em termos de sua prevalência na atmosfera quanto na sua influência sobre as mudanças climáticas globais. Esses poluentes, normalmente, são originados de atividades antrópicas, como a queima de combustíveis fósseis, desmatamento e descarte incorreto de resíduos orgânicos. Dessa maneira, o CO_2 detém grande participação para o aumento da temperatura média global e a ocorrência de eventos climáticos extremos em escala global (Skea et al., 2022).

As mudanças climáticas provocadas pelo aumento dos gases de efeito estufa, especialmente dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄), constituem uma ameaça ambiental e socioeconômica significativa no século XXI. A elevação desses gases, principalmente devido a ações antrópicas, está diretamente associada ao aquecimento global que por sua vez resulta em eventos climáticos extremos, como a elevação do nível do mar, acidificação dos oceanos e perturbações nos ecossistemas. O Acordo de Paris, adotado em 2015, é uma resposta internacional a crise climática, o qual detém o objetivo de limitar o aumento da temperatura global a bem abaixo de 2 °C relativamente aos níveis pré-industriais e se possível a 1,5 °C (Falkner, 2016). Este acordo coordena ações globais para reduzir as emissões de CO₂, CH₄ e outros gases com efeito estufa, criando adaptações às mudanças climáticas e financiando a transição para uma economia de baixo carbono, as quais são essenciais para mitigar os impactos das mudanças climáticas e garantir um futuro sustentável (Change, 2007).

3.2 BIOGÁS

O biogás é um combustível gasoso renovável, constituído majoritariamente por metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂). Esse gás é gerado durante a decomposição anaeróbica de matéria orgânica pelos microrganismos. Desse modo, este processo ocorre a partir de diferentes origens, entre essas, pode-se listar: resíduos agrícolas, efluentes industriais, estações de tratamento de esgoto, culturas energéticas (plantações cultivadas especificamente para a produção de energia) e aterros sanitários. Nos aterros, o biogás é produzido pela decomposição dos resíduos orgânicos depositados juntamente aos outros resíduos, assim, na ausência de oxigênio, os microrganismos decompõem a matéria orgânica liberando CH₄ e CO₂. Esse gás renovável pode ser capturado e utilizado como fonte de energia renovável de baixo carbono, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa e promovendo a sustentabilidade energética (Khalid et al., 2021).

A produção de biogás por meio da decomposição anaeróbica de matéria orgânica envolve uma série de reações bioquímicas complexas. Contudo, a reação principal é a fermentação da glicose (C₆H₁₂O₆) que é um açúcar simples encontrado na matéria orgânica e pode ser representada pela equação:



Nesta reação, a glicose é convertida em dióxido de carbono e gás metano, os principais constituintes do biogás. Além do CH₄ e CO₂, outros compostos gasosos podem ser produzidos durante o processo de digestão anaeróbica, incluindo hidrogênio (H₂), nitrogênio (N₂), sulfeto de hidrogênio (H₂S) e vapor d'água (H₂O). A presença e a quantidade desses compostos adicionais podem variar dependendo das condições específicas do processo de decomposição, como temperatura, pH e composição da matéria orgânica (Jameel et al., 2024).

O aproveitamento do biogás em aterros sanitários oferece diversas vantagens, como a mitigação das emissões de metano e dióxido de carbono, a geração de energia renovável com variadas aplicações e a redução de odores e lixiviados. No entanto, também apresenta desafios, como a necessidade de infraestrutura adequada para a captura e tratamento do biogás, bem como a gestão dos resíduos remanescentes. Além disso, a eficiência da produção de biogás pode variar dependendo da composição dos resíduos e das condições operacionais do aterro. Estudos recentes destacam a importância dos aterros sanitários na produção de biogás como uma alternativa sustentável para a gestão de resíduos e a geração de energia (Surendra et al., 2021; Ward et al., 2020).

3.3 APLICAÇÕES DO BIOGÁS

Diante o exposto, nota-se que o biogás desempenha um papel fundamental na promoção da sustentabilidade através das suas diversas aplicações na cogeração, geração de energia elétrica e produção de energia térmica. Dessa forma, quando a cogeração é combinada com a produção de eletricidade e calor, alcança eficácias energéticas superiores a 80%, sendo ideal para instalações com demanda simultânea dessas formas de energia (Su et al., 2020). Por outro lado, na geração elétrica, o biogás contribui para diversificar a matriz energética e aumentar a segurança energética, sendo utilizado em motores de combustão, microturbinas ou células a combustível (Dickson et al., 2023). Além disso, a produção de energia térmica a partir do biogás oferece uma solução eficiente para aquecimento de ambientes e processos industriais, especialmente em climas frios (Poddar et al., 2022). Assim, o biogás destaca-se como uma alternativa sustentável e versátil, essencial para a transição energética global (Gadirli et al., 2024; Brémond et al., 2021).

A captura do biogás em aterros sanitários é um processo muito importante para mitigar os impactos ambientais e aproveitar uma fonte valiosa de energia renovável. No início, são instalados poços de extração verticalmente no solo do aterro sanitário, penetrando nas camadas onde os resíduos orgânicos estão em decomposição. Dessa forma, esses poços são interligados por uma extensa rede de tubulação, conhecida como *pipelining*, que coleta o biogás gerado em diferentes locais do aterro e o transporta para um ponto central de coleta, garantindo a eficiência máxima na captura do gás (Lee et al., 2020). A implementação de tecnologias avançadas de monitoramento e controle ao longo do sistema de captura pode otimizar ainda mais a eficiência e a confiabilidade do processo.



Imagem 1: Pipeline de biogás do Aterro Sanitário de Vila do Conde, distrito do Porto.

Fonte: Autor, 2024.

No ponto central de coleta, o biogás é destinado para um processo de tratamento que visa remover as impurezas, contaminantes e outras substâncias que comprometem sua qualidade e eficiência como fonte de energia. Assim, após o biogás ser tratado, o produto pode ser utilizado com diferentes finalidades, contribuindo para a redução das

emissões dos gases de efeito estufa e promovendo a sustentabilidade energética, impulsionando a transição para uma economia mais verde (Zhang et al., 2024). Dessa forma, a contínua pesquisa e desenvolvimento nesse campo são elementos relevantes para aprimorar os processos de tratamento e aumentar a eficiência da utilização do biogás como fonte de energia.

O biogás pode ser obtido a partir de diferentes fontes, porém, para haver a ampliação das aplicações desse biocombustível deve passar por um processo de tratamento. Dessa forma, o biogás passa por um processo de remoção de impurezas e purificação, para atingir um grau elevado de pureza comparado ao do gás natural. Esse tratamento envolve a remoção de impurezas, como dióxido de carbono (CO₂), vapor d'água, compostos de enxofre e outros gases em menor concentração (Hossain et al., 2024). Dessa forma, a remoção do CO₂ melhorará a eficiência do combustível, agregando valor e ampliando suas possibilidades de utilização. No entanto, a maioria dos métodos de limpeza do biogás são caros e poucos documentos detalham o uso de materiais sustentáveis para a purificação do biogás (Haldar et al., 2023).

A purificação desse gás de baixo carbono exige que se entenda ao percentual de composição do biogás proveniente das diferentes fontes de geração. Dessa forma, a Tabela 1 apresenta os valores (referência) dos principais constituintes do biogás, além dos valores de referência de composição do gás natural, importante indicador de pureza do biometano.

Tabela 1: Composição do biogás a partir de diferentes fontes

Componentes	Unidades	Gás Natural (Portugal)	Biogás ETAR/ETE	Biogás de Aterro	Biogás Agroindustrial
Metano (CH ₄)	% vol.	86,5	65-75	45-55	45-75
Dióxido de Carbono (CO ₂)	% vol.	≈1	20-35	25-30	25-55
Azoto/Nitrogênio (N ₂)	% vol.	0,3	3,4	10-25	0,01-5,00
Oxigênio (O ₂)	% vol.	0,05-2	0,5	1-5	0,01-2,00
Sulfeto de Hidrogênio (H ₂ S)	mg/mN ³	5	<8000	<8000	10-30000
Siloxanos	mg/mN ³	-	<0,1-5,0	Residual	<0,1-5,0
Poder calorífico inferior (PCI)	MJ/mN ³	37,9	21,6-27,0	16,2-19,8	18,0-27,0

Fonte: Adaptado de Monteiro et al., 2011.

A compreensão desses valores é de extrema importância para o estudo do ciclo de aproveitamento dos gases renováveis. Tendo em vista que para garantir um aproveitamento economicamente viável, é necessário compreender o volume gerado em cada fonte, associado a uma tecnologia eficiente, capaz de escalar a produção desse insumo. Portanto, o estudo das técnicas de purificação do biogás é fundamental para garantir a qualidade e a compatibilidade com os padrões de segurança e ambientais, maximizando o potencial dessa fonte de energia limpa e renovável (Golmakani et al., 2023).

3.4 PROCESSO DE ATUALIZAÇÃO DO BIOGÁS

O processo de transformação do biogás em biometano é chamado atualização, cujo objetivo é remover as impurezas mediante de diferentes técnicas disponíveis no mercado. Entre as tecnologias mais usuais, existe a absorção com solventes, onde o CO_2 é removido do biogás através da absorção seletiva em solventes. Desse modo, a adsorção em leitos sólidos, onde o CO_2 é adsorvido por materiais sólidos enquanto o metano passa pelo adsorvente. A utilização de membranas seletivas, em que os componentes do biogás são separados com base na permeabilidade dos gases. Ademais, a criogenia é utilizada para resfriar o biogás a temperaturas muito baixas, condensando as impurezas. Existe a dessulfurização química que remove compostos de enxofre como H_2S . Essas técnicas permitem realizar o tratamento do biogás e expandir as suas aplicações como combustível renovável de alta pureza (Pavičić et al., 2022).

3.5 BIOMETANO

O biometano é obtido por meio da purificação do biogás, esse composto possui metano (CH_4), com uma pureza de 95% ou mais, e pequenos traços de CO_2 , N_2 e compostos sulfurados. Esse combustível é reconhecido por sua sustentabilidade e capacidade de reduzir o lançamento de gases poluentes na atmosfera. Dessa forma, o biometano é uma alternativa promissora para substituir os combustíveis fósseis, uma vez que esse produto é aplicável em veículos, geração de eletricidade e aquecimento. Além disso, é possível promover a injeção desse gás na malha de gás natural (GN), ao lado do gás convencional. De acordo com Dey & Thomson (2023) o biometano emerge como um recurso energético versátil e de baixo impacto ambiental, fundamental na transição para uma economia sustentável e de baixo carbono.

3.6 APLICAÇÕES DO BIOMETANO

Nesse contexto, a conversão do biogás em biometano apresenta uma grande oportunidade para agregar valor econômico do efluente gasoso e mitigar os gases de efeito estufa prejudiciais às pessoas e ao ambiente. Segundo Sales Silva et al.(2022) existem diversas aplicações para o biogás, tais como a geração de eletricidade, energia térmica ou mecânica, especialmente em sistemas de cogeração. Desse modo, como pode ser exemplificado pela Figura 1, o biogás purificado (biometano) pode ser utilizado como alternativa ao gás natural em veículos ou ser diretamente inserido nas redes de distribuição de gás natural (GN). Essas diferentes aplicações desse combustível renovável, demonstram o papel relevante que os biocombustíveis desempenham na transição energética e como a economia circular pode acelerar esse processo.

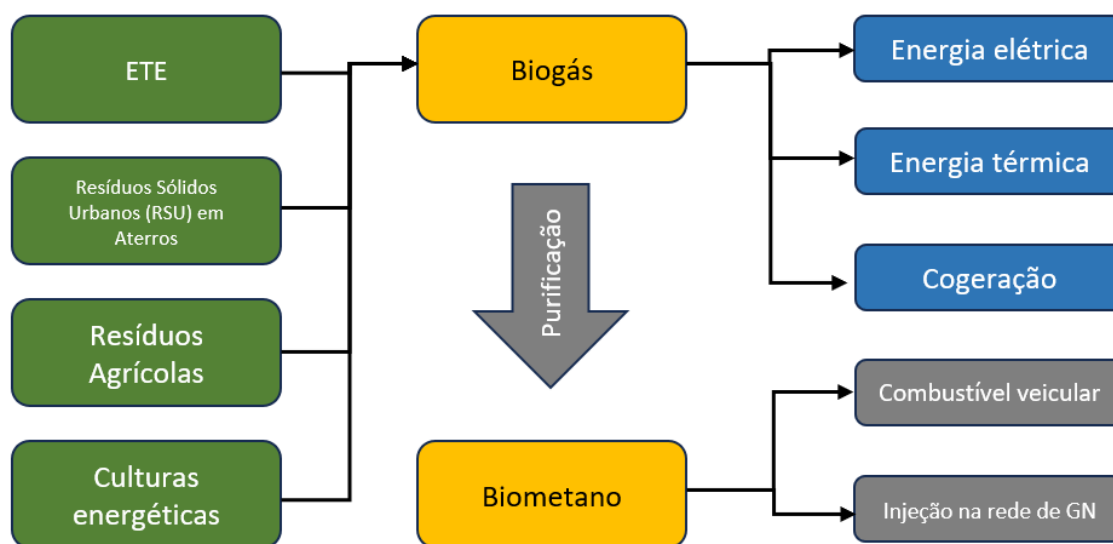


Figura 1: Fontes de produção e aplicações para o biogás.

Fonte: Adaptado de Veiga & Sonia, 2015.

A partir do exposto na Figura 1, nota-se que o biogás é um gás renovável versátil que pode ser originado a partir de fontes distintas, como das estações de tratamento de esgoto (ETE), dos aterros sanitários, dos resíduos agrícolas e das culturas energéticas. Desse modo, sem o processo de purificação (atualização), o biogás é comumente empregado na produção de energia elétrica, térmica e na cogeração. No entanto, quando este gás passa pelo processo de purificação, o mesmo acaba por ampliar as possibilidades de uso, como ser utilizado como combustível e ser injetado na malha de gás natural associado ao mesmo. Portanto, o aproveitamento do biogás é de suma importância no

combate as alterações climáticas, uma vez que a produção desse insumo pode ocorrer em diferentes cenários e locais.

3.7 ADSORÇÃO

A adsorção, como mostra a Figura 2, é um fenômeno físico-químico em que átomos, íons ou moléculas, chamados de adsorvatos, se acumulam na superfície de um material sólido denominado adsorvente. Desse modo, este processo ocorre devido a forças de atração intermoleculares como interações van der Waals, ligações de hidrogênio e por vezes ligações químicas fracas. Dessa forma, a adsorção é dividida em duas categorias principais: adsorção física, que envolve forças de van der Waals e é reversível, e adsorção química, que envolve a formação de ligações químicas e é frequentemente irreversível. Compreender essa distinção é importante para aplicar e prever o comportamento da adsorção em diversos contextos (Singh & Bhatia, 2022).

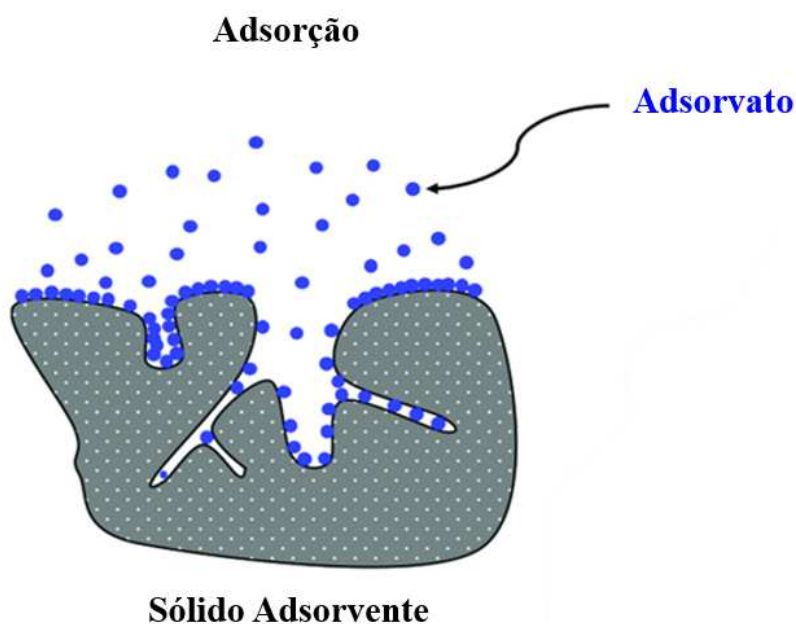


Figura 2: Processo de Adsorção.

Fonte: Adaptado de Zbair & Bennici, 2021.

3.8 TÉCNICAS DE ADSORÇÃO

Os materiais envolvidos na adsorção desempenham papéis distintos, em que o adsorvente é a superfície ativa onde ocorre a adsorção, com exemplos comuns incluindo carvão ativado, zeólitas, sílica e metais. Os adsorvatos são as partículas que se acumulam na superfície do adsorvente, podendo ser gases, líquidos ou solutos em solução. A relação entre a quantidade de adsorvato adsorvido e sua concentração em equilíbrio é descrita por isotermas de adsorção, como pode ser visualizado pela Figura 3. As isotermas de Langmuir aplicam-se a superfícies homogêneas sem interação entre as moléculas adsorvidas, enquanto as isotermas de Freundlich são empíricas e adequadas para superfícies heterogêneas com baixas concentrações de adsorvato (Garcia & Chen, 2023).

Dessa forma, como é representado pela Figura 3, de maneira simplificada, pode-se dizer que as isotermas são diagramas que mostram a variação da concentração de equilíbrio do sólido adsorvente com a pressão parcial ou concentração da fase líquida, em uma determinada temperatura.

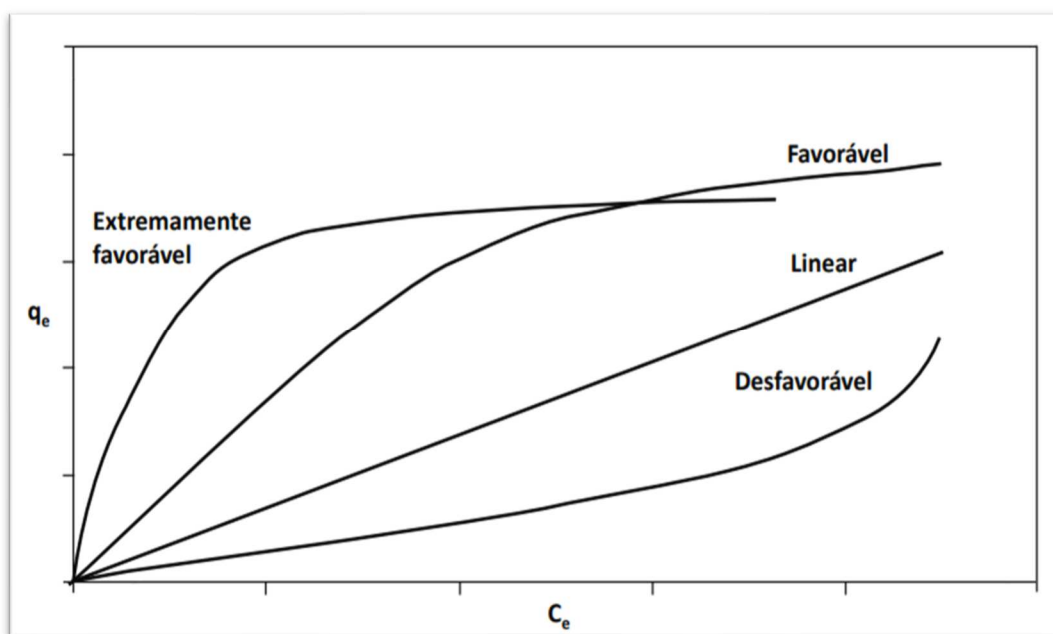


Figura 3: Possíveis formas das isotermas de adsorção.

Fonte: Adaptado de Ferreira et al., 2014.

Diversos fatores influenciam a eficiência e a capacidade da adsorção, entre esses a temperatura é um fator determinante, porque a adsorção física diminui com o aumento da temperatura, enquanto a adsorção química pode variar. A pressão, especialmente no caso de gases, tende a aumentar a quantidade de adsorvato adsorvido. A área de superfície

do adsorvente é essencial, pois uma maior área de superfície proporciona maior capacidade de adsorção. Além disso, as propriedades do adsorvato, como tamanho, polaridade e solubilidade, afetam significativamente a adsorção. Aplicações práticas da adsorção incluem a purificação de gases e líquidos, a separação de misturas na cromatografia, a ativação de catalisadores heterogêneos e o armazenamento de energia em materiais porosos. Essas aplicações ilustram a versatilidade e a importância da adsorção em processos industriais e ambientais, destacando seu papel fundamental na química moderna e nas ciências dos materiais (Dey & Thomson, 2023).

3.9 CARVÃO ATIVADO

Diante o exposto, o presente trabalho explorou a utilização de um carvão ativado no processo de adsorção. Sendo assim, o carvão ativado é um material carbonáceo amplamente utilizado devido à sua estrutura altamente porosa e sua grande área de superfície específica, como pode ser observado na Imagem 2. Este material é produzido a partir de diversas matérias-primas, como madeira, cascas de coco e carvão mineral, que são submetidas a processos de ativação física ou química para aumentar sua porosidade. Segundo Jjagwe et al. (2023), a elevada área de superfície e a presença de microporos tornam o carvão ativado extremamente eficiente na adsorção de moléculas, permitindo a remoção de uma vasta gama de substâncias tanto em fases líquidas quanto gasosas. Essas propriedades fazem do carvão ativado um componente essencial em várias aplicações industriais e ambientais.

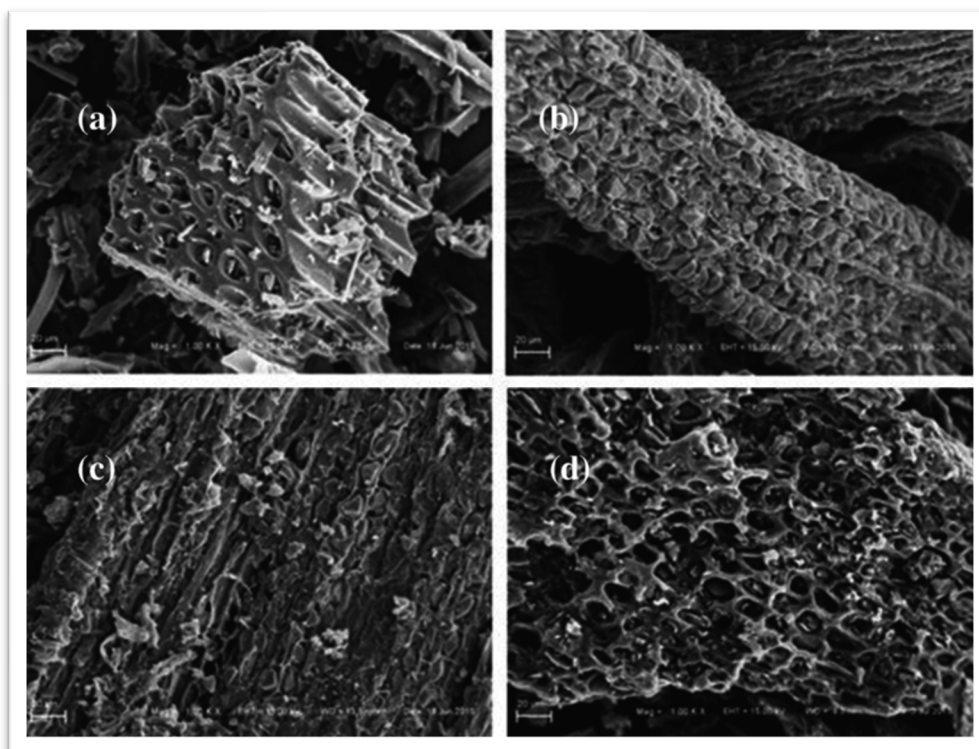


Imagem 2: Microscopia Electrónica de Varrimento (MEV) de diferentes formas do carvão ativado; (a) carvão ativado comercial CAC, (b) carvão C/60, (c) carvão C/05 e (d) carvão ativado CA/H₃PO₄.

Fonte: de Aguiar Linhares et al., 2016.

O carvão ativado comercial (CAC), disponível no mercado, destaca-se por sua alta área superficial e porosidade, sendo amplamente empregado em processos de purificação e tratamento de efluentes. O C/60, ativado por 60 minutos, apresenta maior densidade de poros e elevada capacidade de adsorção, sendo indicado para a remoção de poluentes mais complexos. Em contraste, o C/05, ativado por apenas 5 minutos, exibe menor área superficial e eficiência de adsorção, sendo uma opção mais econômica para aplicações de menor demanda. Por fim, o CA/H₃PO₄, produzido por ativação química com ácido fosfórico, desenvolve uma estrutura porosa altamente eficaz para adsorção de substâncias polares, como metais pesados e compostos orgânicos, sendo ideal para processos de tratamento avançado de efluentes.

Na prática, esse adsorvente é utilizado na purificação de água, o carvão ativado é utilizado para remover contaminantes orgânicos e inorgânicos, garantindo a qualidade e segurança do produto final. Na indústria alimentícia, é empregado na clarificação de líquidos, como sucos e bebidas alcoólicas, para melhorar a aparência e o sabor destes produtos (Lebre, 2023). No setor médico, o carvão ativado é utilizado tanto em tratamentos de desintoxicação quanto em sistemas de filtração de ar, como em máscaras

de proteção, devido à sua capacidade de adsorver gases nocivos (Mukhin, 2023). Em ambientes industriais, a capacidade do carvão ativado de adsorver gases é essencial para o controle da emissão de poluentes e odores, contribuindo para a melhoria da qualidade do ar (Lima, 2020). Dessa forma, o carvão ativado se destaca como um material versátil e indispensável em diversas áreas da ciência e tecnologia.

3.10 PENEIRA MOLECULAR DE CARBONO - *CARBON MOLECULAR SIEVE (CMS)*

A peneira molecular de carbono, ou *Carbon Molecular Sieve (CMS)* 3K, é um tipo específico de carvão ativado comercial que foi adotado nesse estudo para investigar o processo de purificação do biogás. Esse carvão é normalmente fornecida pela Osaka Gas Chemicals Co., Japão, e consiste em pellets cilíndricos comerciais com diâmetro de 1,8 mm e comprimento entre 1,18 e 2,8 mm (Zafanelli et al., 2024). No entanto, para garantir o funcionamento do carvão, este precisa passar por um processo de pirólise e ativação para atingir o tamanho de micróporos ideal para remoção (Cavenati, 2005). A seguir, a Imagem 3 apresenta a morfologia do CMS-3K-172 que foi avaliada por microscopia eletrônica de varredura (MEV) nos estudos de caracterização desse elemento, realizados no Laboratório de Sólidos Porosos da Universidade de Málaga, na Espanha.

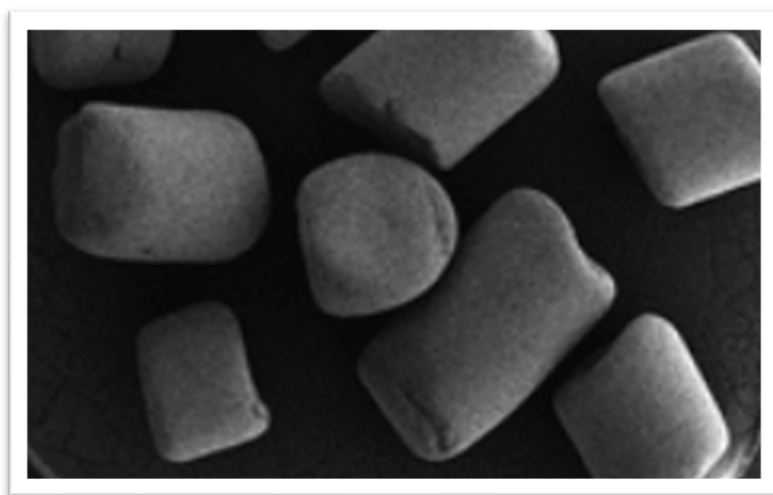


Imagem 3: *Pellets* cilíndricos de CMS-3K.

Fonte: Adaptado de Zafanelli et al., 2024.

De acordo com Zafanelli et al., (2024), o estudo apontou as propriedades texturais do CMS-3K-172, os resultados foram apresentados através da Tabela 2. Além disso,

foram avaliadas a partir de estudos de adsorção de CO₂ a 273 K, realizados em sistema de área superficial acelerada e porosimetria (ASAP 2020 da Micrometrics) e por porosimetria de intrusão de mercúrio, realizados em analisador de tamanho de poros (Micromeritics AutoPoreIV 9500). Outros estudos demonstram que o CMS é um ótimo componente para ser utilizado no processo purificação do biogás em biometano. Uma vez que os poros de tamanho molecular no CMS proporcionaram alta seletividade cinética e capacidade de adsorção para vários gases. Portanto, o CMS foi escolhido no presente estudo de atualização do biogás porque permite um maior nível de difusão de dióxido de carbono na rede de microporos do que as moléculas de metano (CH₄), que apresentam forte resistência na superfície e dentro dos microporos do adsorvente (Kottitum et al., 2020).

Tabela 2: Propriedades texturais do CMS-3K.

Característica	Valor	Unidade
Volume total de intrusão	0,304	cm ³ g ⁻¹
Área total dos poros	5.760	m ² g ⁻¹
Diâmetro médio dos poros (volume)	379	nm
Diâmetro médio dos poros (área)	203	nm
Densidade sólida	1.495	gcm ⁻³
Densidade aparente	1.028	gcm ⁻³
Porosidade	31h25	%
Área de superfície microporosa	481	m ² g ⁻¹
Limitando o volume do microporo	0,193	cm ³ g ⁻¹
Forma adsorvente	-	cilíndrico
Diâmetro adsorvente	1,8	mm
Comprimento adsorvente	1,18–2,8	mm

Fonte: Adaptado de Zafanelli et al., 2024.

Dessa forma, esse carvão ativado comercial é uma opção para ser utilizado em no processo de purificação de gases, uma vez que suas propriedades consegue remover o dióxido de carbono presente no biogás, atingindo excelentes graus de pureza. Algumas pesquisas mostram que a combinação do CMS com tecnologias de adsorção, como o *Pressure swing adsorption (PSA)*, conseguem atingir excelentes grau de pureza, com até

97,92% de metano no biogás, demonstrando a uma oportunidade de redução de custos comerciais do processo (Kottitum et al., 2020).

3.11 ADSORÇÃO POR VARIAÇÃO DE PRESSÃO - *PRESSURE SWING ADSORPTION* (PSA)

A técnica do PSA associada a utilização do adsorvente CMS-3K permite atingir um excelente grau de purificação para atingir as necessidades do mercado. Porém, esse processo para a atualização do biogás ainda é pouco usual, contudo apresenta vantagens competitivas quando se escala a produção do insumo de biometano. Ademais, esse procedimento apresenta uma vantagem ambiental quando comparada com as outras, tendo em vista que seu processo não necessita utilizar solventes químicos ou realizar a troca constante dos filtros (Augelletti & Annesini, 2017).

As peneiras moleculares de carbono (CMS) apresentam vantagens ambientais, uma vez que elas podem ser produzidas a partir de fontes orgânicas diferentes: carvão betuminoso, ossos, casca de coco e outras matérias-primas. A aplicação de peneiras moleculares de carbono na separação de metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2) para a purificação de gás de aterro tem ganhado destaque nos últimos anos. Essas peneiras moleculares, quando utilizadas em processos de adsorção por modulação de pressão (PSA), oferecem uma vantagem significativa: sua estrutura porosa pode ser projetada com gargalos de tamanho intermediário, o que limita ou retarda a adsorção de metano. Esse controle preciso dos poros aumenta a seletividade para CO_2 , favorecendo a separação eficiente dos dois gases. Assim, o CMS se mostram altamente promissoras para otimizar a purificação de biogás, aumentando tanto a eficiência do processo quanto sua viabilidade em escala industrial (Cavenati et al., 2005).

O adsorvente utilizado no processo PSA será o CMS-3k, ou seja, a peneira molecular de carbono (*Carbon Molecular Sieve*). Essa substância é um carvão ativado comercial que possui uma distribuição de microporos estreita e uniforme. Dessa forma, essa geometria dos poros, muito perto dos diâmetros cinéticos de algumas moléculas presentes no gás, permite que sejam utilizados como peneiras moleculares em determinadas separações. Assim, esse trabalho buscou investigar a eficiência da remoção do CO_2 do biogás advindo de resíduos orgânicos, utilizando o CMS-3K no sistema PSA.

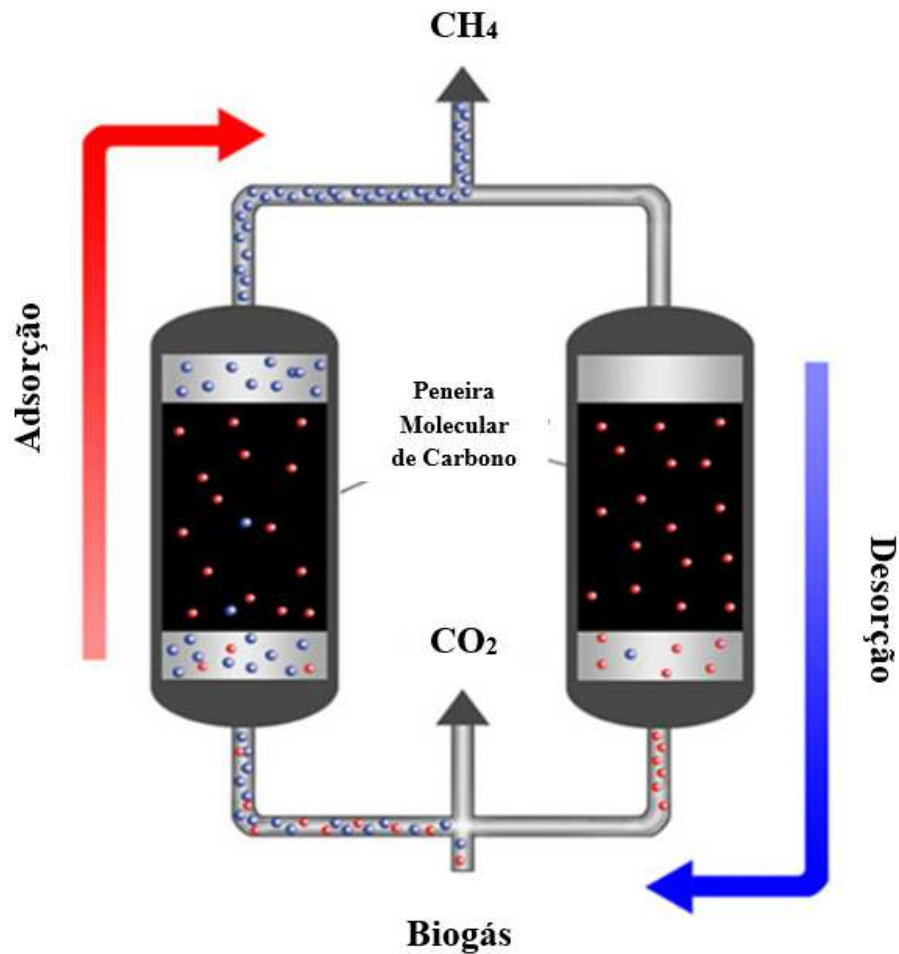


Figura 4: Exemplo de Pressure Swing Adsorption (PSA).

Fonte: Adaptado de Osaka Gas Chemicals Co., 2024.

Nos processos de adsorção por oscilação de pressão (PSA), o biogás é submetido a uma compressão entre 4-10 bar e então alimentado em uma coluna onde entra em contato com um material adsorvente. Esse adsorvente, como as peneiras moleculares de carbono (CMS), carvões ativados, zeólitas e outros materiais detêm a capacidade de reter seletivamente o CO_2 presente no biogás. O gás metano (CH_4) purificado é recuperado no topo da coluna com uma queda de pressão mínima. Assim, com o passar do tempo, o adsorvente fica saturado com CO_2 , após isso, é necessário regenerar a coluna, reduzindo a pressão (Kohlheb et al., 2021).

Embora esse processo funcione adequadamente na remoção do dióxido de carbono, gás causador do efeito estufa, para o H_2S é normalmente irreversível nos adsorventes, então um processo de remoção desse gás deve ser implementado antes do PSA. Dependendo do adsorvente escolhido, também é possível remover a umidade

presente no biogás juntamente com o CO₂ na mesma unidade. Nesse método, para simular um processo contínuo, são empregadas matrizes de múltiplas colunas. No entanto, para aplicações de menor escala e sujeitas a interrupções, é possível utilizar uma única coluna com tanques de armazenamento. Desse modo, uma das principais vantagens do processo PSA é sua adaptabilidade para a valorização do biogás em qualquer parte do mundo, independentemente da disponibilidade de fontes quentes ou frias (Shen et al., 2021).

A vida útil da peneira molecular de carbono é um fator importante a ser considerado nas aplicações de separação de gases. Dessa forma, a duração do CMS pode variar de acordo com a qualidade do material, as condições operacionais, como a composição do gás, a temperatura e a pressão, além da frequência de regeneração. Com uma manutenção adequada e a adoção de práticas operacionais corretas, a vida útil do CMS pode ser prolongada, garantindo um desempenho consistente ao longo do tempo, podendo ultrapassar anos funcionamento. No entanto, é importante monitorar regularmente o desempenho operacional desse material e substituí-lo quando necessário, para assegurar a eficiência e a qualidade dos processos de separação de gases (Yamtop Chemical Co., 2024).

O trabalho busca compreender o processo de separação de gases por adsorção na produção de biogás e analisar os benefícios ambientais, sociais e econômicos desse gás renovável. Quando o biogás é convertido em biometano através da purificação, esse combustível apresenta aplicações distintas em diferentes setores. A sustentabilidade é um ponto forte, tendo em vista a capacidade de substituição dos combustíveis fósseis; aproveitamento dos resíduos orgânicos, colaborando com a implementação da economia circular; capacidade de gerar segurança energética para países dependentes de importação de energia, além de diversificar as fontes de matriz energética; o desenvolvimento rural e geração de empregos; e por fim, a implementação de políticas públicas para promover a utilização de fontes de energia limpa.

Portando, a atualização do biogás para biometano é importante tanto do ponto de vista socioambiental quanto econômico. Ao converter biogás em biometano, eliminamos componentes indesejados como CO₂ e impurezas, resultando em um combustível mais limpo e de maior qualidade. Isso não só reduz as emissões de GEE, mas também aproveita de forma mais eficiente os resíduos orgânicos, transformando-os em uma fonte valiosa de energia renovável. Além disso, a produção de biometano oferece uma solução sustentável para a gestão de resíduos sólidos urbanos, contribuindo significativamente

para a redução do impacto ambiental e promovendo a transição para uma economia mais verde e circular (Wang & Azam, 2024).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Com o propósito de aumentar a eficácia da identificação e do reconhecimento da produção acadêmica referente ao processo de atualização do biogás utilizando o adsorvente CMS-3K no PSA, foi realizada uma revisão sistemática da literatura em conjunto com a análise bibliométrica. Essa prática metodológica foi inspirada no trabalho de Soares (2023), que defende a utilização combinada dessas duas metodologias como forma de demonstrar de forma abrangente o progresso da pesquisa científica. Portanto, a combinação dessas técnicas é capaz de demonstrar a evolução dos estudos científicos ao longo do tempo de forma quantitativa utilizando a bibliometria, e qualitativamente, por meio de estudos específicos sobre temas e conteúdos utilizando a revisão sistemática (Pizzi et al., 2020).

4.1 ANÁLISE QUALITATIVA VIA MÉTODO PRISMA

Considerando a importância fundamental do tema abordado neste artigo, é essencial realizar uma revisão sistemática da literatura. Esta abordagem metodológica permite a coleta e análise de estudos relevantes, centrados em um tópico específico, além da síntese de resumos precisos e objetivos dos resultados obtidos. De acordo com de Souza Scotelano et al. 2023, a revisão sistemática da literatura envolve a identificação e seleção sistemática de pesquisas em destaque, a extração de dados e a análise dos resultados observados dentro do domínio científico.

O presente estudo utilizou o protocolo PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta Analyses*) na produção da revisão, permitindo a inclusão de aspectos relevantes como busca na literatura, identificação de artigos publicados elegíveis, extração de dados e sumarização. Para a realização da pesquisa bibliográfica, utilizou-se a base de dados *Web of Science*, considerando um recorte temporal de dez anos. Assim, teve-se como prioridade os documentos de acesso aberto de periódicos indexados em todo o mundo. A escolha da base *Web of Science* ocorreu devido à sua reputação de consistência, padronização e credibilidade em pesquisas acadêmicas.

A estratégia de pesquisa foi feita no modo avançado por meio das seguintes strings de busca: TS = (PRISMA AND *Preferred Reporting Items for Systematic reviews and*

Meta Analyses), TS = (*bibliometrics*), TS = (biomethane AND landfill gas), TS = (biogas upgrade), TS = (CMS-3K AND carbon molecular sieve), TS = (PSA AND pressure swing adsorption). Todas as seis strings de pesquisa foram combinadas através do operador lógico booleano OR para não obter resultados duplicados. Além disso, foram selecionados apenas artigos publicados em inglês no período compreendido entre a data de 01/01/2015 a 01/01/2024.

Foram encontrados um total de 29.880 documentos usando a sequência de busca mencionada anteriormente. Dessa forma, os dados foram então exportados com registro completo e referências citadas e salvos em formato tabular para posterior análise no Microsoft Excel, elaborando-se gráficos e tabelas.

A pesquisa realizada por Boloy et al. 2021 indica que o software OpenRefine 3.8 é recomendado devido à sua compatibilidade com várias tarefas de manipulação de dados e sua eficácia na limpeza de dados, resolução de informações ambíguas, eliminação de redundâncias e facilitação de transformações de formato de dados.

4.2 ANÁLISE QUANTITATIVA VIA REVISÃO BIBLIOMÉTRICA

O estudo da bibliometria engloba diferentes técnicas quantitativas, estatísticas e matemáticas empregadas para examinar e construir indicadores relativos aos padrões e desenvolvimentos no domínio científico. Via de regra, esses métodos se concentram na investigação de disciplinas, áreas de estudo, organizações ou países. Desse modo, os dados utilizados para análises bibliométricas são provenientes de importantes bases de dados de artigos dedicados a periódicos e revistas acadêmicas conceituadas (Soares, 2023).

A análise dos dados neste estudo foi realizada utilizando-se a metodologia descrita em Boloy et al. 2021. A fim de facilitar a construção e visualização dos mapas bibliométricos, os pesquisadores utilizaram o software VOSviewer. O programa oferece uma abordagem abrangente e fácil de usar para construir e interpretar mapas bibliométricos, além disso, possui o acesso gratuito. Os mapas são representados por círculos que representam itens individuais, com o tamanho de cada círculo refletindo o significado do respectivo elemento e as conexões entre os itens no mapa de rede demonstra a proximidade de seus relacionamentos. Além disso, a posição e a cor dos círculos são empregadas para agrupar elementos semelhantes (Van Eck & Waltman, 2010).

O trabalho considerou dois indicadores bibliométricos para a realização deste estudo: coautoria com países como análise unitária e co-ocorrência com palavra-chave de autor como análise unitária.

Segundo Pizzi et al. 2020, o indicador "coautoria com países como unidade" refere-se à relação entre os elementos com base no número de coautores envolvidos nos artigos, com foco específico em destacar os países dos respectivos autores. Assim, esse indicador investiga a natureza colaborativa da pesquisa em diferentes países. Por outro lado, o indicador "co-ocorrência com palavras-chave do autor como unidade" refere-se à relação entre artigos com base na frequência de ocorrência de palavras-chave compartilhadas entre eles. Esse indicador enfatiza a semelhança de palavras-chave específicas usadas pelos autores em suas publicações, fornecendo *insights* sobre semelhanças temáticas e tendências de pesquisa. Portanto, a junção desses indicadores oferece uma análise valiosa para a compreensão da colaboração em pesquisa e conexões temáticas dentro do conjunto de dados estudado.

4.3 PARTE EXPERIMENTAL

4.3.1 LOCAL DE REALIZAÇÃO DOS EXPERIMENTOS

Os experimentos práticos descritos neste trabalho foram conduzidos no laboratório do Centro de Investigação de Montanha (CIMO), integrado à Escola Superior de Tecnologia e Gestão (ESTIG) do Instituto Politécnico de Bragança (IPB). O CIMO é um centro de investigação reconhecido pela sua capacidade técnica e instrumental, especialmente na área de análises químicas e ambientais, onde os protocolos científicos são seguidos rigorosamente para garantir a reprodutibilidade e exatidão dos resultados. Dessa forma, a escolha deste local ocorreu pelo fato de existir excelentes profissionais pesquisadores que atuam no campo dos gases e de variedades de materiais adsorventes. Assim, pode-se realizar experimentos que demonstrem a adsorção de gases do biogás.

4.3.2 ADSORVENTE E ADSORVATO

Neste estudo, utilizou-se a peneira molecular de carbono (Carbon Molecular Sieve - CMS 3K), um carvão ativado de alta pureza fornecido pela Osaka Gas Chemicals Co., do Japão, para investigar sua eficácia no processo de atualização do biogás. O CMS 3K, apresenta-se na forma de pellets cilíndricos com um diâmetro preciso de 1,8 mm e

comprimento variando entre 1,18 e 2,8 mm (conforme ilustrado na Imagem 4). As propriedades físico-químicas detalhadas do CMS 3K são descritas na Tabela 2, oferecendo uma visão abrangente das características que fundamentam sua aplicação no processo de purificação.



Imagem 4: Peneira Molecular de Carbono do tipo CMS-3K.

No laboratório CIMO/ESTIG, foram utilizados gases produzidos pela empresa Air Liquide, cada um com especificações rigorosas para garantir a precisão dos experimentos (Imagem 5). O Hélio (He) ALPHAGAZ 2, com uma pureza de 99,9998%, foi empregado como gás inerte. O Dióxido de Carbono (CO₂) N48, com pureza de 99,998%, e o Metano (CH₄) N35, com pureza de 99,95%, foram utilizados como gases adsorvatos. A elevada pureza desses gases se torna um fator muito importante para assegurar a exatidão e a reprodutibilidade dos resultados experimentais. Dessa forma, a qualidade controlada dos gases contribuiu significativamente para a eficácia das análises e para a robustez dos dados obtidos durante o estudo.



Imagem 5: Cilindros de gases do CIMO/ESTIG.

4.3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Na etapa experimental deste estudo, utilizou-se uma unidade desenvolvida no laboratório CIMO/ESTIG para investigar o equilíbrio de adsorção dos gases CO_2 e CH_4 , por meio da medição de curvas de ruptura em leito fixo (Imagem 6). Este equipamento, já validado em estudos anteriores sobre adsorção (Zafanelli et al., 2020; Aly et al., 2021), foi projetado para oferecer alta precisão no controle das variáveis experimentais, assegurando resultados consistentes e replicáveis. O diagrama esquemático da unidade experimental está representado na Figura 5.

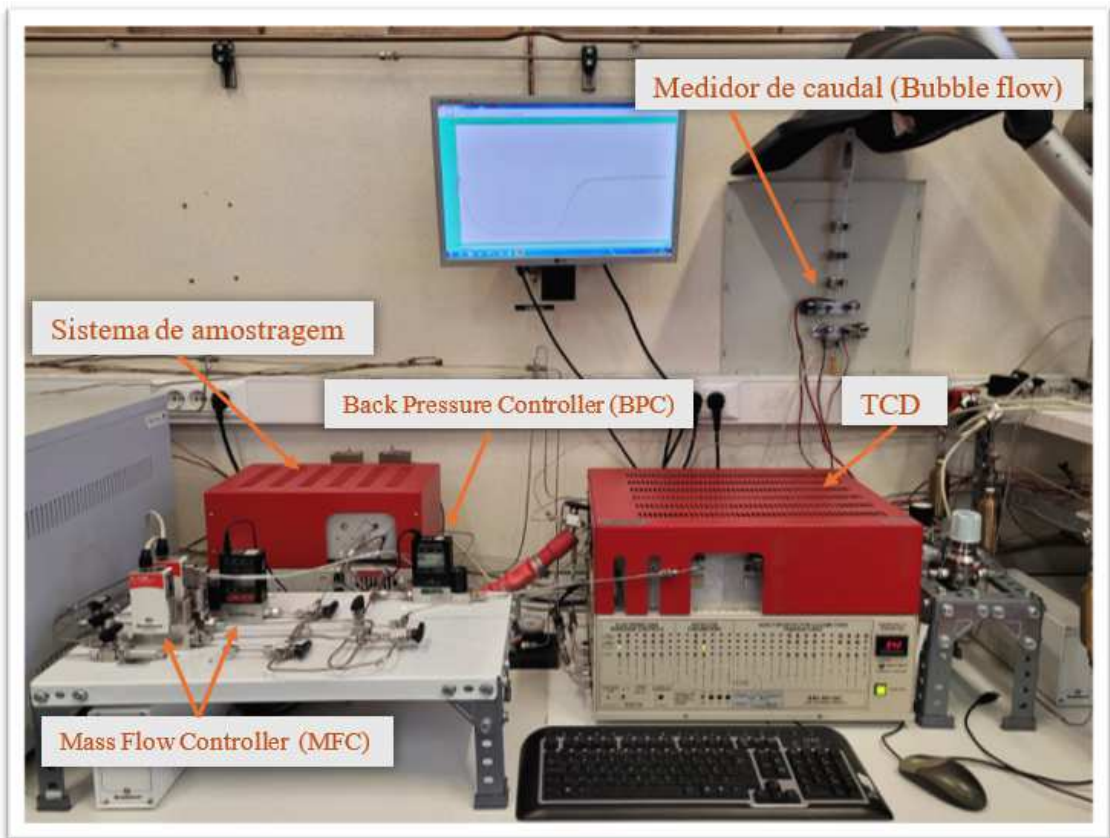


Imagem 6: Configuração Experimental CIMO/ESTIG.

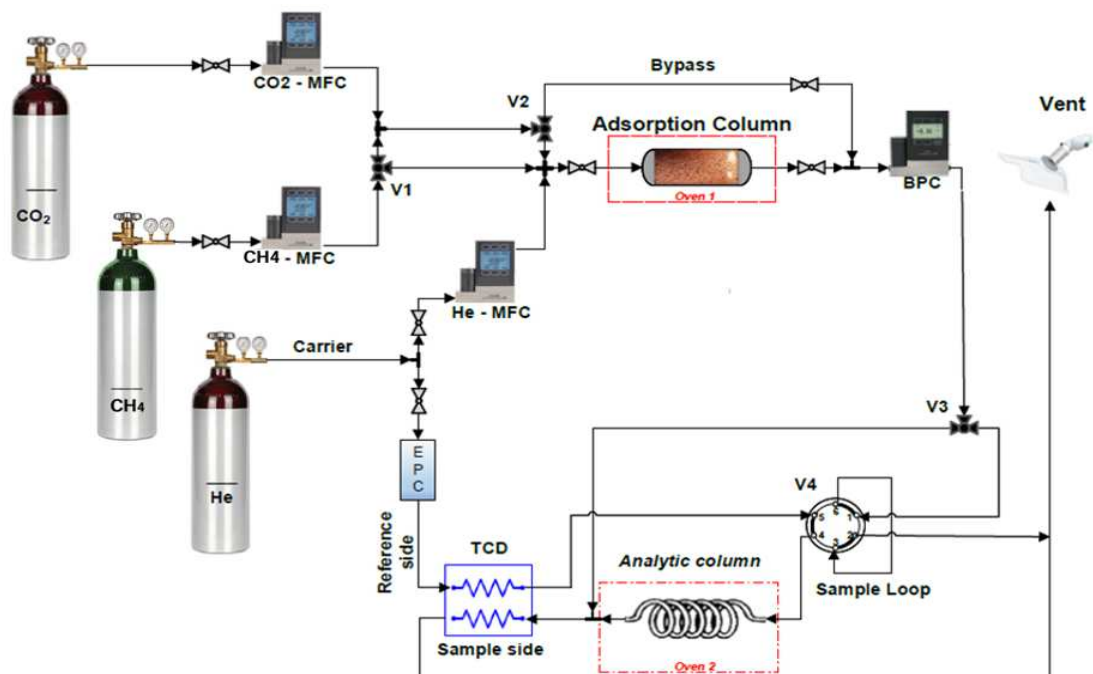


Figura 5: Desenho esquemático da configuração experimental usada para realizar experimentos inovadores de um e vários componentes para medir o equilíbrio de adsorção.

Fonte: Adaptado de (Aly et al., 2021).

O sistema experimental é dividido em três seções principais. A primeira é a seção de preparação de gás, responsável pelo controle e fornecimento dos gases utilizados nos experimentos. Em seguida, há o sistema de coluna de adsorção, onde ocorre a separação dos gases e a medição das curvas de ruptura. Por fim, a terceira seção é o sistema analítico, que utiliza um cromatógrafo a gás com detector de condutividade térmica (TCD) (modelo SRI 8610C, EUA) para monitorar e quantificar as concentrações de CO_2 e CH_4 .

Na primeira etapa do experimento, a pressão parcial dos gases adsorvíveis foi cuidadosamente ajustada antes de sua introdução na coluna de adsorção. A mistura gasosa, então, percorreu uma coluna de adsorção de 100 mm de comprimento e 4,6 mm de diâmetro (Imagem 7), inserida em um forno com temperatura controlada para garantir condições consistentes. O controle preciso do caudal dos gases de arraste (He) e dos gases de adsorção (CO_2/CH_4) foi realizado por controladores de fluxo de massa (Alicat MFCs, EUA), enquanto a pressão total do sistema foi mantida por um controlador eletrônico de pressão (Alicat BPR, EUA).



Imagem 7: Coluna de adsorção.

Em experimentos com um único adsorvato, o gás que sai da coluna foi conduzido diretamente ao detector de condutividade térmica (TCD) para análise, assegurando medições exatas do comportamento de adsorção.

Nos experimentos binários, o gás proveniente da coluna foi direcionado para um sistema de loop de captura, controlado por uma válvula de seis portas VICI-Valco. A válvula foi programada para injetar automaticamente a amostra gasosa, retida no loop, em intervalos de 20 segundos, em uma coluna cromatográfica (HayeSep), para análise subsequente no detector de condutividade térmica (TCD).

O número de mole de adsorvato retido no leito nas condições de equilíbrio, q_{exp} ($mol.kg^{-1}$), também conhecido como quantidade adsorvida, é calculado a partir de um balanço de massa, a partir da integração do histórico molar da curva de ruptura completa, de acordo com a Equação II.

$$q_{exp} = \frac{1}{m_s} \left(F_f t_s - \int_0^{t_s} F dt - \varepsilon_b V_{ac} C_f \right) \quad (II)$$

onde m_s (kg) é a massa de adsorvente empacotada na coluna, F_f and F ($mol.s^{-1}$) são os caudais molares da espécie adsorvível na alimentação e na saída da coluna, respectivamente, t_s (s) é o tempo de saturação, ε_b é a porosidade do leito, V_{ac} (m^3) é o volume da coluna de adsorção e C_f ($mol.m^{-3}$) é a concentração de alimentação da espécie adsorvível. Neste trabalho utilizou-se um valor de 0.4 para ε_b .

Antes do primeiro experimento, a coluna de adsorção passou por um processo de ativação de 12 horas, a 373 K, sob vácuo e com caudal contínuo de hélio puro ($10 mL min^{-1}$), visando remover qualquer contaminante pré-adsorvido, como a umidade, garantindo assim a integridade e a precisão das medições realizadas.

5 RESULTADOS

5.1 PANORAMA DAS PUBLICAÇÕES SOBRE ATUALIZAÇÃO DE BIOGÁS UTILIZANDO CMS-3K NO *PRESSURE SWING ADSORPTION* (PSA)

5.1.1 ANÁLISE CRONOLÓGICA DAS PUBLICAÇÕES

A partir da *string* de busca utilizada na base de dados Web os Science citada anteriormente, foram encontrados 29.880 documentos que passaram por um processo de triagem e foram refinados a 9.374 artigos que se referem à atualização de biogás utilizando peneira molecular de carbono nas colunas do PSA. A Figura 6 quantifica a contribuição cronológica dos artigos publicados entre 2015 e 2024. Como pode ser observado na figura, o número médio de publicações tem aumentado ao longo dos anos e pode-se notar que a partir de 2018 a taxa de crescimento aumentou significativamente. Os anos com mais publicações são 2022 e 2024, com 1670 e 1745 artigos, respectivamente. O valor reduzido, 135, representa apenas os dados iniciais do ano de 2024.

O número crescentes de publicações a partir de 2018 pode ser explicado por um acontecimento marcante no mundo nesse ano. O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) lançou um relatório especial em outubro sobre os impactos do aquecimento global de 1,5°C acima dos níveis pré-industriais. Esse relatório destacou a necessidade urgente de reduzir drasticamente as emissões de gases de efeito estufa para limitar os impactos climáticos catastróficos. Dessa maneira, muitas pesquisas pautadas em temáticas de transição energética ganharam força, a fim de limitar as emissões de GEE na atmosfera (Pörtner, 2022).

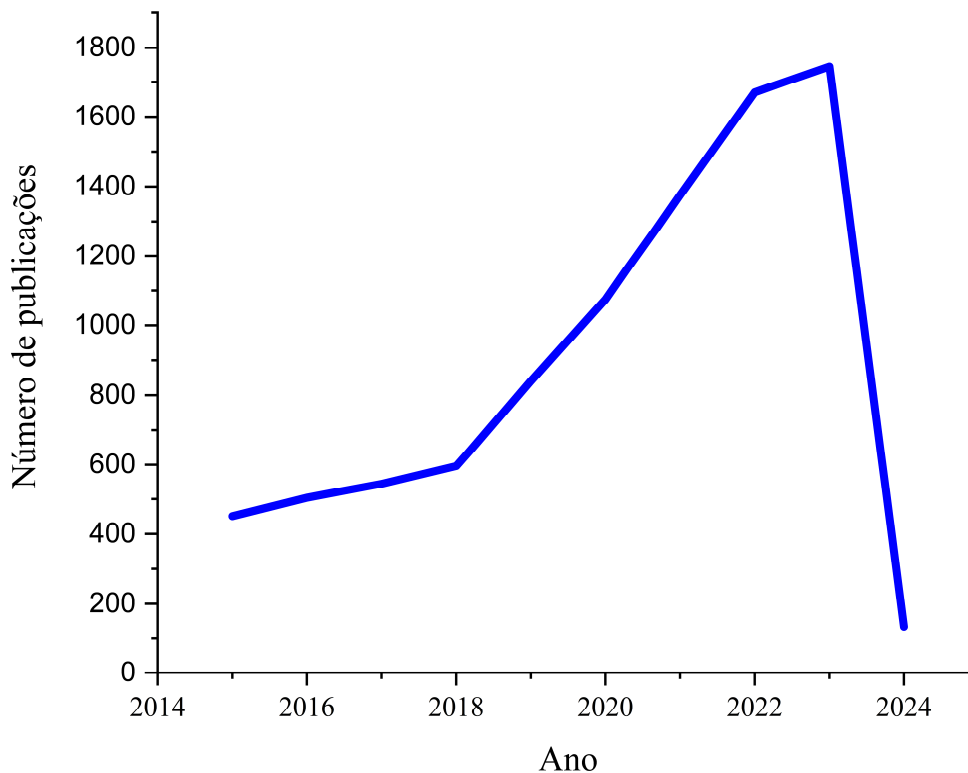


Figura 6: Número de documentos publicados por ano.

Fonte: Autor, 2024.

5.1.2 ANÁLISE DAS PUBLICAÇÕES POR PAÍS

De acordo com a Figura 7, o país que mais contribui com documentos é a China, com 2205, seguido por Estados Unidos (1483), Espanha (739), Inglaterra (569) e Itália (541). Pensando em apresentar uma forma melhor de visualização dessas informações, foi criado o mapa de visualização (Figura 7) com base nos dados bibliográficos escolhidos no software VOSviewer, os quais permitem explicar a quantidade de documentos publicados por país. Dessa forma, utilizou-se uma abordagem analítica para investigar padrões de coautoria, com foco na unidade do país. Para isso, utilizou-se a análise de arquivos bibliográficos do banco de dados extraídos da Web of Science, os quais foram processados pelo método de contagem completa.

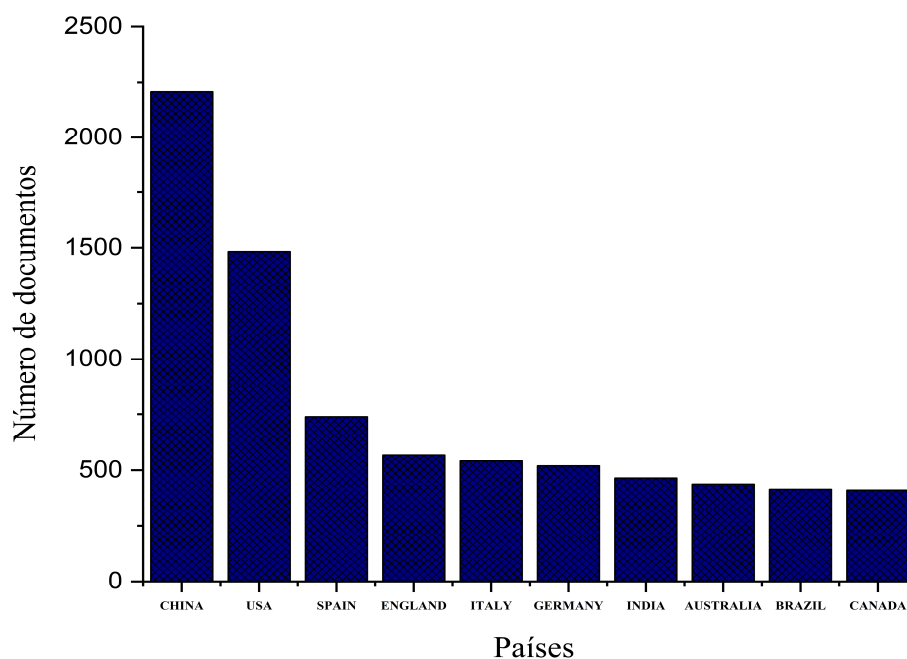


Figura 7: Número de documentos por país.

Fonte: Autor, 2024.

Sendo assim, em cada documento foi considerado um máximo de 25 países, garantindo um limite mínimo de dez documentos por país. Dessa forma, 79 países cumpriram com sucesso esse critério, permitindo uma análise robusta. Além disso, o estudo avaliou a força geral das conexões de coautoria entre cada um dos 79 países que atenderam os critérios estabelecidos. O estudo da coautoria por país serve como uma unidade valiosa de análise e fornece *insights* sobre a força cumulativa do vínculo, ou seja, indica a intensidade ou proximidade dessa relação entre dois ou mais itens. Diante esse estudo, percebeu-se que os Estados Unidos (força total da ligação: 82) apresenta laços estreitos com a Índia, Austrália, Canadá e China. A Inglaterra (força total da ligação: 76) possui fortes ligações com a Itália, Alemanha, Brasil, Canadá e Estados Unidos. A Alemanha (força total da ligação: 74) tem uma forte ligação com a Inglaterra e Itália.

Os Estados Unidos colaboram academicamente com a Índia, Canadá, Austrália e China devido à preeminência desses países em diversas áreas de pesquisa. A China destaca-se em inteligência artificial e biotecnologia, o Canadá e a Austrália em ciências ambientais e da saúde e a Índia em tecnologia da informação e ciências da computação. Dessa forma, essas colaborações permitem que os cientistas dos EUA acessem

conhecimentos avançados e tecnologias inovadoras, ampliando assim o alcance e a profundidade de suas pesquisas (Lee, 2024).

A Inglaterra mantém fortes ligações com a Itália, Alemanha, Brasil, Canadá e Estados Unidos devido a uma confluência de fatores históricos, econômicos, culturais e científicos. Historicamente, alianças políticas e militares, especialmente durante e após as duas Guerras Mundiais, consolidaram os vínculos com a Alemanha, Estados Unidos e Canadá. Economicamente, a Inglaterra desfruta de relações comerciais robustas com esses países, que são parceiros no comércio internacional e em investimentos. Culturalmente, há uma troca rica e contínua de ideias, pessoas e tradições, facilitada pela diáspora e pela globalização. Esta troca cultural é reforçada por eventos internacionais, colaborações artísticas e intercâmbios acadêmicos, que promovem uma compreensão mútua e valorização das respectivas culturas (Buckle, 2023).

Cientificamente, colaborações em pesquisa e desenvolvimento são fortemente incentivadas pela presença de instituições de ensino e pesquisa de renome mundial. A cooperação em projetos científicos e tecnológicos entre universidades e centros de pesquisa da Inglaterra e desses países tem promovido avanços significativos em diversas áreas do conhecimento. Programas de intercâmbio e parcerias educacionais, como o Erasmus+ e iniciativas bilaterais com universidades norte-americanas e europeias, desempenham um importante papel na consolidação desses laços (Dedej & Medici, 2024).

Em relação a China (força total da ligação: 70), embora também apresente um grande número de conexões, esse país se destaca por deter o maior número de publicações da atualidade, esse cenário pode ser explicado pelo fato de que a população de estudantes universitários aumentou consideravelmente nos últimos 20 anos (Gomes et al., 2022).

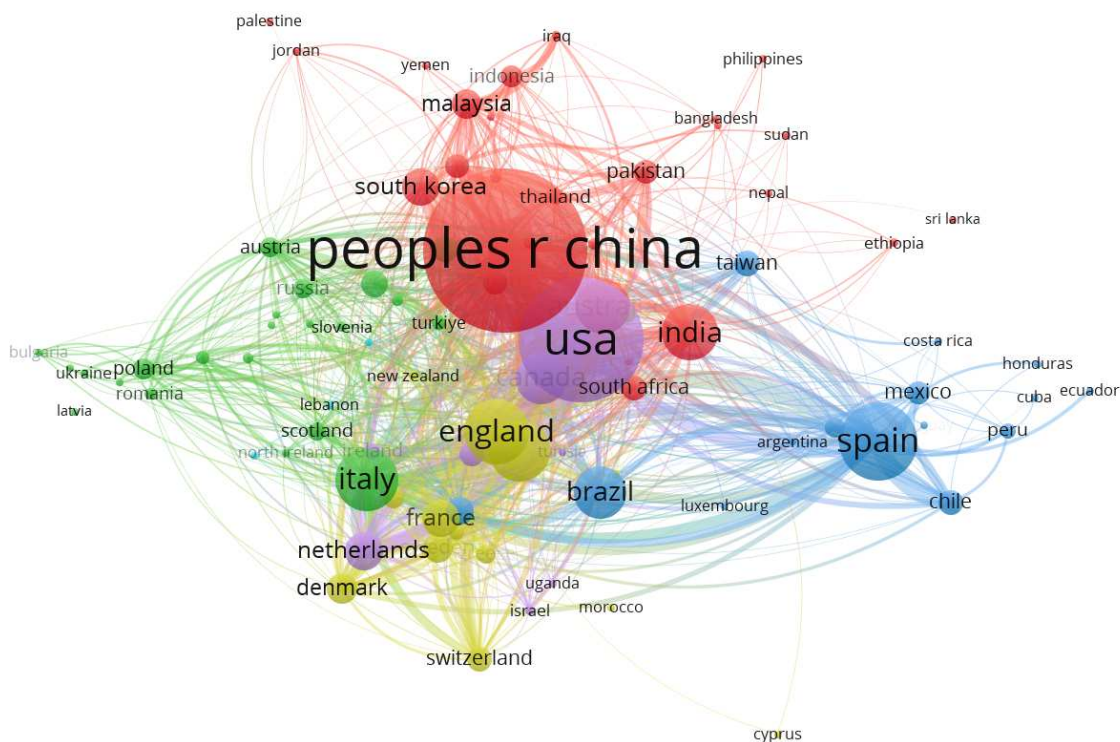


Figura 8: Cooperação entre países.

Fonte: Autor, 2024.

5.1.3 ANÁLISE GERAL DAS PALAVRAS-CHAVE DA PUBLICAÇÃO

O estudo empregou o software VOSviewer para criar um mapa de visualização de sobreposição (Figura 9), utilizando dados bibliográficos selecionados por meio de análise de coocorrência. A análise abrangeu todas as palavras-chave dos autores, com os dados sendo extraídos de arquivos extraídos bancos de dados bibliográficos da Web of Science e tratados como o apoio do software Openrefine. O critério de seleção das palavras-chave foi uma ocorrência mínima de cinco vezes no software VOSviewer.

Posteriormente, o estudo calculou a ocorrência entre cada uma das 17.542 palavras-chave do autor e sua força de ligação. A partir dessa análise, as 1144 palavras-chave com maior força total de ligação foram identificadas e submetidas a um exame mais aprofundado. Como pode ser observado, as palavras-chave foram separadas em dez agrupamentos numerados de acordo com a palavra-chave mais ocorrente, como mostra a Tabela 3.

A partir do software VOSviewer analisado na Figura 9, foram encontradas 1144 palavras-chave em 5 ocorrências. Após selecionar as palavras que mais condiziam com o objetivo do trabalho foi possível criar uma estrutura de visualização. Além disso, a

palavra-chave mais utilizada é "Bibliometria", com 4053 buscas, e a força total do link foi de 5, seguida por "Atualização de biogás", com 435 buscas e uma força total de alcance de 9. A "Análise bibliométrica" ocorreu 404 vezes, com uma força total de ligação de 4. A distância entre as palavras-chave é proporcional à relação entre elas. Sendo assim, a palavra-chave "Bibliometria" é muito próxima de "Adsorção", indicando que esses conceitos possivelmente se originam uns dos outros.

A palavra-chave "biogás" está cercada das palavras "captura de CO₂", "carvão ativado", "Pressure Swing Adsorption" e "utilização de CO₂". A palavra-chave 'biogás' está intrinsecamente conectada a conceitos como 'captura de CO₂', 'carvão ativado', 'Pressure Swing Adsorption' e 'utilização de CO₂'. O biogás, sendo uma fonte renovável de energia, é frequentemente associado a tecnologias de captura de CO₂ para mitigar emissões de gases de efeito estufa. Nesse contexto, o carvão ativado desempenha um papel importante como um adsorvente eficiente, especialmente em sistemas de '*Pressure Swing Adsorption*', um método amplamente utilizado para separar e purificar gases, incluindo o CO₂. Além disso, a 'utilização de CO₂' busca integrar o gás capturado em processos produtivos, promovendo uma abordagem sustentável e alinhada com os princípios da economia circular.

De acordo com o trabalho de Bernardo et al. (2021), o caráter renovável e sustentável do precursor desses bioadsorventes, como o carvão ativado, deve ser destacado no contexto de uma economia circular e mercado emergente de energia renovável para atingir as metas climáticas e energéticas da União Europeia. Além disso, o autor Lestinsky et al. (2015) defende que o processo de adsorção é o método mais típico para o processo de atualização, particularmente para o processo de PSA. Consistindo em um lote periódico em que a adsorção é realizada em alta pressão e a dessorção (regeneração) em baixa pressão.

Ademais, as palavras "atualização de biogás", "biometano" e "biogás" apresentam-se em *clusters* bem definidos próximos, ou seja, em grupos circulares com cores bem visíveis. Essa proximidade das palavras-chave do autor indicam subáreas de pesquisa amplamente exploradas, onde os temas dentro de cada *cluster* estão fortemente conectados. Dessa forma, a relação entre essas palavras está intrinsecamente ligada à transformação de resíduos orgânicos em energia renovável de alta qualidade. O biogás, produzido pela decomposição anaeróbica de materiais orgânicos é composto principalmente de metano e dióxido de carbono. Para torná-lo mais eficiente e utilizável

em larga escala, o biogás passa por um processo de atualização, no qual impurezas como CO₂ e vapor de água são removidas, resultando em um gás com elevado teor de metano.

Esse gás purificado, conhecido como biometano, possui características semelhantes ao gás natural, sendo uma alternativa sustentável. Esse processo integra a bioeconomia circular, ao converter resíduos em uma fonte limpa de energia, promovendo a sustentabilidade e a redução de emissões de carbono (Dada & Mbohwa, 2017).

Tabela 3: Ocorrência das palavras-chave do autor.

Palavras-chave do autor	Clusters	Nº de ocorrências
Bibliometria	7	4053
Atualização de biogás	5	435
Análise bibliométrica	8	404
Biogás	6	306
Biometano	4	271
Revisão sistemática	1	210
Pressure Swing Adsorption	2	195
Digestão anaeróbia	9	193
Adsorção	10	100
Captura de CO ₂	3	92

Fonte: Autor, 2024.

foram "Scientometrics ", com uma fonte com 12476 citações, que foi a maior entre as publicações de purificação de biogás com CMS-3K utilizando o PSA. A segunda fonte refere-se a " Journal of Informetrics", com 8201 citações. A terceira fonte de publicação é "Applied Energy", com 3886 citações. As outras fontes como "Bioresource Technology", "Journal of Cleaner Production", "Chemical Engineering Journal", "Energy", "Industrial & Engineering Chemistry R.", "Renewable Energy" e "Fuel" aparecem com 3803, 3526, 3069, 1575, 1493, 1438 e 957 citações, respectivamente.

Tabela 4: Indicador de Fator de Impacto

Revista	Citações	Journal Impact Factor (JIF)
Scientometrics	12476	3.9
Journal of Informetrics	8201	3.7
Applied Energy	3886	11.2
Bioresource Technology	3803	11.4
Journal of Cleaner Production	3526	11.1
Chemical Engineering Journal	3069	15.1
Energy	1575	8.9
Industrial & Engineering Chemistry R.	1493	4.2
Renewable Energy	1438	8.7
Fuel	957	7.4

Fonte: Autor, 2024.

5.1.5 ÁREAS DE PESQUISA

As áreas de pesquisa mais relevantes escolhidas para os artigos publicados sobre o processo de atualização do biogás utilizando o CMS-3K no PSA são mostrados no quadro da Figura 10, abaixo. As dez áreas temáticas de pesquisa que apresentaram mais artigos publicados foram: Ciência da Informação Biblioteconomia (1312), Engenharia Química (884), Combustíveis Energéticos (862), Ciências ambientais (769), Aplicações Interdisciplinares em Ciência da Computação (691), Tecnologia científica sustentável verde (441), Engenharia Ambiental (416), Cirurgia (358), Medicina Geral Interna (326) e Sistemas de Informação em Ciência da Computação (308).

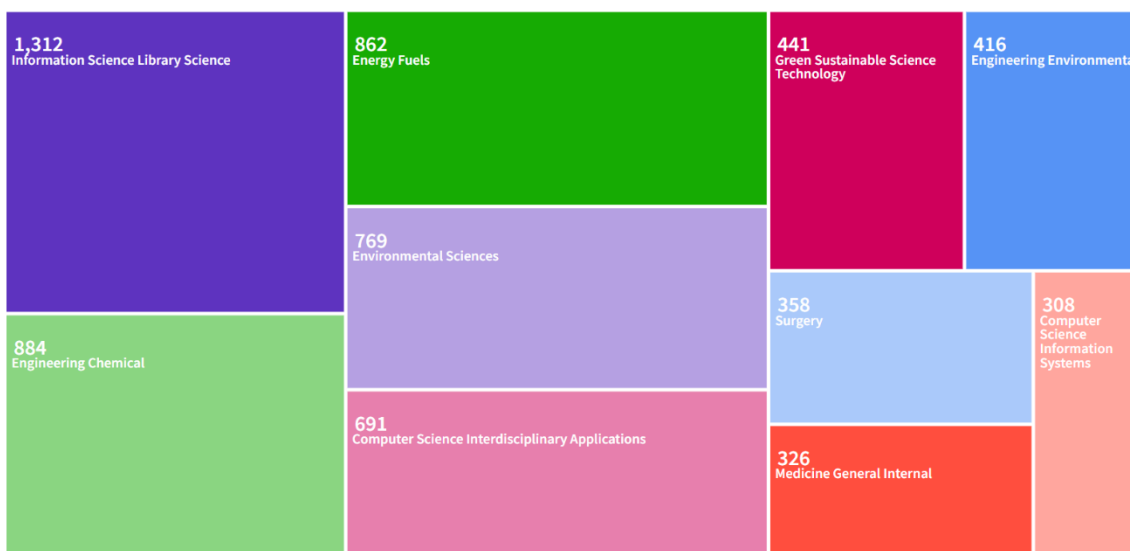


Figura 10: Áreas de pesquisa mais relevantes.

Fonte: Autor, 2024.

A presença de publicações sobre PRISMA em áreas como Medicina, Ciências Ambientais, e Engenharia reflete a importância da revisão sistemática como ferramenta crítica para sintetizar a evidência científica e estabelecer bases sólidas para a tomada de decisão em políticas públicas e desenvolvimento tecnológico (Pollock & Berge, 2018). Da mesma forma, a Bibliometria se aplica não apenas à Ciência da Informação, mas também à avaliação de tendências e impacto em setores como Combustíveis Energéticos e Tecnologia Sustentável Verde, fornecendo métricas para mensurar o progresso científico e a inovação (Donthu et al., 2021).

A relevância de tópicos como Biometano e PSA em áreas como Engenharia Química e Engenharia Ambiental destaca o papel dessas tecnologias na transição energética e na mitigação das mudanças climáticas, ao otimizar a produção de energias renováveis e a captura de gases de efeito estufa (Zhao & You, 2020). Adicionalmente, o uso de materiais inovadores, como CMS-3K, amplia as aplicações em separação de gases e tecnologias limpas, com impacto direto nas áreas de Engenharia Química e Ciências Ambientais (Kapoor et al., 2019).

Por fim, a inclusão de Ciência da Computação e suas vertentes interdisciplinares é um reflexo da necessidade de ferramentas avançadas de modelagem e otimização, fundamentais em diversos campos, desde a simulação de processos químicos até a análise de grandes volumes de dados em revisões sistemáticas e métricas bibliométricas (Nica et al., 2024). Assim, a interconexão entre essas áreas demonstra como o conhecimento

científico se articula de maneira transversal, evidenciando a colaboração entre disciplinas na busca por soluções inovadoras e sustentáveis.

5.2 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA: MÉTODO PRISMA

A Figura 11 apresenta o fluxograma PRISMA para os registros incluídos na revisão com base em quatro etapas da estratégia de busca (identificação, triagem, elegibilidade e incluído). Dos 29.880 documentos triados na base de dados Web of Science, foram selecionados 393, após descarte dos demais documentos devido a critérios de refinamento na etapa de triagem, como por exemplo: considerando o ano publicado 10 anos, textos publicados apenas em inglês e área temática. Em relação a área temática, foram descartados 8.612 documentos textuais que não pertenciam ao tema em pauta. Em seguida, apenas 7 foram selecionados após a leitura do título, em que foram descartados títulos sem termos como "carbon molecular sieve", "biomethane", "biogas upgrade", "pressure swing adsorption" e "landfill gas". A partir desses documentos e após a leitura do resumo, 7 foram incluídos na metanálise. Ademais, foram identificados outros documentos utilizados na aplicação do método PRISMA retirados de outras fontes de informações indicadas na Figura 11.

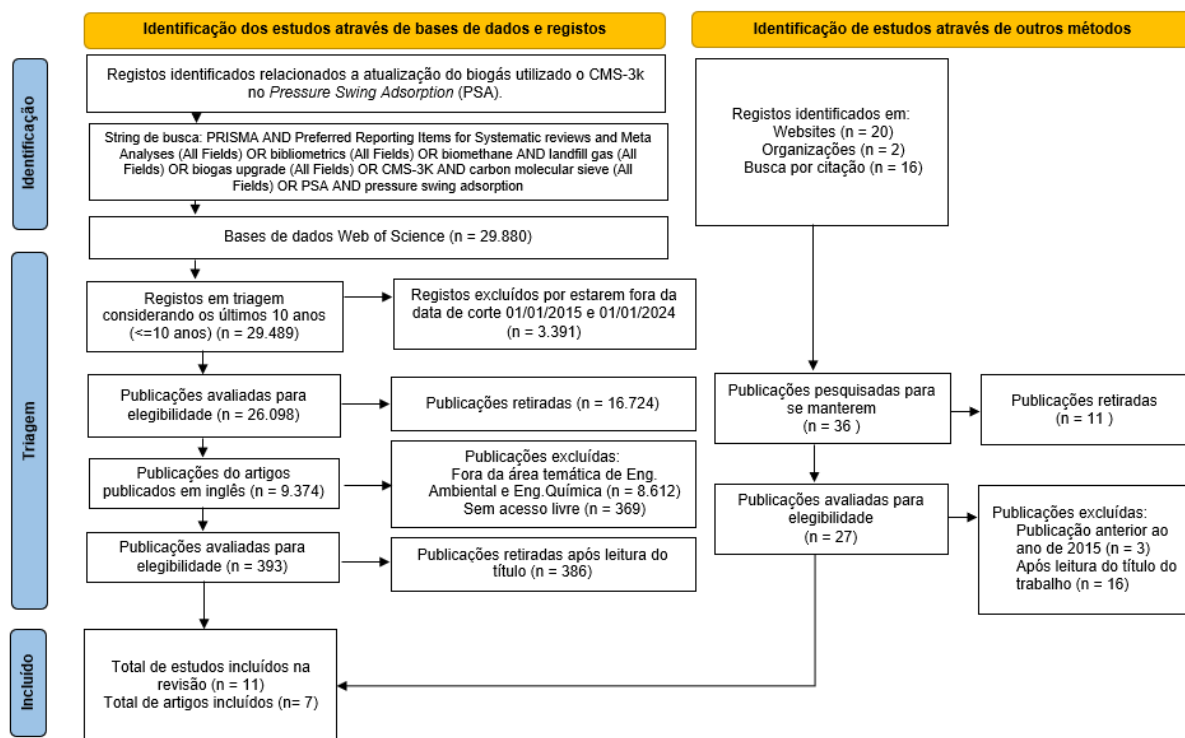


Figura 11: Fluxograma PRISMA para os registros incluídos na revisão.









Fonte: Autor, 2024.

Como mencionado anteriormente, após a aplicação de todos os filtros, como o lapso temporal entre 2015 e 2024 e a leitura do título, foram selecionados ao todo 18 informações que foram obtidas através do método, porém, apenas 10 documentos eram artigos. Os outros 8 documentos eram informações retiradas de sites de empresas que empregam a técnica do PSA para processos de purificação de ar. Após a leitura dos resumos desses documentos, percebeu-se que apesar de estarem relacionados ao tema da atualização do biogás utilizando o CMS-3K no PSA, a maioria dos trabalhos encontrados não tinham uma abordagem direta sobre a o aproveitamento do biogás utilizando o CMS-3K. Dessa forma, as informações dos dados referentes aos 18 documentos foram organizadas em duas tabelas distintas. Assim, a Tabela 5 apresenta as informações encontradas no *site* de algumas empresas sobre o emprego da técnica do PSA no processo de separação de gases por adsorção. E a Tabela 6, apresenta as informações dos dados que foram divididas em quatro tópicos: Referência, Tópico, Foco e Periódico.

Diante da grande lacuna de informações a respeito da utilização da peneira molecular de carbono do tipo CMS-3K no processo de atualização do biogás, o método PRISMA foi empregado na tentativa de esclarecer quais são as empresas do mundo que já estão empregando essa tecnologia nos processos de purificação do biogás para produção do biometano. Desse modo, a Tabela 5, consegue esclarecer as principais empresas que utilizam a tecnologia do PSA, contudo não especificam a utilização desse material poroso no processo.

Entender as tecnologias empregadas pelas empresas é essencial no processo de criação de novas tecnologias, particularmente no contexto da purificação de biogás por meio do processo de PSA com carvão ativado. Primeiramente, essa compreensão permite uma análise mais aprofundada dos impactos ambientais, dado que a eficácia e eficiência dessas tecnologias podem influenciar diretamente na redução de emissões de GEE e outros poluentes atmosféricos. Além disso, o conhecimento das tecnologias existentes possibilita a identificação de lacunas ou áreas de melhoria, impulsionando a inovação e o desenvolvimento de novas soluções mais eficientes e sustentáveis. Ao compreender os processos envolvidos na purificação de biogás, os pesquisadores e profissionais podem contribuir para a otimização dos sistemas, redução de custos operacionais e maximização dos benefícios ambientais. Em última análise, a compreensão das tecnologias existentes e sua aplicação prática são fundamentais para promover avanços significativos na engenharia ambiental e na busca por soluções mais eficazes para os desafios ambientais contemporâneos.

Tabela 5: Levantamento das empresas que utilizam o processo de PSA.

Marca	Nome da empresa	Tipo de Processo Utilizado
	SYSADVANCE – Sistemas de Engenharia, S.A.	VPSA (Adsorção por Modulação de Pressão e Vácuo) de dois estágios, onde o primeiro estágio é otimizado para remover N ₂ e o segundo estágio promove a separação do CO ₂ e do O ₂ do CH ₄ .
	Gruen Biogás	Sistema PSA para remoção de CO ₂ e N ₂
	Grupo de tecnologia ambiental Mingshuo Co., Ltd.	Possui sistema que utiliza membrana e PSA
	Suomen Biovoima Oy	Possui sistema que utiliza membrana e PSA
	Carbotech	Sistema de PSA
	Xebec	Sistema de PSA
	Gasrec	Sistema de PSA
	Atlas Copco GG	Lavagem de água, lavagem de aminas, membranas, adsorção com oscilação de pressão (PSA) e destilação criogênica.

Fonte: Autor, 2024.

A revisão da literatura utilizando o método PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) é fundamental para assegurar a integridade e a confiabilidade das revisões sistemáticas e meta-análises. Este método oferece uma abordagem estruturada que promove a transparência e a consistência, aspectos essenciais para a qualidade da pesquisa científica. A importância do PRISMA reside na sua capacidade de minimizar o viés e garantir que todos os estudos relevantes sejam identificados e avaliados de maneira rigorosa. A metodologia começa com a formulação de uma pergunta de pesquisa clara e a elaboração de um protocolo detalhado, que orienta cada etapa do processo de revisão. Isso inclui a busca exaustiva da literatura, a seleção criteriosa dos estudos com base em critérios pré-definidos e a extração e análise sistemática dos dados (Tabela 6).

O PRISMA também promove a reprodutibilidade, permitindo que outros pesquisadores possam replicar o estudo e verificar os resultados, o que é essencial para validar e consolidar o conhecimento científico. O uso do fluxograma PRISMA para documentar o processo de seleção dos estudos oferece uma visão clara da metodologia utilizada e das decisões tomadas ao longo da revisão (Figura 11). Além disso, a aplicação do PRISMA contribui para a síntese robusta das evidências, fornecendo uma base sólida para decisões clínicas, formulação de políticas e futuras pesquisas. Ao seguir essas diretrizes, os pesquisadores garantem que suas revisões sistemáticas sejam completas e confiáveis, facilitando a compreensão e a aplicação do conhecimento científico. Em suma, o método PRISMA é indispensável para garantir a qualidade e a credibilidade das revisões de literatura, promovendo avanços significativos em diversas áreas do conhecimento.

Tabela 6: Revisão da literatura método PRISMA.

Referências	Objetivo, foco e periódico	Principais conclusões
(Shah et al., 2021)	Objetivo: Explorar como vários fatores e inovações de engenharia afetam a eficiência do processo de purificação de biogás por adsorção com oscilação de pressão (PSA).	Existem enormes oportunidades para explorar diferentes tipos de adsorventes, especialmente novos materiais nas tecnologias de enriquecimento de biogás, especialmente tecnologias de adsorção por oscilação de pressão (PSA).
	Foco: Purificação de biogás com PSA	
	Periódico: INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY	
(Wu et al., 2015)	Objetivo: Utilizar simulação dinâmica do ciclo de Skarstrom modificado para analisar o beneficiamento de biogás por adsorção com oscilação de pressão, difícil de observar experimentalmente.	Os resultados da simulação indicam que a solução chave para diminuir o consumo de energia do processo PSA é desenvolver novos adsorventes com bom equilíbrio e seletividade cinética e capacidade de adsorção, o que pode fornecer uma diretriz para a síntese de novos materiais.
	Foco: Estudar o beneficiamento de biogás por adsorção com PSA	
	Periódico: Journal of Cleaner Production	
(Augelletti et al., 2017)	Objetivo: Avaliar a viabilidade de um processo de PSA para obter biometano adequado para a rede de gás natural ($CO_2 < 3\%$) e um fluxo de CO_2 quase puro ($> 99\%$).	Obteve o biometano com um teor de CO_2 inferior a 3%, o que o torna adequado para ser injectado na rede de gás natural

Tabela 6: Revisão da literatura método PRISMA.

Referências	Objetivo, foco e periódico	Principais conclusões
	<p>Foco: Purificação de biogás com PSA</p> <p>Periódico: Journal of Cleaner Production</p>	e CO ₂ quase puro corrente (>99%) que pode ser utilizada em diversas aplicações como fonte de carbono em processos químicos e bioquímicos.
(Pérez-Camacho et al., 2019)	<p>Objetivo: Avaliar os impactos ambientais da produção e uso do biogás, substituindo eletricidade da rede, gás natural e combustíveis de transporte, com foco nas emissões de GEE.</p> <p>Foco: Análise do Ciclo de Vida (ACV) do biogás</p> <p>Periódico: Waste Management</p>	A conversão do biogás em biometano, substituindo a utilização da gasolina ou do gasóleo nos transportes, proporciona as maiores reduções nos impactos ambientais, tanto em termos de emissões de GEE, como também de partículas.
(Chen et al., 2021)	<p>Objetivo: Simular um processo de PSA de leito duplo e oito etapas para separar CH₄ de alta pureza do biogás, atendendo aos padrões de gasodutos de Taiwan (>95% CH₄ e <4 ppm H₂S).</p> <p>Foco: Purificação de biogás com PSA</p> <p>Periódico: Processes</p>	Foram realizados para três tipos de adsorventes comerciais: zeólita 13X, zeólita 5A e AC. Como resultado de seu excelente efeito na separação do CH ₄ do biogás, a zeólita COSMO 13X foi escolhida como adsorvente para o processo PSA de oito etapas e leito duplo para atualizar o biogás após o cálculo dos três parâmetros de seletividade.
(He et al., 2018)	<p>Objetivo: Utilizar membranas de fibra oca de carbono derivadas de celulose foram testadas para separação de CO₂/CH₄ em pressões moderadas, obtendo uma seletividade de permeância >60, e avaliadas para atualização de biogás em uma planta de 1000 m³/h via simulação HYSYS e estimativa de custos.</p> <p>Foco: Separação de gases no produção de biogás</p> <p>Periódico: Journal of Cleaner Production</p>	As membranas de carbono são econômicas para usinas de biogás de pequena escala devido custo do compressor rotativo. Uma pressão de alimentação de 8,5 bar é ideal para atingir o menor custo de atualização de biogás para 1000 m ³ /h. Melhorar o desempenho da membrana de carbono pode reduzir ainda mais o custo de atualização do biogás.

Tabela 6: Revisão da literatura método PRISMA.

Referências	Objetivo, foco e periódico	Principais conclusões
(Bywater et al., 2022)	Objetivo: Avaliar a estratégia de descarbonização do Reino Unido (UK) que inclui energia proveniente tanto do hidrogênio como do biometano.	Os resultados revelam melhorias notáveis na produção de metano e no teor de metano do biogás por unidade de alimentação orgânica. No entanto, questões como os efeitos da expansão e diferenças operacionais exigem resolução para uma adoção confiante desta tecnologia pela indústria.
	Foco: Estudar o potencial de biogás pautado em políticas públicas	
	Periódico: Processes	
(Álvarez-Gutiérrez et al., 2018)	Objetivo: Desenvolver uma abordagem simplista que conduza o processo de tomada de decisão sobre o adsorvente em menos tempo.	Os resultados apontaram que um dos carvões ativados, o MC27, como o candidato adsorvente mais promissor para separar CO ₂ / CH ₄ por meio de PSA. Uma análise de sensibilidade do desempenho do processo em função das dimensões do leito foi abordada usando o modelo de atalho desenvolvido.
	Foco: Testar eficiência de materias na separação de gases com PSA	
	Periódico: Journal of CO ₂ Utilization	
(Cordova et al., 2023)	Objetivo: Identificar e avaliar alternativas de utilização de CO ₂ para possível integração com a valorização do biogás proveniente da digestão anaeróbica.	Os resultados mostram que nenhuma alternativa apresenta um bom desempenho em todos os indicadores e que ainda existe uma elevada incerteza por indicador e nas alternativas. No entanto, orienta as decisões relativas a esforços adicionais de implementação quando um indicador é impossível de cumprir.
	Foco: Estudar o emprego do CO ₂ proveniente do processo de produção do biogás	
	Periódico: Journal of CO ₂ Utilization	
(Liu et al., 2020)	Objetivo: Testar materiais na separação de gases durante o processo de atualização do biogás em biometano.	Os resultados indicam que o material CMS é um adsorvente perfeito de N ₂ em vez de adsorvente de CO ₂ se o biogás real contivesse N ₂ e a zeólita 13X exibisse alta capacidade de
	Foco: Testar eficiência de materias na separação de gases com PSA	
	Periódico: Processes	

Tabela 6: Revisão da literatura método PRISMA.

Referências	Objetivo, foco e periódico	Principais conclusões
		adsorção de CO ₂ somente sob condições secas. Este trabalho revela as deficiências dos adsorventes comerciais existentes na purificação do biogás real.

Fonte: Autor, 2024.

A Tabela 6, elaborada para a análise PRISMA, oferece uma síntese refinada e organizada dos elementos-chave nas revisões sistemáticas que seguem o método PRISMA. Esta tabela destaca, de forma detalhada, as referências aos estudos revisados, proporcionando um panorama claro da conformidade com as diretrizes estabelecidas. Teve como objetivo principal sintetizar e ilustrar como as práticas recomendadas do método foram implementadas, revelando a eficácia e o rigor das revisões sistemáticas analisadas. Dessa forma, a tabela acima explorou nos artigos selecionados através da metodologia os aspectos listados a seguir: referências; objetivo; foco; periódico e as principais conclusões.

Esse instrumento avaliou artigos publicados em periódicos acadêmicos de prestígio, representando uma gama diversificada de áreas de pesquisa, desde a saúde até ciências ambientais e engenharia. Os principais achados indicam que a adesão às diretrizes PRISMA está fortemente associada a revisões sistemáticas que são meticulosamente estruturadas e conduzidas com alto padrão de qualidade. A tabela demonstra que a aplicação das diretrizes PRISMA promove uma busca literária abrangente, uma seleção rigorosa dos estudos e uma avaliação detalhada da qualidade. Além disso, enfatiza que o uso do PRISMA contribui significativamente para a transparência, reduz o viés e garante a reprodutibilidade, fortalecendo a base de evidências científicas e otimizando a qualidade e a confiabilidade das análises e das decisões baseadas em evidências.

5.3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5.3.1 EQUILÍBRIO DE ADSORÇÃO DO CO₂

A isoterma de equilíbrio de adsorção do CO₂ no CMS-3K foi determinada por meio da medição de curvas de ruptura na temperatura constante de 313 K e pressões parciais de 45 kPa até 280 kPa. As condições experimentais específicas, como os caudais de CO₂ e He, bem como as quantidades de gás adsorvidas durante o experimento, estão detalhadamente apresentadas na Tabela 7. Pode-se observar que os resultados são termodinamicamente consistentes uma vez que as quantidades adsorvidas de CO₂ no equilíbrio aumentam de acordo com a pressão parcial.

Tabela 7: Condições experimentais para medir curvas de ruptura do CO₂ no CMS-3K.

RUN	Temp. (K)	Pressão total (kPa)	Pressão parcial CO ₂ (kPa)	Pressão parcial CO ₂ (bar)	Caudal de He (mL min ⁻¹)*	Caudal de CO ₂ (mL min ⁻¹)*	Quantidade adsorvida CO ₂ (mol kg ⁻¹)
1	313	100	46	0,46	1,99	1,70	1,15
2	313	200	92	0,92	3,99	3,40	1,65
3	313	300	132	1,32	6,07	4,80	1,96
4	313	400	182	1,82	7,90	6,58	2,25
5	313	500	226	2,26	9,79	8,09	2,44
6	313	600	275	2,75	11,59	9,82	2,57

* Os caudais estão expressos nas condições padrão de temperatura e pressão (CPTP)

* A massa de CMS-3K utilizada nos experimentos foi de 0.921 g.

* Condições experimentais determinadas para um tempo de passagem do gás na coluna de ≈ 10 s.

A interpretação das curvas de ruptura e das isotermas de adsorção é essencial para compreender o desempenho de materiais adsorventes em processos de purificação de gás. As curvas de ruptura permitem identificar o ponto em que o adsorvente começa a perder eficiência, fornecendo dados sobre o tempo de operação e a dinâmica de saturação ao longo do processo. As correspondentes curvas de ruptura estão representadas na Figura 12, plotadas em termos da razão da fração molar normalizada do CO₂ em função do tempo.

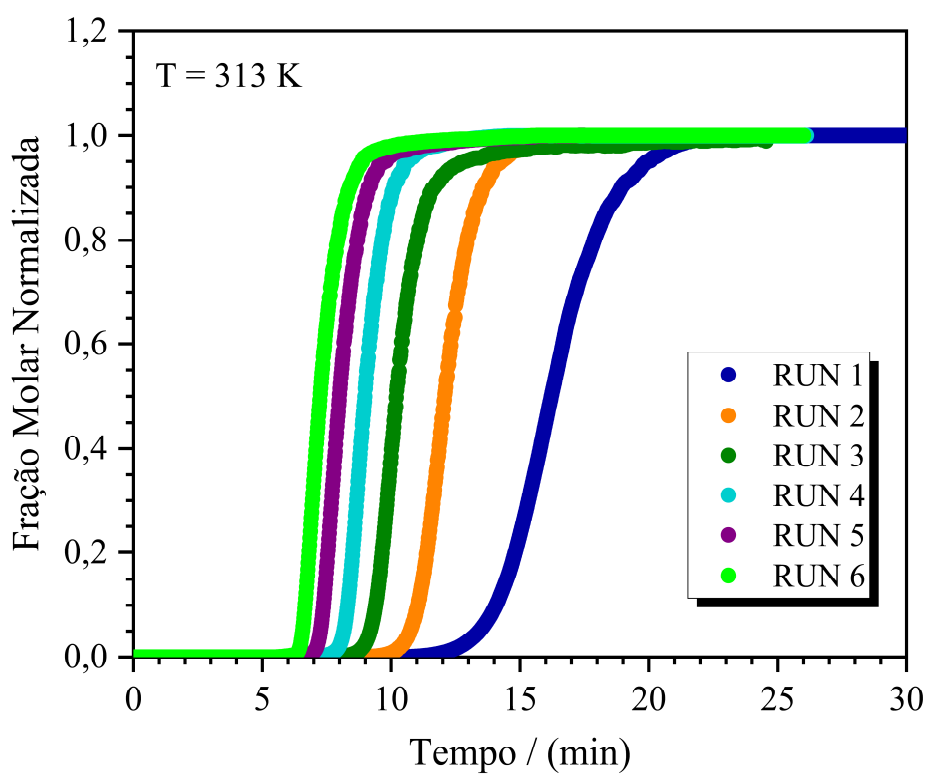


Figura 12: Curvas de Ruptura.

Como é possível se observar, há uma clara mudança na forma dos perfis de concentração com o aumento da pressão parcial (alta concentração de alimentação de CO_2), em que as curvas de ruptura se tornam mais íngremes, devido ao efeito da natureza favorável da isoterma de adsorção. Assim, quanto maior a pressão parcial do CO_2 , maior será a velocidade do processo de saturação da coluna de adsorção.

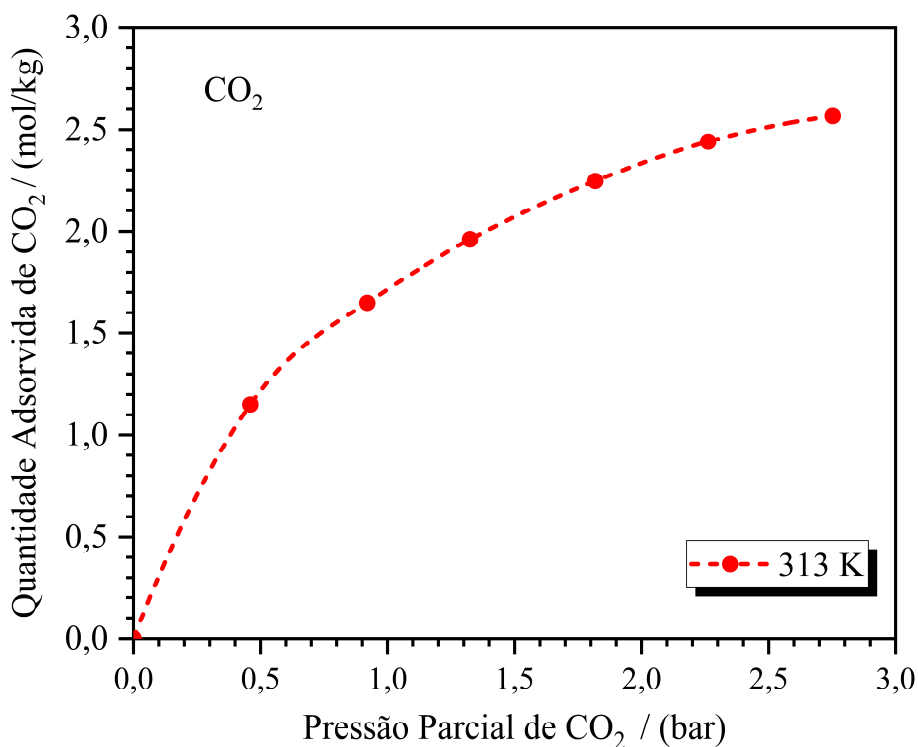


Figura 13: Isoterma de equilíbrio de adsorção do CO₂.

As quantidades adsorvidas de CO₂ foram plotadas em função das suas respectivas pressões parciais, resultando assim na isoterma de adsorção (Figura 13). De acordo com seu perfil, a curva plotada acima possui um comportamento aproximado as isotermas do tipo I de acordo com a classificação da União Internacional de Química Pura e Aplicada (IUPAC) (de Sousa et al., 2021). Em que a quantidade de adsorvato aumenta de acordo com a pressão, alcançando um platô quando a pressão atinge níveis elevados. Este comportamento, que é reversível, é típico de sólidos microporosos. Desse modo, o volume máximo de adsorção é limitado pelo volume dos microporos acessíveis no material, refletindo a capacidade de adsorção do adsorvente em condições específicas (Lahuri et al., 2023).

5.3.2 CURVAS DE RUPTURA COM MISTURA DE CO₂ E CH₄

De modo a avaliar a performance do CMS-3K na separação de misturas de CO₂ e CH₄, experimentos com misturas binárias também foram realizados na temperatura de 313 K. Informações sobre as condições experimentais utilizadas, estão reportadas na Tabela 8. Para isso, o experimento buscou simular as quantidades de concentrações do biogás encontrados na indústria, ou seja, misturas com aproximadamente 20% CO₂ – 85% CH₄ (Figuras 14 e 15) e 50% CO₂ – 50% CH₄ (Figuras 16 e 17), respectivamente.

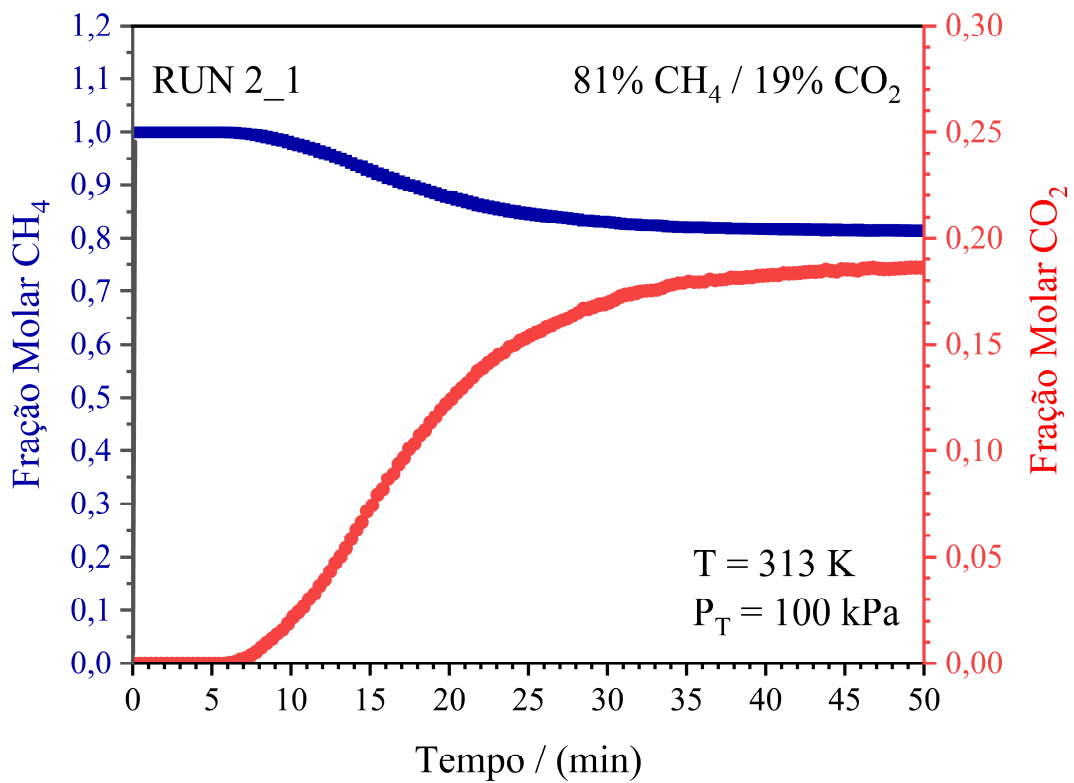


Figura 14: Curvas de ruptura de misturas binárias de CO₂/CH₄ (RUN 2_1).

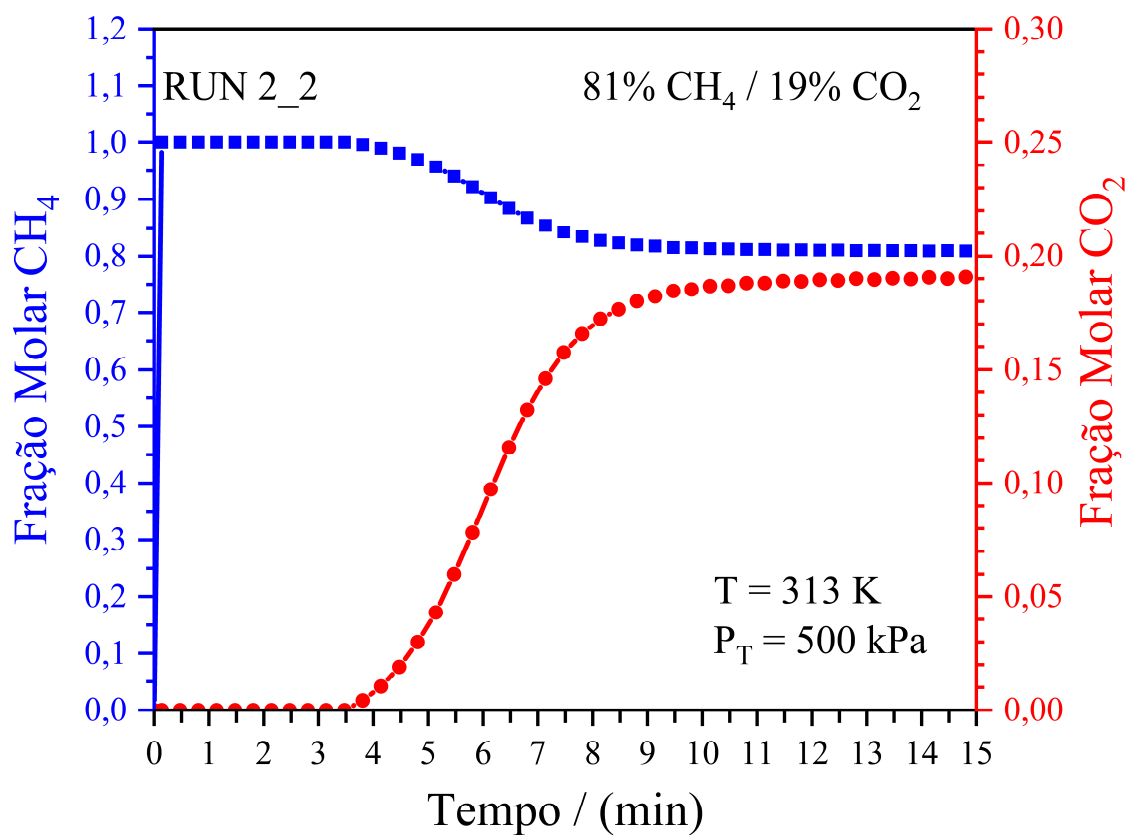


Figura 15: Curvas de ruptura de misturas binárias de CO₂/CH₄ (RUN 2_2).

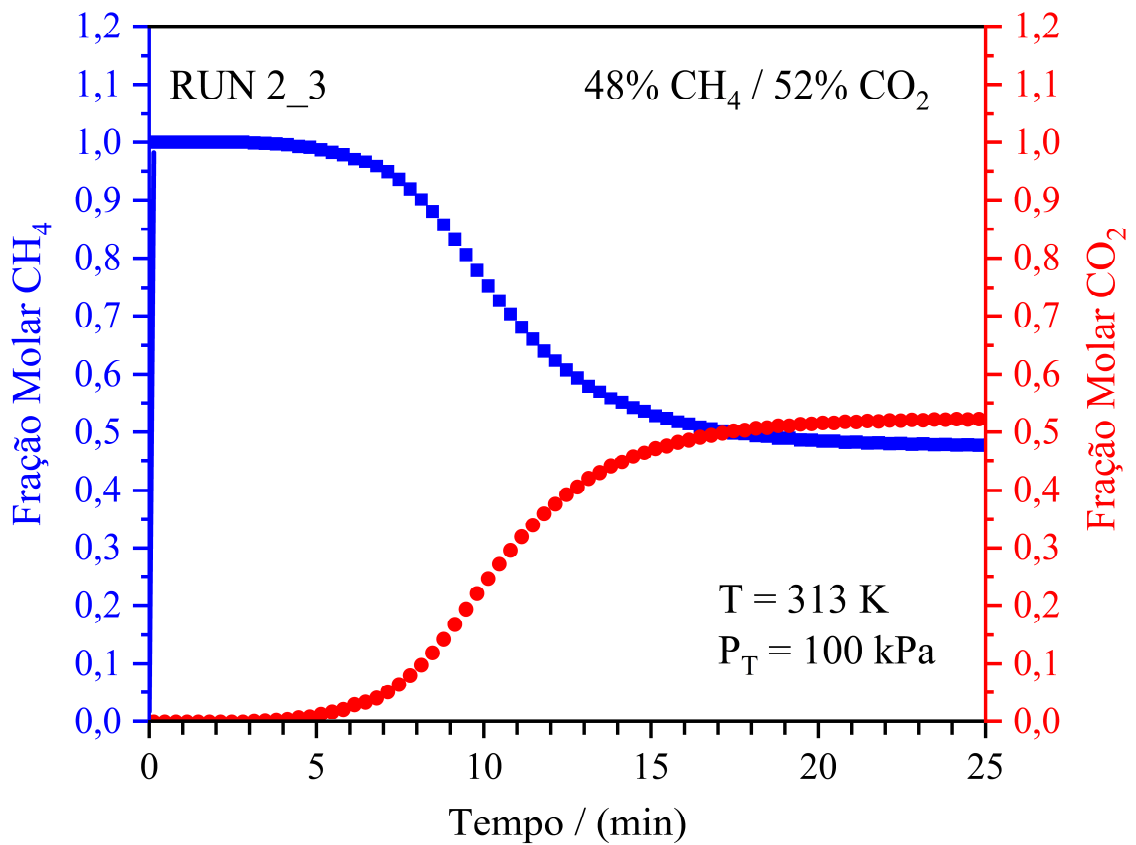


Figura 16: Curvas de ruptura de misturas binárias de CO₂/CH₄ (RUN 2_3).

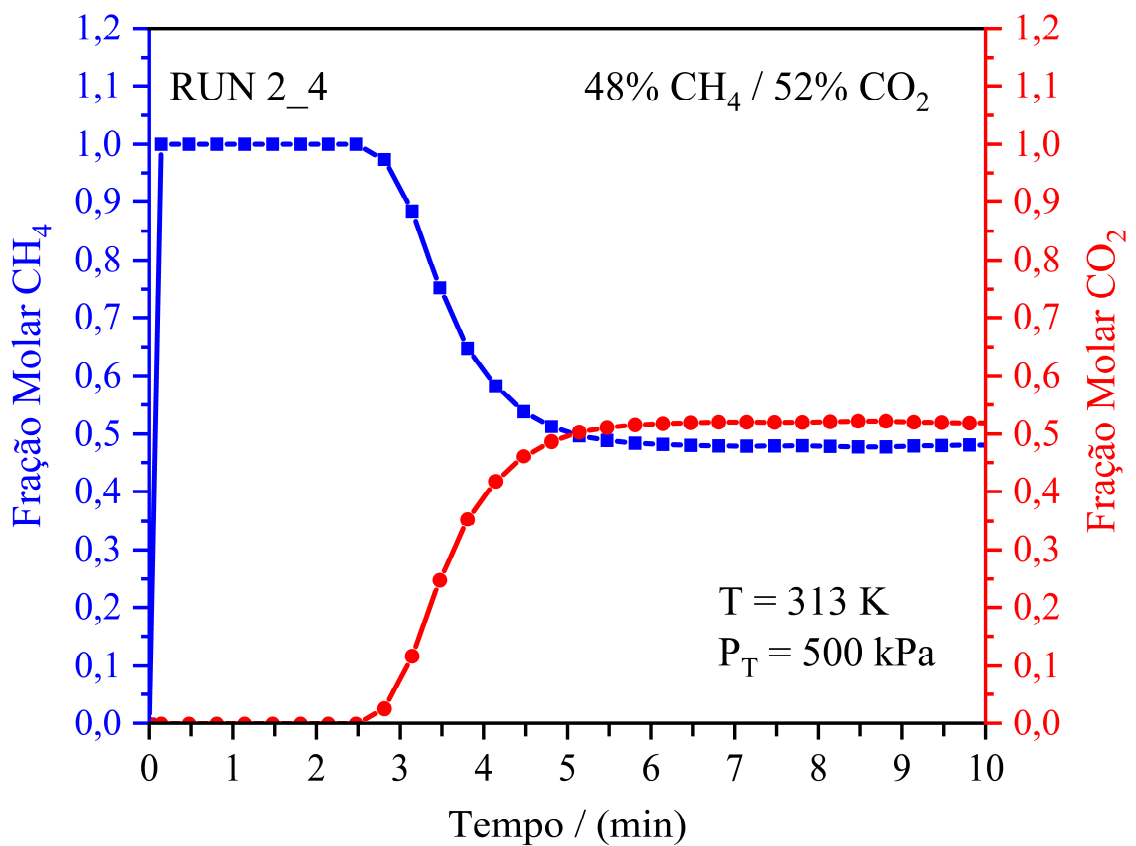


Figura 17: Curvas de ruptura de misturas binárias de CO₂/CH₄ (RUN 2_4).

Como resultado, nota-se que curva do CH₄ possui um tempo de eluição (saída) praticamente igual ao tempo de residência do gás na coluna, ou seja, uma curva de ruptura espontânea, significando que o gás não é adsorvido pelo material. Em contrapartida, o CO₂ possui um tempo de retenção na coluna muito maior que o tempo de residência da mistura no leito. Este efeito é observado em todas as condições de pressões e temperatura estudadas, sendo um excelente resultado onde o CO₂ é completamente separado na mistura.

Tabela 8: Condições experimentais para medir curvas de ruptura de misturas binárias de CO₂/CH₄ no CMS-3K.

RUN	Temp. (K)	Pressão total (kPa)	Caudal de CO ₂ (mL min ⁻¹)*	Caudal de CH ₄ (mL min ⁻¹)*	Caudal de He (mL min ⁻¹)*	Quantidade adsorvida CO ₂ (mol kg ⁻¹)
<i>≈20% CO₂ – 80% CH₄</i>						
2_1	313	100	0,42	2,37	0,70	0,53
2_2	313	500	2,09	11,83	3,48	0,91
<i>≈50% CO₂ – 50% CH₄</i>						
3_1	313	100	1,39	1,39	0,70	0,96
3_2	313	500	6,00	6,00	3,48	1,46

* Os caudais estão expressos nas condições padrão de temperatura e pressão (CPTP)

* A massa de CMS-3K utilizada nos experimentos foi de 0.921 g.

* Condições experimentais determinadas para um tempo de passagem do gás na coluna de ≈ 10 s.

* Os caudais de He representam cerca de $\approx 20\%$ dos caudais totais das misturas.

6 DISCUSSÃO

A mitigação das emissões de gases de efeito estufa é uma necessidade premente para combater as mudanças climáticas em curso no momento presente. As novas tecnologias desempenham um papel fundamental nesse esforço, oferecendo soluções inovadoras para reduzir as emissões provenientes de diversas fontes. Desde fontes de energia limpa e renovável, como solar e eólica, tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCS) possuem o potencial de significativamente diminuir a quantidade de gases de efeito estufa liberados na atmosfera. Além disso, a gestão dos resíduos sólidos urbanos, melhores práticas agrícolas e o desenvolvimento de bioenergia com captura e armazenamento de carbono (BECCS) contribuem para esse esforço (Bywater et al., 2022).

Diante dos desafios climáticos enfrentados no momento atual, o processo de atualização do biogás em biometano utilizando adsorventes pelo processo de PSA representa uma alternativa vital na transição para fontes de energia mais limpas e promoção de uma valorização dos resíduos sólidos urbanos. Esse combustível que é originado a partir da decomposição anaeróbica da matéria orgânica presente em resíduos como restos de alimentos e lodo de esgoto, o biogás oferece uma fonte de energia renovável e de baixo carbono. Quando comparado a outros combustíveis convencionais, esse o biogás e o biometano apresentam vantagens significativas nos níveis de emissões atmosféricas, como o gás de GEE, dióxido de carbono listado entre os principais causadores do aquecimento global (Cordova et al., 2023).

Ao aproveitar materiais orgânicos descartados em aterros sanitários, o biogás não apenas evita a produção de metano durante a decomposição, mas também reduz a dependência de combustíveis não renováveis, promovendo a diversificação da matriz energética. Além disso, o biogás possibilita uma gestão mais eficaz dos resíduos sólidos urbanos, diminuindo a quantidade de lixo enviada para aterros e gerando receitas adicionais por meio da venda de energia elétrica, uso como combustível veicular ou injeção na malha de distribuição de gás natural (Pérez-Camacho et al., 2019). Apesar dos desafios relacionados à infraestrutura e à regulação, o potencial do biogás como um combustível sustentável é inegável, exigindo políticas e investimentos adequados para sua ampla adoção e maximização de seus benefícios ambientais e econômicos (Cordova et al., 2023).

As tecnologias de aproveitamento de combustíveis renováveis são imprescindíveis. Desse modo, o trabalho explorou as técnicas de separação de gases apoiadas em processos de adsorção utilizando o *Pressure Swing Adsorption* (PSA) contendo a peneira molecular de carbono (CMS-3K). A partir da revisão da literatura, alguns autores desenvolveram experimentos avaliando diferentes tipos de adsorventes para separar o $\text{CO}_2 / \text{CH}_4$ presente no biogás produzido a partir da degradação dos resíduos orgânicos. Os resultados indicam que o material CMS é um adsorvente excelente para remover o N_2 da mistura gasosa quando comparada a remoção CO_2 . Porém, se o biogás real contivesse N_2 e a Zeólita 13X exibisse alta capacidade de adsorção de CO_2 somente sob condições secas (Liu et al., 2020).

É necessário haver investimentos para a pesquisa de novos adsorventes comerciais que possuam boa capacidade de remoção o dióxido de carbono do metano, seja atrativo economicamente e operacionalmente, além de ser ambientalmente responsável em todas

as etapas de seu ciclo de vida. Segundo Wu et al., (2015), os resultados de seus trabalhos indicam que a alternativa para diminuir o consumo de energia do processo PSA e aumentar a eficiência do processo, é preciso desenvolver novos adsorventes com bom equilíbrio e seletividade cinética e capacidade de adsorção, podendo fornecer uma diretriz para a síntese de novos materiais.

De acordo com a análise de visualização de sobreposição de palavra-chave do autor promovida pelo software VOSviewer, apresentado através da Figura 18, é possível identificar uma forte proximidade entre as palavras-chave “biogas upgrading”, “biogas” e “biomethane”. Essa relação demonstra que os termos estão associados, possuindo uma dependência em relação a origem, fato que condiz com a origem do biometano, uma vez que esse combustível se origina a partir da purificação do biogás. Ademais, percebe-se entre as palavras-chave mencionados anteriormente, o termo “biogas upgrading” apareceu nas últimas publicações contidas na base de dados utilizada no software.

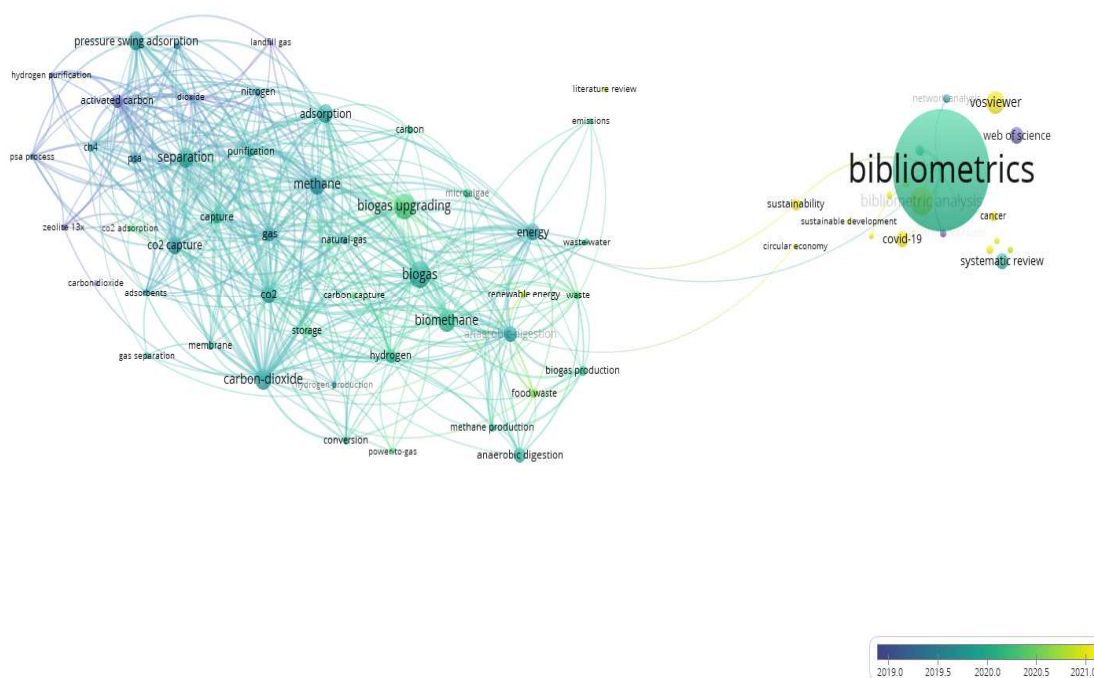


Figura 18: Visualização de sobreposição de palavra-chave do autor.

Fonte: Autor, 2024.

Outro desafio apresentado no processo de purificação do biogás surge com a aplicação do gás removido do sistema. Sendo assim, o aproveitamento do CO₂ produzido durante o processo de atualização do biogás surge como uma estratégia essencial na busca por soluções de baixo carbono. Assim, ao direcionar esse subproduto para diversas

aplicações industriais, como na produção de materiais de construção e combustíveis sintéticos, existe a possibilidade de reduzir significativamente as emissões de carbono, contribuindo para a mitigação do aquecimento global. No entanto, para maximizar os benefícios dessa abordagem, é fundamental superar obstáculos técnicos e econômicos, além de garantir uma regulamentação adequada que promova e incentive o aproveitamento desse gás residual do processo (Cordova et al., 2023).

Além disso, o aproveitamento do CO₂ proveniente do processo de purificação do biogás pode impulsionar a adoção de tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CAC), em que essas são essenciais para alcançar metas ambiciosas de redução de emissões climáticas. Portanto, o armazenamento do CO₂ de maneira segura e permanente em reservatórios naturais ou artificiais pode evitar sua liberação na atmosfera, ajudando a conter o aumento da temperatura global. No entanto, para que essa estratégia seja eficaz, é essencial a promoção cooperação entre os governos, empresas e sociedade civil, visando a implementação de políticas e investimentos que incentivem o aproveitamento e a utilização responsável dos recursos, a fim de promover a transição para uma economia sustentável.

Diante o exposto, a atualização do biogás em biometano utilizando processos de adsorção (PSA) contendo a peneira molecular de carbono (CMS) nas colunas é uma técnica pouco explorada tanto no ambiente de pesquisa como na indústria. Por isso, esse trabalho buscou explorar essa temática devido a importância do tema perante aos avanços tecnológico e científicos necessários na produção de biocombustíveis de alta pureza. Diante os resultados obtidos, foi possível perceber poucos trabalhos focando na técnica PSA com a utilização do CMS, embora exista um forte potencial dessa combinação para remover o dióxido de carbono presente no biogás.

Contudo, a produção do biogás irá depender de fatores locais de cada região, alguns pontos como a elevada umidade do gás pode atrapalhar a alta eficiência de remoção de poluentes do CMS. Entretanto, alguns estudos apontaram que a produção de biogás é muito versátil, podendo ocorrer em diferentes regiões, como em áreas rurais e urbanas. De modo geral, este processo não só contribui para a mitigação das emissões de GEE, ao reduzir a dependência de combustíveis fósseis, como também promove uma gestão mais sustentável dos resíduos orgânicos, alinhando-se com os princípios da economia circular e desenvolvimento sustentável.

7 CONCLUSÃO

Neste trabalho, analisou-se o processo de produção/atualização do biogás em biometano produzidos a partir do gás de aterro utilizando o processo de adsorção *Pressure Swing Adsorption* (PSA), com colunas contendo a *Carbon Molecular Seive* (CMS). Desse modo, o trabalho teve por objetivo avaliar a técnica de separação de gases contidos no biogás proveniente de resíduos orgânicos, utilizando o método de adsorção PSA contendo o carvão ativado do tipo CMS-3K para remover o CO₂ do biogás.

Conforme discutido, o biogás é um combustível renovável composto majoritariamente de metano, dióxido de carbono e pequenos traços de outros gases que pode ser transformado em biometano através da purificação, ou seja, remoção do dióxido de carbono presente na mistura gasosa. Embora não existam muitos trabalhos publicados sobre a técnica escolhida, o que justifica a necessidade de novos estudos a fim de se desenvolver mais esse processo, ambos os combustíveis apresentam muitas vantagens socioambientais e socioeconômicas. Os produtos gerados nos processos podem ser empregados em diferentes áreas da sociedade, como no aquecimento, geração de energia elétrica, na cogeração, ser injetado na malha de gás natural e utilizado como um combustível veicular. Contudo, todas as aplicações desse insumo exigem o investimento em diferentes campos da sociedade, desde infraestrutura, mão de obra especializada, tecnologias, equipamentos modernos e insumos.

Diante a problemática de escala global em curso, esse trabalho desenvolveu uma análise bibliométrica associada de uma revisão sistemática para identificar os principais pontos em pauta no mundo sobre a temática de atualização de biogás utilizando o método de adsorção PSA contendo o carvão ativado do tipo CMS-3K. Os resultados revelam que embora a metodologia na base de dados conseguiu alcançar um número elevado de artigos contendo as palavras-chave, poucos trabalhos estavam diretamente ligados ao tema em pauta.

As análises permitiram identificar que a China possui o maior número de trabalhos científicos publicados, contudo os Estados Unidos e a Inglaterra possuem uma forte influência de cooperação entre os mais variados países do mundo. Além disso, foi identificado nos trabalhos selecionados a necessidade de investir em novos tipos de adsorventes que consigam ter eficiência de remoção de gases e baixo custo de operação. Outro ponto importante, surge com a destinação correta do dióxido de carbono eliminado posterior ao processo de separação. Embora existam muitas possibilidades de aplicação,

não se identificou uma normatização unificada de como proceder com esses gases corretamente.

Os resultados experimentais realizados em escala laboratorial do laboratório de química do CIMO/ESTIG demonstraram que para a simulação do biogás industrial, o material adsorvente do tipo peneira molecular de carbono (CMS-3K) utilizado no processo de separação de gases, consegue adsorver todo o CO₂ presente na mistura. Dessa forma, nota-se o potencial desse componente para o processo comercial de atualização do biogás.

Esse trabalho contribuiu significativamente para o levantamento de informações de qualidade, nos campos teóricas e experimentais, que podem contribuir no desenvolvimento de novas pesquisas e desenvolvimento de novas tecnologias de baixo carbono nos campos da valorização energética de resíduos sólidos, economia circular, adsorção, purificação de gases, atualização do biogás em biometano, remoção de CO₂ e desenvolvimento sustentável.

Conclui-se que o biogás e o biometano são combustíveis de transição energética versáteis que permitem substituir gradativamente a utilização dos combustíveis fósseis a longo prazo. A técnica de adsorção por PSA com peneira molecular de carbono ainda é pouco utilizada, tendo em vista que o mais comum são as membranas. Essa técnica permite aproveitar o metano como combustível, recuperar o dióxido de carbono e evitar as emissões de GEE na atmosfera. Permitindo o desenvolvimento sustentável a partir do emprego de técnicas advindas da economia circular.

7.1 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Embora este estudo forneça *insights* valiosos sobre o processo de purificação do biogás, é essencial reconhecer algumas limitações que podem influenciar a interpretação dos resultados. Primeiramente, a metodologia adotada baseou-se na utilização de uma única base de dados, a Web of Science. Embora essa base de dados seja bem conceituada e pelos trabalhos disponíveis, a não inclusão de outras bases de dados na análise cria uma seleção dos trabalhos incluídos na análise. Outro ponto de limitação é a limitação temporal de dez anos, que por sua vez não abarca todos os trabalhos publicados sobre o tema.

7.2 RECOMENDAÇÕES DE PESQUISAS FUTURAS

- Realizar a análise do ciclo de vida das peneiras molecular de carbono (CMS);
- Realizar a viabilidade econômica da utilização do CMS-3K junto ao PSA na produção de biometano;
- Estudar a melhor maneira de triar os resíduos orgânicos descartados, a fim de aproveitar os gases para a produção de biogás;
- Investigar as áreas, locais e regiões que apresentam as melhores condições para implementar o aproveitamento do biogás e biometano;
- Estudar técnicas de armazenamento, transporte e captura de dióxido de carbono (CO₂) provenientes da atualização do biogás.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Álvarez-Gutiérrez, N., Gil, M. V., Rubiera, F., & Pevida, C. (2018). Simplistic approach for preliminary screening of potential carbon adsorbents for CO₂ separation from biogas. *Journal of CO₂ Utilization*, 28, 207-215.
2. Aly, E., Zafaneli, L. F., Henrique, A., Golini Pires, M., Rodrigues, A. E., Gleichmann, K., & Silva, J. A. (2021). Fixed bed adsorption of CO₂, CH₄, and N₂ and their mixtures in potassium-exchanged binder-free beads of Y zeolite. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 60(42), 15236-15247.
3. Augelletti, R., Conti, M., & Annesini, M. C. (2017). Pressure swing adsorption for biogas upgrading. A new process configuration for the separation of biomethane and carbon dioxide. *Journal of Cleaner Production*, 140, 1390-1398.
4. Bai, J., Shen, D., Zhou, M., Zhang, D., & Wei, Z. (2021). Current Status and Future Prospects of Biogas Generation from Landfills: A Review. *Frontiers in Energy Research*, 9, 676832.
5. Bakkaloglu, S., & Hawkes, A. (2024). A comparative study of biogas and biomethane with natural gas and hydrogen alternatives. *Energy and Environmental Science*.
6. Bernardo, M., Lapa, N., Fonseca, I., & Esteves, I. A. (2021). Biomass valorization to produce porous carbons: applications in CO₂ capture and biogas upgrading to biomethane—a mini-review. *Frontiers in Energy Research*, 9, 625188.
7. Boloy, R. A. M., da Cunha Reis, A., Rios, E. M., de Araújo Santos Martins, J., Soares, L. O., de Sá Machado, V. A., & de Moraes, D. R. (2021). Waste-to-energy technologies towards circular economy: A systematic literature review and bibliometric analysis. *Water, Air, & Soil Pollution*, 232(7), 306.
8. Brémond, U., Bertrandias, A., Steyer, J. P., Bernet, N., & Carrere, H. (2021). A vision of European biogas sector development towards 2030: Trends and challenges. *Journal of Cleaner Production*, 287, 125065.
9. Buckle, H. T. (2023). *History of Civilization in England: Vol. 3. BoD—Books on Demand*.

10. Bywater, A., Heaven, S., Zhang, Y., & Banks, C. J. (2022). Potential for biomethanisation of CO₂ from anaerobic digestion of organic wastes in the United Kingdom. *Processes*, 10(6), 1202.
11. Cavenati, S., Grande, C. A., & Rodrigues, A. E. (2005). Separation of methane and nitrogen by adsorption on carbon molecular sieve. *Separation Science and Technology*, 40(13), 2721-2743.
12. Change, I. P. O. C. (2007). *Climate change 2007: The physical science basis*. *Agenda*, 6(07), 333.
13. Chen, Y. F., Lin, P. W., Chen, W. H., Yen, F. Y., Yang, H. S., & Chou, C. T. (2021). Biogas upgrading by pressure swing adsorption with design of experiments. *Processes*, 9(8), 1325.
14. Cordova, S. S., Gustafsson, M., Eklund, M., & Svensson, N. (2023). What should we do with CO₂ from biogas upgrading?. *Journal of CO₂ Utilization*, 77, 102607.
15. Dada, O., & Mbohwa, C. (2017). Biogas upgrade to biomethane from landfill wastes: a review. *Procedia manufacturing*, 7, 333-338.
16. de Aguiar Linhares, F., Marcílio, N. R., & Melo, P. J. (2016). Estudo da produção de carvão ativado a partir do resíduo de casca da acácia negra com e sem ativação química. *Scientia cum Industria*, 4, 74-79.
17. de Sousa, A. A. O., Oliveira, T. S., de Azevedo, L. E. C., Nobre, J. R. C., Stefanelli, W. F. R., de Sousa Costa, T. A. P., ... & Barral, A. V. S. (2021). Adsorção do corante básico Verde Malaquita via carvão ativado a partir do caroço de açaí. *Research, Society and Development*, 10(2), e49110212871-e49110212871.
18. de Souza Scotelano, L., Gonçalves, A., da Costa Leonidio, U., de Souza, C. G., & Boloy, R. A. M. (2023). LIFE CYCLE ASSESSMENT METHOD IN EDUCATIONAL INSTITUTIONS TOWARDS CIRCULAR ECONOMY: A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW AND BIBLIOMETRIC ANALYSIS. *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, 16(3), 85-104.

19. Dedej, A., & Medici, L. (2024). Internationalization and Globalization in the Field of Education. *Interdisciplinary Journal of Research and Development*, 11(1 S1), 14-14.
20. Dey, A., & Thomson, R. C. (2023). India's biomethane generation potential from wastes and the corresponding greenhouse gas emissions abatement possibilities under three end use scenarios: electricity generation, cooking, and road transport applications. *Sustainable Energy & Fuels*, 7(1), 209-241.
21. Dickson, E. M., Hastings, A., & Smith, J. (2023). Energy production from municipal solid waste in low to middle income countries: a case study of how to build a circular economy in Abuja, Nigeria. *Frontiers in Sustainability*, 4, 1173474.
22. Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N., & Lim, W. M. (2021). How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of business research*, 133, 285-296.
23. Falkner, R. (2016). The Paris Agreement and the new logic of international climate politics. *International Affairs*, 92(5), 1107-1125.
24. Ferreira, R. N., Lima, A. C. A., Vidal, C. B., Melo, D. Q., & Raulino, G. S. C. (2014). *Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais*. Universidade Federal do Ceará.
25. Gadirli, G., Pilarska, A. A., Dach, J., Pilarski, K., Kolasa-Więcek, A., & Borowiak, K. (2024). Fundamentals, Operation and Global Prospects for the Development of Biogas Plants—A Review. *Energies*, 17(3), 568.
26. Garcia, A., & Chen, L. (2023). Advances in adsorption technologies for environmental applications. *Journal of Environmental Science and Technology*, 57(3), 345-359.
27. Golmakani, A., Wadi, B., Manović, V., & Nabavi, S. A. (2023). Comparative Evaluation of PSA, PVSA, and Twin PSA Processes for Biogas Upgrading: The Purity, Recovery, and Energy Consumption Dilemma. *Energies*, 16(19), 6840.
28. Gomes, V., da Silva, M. G., & Kowaltowski, D. C. C. K. (2022). Long-term experience of teaching life cycle assessment and circular design to future architects: a learning by doing approach in a design studio setting. *Sustainability*, 14(12), 7355.

29. Haldar, D., Bhattacharjee, N., Shabbirahmed, A. M., Anisha, G. S., Patel, A. K., Chang, J. S., ... & Singhanian, R. R. (2023). Purification of biogas for methane enrichment using biomass-based adsorbents: A review. *Biomass and Bioenergy*, 173, 106804.
30. He, X., Chu, Y., Lindbråthen, A., Hillestad, M., & Hägg, M. B. (2018). Carbon molecular sieve membranes for biogas upgrading: Techno-economic feasibility analysis. *Journal of cleaner production*, 194, 584-593.
31. Hossain, M. M., Shahriar, T., Habib, M. A., Hasanuzzaman, M., & Inan, M. N. (2024). Techno-economic and environment assessment of landfill and sewage treatment plant-based combined power generation system: a case study for Dhaka. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(1), 701-717.
32. Jameel, M. K., Mustafa, M. A., Ahmed, H. S., Jassim Mohammed, A., Ghazy, H., Shakir, M. N., ... & Kianfar, E. (2024). Biogas: Production, properties, applications, economic and challenges: A review. *Results in Chemistry*, 101549.
33. Jjagwe, J., Olupot, P. W., Menya, E., & Kalibbala, H. M. (2021). Synthesis and application of granular activated carbon from biomass waste materials for water treatment: A review. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 6(4), 292-322.
34. Kapoor, R., Ghosh, P., Kumar, M., & Vijay, V. K. (2019). Evaluation of biogas upgrading technologies and future perspectives: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 11631-11661.
35. Khalid, A., Arshad, M., Anjum, M., Mahmood, T., & Dawson, L. (2021). The anaerobic digestion of solid organic waste. *Waste Management*, 45, 485-499.
36. Kohlheb, N., Wluka, M., Bezama, A., Thrän, D., Aurich, A., & Müller, R. A. (2021). Environmental-economic assessment of the pressure swing adsorption biogas upgrading technology. *BioEnergy Research*, 14, 901-909.
37. Kottitum, B., Srinophakun, T., Phongsai, N., & Phung, Q. T. (2020). Optimization of a six-step pressure swing adsorption process for biogas separation on a commercial scale. *Applied Sciences*, 10(14), 4692.

38. Lahuri, A. H., Rahim, A. A., Nordin, N., Adnan, R., Jaafar, N. F., & Taufiq-Yap, Y. H. (2023). Comparative studies on adsorption isotherm and kinetic for CO₂ capture using iron oxide impregnated activated carbon. *Catalysis Today*, 418, 114111.
39. Lebre, D. T. (2023). Avaliação e uso de materiais alternativos para remoção de hormônios, fármacos e drogas de abuso em efluentes industrial e doméstico (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).
40. Lee, H., Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P., ... & Zommers, Z. (2023). Climate change 2023: synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.
41. Lee, R. P., Meyer, B., Huang, Q., & Voss, R. (2020). Sustainable waste management for zero waste cities in China: potential, challenges and opportunities. *Clean energy*, 4(3), 169-201.
42. Lee, S. (2024). US-China technology competition and the emergence of techno-economic statecraft in East Asia: High technology and economic-security nexus. *Journal of Chinese Political Science*, 1-20.
43. Lestinsky, P., Vecer, M., Navratil, P., & Stehlik, P. (2015). The removal of CO₂ from biogas using a laboratory PSA unit: design using breakthrough curves. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 17, 1281-1289.
44. Li, Y., Zhang, S., Wang, L., & Zhang, W. (2023). Advances in Pressure Swing Adsorption Technology for Gas Separation and Purification. *Chemical Engineering Journal*, 446, 137318.
45. Lima, T. P. (2020). Performance and effectiveness of adsorbents prepared from lignocellulosic agro-industrial residues on the abatement of leachate odor containing ammonia (Doctoral dissertation, Instituto Politecnico de Braganca (Portugal)).
46. Mignogna, D., Ceci, P., Cafaro, C., Corazzi, G., & Avino, P. (2023). Production of Biogas and Biomethane as Renewable Energy Sources: A Review. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(18).

47. Monteiro, S. D. D. S. C. (2011). Produção de biometano: análise de mercado e estudo da Separação por PSA.
48. Mukhin, V. M., Burakov, A. Y., & Burakova, I. V. (2017). Active carbon as nanoporous material for solving environmental problems. *Advanced Materials & Technologies*, (2), 50-56.
49. Nica, I., Georgescu, I., & Chiriță, N. (2024). Simulation and Modelling as Catalysts for Renewable Energy: A Bibliometric Analysis of Global Research Trends. *Energies*, 17(13), 3090.
50. Pavičić, J., Novak Mavar, K., Brkić, V., & Simon, K. (2022). Biogas and Biomethane Production and Usage: Technology Development, Advantages and Challenges in Europe. *Energies*, 15(8), 2940.
51. Pérez-Camacho, M. N., Curry, R., & Cromie, T. (2019). Life cycle environmental impacts of biogas production and utilisation substituting for grid electricity, natural gas grid and transport fuels. *Waste Management*, 95, 90-101.
52. Pizzi, S., Caputo, A., Corvino, A., & Venturelli, A. (2020). Management research and the UN sustainable development goals (SDGs): A bibliometric investigation and systematic review. *Journal of Cleaner Production*, 276, 124033.
53. Poddar, B. J., Nakhate, S. P., Gupta, R. K., Chavan, A. R., Singh, A. K., Khardenavis, A. A., & Purohit, H. J. (2022). A comprehensive review on the pretreatment of lignocellulosic wastes for improved biogas production by anaerobic digestion. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1-28.
54. Pollock, A., & Berge, E. (2018). How to do a systematic review. *International Journal of Stroke*, 13(2), 138-156.
55. Pörtner, H. O., Roberts, D. C., Poloczanska, E. S., Mintenbeck, K., Tignor, M., Alegría, A., ... & Okem, A. (2022). IPCC, 2022: Summary for policymakers.
56. Reza, M. (2023). AI-Driven Solutions for Enhanced Waste Management and Recycling in Urban Areas. *International Journal of Sustainable Infrastructure for Cities and Societies*, 8(2), 1-13.

57. Sales Silva, S. T., Barros, R. M., Silva dos Santos, I. F., Maria de Cassia Crispim, A., Tiago Filho, G. L., & Silva Lora, E. E. (2022). Technical and economic evaluation of using biomethane from sanitary landfills for supplying vehicles in the Southeastern region of Brazil. *Renewable Energy*, 196, 1142–1157.
58. Shen, Y., Niu, Z., Zhang, R., & Zhang, D. (2021). Vacuum pressure swing adsorption process with carbon molecular sieve for CO₂ separation from biogas. *Journal of CO₂ Utilization*, 54, 101764.
59. Singh, P., & Bhatia, S. (2022). Theoretical and experimental insights into adsorption processes: A comprehensive review. *Chemical Engineering Journal*, 438, 135567.
60. Skea, J., Shukla, P. R., Reisinger, A., Slade, R., Pathak, M., Al Khourdajie, A., ... & Winkler, H. (2022). Summary for policymakers. In *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change: Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
61. Smith, J., Brown, L., & Lee, K. (2023). Advances in Carbon Molecular Sieve Technology for Gas Separation. *Journal of Chemical Engineering*, 389, 123456.
62. Soares, L. O., Reis, A. D. C., Vieira, P. S., Hernandez-Callejo, L., & Boloy, R. A. M. (2023). Electric vehicle supply chain management: A bibliometric and systematic review. *Energies*, 16(4), 1563.
63. Su, B., Han, W., He, H., Jin, H., Chen, Z., & Yang, S. (2020). A biogas-fired cogeneration system based on chemically recuperated gas turbine cycle. *Energy conversion and management*, 205, 112394.
64. Surendra, K. C., Takara, D., Hashimoto, A. G., & Khanal, S. K. (2021). Biogas as a sustainable energy source for developing countries: Opportunities and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 846-859.
65. Triviño-Pineda, J.-S., Sanchez-Rodriguez, A., & Peláez, N. P. (2024). Biogas production from organic solid waste through anaerobic digestion: A meta-analysis. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 9.

66. Van Eck, N., & Waltman, L. (2010). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *scientometrics*, 84(2), 523-538.
67. Veiga, A. P. B., & Mercedes, S. S. (2015). Biometano de gás de aterros no Brasil: Potencial e Perspectivas. *Universidade de São Paulo-USP*, 10.
68. Wang, J., & Azam, W. (2024). Natural resource scarcity, fossil fuel energy consumption, and total greenhouse gas emissions in top emitting countries. *Geoscience Frontiers*, 15(2), 101757.
69. Ward, A. J., Hobbs, P. J., Holliman, P. J., & Jones, D. L. (2020). Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource Technology*, 99(17), 7928-7940.
70. Wilson, D. C., Rodic, L., Modak, P., Soos, R., Carpintero, A., Velis, K., ... & Simonett, O. (2015). *Global waste management outlook*. UNEP.
71. Wu, B., Zhang, X., Xu, Y., Bao, D., & Zhang, S. (2015). Assessment of the energy consumption of the biogas upgrading process with pressure swing adsorption using novel adsorbents. *Journal of Cleaner Production*, 101, 251-261.
72. Yamtop Chemical Co., Ltd. (Chemical Company Yamtop). (2024). Carbon molecular sieve Description. Retrieved from <https://www.yamtop.com/molecular-sieve.html>.
73. Yang, H., Ma, M., Thompson, J. R., & Flower, R. J. (2018). Waste management, informal recycling, environmental pollution and public health. *J Epidemiol Community Health*, 72(3), 237-243.
74. Zafanelli, L. F., Aly, E., Henrique, A., Rodrigues, A. E., Mouchaham, G., & Silva, J. A. (2024). Green Hydrogen Recovery from Natural Gas Grids by Vacuum Pressure Swing Adsorption. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 63(14), 6333-6346.
75. Zafanelli, L. F., Henrique, A., Karimi, M., Rodrigues, A. E., & Silva, J. A. (2020). Single- and multicomponent fixed bed adsorption of CO₂, CH₄, and N₂ in binder-free beads of 4A zeolite. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 59(30), 13724-13734.

76. Zbair, M., & Bennici, S. (2021). Survey summary on salts hydrates and composites used in thermochemical sorption heat storage: a review. *Energies*, 14(11), 3105.
77. Zhang, Z., Chen, Z., Zhang, J., Liu, Y., Chen, L., Yang, M., ... & Yap, P. S. (2024). Municipal solid waste management challenges in developing regions: A comprehensive review and future perspectives for Asia and Africa. *Science of the Total Environment*, 172794.
78. Zhao, N., & You, F. (2020). Can renewable generation, energy storage and energy efficient technologies enable carbon neutral energy transition?. *Applied Energy*, 279, 115889.