

SEPARAÇÃO DE CO₂ E CH₄: PROGRESSO TECNOLÓGICO E DESAFIOS NO DESENVOLVIMENTO DE MEMBRANAS DE ALTA SELETIVIDADE

Izamara do Nascimento Lima 1.

Dany Geraldo Kramer 2.

Resumo

Esta revisão abrange os mais diversos avanços tecnológicos de membranas desenvolvidas com a funcionalidade de separação seletiva de dióxido de carbono e metano. As buscas foram realizadas nas bases Scopus, Web of Science, SciELO e Google Scholar, contemplando a literatura nacional e internacional, com foco em estudos que tiveram publicações entre os anos de 2003 até 2025. Como resultado, pode-se observar fatos que evidenciam evolução significativa no desempenho de membranas poliméricas, híbridas, peneiras moleculares de carbono e membranas com matrizes mistas (MMMs), que vêm se destacando pela elevada seletividade, estabilidade térmica aprimorada e resistência química sob diferentes condições operacionais. Observa-se também que a engenharia de membranas tem avançado em direção a abordagens mais sustentáveis, apresentando menor demanda energética e menor geração de resíduos em comparação a tecnologias convencionais, como absorção química. Em síntese, a revisão destaca que o conjunto de inovações desenvolvidas ao longo dos anos aponta um cenário promissor, ainda que os desafios persistam, sobretudo relacionados à plasticização, estabilidade em longos períodos operacionais e o equilíbrio entre seletividade e permeabilidade. Por tanto, as membranas caracterizam-se por serem uma nova

1 INTRODUÇÃO

Compreender os avanços tecnológicos são fundamentais principalmente quando se trata de processos industriais mais eficientes e

ambientalmente sustentáveis, esses fatores têm gerado grande impacto, impulsionando o desenvolvimento de tecnologias avançadas que se direcionam para a seletividade e purificação de gases. As membranas são uma nova proposta que vem ganhando destaque como alternativas promissoras para captura de dióxido de carbono e metano, direcionando por tanto suas aplicabilidades para o refino de gás natural e à mitigação de emissões de gases na atmosféricas. As membranas são tecnologias mais "verdes" que outras tecnologias, pois podem gerar menos resíduos e ter menos consumo de energia (Santana et al., 2024).

Segundo Habert et al., (2006), uma membrana é, por definição, uma barreira permoseletiva entre duas fases. Isso significa que este material funciona, de fato, como uma barreira que separa duas fases e pode restringir o transporte de uma ou várias substâncias químicas presentes em solução de uma fase para. Analisando esses fatos, é essencial conhecer e compreender os avanços que estão sendo apresentados no design, materiais e desempenho dessas membranas, avaliando as diversas metodologias, suas aplicabilidades, desempenho e seu potencial em escala industrial.

Essas tecnologias oferecem membranas com processos e estruturas diferentes. No contexto de membranas densas, o processo de separação ocorre devido à interação físico-química entre os componentes a serem permeados e o tipo de material constituinte da membrana, um mecanismo denominado de adsorção-difusão, além de caracterizar-se por interações intensas, fazendo com que as membranas densas sejam as que possuem maior seletividade (Judd, Jefferson, 2003).

Por sua vez, nas membranas porosas, a separação ocorre essencialmente por um mecanismo de natureza mecânica. Nesses sistemas, a capacidade de discriminação dos materiais é determinada entre o tamanho das partículas presentes na corrente de alimentação e o diâmetro dos poros da membrana. Por tanto, materiais que tenham tamanho superior ao tamanho dos poros da membrana, ficarão na corrente de concentrado, enquanto as dimensões inferiores ao tamanho dos poros conseguem atravessar a estrutura, ou seja, serão permeados (Santos, 2011).

Por tanto, o objetivo dessa revisão foi identificar e discutir sobre as tecnologias de membranas desenvolvidas entre 2003 e 2025 que apresentaram resultados promissores.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Metodologia

A metodologia desta revisão consistiu na investigação e pesquisa integrativa da literatura e objetivou-se na identificação de novas tecnologias voltadas para a captura de dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4). Essas buscas foram realizadas nas bases de dados scopus, Web of science, Google Scholar e SciELO, com o intuito de contemplar a literatura nacional e internacional, mediante isso, foram utilizados artigos em língua portuguesa e inglesa. Para garantir a atualidade dos dados, foram considerados apenas estudos publicados entre 2003 e 2025. As palavras chaves foram definidas baseando-se no tema central abordado nesta revisão, entre os termos utilizados, destacam-se: membrane selective, CO_2 membrane, CH_4 membrane, gas separation, CO_2/CH_4 selectivity.

A análise de dados foi de caráter qualitativo e descritivo, permitindo uma identificação das novas tecnologias, as limitações e os desafios técnicos, econômicos e ambientais associados a cada abordagem.

2.2. Resultados e discussões

A revisão sistemática desenvolvida por Olabi et al., 2023, evidencia que determinadas arquiteturas de membranas apresentam desempenho robusto sob ampla faixa de pressões e temperaturas, o que reforça seu potencial de aplicação em contextos industriais de grande escala. Com tudo, os autores reportam que configurações híbridas e membranas compostas têm alcançado seletividades superiores e maior estabilidade térmica, características que ampliam significativamente sua viabilidade comercial e consolidam seu papel emergente nas estratégias de captura de carbono.

Okamoto et al., (2020), em sua revisão intitulada por Perfluorodioxolane Polymers for Gas Separation Membrane Applications, aborda sobre a

utilização de polímeros de perfluorodioxolano destinado às membranas para a separação de gases. Mediante a estrutura amorfa polimérica, os resultados tendem a mostrar excelência e bom desempenho desse material destinado a seletividade de CO_2/CH_4 , resultando em características de boa estabilidade térmica, resistência química e estabilidade contra degradação.

Dessa forma, Okamoto et al., (2020), destacam que a avaliação do desempenho dessas membranas revela uma permeação significativamente superior do CO_2 em relação ao CH_4 . Tal comportamento decorre da combinação entre a maior afinidade e solubilidade do CO_2 na matriz polimérica e a seletividade difusional intrínseca do material. Em contraste, o CH_4 , devido à sua difusividade significativamente mais baixa e à menor interação com os segmentos poliméricos, experimenta mobilidade restrita ao longo da microestrutura amorfa, resultando em limitada permeabilidade. Essa distinção entre os mecanismos de transporte confirma a superioridade das membranas de perfluorodioxolano na separação seletiva do par CO_2/CH_4 , conforme discutido pelos autores.

O artigo foi desenvolvido por Lei et al., (2020), Preparation of carbon molecular sieve membranes with remarkable CO_2/CH_4 selectivity for high-pressure natural gas sweetening, aborda sobre a seletividade de gases através de membranas como peneira molecular de carbono, direcionando-se a processos com gás natural. O enfoque principal deste artigo foi buscar a otimização do tamanho do poro para que a membrana pudesse maximizar a sua seletividade para gases de CO_2 e CH_4 , mantendo uma permeabilidade razoável quando submetida a pressões de 50 bar e elevadas temperaturas.

O estudo de Wang et al., (2019), embasa-se no mesmo objetivo das demais membranas citadas anteriormente. O estudo parte da premissa de uma membrana desenvolvida com o polímero Pebax 1667, servindo como uma alternativa promissora para atingir os objetivos propostos, esse fato se tornaria possível pois sua cadeia apresenta segmentos de Polietileno Glicol (PEO), que interagem fortemente com a molécula de dióxido de carbono. Em síntese, o artigo também expõe que membranas mistas desenvolvidas a partir de Pebax 1657 e NOHM-I HPE são também uma rota promissora nos processos

de captura e purificação do CO₂. Por tanto, o trabalho destaca a importância da integração entre química de materiais avançados e engenharia de membranas como uma estratégia funcional capaz de enfrentar desafios energéticos e ambientes que se associam ao uso de combustíveis fósseis.

O enfoque principal do artigo desenvolvido por Wu et al., (2025), enfatizam que a incorporação de cadeias flexíveis de Polidimetilsiloxano (PDMS), às membranas poliméricas representam uma nova metodologia inovadora. As proporções moderadas podem fornecer a geração de uma rede ultra microporosa mais aberta, o que eleva consideravelmente a permeabilidade do CO₂, além desses fatores, é importante salientar que adicionar ao adicionar mais PDMS apresentou melhoras na permeabilidade, porém em contraponto pode reduzir a seletividade se esse teor foi muito elevado. Outro fator citado que deve ser considerado foi a temperatura de pirólise, pois se for mais quente densifica a membrana reduzindo o volume do poro e aumentando a seletividade, por tanto, esse artigo mostrou uma nova alternativa de membrana com cadeias flexíveis mediante a decomposição térmica.

Nie et al., (2025) realiza através do seu estudo uma investigação sobre a construção de membranas com matrizes mistas (MMMs) a partir de poliamida 6FDA – TFMB incorporando nanosheets 2D de MOF AlFNI. O objetivo principal desse artigo foi desenvolver métodos que criam canais de transporte ultrarrápidos e seletivos. Como resultado, essas membranas apresentaram aumentos expressivos de permeabilidade e seletividade de CO₂/CH₄, ainda que submetidas em condições de altas temperaturas e pressões (industriais). Dessa forma, o uso dos MOFs fluorados dentro da matriz polimérica geram estruturas que desempenham um papel crucial, pois as estruturas altamente estáveis permitem que os microporos mantenham-se organizados, decorrendo de uma afinidade elevada com CO₂.

Já Khan et al., (2025), falou em seu artigo sobre uma funcionalização amina da ZIF-8 em membrana, mostrando que a afinidade por CO₂ prevalece e também consta uma compatibilidade com o polímero, isso contribui significativamente para as propriedades da membrana. Esse material foi

desenvolvido seguindo o padrão de fibra oca (Hollow fiber), favorecendo na aplicabilidade industrial. Os testes foram desenvolvidos com cargas de 0,5% e 0,25% wt e como resultado, o estudo enfatizou que com carga baixa e modificação adequada, as membranas resultam em uma boa resistência à plasticização mesmo sobre pressões altas, sendo um fator extremamente importante na purificação de gás natural.

3 CONCLUSÃO

A análise das publicações entre 2003 e 2025 evidencia que as membranas vêm ganhando destaque entre as novas tecnologias aplicadas à seletividade de gases. Esse avanço se deve ao fato de serem um método mais “verde”, sustentável e energeticamente eficiente para o tratamento de misturas gasosas, quando comparadas a outras tecnologias já existentes. Os resultados reforçam que o desempenho das membranas está diretamente relacionado ao controle preciso de fatores como tamanho dos poros, química de superfície, estabilidade térmica e resistência mecânica. Esses aspectos configuram um cenário promissor, no qual as membranas despontam como tecnologias estratégicas para a seletividade do dióxido de carbono e do metano, oferecendo propriedades ideais para aplicações em diferentes condições de temperatura e pressão.

A revisão também mostrou que, ao longo desse período, ocorreram avanços significativos, incluindo estudos envolvendo peneiras moleculares de carbono, incorporação de MOFs e abordagens híbridas. Por fim, pode-se enfatizar que os resultados evidenciam que ajustes estruturais — como a otimização do tamanho dos poros, a inserção de nanopartículas e o controle da temperatura de pirólise — modificam profundamente o desempenho das membranas, aumentando sua eficiência nos processos de seletividade e purificação de CO₂ e CH₄.

REFERÊNCIAS

HABERT, A. C.; Borges, C. P.; Nobrega R. Processo de separação por membranas. p. 9–23, 2006.

JUDD, S. J. Membranes for Industrial Wastewater Recovery and Re-use. Oxford: Elsevier Science, p. 291, 2003.

KHAN, I. U.; Otham, M. H. D.; Rahman, M. A.; Iftikhar, M. Enhanced CO₂/CH₄ separation using amine-modified ZIF-8 mixed matrix membranes. Materials Chemistry and Physics, v. 334, p. 130404, 2025.

LEI, L. et al. Preparation of carbon molecular sieve membranes with remarkable CO₂/CH₄ selectivity for high-pressure natural gas sweetening. Journal of Membrane Science, v. 614, 118529, 2020.

NIE, Huijie et al. Enhancement of gas separation performance of polyimide mixed matrix membranes by oriented 2D Metal-Organic Framework. Separation and Purification Technology, v. 377, p. 134334, 2025.

OILABI, A. G. et al. Membrane-based carbon capture: Recent progress, challenges, and their role in achieving the sustainable development goals. Chemosphere, v. 320, p. 137996, 2023.

OKAMOTO, Y. et al. Perfluorodioxolane polymers for gas separation membrane applications. Membranes, v. 10, n. 12, Article 394, 2020.

SANTOS, T. D. Preparação e caracterização de membranas compósitas polisulfona/material celulósico como barreira seletiva. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Caxias do Sul. 2011.

WANG, J. et al. Selective separation of CO₂ using novel mixed matrix membranes based on Pebax and liquid-like nanoparticle organic hybrid materials. Journal of Membrane Science, v. 584, p. 79–88, 2019.

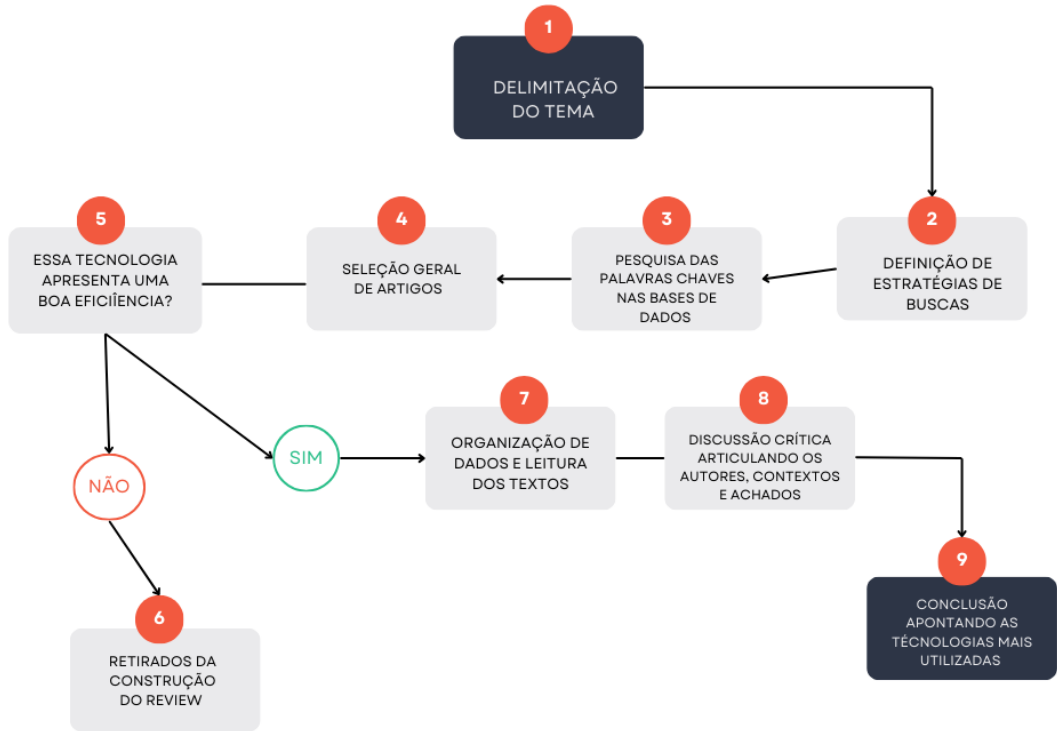
WU, Ying Xiu et al. Improved CO₂/CH₄ separation in carbon molecular sieve membranes via copolymerization of long-chain flexible structures. Membranes, v. 15, n. 5, p. 128, 2025.

Sobre o(s) autor(es)

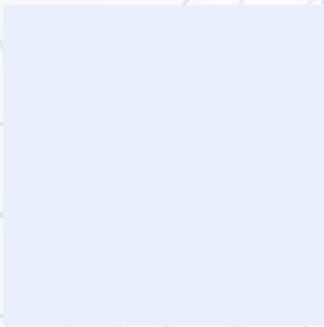
1. Mestranda do Programa de Pós - Graduação em Engenharia Têxtil na Universidade Federal do Rio Grande do Norte. izamara.lima.707@ufrn.edu.br.

2. Prof. Dr. do Programa de Pós - Graduação em Engenharia Têxtil na Universidade Federal do Rio Grande do Norte. dgkcs@yahoo.com.br

Fluxograma metodológico do processo de seletividade dos artigos estudados e apresentados no review.

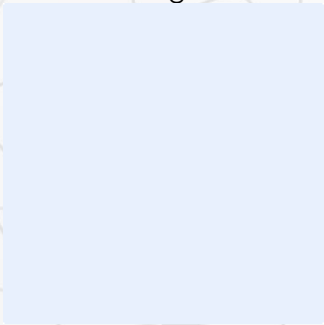


Fonte: Autora 2025.



Fonte:

Título da imagem



Fonte: Fonte da imagem

Título da imagem



Fonte: Fonte da imagem

Título da imagem



Fonte: Fonte da imagem

Título da imagem



Fonte: Fonte da imagem