



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



DIOVANNA FERRARI

**ANÁLISE DA APLICAÇÃO DE PROCESSOS DE
FILTRAÇÃO POR MEMBRANAS PARA
SEPARAÇÃO DE DIÓXIDO DE CARBONO: UMA
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.**

UBERLÂNDIA

2025

DIOVANNA FERRARI

ANÁLISE DA APLICAÇÃO DE PROCESSOS DE
FILTRAÇÃO POR MEMBRANAS PARA SEPARAÇÃO
DE DIÓXIDO DE CARBONO: UMA REVISÃO
BIBLIOGRÁFICA.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
curso de graduação em Engenharia Química da
Universidade Federal de Uberlândia, Campus Santa
Mônica.

Orientador (a): Prof.a Dr.a Miria Hespanhol
Miranda Reis

UBERLÂNDIA

2025

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU com dados
informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

C972 Ferrari, Diovanna, 1999
2025 ANÁLISE DA APLICAÇÃO DE PROCESSOS DE FILTRAÇÃO
POR MEMBRANAS PARA SEPARAÇÃO DE DIÓXIDO DE
CARBONO: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA. [recurso
eletrônico] / Diovanna Ferrari.- 2025.

Orientador: Miria Hespanhol Miranda
Reis.

Trabalho de Conclusão de Curso
(graduação) - Universidade Federal de
Uberlândia, Graduação em Engenharia
Química.

Modo de acesso:

Internet. Inclui

bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia química. I. Reis, Miria Hespanhol
Miranda, 1978, (Orient.). II. Universidade Federal
de Uberlândia. Graduação em Engenharia Química.
III. Título.

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

DIOVANNA FERRARI

ANÁLISE DA APLICAÇÃO DE PROCESSOS DE
FILTRAÇÃO POR MEMBRANAS PARA SEPARAÇÃO DE
DIÓXIDO DE CARBONO: UMA REVISÃO
BIBLIOGRÁFICA.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia Química da Universidade
Federal de Uberlândia como parte dos requisitos
necessários para a aprovação na disciplina Trabalho
de Conclusão do Curso de Graduação em
Engenharia Química.

Uberlândia, 08 de maio de 2025.

Banca examinadora:

Prof.^a Dr.^a Miria Hespanhol Miranda Reis
Orientadora – FEQUI/UFU

Prof. Dra. Lidiane Pereira Bessa
IQ-UnB

Guilherme Guimarães Ascendino
Doutorando PPGEQ-UFU

AGRADECIMENTOS

É com sincera gratidão que reconheço o apoio de todos que me acompanharam nesta jornada acadêmica. Agradeço primeiramente a Deus, por ter me concedido força e sabedoria para superar os desafios ao longo deste caminho.

Expresso minha profunda gratidão aos meus pais, Lusandra e Sergio, pilares de amor e apoio incondicional. Este trabalho é um testemunho da fé que depositaram em mim e dos sacrifícios que fizeram. Agradeço por cada gesto de suporte, desde o auxílio emocional e financeiro até as conversas que me reergueram nos momentos difíceis. Sua presença constante aliviou o peso das minhas responsabilidades e me impulsionou a buscar um futuro melhor. Sou eternamente grata pelo exemplo de vida e pelo amor que me guiaram até aqui.

Meus sinceros agradecimentos aos amigos e colegas que tornaram meus dias mais leves e me auxiliaram ao longo desta jornada. Agradeço por me entenderem, por caminharem ao meu lado e por tornarem este percurso mais agradável.

Meus sinceros agradecimentos aos professores, que desde a infância me inspiram. Agradeço por terem moldado quem sou hoje, compartilhando experiências, sabedoria e motivação ao longo da minha jornada. Em especial, gostaria de expressar minha profunda gratidão a minha orientadora, Prof.^a Dr.^a Miria, por sua paciência, dedicação e incentivo ao longo de todo o processo. Seus conhecimentos e orientações foram fundamentais para a conclusão deste trabalho.

Por fim, expresso minha gratidão à universidade, que me proporcionou um desenvolvimento integral, moldando tanto meu percurso acadêmico quanto minha trajetória profissional. Reconheço o valor inestimável da ConsultEQ e do Movimento Empresa Júnior, ambientes de aprendizado enriquecedores e de conexões cruciais para meu crescimento. Agradeço a todos que foram importantes em minha vida e que contribuíram para a realização desse trabalho. Muito obrigada!

RESUMO

O papel das políticas de eficiência energética e gestão sustentável dos recursos naturais na redução das emissões de dióxido de carbono (CO₂) demonstra a importância da governança ambiental para orientar ações individuais e coletivas. O aumento das emissões de dióxido de carbono, intensificado pelas atividades humanas, tem contribuído significativamente para as mudanças climáticas globais. Nesse contexto, torna-se essencial o desenvolvimento de tecnologias de captura de carbono, compreendida como o conjunto de processos que incluem a separação, o transporte e o armazenamento de CO₂. A separação, especificamente, refere-se à etapa em que o CO₂ é isolado de misturas gasosas industriais, sendo uma fase crítica para o sucesso das estratégias de mitigação. Entre as tecnologias de separação, o uso de membranas surgiu como uma alternativa eficiente, de menor custo e impacto ambiental em comparação a métodos convencionais. Entre essas alternativas, as membranas poliméricas destacam-se principalmente devido à sua modularidade, seletividade e eficiência. Este trabalho realizou uma análise teórica sobre o uso de membranas poliméricas na separação de dióxido de carbono, abordando os mecanismos de transporte, as propriedades físico-químicas do gás, os materiais utilizados e o desempenho de membranas comerciais. O estudo baseou-se em levantamento bibliográfico de publicações científicas dos últimos dez anos, abrangendo avanços tecnológicos e desafios enfrentados no escalonamento industrial dessa tecnologia. Como resultado, apresenta-se uma síntese das principais abordagens disponíveis, com destaque para os materiais mais promissores, como as poliimidas e os polímeros de microporosidade intrínseca. Também são discutidas as limitações atuais, como o *trade-off* entre permeabilidade e seletividade, e estratégias emergentes para sua superação, como as membranas mistas (MMMs). E embora ainda existam barreiras tecnológicas, as membranas poliméricas apresentam grande potencial para impulsionar práticas industriais mais sustentáveis e contribuir para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa.

Palavras-chaves: dióxido de carbono; membranas poliméricas; separação de gases; captura de carbono; desempenho de membranas.

ABSTRACT

The role of energy efficiency policies and sustainable management of natural resources in reducing carbon dioxide (CO₂) emissions demonstrates the importance of environmental governance in guiding individual and collective actions. The increase in carbon dioxide emissions, intensified by human activities, has significantly contributed to global climate change. In this context, the development of carbon capture technologies, understood as the set of processes that include the separation, transportation, and storage of CO₂, becomes essential. Separation, specifically, refers to the stage where CO₂ is isolated from industrial gas mixtures, being a critical phase for the success of mitigation strategies. Among the separation technologies, the use of membranes has emerged as an efficient alternative with lower cost and environmental impact compared to conventional methods. Among these alternatives, polymeric membranes stand out mainly due to their modularity, selectivity, and efficiency. This work conducted a theoretical analysis on the use of polymeric membranes in carbon dioxide separation, addressing the transport mechanisms, the physicochemical properties of the gas, the materials used, and the performance of commercial membranes. The study was based on a bibliographic survey of scientific publications from the last ten years, covering technological advances and challenges faced in the industrial scaling of this technology. As a result, a synthesis of the main available approaches is presented, highlighting the most promising materials, such as polyimides and polymers of intrinsic microporosity. Current limitations, such as the trade-off between permeability and selectivity, and emerging strategies for their overcoming, such as mixed matrix membranes (MMMs), are also discussed. Although technological barriers still exist, polymeric membranes show great potential to drive more sustainable industrial practices and contribute to the mitigation of greenhouse gas emissions.

Keywords: carbon dioxide; polymeric membranes; gas separation; carbon capture; membrane performance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Dados de emissão de dióxido de carbono na atmosfera no Brasil	14
Figura 2 - Emissões de CO ₂ por setores.....	16
Figura 3 - Principais tipos de membranas	20
Figura 4 - Curva de Robenson CO ₂ / CH ₄	24

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre os tipos de membranas.	23
Tabela 2 - Comparação entre membranas poliméricas comerciais.	29
Tabela 3 – Comparação de Desempenho das Membranas para Separação de CO ₂	36

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	8
2. OBJETIVOS.....	11
2.1. Objetivos gerais.....	11
2.2. Objetivos específicos.....	11
3. METODOLOGIA.....	12
4. POLUIÇÃO DO AR.....	12
5. IMPACTOS DO DIÓXIDO DE CARBONO NO EFEITO ESTUFA E NAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS	13
6. ASPECTOS LEGAIS E INSTITUCIONAIS ENTRE MEIO AMBIENTE E ECONOMIA.....	15
7. ESTIMATIVA DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA.....	15
8. PROPRIEDADES DO DIÓXIDO DE CARBONO.....	17
9. MÉTODOS DE SEPARAÇÃO DE CO ₂	17
10. COMPARAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL.....	19
11. CONSIDERAÇÕES SOBRE SEPARAÇÃO POR MEMBRANA (PSM).....	20
12. TIPOS DE MEMBRANAS	22
13. MEMBRANAS POLIMÉRICAS	23
15.1 Mecanismos de Transporte em Membranas Poliméricas	24
15.1.1 Difusão	25
15.1.2 Solubilidade.....	25
15.1.3 Transporte Facilitado	25
15.1.4 Efeito de Nanomateriais no Transporte de Gases	26
15.1.5 Mecanismo de Transporte em Membranas Híbridas	26
15.2 Relação entre Estrutura do Polímero e Desempenho na Separação de CO ₂	26
15.3 Materiais Poliméricos Utilizados na Separação de CO ₂	27
15.4 Desempenho de Membranas Poliméricas Comerciais	28
15.5 Desafios e Perspectivas Futuras das Membranas Poliméricas na Captura de CO ₂	30
15.6 Aplicações Industriais e Desafios de Escalonamento	31
14. INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS OPERACIONAIS NA SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS	31
15. PARÂMETROS DE DESEMPENHO PARA CAPTURA DE CO ₂	33
16. ESTUDOS DE CASOS.....	35
17. CONCLUSÃO.....	37
18. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39

1. INTRODUÇÃO

O sistema capitalista tem sido reconhecido como o principal impulsionador da criação de riqueza material ao longo da história. Antes da Revolução Industrial, o crescimento econômico e a produção de bens e serviços eram bastante limitados. Durante esse período, os combustíveis fósseis emergiram como componentes essenciais para o desenvolvimento econômico, porém, essa dependência também resultou em impactos negativos significativos. A queima desses combustíveis para a geração de energia industrial tem contribuído para o aumento da concentração de gases de efeito estufa (GEE), resultando em consequências prejudiciais. O acúmulo excessivo desses gases na atmosfera tem causado poluição, problemas respiratórios e alterações na química atmosférica, além de contribuir para o aquecimento global (ALVES, 2017).

A crescente atividade industrial e urbana intensificou a liberação de gases como metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso (N_2O) e clorofluorcarbonos (CFCs). A redução na emissão desses gases é de grande interesse como forma de evitar as mudanças climáticas. Assim, o uso de tecnologias eficazes de separação para seu reaproveitamento proporciona diversos benefícios, como o controle de emissões nas fontes poluidoras em conformidade com as leis ambientais, o aumento da sustentabilidade e a agregação de valor a esses componentes para diversas aplicações (LEE et al., 2015).

Os processos de produção foram estabelecidos para atender às necessidades humanas em termos de produtos e energia, estando intimamente ligados à poluição atmosférica. Por anos, tanto a economia quanto o setor produtivo negligenciaram os efeitos negativos das atividades humanas sobre o meio ambiente, prevalecendo a crença equivocada de que os recursos naturais eram inesgotáveis e de que o ambiente tinha capacidade intrínseca de absorver os impactos negativos resultantes da intervenção humana (UGAYA et al., 2013).

A produção de eletricidade a partir de usinas baseadas em combustíveis fósseis vem sendo desafiada pela crescente preocupação de que as emissões antropogênicas de gases de efeito estufa, como o dióxido de carbono, estejam contribuindo para as mudanças climáticas globais. Atualmente, as usinas termelétricas a carvão emitem cerca de 2 bilhões de toneladas de CO_2 por ano. Diante desse cenário, surgem questionamentos sobre como conciliar as necessidades humanas por produtos e o desenvolvimento econômico sem causar degradação ambiental. Conforme destacado por Alves (2017), há hoje um crescente interesse na preservação da natureza, motivado pelas consequências da poluição e da degradação

ambiental.

Reconhece-se que o desenvolvimento econômico promove o progresso humano, mas também está associado a problemas ambientais e mudanças climáticas. Entre os desafios globais enfrentados atualmente, a mudança climática é considerada a mais grave. Trata-se de um problema que não se restringe a determinadas nações, mas que representa um transtorno global que requer o envolvimento de todos os países para ser enfrentado. Consequentemente, para alcançar o objetivo de reduzir ou estabilizar as emissões de gases de efeito estufa, é necessário implementar negociações e acordos ambientais internacionais (HEUGES, 2012).

A geração de dióxido de carbono (CO_2), principal gás de efeito estufa emitido pelas atividades humanas, está diretamente relacionada à queima de combustíveis fósseis para produção de energia, processos industriais, atividades agrícolas e desmatamento (IPCC, 2021; IEA, 2022). Entre os setores mais responsáveis pelas emissões estão a geração de eletricidade, o transporte, a indústria pesada e as mudanças no uso do solo (IPCC, 2021). O acúmulo de CO_2 na atmosfera intensifica o efeito estufa natural, elevando a temperatura média global e impactando os sistemas climáticos (NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, 2018).

Para mitigar essas emissões, diversas tecnologias de separação de CO_2 foram desenvolvidas, principalmente focadas na captura em fontes estacionárias, como usinas termoeletricas e indústrias de grande porte (IEA, 2022). Os processos convencionais incluem a absorção química, geralmente utilizando soluções de aminas; a adsorção física ou química em sólidos; a separação criogênica; e os métodos baseados na difusão seletiva (SHAH et al., 2017; SONG et al., 2018). Embora eficientes, essas tecnologias frequentemente apresentam alto consumo energético, degradação de materiais e elevados custos operacionais, o que impulsiona a busca por alternativas mais sustentáveis e econômicas (RUBIN et al., 2015).

A tecnologia de separação por membranas tem proporcionado processos eficientes com baixo consumo energético, sendo reconhecida como uma das mais promissoras tecnologias do final do século XX até meados do século XXI (ZHANG et al., 2019). Neste contexto, as membranas de separação de gases surgem como uma alternativa viável para a separação de compostos com diferentes tamanhos moleculares e graus de polaridade (KARIMI et al., 2017).

A variedade de estruturas químicas e as propriedades dos polímeros torna possível a criação de diferentes membranas para diversas aplicações, como na separação de gases (KARIMI et al., 2017). Nos últimos anos, o uso de membranas poliméricas, como acetato de celulose, poliestireno, polissulfona, poliamida, poliimida e poliuretano, tem recebido

considerável atenção devido à facilidade de fabricação e ao alto desempenho na separação de gases (AMEDI et al., 2016). Pesquisas recentes indicam que as membranas de poliuretano (PU) são ótimas candidatas para separação de gases devido às suas propriedades mecânicas, estabilidade térmica e elevada eficiência (SODEIFIAN et al., 2019; NOROUZBAHARI et al., 2020).

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivos gerais

Analisar, por meio de uma revisão bibliográfica, os métodos de filtração de dióxido de carbono por membranas, com foco na viabilidade técnica, eficiência e impactos ambientais desse processo.

2.2. Objetivos específicos

- Avaliar a eficiência das membranas poliméricas na filtração de CO₂ a partir de fontes de emissões industriais.
- Investigar os parâmetros de operação que afetam a eficácia do processo de separação.
- Estudar os efeitos da composição e morfologia das membranas na seletividade e na resistência ao transporte de CO₂.
- Comparar o impacto ambiental da separação por membranas com outras tecnologias de captura de carbono.
- Explorar possibilidades de reaproveitamento ou armazenamento do CO₂ capturado para aplicações industriais.

3. METODOLOGIA

Este trabalho foi desenvolvido com base em uma revisão bibliográfica e análise qualitativa de estudos experimentais relacionados à aplicação de membranas poliméricas na separação de dióxido de carbono. Foram selecionados artigos científicos recentes, publicados majoritariamente entre os anos de 2015 e 2024, que abordam o desempenho de diferentes tipos de membranas, incluindo polímeros de microporosidade intrínseca, membranas híbridas e membranas funcionalizadas com grupos amina.

A pesquisa foi realizada em bases de dados científicas como *ScienceDirect*, *Scopus* e *Web of Science*, utilizando termos-chave como “*polymeric membranes*”, “*CO₂ separation*”, “*carbon capture*” e “*membrane gas separation*”. A seleção dos estudos considerou os seguintes critérios: uso de membranas poliméricas; foco na captura de CO₂ e apresentação de resultados experimentais com parâmetros como permeabilidade, seletividade, e estabilidade térmica.

A metodologia seguiu uma abordagem qualitativa e comparativa, buscando identificar os principais materiais utilizados, condições operacionais empregadas e desempenho observado nas pesquisas. Como complemento, foi realizada uma análise crítica dos desafios enfrentados e das inovações tecnológicas propostas nos estudos selecionados.

4. POLUIÇÃO DO AR

A Organização Mundial da Saúde, OMS, caracteriza a poluição ar como qualquer alteração das propriedades naturais da atmosfera causada por qualquer agente químico, físico ou biológico. Ao ultrapassar a capacidade natural de purificação do ar, ocorre a poluição atmosférica, que leva ao acúmulo de compostos nocivos à vida. A degradação é um dos efeitos mais significativos deste segmento industrial, que utiliza cerca de 37% da energia global, e produz 50% de dióxido de carbono (CO₂), além de uma variedade de substâncias químicas que colocam em risco a destruição da camada de ozônio (MEDEIROS, 2005).

De acordo com informações do Painel Vigiar, encarregado de acompanhar a poluição atmosférica no Brasil, a média anual de material particulado fino emitido em 2023 superou quase o dobro do limite recomendado pela OMS, provenientes

principalmente de veículos, indústrias e queimadas. Essas partículas, devido ao seu tamanho, podem ser inaladas nos pulmões, atingindo o sangue e podendo provocar problemas respiratórios, cardíacos e até câncer.

5. IMPACTOS DO DIÓXIDO DE CARBONO NO EFEITO ESTUFA E NAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

O efeito estufa é um fenômeno natural essencial para a manutenção da temperatura média da Terra, pois permite a passagem da radiação solar de ondas curtas, enquanto retém parte da radiação infravermelha de ondas longas refletida pela superfície terrestre. Essa retenção ocorre devido à presença de gases como dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e vapor d'água (H_2O), que absorvem e reemitem essa radiação, aquecendo a atmosfera (IPCC, 2021).

Embora esse processo seja natural e necessário para a vida no planeta, o aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera, especialmente por atividades humanas, tem intensificado esse efeito, contribuindo para o aquecimento global (NASA, 2023). Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), é extremamente provável (probabilidade superior a 95%) que a elevação da temperatura média global desde meados do século XX seja causada pelas emissões antropogênicas de gases de efeito estufa, principalmente provenientes da queima de combustíveis fósseis, mudanças no uso da terra e desmatamento (IPCC, 2021).

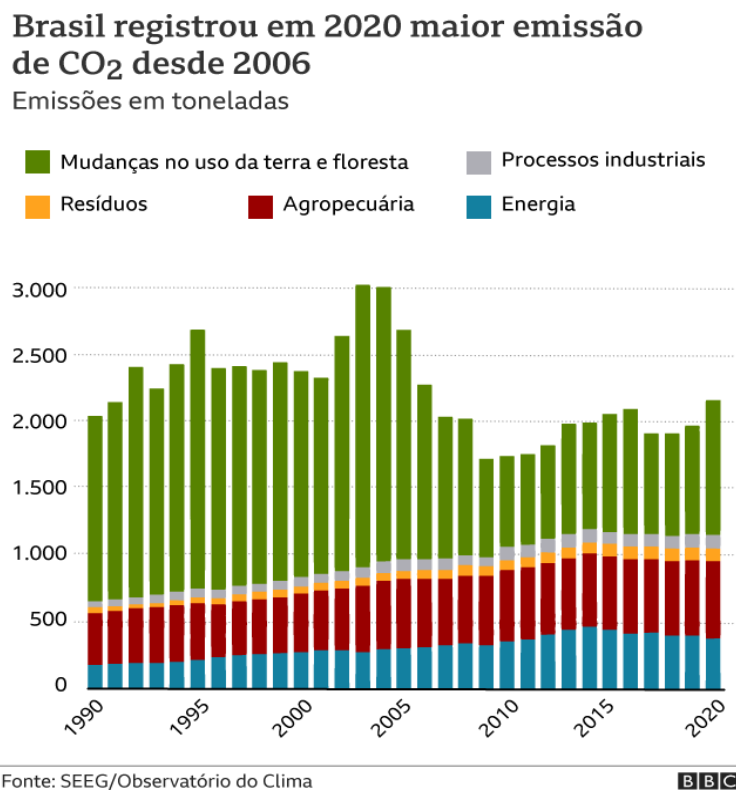
As consequências desse desequilíbrio climático já são perceptíveis: aumento do nível do mar, derretimento das geleiras, alterações nos padrões de precipitação e aumento na frequência e intensidade de eventos extremos, como secas, ondas de calor e furacões (UNEP, 2022). A acidificação dos oceanos, causada pela absorção de CO_2 , também compromete ecossistemas marinhos, afetando cadeias alimentares e a biodiversidade (NOAA, 2022).

Estudos recentes estimam que, se as emissões continuarem no ritmo atual, entre 10% e 30% das espécies animais e vegetais podem enfrentar risco de extinção até 2050, devido à perda de habitat e mudanças drásticas nos ecossistemas (WWF, 2020). Além disso, doenças tropicais como malária e dengue tendem a se expandir para novas regiões, impulsionadas pelas mudanças nos padrões climáticos (WHO, 2021). Os efeitos adicionais previstos incluem um aumento do nível do mar entre 110 e 770 milímetros até 2100, consequências na agricultura, desaceleração da circulação termohalina, reduções na

camada de ozônio, aumento na intensidade e frequência de furacões, acidificação dos oceanos e propagação de doenças como malária e dengue. Um estudo ainda estima que entre 18% e 35% das 1103 espécies de plantas e animais estarão extintas até 2050 (OLIVEIRA, 2000).

No Brasil, as principais fontes antropogênicas de emissões de CO₂ são o desmatamento, a combustão industrial e o tráfego de veículos, representando cerca de 3% das emissões globais, segundo informações divulgadas na Cúpula de Líderes pelo Clima em 2021. A queima de combustíveis fósseis ocorre principalmente nos setores de energia, indústria e transporte. Além disso, as ações humanas também afetam os reservatórios naturais de carbono e os sumidouros, como as florestas, cujo desmatamento e queimadas liberam carbono armazenado na biomassa para a atmosfera na forma de dióxido. Embora sejam relativamente baixas em comparação com outros países, as emissões de CO₂ têm aumentado ao longo dos anos e atingiram seu pico em 2020, representando a maior taxa desde 2006, como ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Dados de emissão de dióxido de carbono na atmosfera no Brasil.



Fonte: SEEG/Observatório do Clima.

6. ASPECTOS LEGAIS E INSTITUCIONAIS ENTRE MEIO AMBIENTE E ECONOMIA

As comunidades internacionais estão empenhadas em combater o aquecimento global através de acordos voluntários entre as nações. O Protocolo de Kyoto, estabelecido em 1997, foi o primeiro tratado internacional direcionado ao controle das emissões de gases de efeito estufa, visando uma redução de 5,2% em relação a 1990, principalmente por parte dos países industrializados, durante o período de 2008 a 2012. Apesar de assinado por 84 países, os Estados Unidos abandonaram o acordo em 2001, citando preocupações econômicas. No Brasil, a legislação ambiental reflete a preocupação com a degradação do meio ambiente, com a Lei 12.187/2009 estabelecendo o Sistema Nacional de Redução de Emissões de Gases de Efeito Estufa (Sinare) e os Planos Setoriais de Mitigação das Mudanças Climáticas. Esses planos definem metas progressivas alinhadas com o objetivo de longo prazo de neutralidade climática estipulado na Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC), com monitoramento realizado por meio de inventários periódicos de gases de efeito estufa pelos setores envolvidos. A proposição dos Planos Setoriais compete aos Ministérios do Meio Ambiente e da Economia, com aprovação pelo Comitê Interministerial sobre a Mudança do Clima e o Crescimento Verde, e os setores têm um prazo de 180 dias, prorrogáveis, para apresentar suas propostas de curvas de redução de emissões.

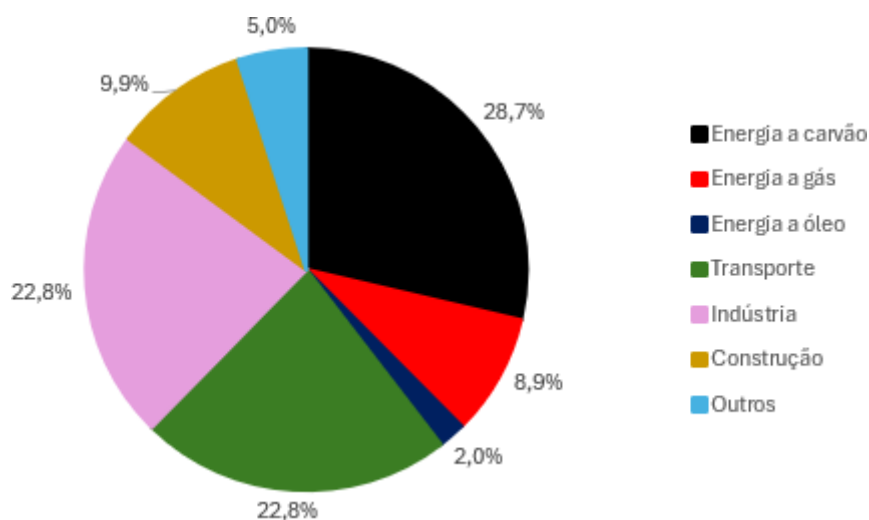
7. ESTIMATIVA DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA

Controlar efetivamente as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) não só proporciona às empresas uma operação mais segura e ecoeficiente, mas também abre portas para novos investimentos e oportunidades de emprego (SILVA, 2012). Considerar o impacto dos GEE em qualquer empreendimento é essencial para uma gestão corporativa eficaz, servindo como indicador para análise de riscos e identificação de oportunidades. Esse processo segue uma cadeia de valor, desde o cumprimento das regulamentações até a inovação empresarial, assegurando um desenvolvimento responsável e operações economicamente eficientes. Ao identificar e quantificar precisamente as emissões totais, as organizações obtêm uma visão mais clara das áreas que requerem intervenções específicas (FINNEGAN et al., 2018).

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), gerir de forma eficiente as emissões de GEE traz vantagens para as empresas, concentrando-se na melhoria da gestão operacional e na eficiência energética. Em resumo, essa abordagem estratégica resulta em maior produção com custos equivalentes, reduzindo o desperdício, o consumo energético e as emissões de gases do efeito estufa, além de garantir a conformidade com as obrigações legais. Do ponto de vista financeiro, as práticas sustentáveis se refletem no valor de mercado da empresa.

O dióxido de carbono é amplamente reconhecido como o principal GEE, e a queima de combustíveis fósseis, como carvão, petróleo e gás natural, para geração de energia representa, de longe, a maior fonte de emissões de CO₂, sendo responsável por quase metade das emissões globais. Além disso, o setor de transporte contribuiu com quase um quarto dessas emissões, conforme relatório da Agência Internacional de Energia (IEA) de 2021, ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Emissões de CO₂ por setores.



Fonte: Autoria própria (2025).

Desde 1990, os setores com maior crescimento nas emissões de gases de efeito estufa foram os processos industriais (174%), impulsionados pelo aumento do uso de refrigeração, o transporte (71%), devido ao maior deslocamento de automóveis, e a fabricação e construção (55%). No subsector de maior emissão, geração de eletricidade e calor, as emissões cresceram 78% entre 1990 e 2013, mas caíram 2% até 2016, principalmente pela substituição do carvão por gás natural e pelo aumento das energias renováveis. No entanto, as emissões de CO₂ da energia voltaram a subir em 2017 e 2018.

8. PROPRIEDADES DO DIÓXIDO DE CARBONO

A eficácia da separação de CO_2 por membranas está diretamente relacionada às propriedades físico-químicas do gás e à sua interação com os materiais poliméricos da membrana. Dois parâmetros fundamentais nesse processo são a difusividade e a solubilidade do gás no polímero. A difusividade, que determina a taxa com que o CO_2 atravessa a membrana, depende do diâmetro cinético da molécula. Como o dióxido de carbono possui tamanho molecular relativamente pequeno, ele apresenta elevada difusividade em polímeros vítreos, facilitando sua passagem (PARK et al., 2017).

Já a solubilidade do CO_2 nos polímeros está relacionada à sua temperatura crítica elevada, o que favorece sua capacidade de se dissolver em materiais orgânicos. Isso confere ao gás carbônico maior afinidade por diversos tipos de polímeros em comparação com gases como N_2 ou H_2 , elevando sua permeabilidade (MULIAWAN; LI, 2020).

A combinação entre alta difusividade e elevada solubilidade torna a separação de misturas como CO_2/N_2 e CO_2/CH_4 particularmente viável por meio de membranas poliméricas, utilizando o mecanismo de transporte por solução-difusão (WANG et al., 2016). Por outro lado, a separação de CO_2/H_2 é mais desafiadora, já que o hidrogênio, apesar de sua alta difusividade, possui baixa solubilidade em polímeros convencionais, dificultando a seletividade desejada (JAFARI; RAHIMI, 2019).

A compreensão aprofundada desses fatores é essencial para o desenvolvimento de membranas com maior seletividade e permeabilidade, visando à eficiência na captura e purificação de CO_2 em processos industriais e ambientais.

9. MÉTODOS DE SEPARAÇÃO DE CO_2

A separação de dióxido de carbono em ambientes industriais é um campo de pesquisa e desenvolvimento em constante evolução, impulsionado pela necessidade de mitigar as emissões de gases de efeito estufa. A diversidade das fontes de CO_2 , com variações significativas em concentração e composição, exige uma variedade de abordagens tecnológicas. Entre as mais proeminentes, destacam-se a absorção química, a adsorção, a captura direta do ar, a separação criogênica e os processos de separação por membranas (RAHMAN et al., 2021).

A absorção química emprega solventes que reagem reversivelmente com o CO_2 ,

proporcionando alta seletividade. No entanto, essa tecnologia enfrenta desafios significativos, como o alto custo de capital associado à construção de grandes instalações, o consumo energético considerável necessário para regenerar os solventes e o potencial impacto ambiental decorrente da degradação ou perda desses solventes (ROCHELLE, 2009). Indústrias de gás natural e no refino de petróleo, por exemplo, utilizam a técnica de absorção química para remover o dióxido de correntes de gás, garantindo a qualidade do produto final e reduzindo emissões (IEA, 2021).

Outro método é a adsorção, que utiliza materiais sólidos que separam o CO₂ por meio de interações gás-sólido. Processos como a adsorção por oscilação de pressão (PSA) e a adsorção por oscilação de temperatura (TSA) exploram variações de pressão e temperatura, respectivamente, para alcançar a separação. Embora essa técnica ofereça vantagens como menor corrosão e alta pureza do produto, ela apresenta limitações em capacidade e por exigir pré-tratamento para remoção de umidade (SAMANTA et al., 2012; WANG et al., 2011). Esse processo é uma etapa crucial na purificação do biogás, convertendo-o em biometano, e na siderúrgica para separação de dióxido de carbono dos gases de combustão, contribuindo para processos mais limpos (IEA, 2021).

Já a captura direta de CO₂ do ar (DAC) recorre a materiais de quimissorção para remover CO₂ em concentrações reduzidas, sendo considerada uma solução emergente para emissões negativas ou compensação de fontes difusas, como as provenientes dos setores agrícola e de transporte (FASIHI et al., 2019).

Além dessas técnicas, a separação criogênica, embora menos difundida, representa uma alternativa promissora para a captura de CO₂, baseada na liquefação do gás por meio de etapas de compressão, resfriamento, expansão e separação. Apesar do elevado consumo energético associado ao uso de compressores e pressões elevadas, avanços recentes têm tornado essa tecnologia mais eficiente, especialmente quando integrada a processos híbridos, como etapa final para purificação ou liquefação do CO₂ após separação preliminar por membranas ou adsorventes (KHOSRAVI; RAHBAR, 2020; IEA, 2023).

A separação por membranas, por sua vez, vem ganhando destaque como uma tecnologia promissora devido ao baixo custo de capital, modularidade, simplicidade operacional e menor impacto ambiental, pois dispensa aditivos químicos e regeneração de solventes. Seu escalonamento linear e menor investimento inicial tornam-na atrativa para aplicações de pequena e média escala. No entanto, sua aceitação industrial ainda é restrita, e a maioria das membranas disponíveis apresenta um nível de prontidão tecnológica (TRL) inferior a 5, evidenciando a necessidade de avanços para viabilizar sua implementação em

larga escala (BERNARDO et al., 2009; IEA, 2020).

10. COMPARAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL

A avaliação do impacto ambiental das tecnologias de captura de carbono é fundamental para orientar a seleção de métodos mais sustentáveis. A Análise do Ciclo de Vida (ACV) surge como uma ferramenta essencial para comparar as emissões de gases de efeito estufa, o consumo de energia, o uso de recursos e a geração de resíduos em cada tecnologia (ROMANO et al., 2016).

Nesse contexto, o consumo de energia emerge como um fator crítico. A separação por membranas geralmente apresenta um menor consumo de energia em comparação com outras tecnologias, como a absorção química, que demanda energia significativa para a regeneração dos solventes (MOLKI et al., 2018; ZHANG et al., 2019). Essa característica confere às membranas uma vantagem ambiental, especialmente em um cenário de crescente preocupação com a eficiência energética.

A geração de resíduos também representa um ponto de diferenciação importante. Processos como a absorção química podem gerar resíduos líquidos ou sólidos decorrentes da degradação dos solventes, exigindo tratamento e disposição adequados. Em contraste, a separação por membranas minimiza a geração de resíduos, contribuindo para a redução do impacto ambiental.

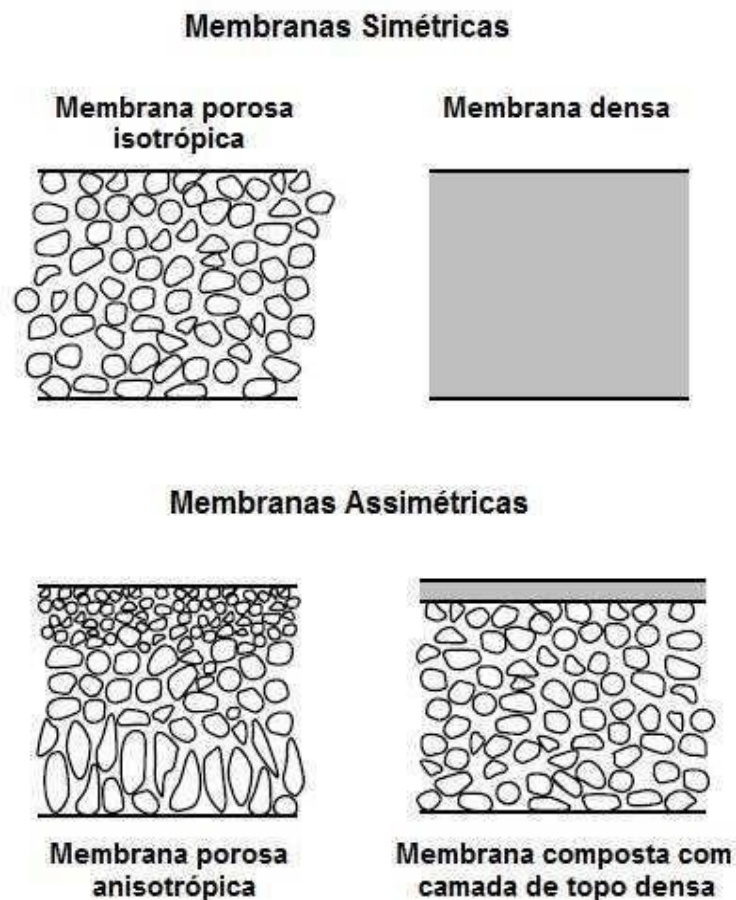
O uso de materiais na fabricação das tecnologias de captura é outra dimensão relevante. A produção de solventes químicos para absorção pode envolver o uso de recursos não renováveis e a geração de emissões. Por outro lado, a fabricação de membranas requer a seleção cuidadosa de materiais, considerando a disponibilidade, a renovabilidade e a reciclabilidade (SANDERS et al., 2013). O desenvolvimento de membranas a partir de materiais mais sustentáveis, como polímeros de base biológica, representa uma área promissora para aprimorar ainda mais o perfil ambiental dessa tecnologia.

Em suma, a comparação do impacto ambiental das tecnologias de captura de carbono revela que a separação por membranas apresenta vantagens significativas em termos de consumo de energia, geração de resíduos e potencial para uso de materiais mais sustentáveis. No entanto, a ACV completa e detalhada de cada tecnologia é essencial para uma avaliação abrangente e para a tomada de decisões informadas sobre a implementação de estratégias de captura de carbono.

11. CONSIDERAÇÕES SOBRE SEPARAÇÃO POR MEMBRANA (PSM)

Membranas são estruturas finas e flexíveis que desempenham o papel de barreiras ou separadores em diversos ambientes e contextos, indo desde aplicações biológicas até industriais. Elas são empregadas como separadores seletivos para isolar substâncias com base em suas características físicas e químicas, como tamanho, carga, solubilidade e polaridade. Essas membranas têm a capacidade de separar duas fases e restringir o transporte de espécies químicas entre essas fases. Podem ser compostas por materiais poliméricos, cerâmicos, metálicos ou uma combinação desses materiais. Encontram aplicação em diversos processos, como filtração, osmose reversa e destilação. Existem diferentes tipos de membranas, classificadas principalmente em três categorias: densas, porosas e compostas (HABERT et al., 2006) como pode-se observar na Figura 3.

Figura 3 - Principais tipos de membranas.



Fonte: GHIGGI, FERNANDA (2014).

O Processo de Separação por Membranas (PSM) são empregados em uma variedade de aplicações, tais como a produção de água potável a partir da água do mar, a filtração de efluentes para a recuperação de compostos valiosos, e para concentrar, purificar ou fracionar soluções sensíveis à temperatura (MADAENI, 1999; BAKER, 2004). É uma importante tecnologia aplicada ao tratamento de água e esgoto, a qual apresenta desempenho e economia comprovadamente maiores no tratamento, sendo uma estratégia de separação que emprega membranas semipermeáveis para segmentar os diversos elementos de uma mistura conforme suas propriedades físicas e químicas. Assim, as membranas possibilitam a passagem seletiva de determinadas substâncias, ao mesmo tempo em que retêm outras, variando de acordo com características como tamanho molecular, carga elétrica, polaridade e solubilidade.

A remoção de partículas e solutos de correntes fluidas por membranas ocorre, predominantemente, por dois mecanismos: exclusão por tamanho (filtração por peneira) e transporte por solução-difusão. No primeiro, a membrana atua como uma barreira física, impedindo a passagem de partículas maiores que seus poros. Já no segundo, as espécies químicas interagem com a matriz polimérica da membrana, sendo sorvidas por afinidade físico-química e, em seguida, difundidas através da estrutura do material (RAJABZADEH et al., 2021).

O desempenho da membrana, expresso pelo fluxo de permeado, é fortemente afetado por fenômenos como polarização de concentração e *fouling*. A polarização de concentração se refere à formação de um gradiente de concentração próximo à superfície da membrana, que reduz a força motriz da separação e impacta negativamente a seletividade e o fluxo (REZAEI et al., 2019). Já o *fouling* consiste na deposição de substâncias como partículas coloidais, emulsões, macromoléculas e sais na superfície ou interior da membrana, podendo ser um processo reversível ou irreversível, dependendo da natureza dos compostos e das condições operacionais (ASGHAR et al., 2018). Ambos os efeitos elevam a resistência à permeação, comprometendo a eficiência e a vida útil do sistema de separação.

12. TIPOS DE MEMBRANAS

As membranas utilizadas em processos de separação de gases e líquidos podem ser classificadas de acordo com o material base que compõe sua estrutura. Dentre os principais

tipos, destacam-se as membranas poliméricas, cerâmicas, metálicas e híbridas, cada uma com características específicas que determinam sua aplicação em sistemas industriais.

As membranas poliméricas são as mais utilizadas comercialmente devido ao seu baixo custo de produção, facilidade de processamento, flexibilidade estrutural e ampla variedade de modificações químicas possíveis. São geralmente constituídas por materiais como poliimidas (PI), acetato de celulose (CA) e polietersulfona (PES), e operam com base no mecanismo de solução-difusão, onde a separação ocorre pela diferença de solubilidade e difusividade dos componentes da mistura (BAKER, 2004; ROBESON, 2008).

As membranas cerâmicas, por outro lado, são compostas por óxidos metálicos como alumina (Al_2O_3), zircônia (ZrO_2) ou sílica (SiO_2), e se destacam por sua alta resistência térmica e química, podendo ser aplicadas em condições severas de operação. Sua estrutura porosa favorece mecanismos como filtração por tamanho de poro ou adsorção seletiva, sendo utilizadas principalmente na separação de líquidos, tratamento de águas residuais e processos de ultrafiltração em altas temperaturas (GUO et al., 2012).

As membranas metálicas, embora menos comuns, oferecem vantagens específicas em processos que requerem alta resistência mecânica e estabilidade em ambientes reativos, como a separação de hidrogênio em temperaturas elevadas. São geralmente produzidas a partir de ligas metálicas porosas ou camadas finas de metais como paládio (Pd), que apresentam alta seletividade para certas moléculas gasosas (ULBRICHT, 2006).

Por fim, as membranas híbridas ou mistas (Mixed Matrix Membranes – MMMs) representam uma abordagem inovadora ao combinar fases poliméricas com materiais inorgânicos, como zeólitas, MOFs (Metal-Organic Frameworks) ou óxidos metálicos. Essa combinação visa unir as vantagens de ambos os materiais, resultando em membranas com maior seletividade, permeabilidade e estabilidade térmica. Essas estruturas têm sido amplamente estudadas na separação de CO_2 , apresentando resultados promissores tanto em escala laboratorial quanto em testes piloto (BERGER et al., 2020; ZHANG et al., 2013).

A Tabela 1 apresenta uma comparação entre as principais características dos diferentes tipos de membranas utilizadas na separação de CO_2 , com ênfase em propriedades como permeabilidade, seletividade, resistência térmica, estabilidade química

e custo.

Tabela 1 - Comparação entre os tipos de membranas.

Característica	Polimérica	Cerâmica	Metálica
Permeabilidade ao CO ₂	Média a alta	Baixa a média	Média
Seletividade CO ₂ /N ₂	Alta (dependendo da funcionalização)	Alta	Alta
Resistência térmica	Baixa a média (<150°C)	Muito alta (>600°C)	Alta (>300°C)
Estabilidade química	Moderada (sensível a solventes)	Excelente	Excelente
Custo	Baixo	Alto	Alto

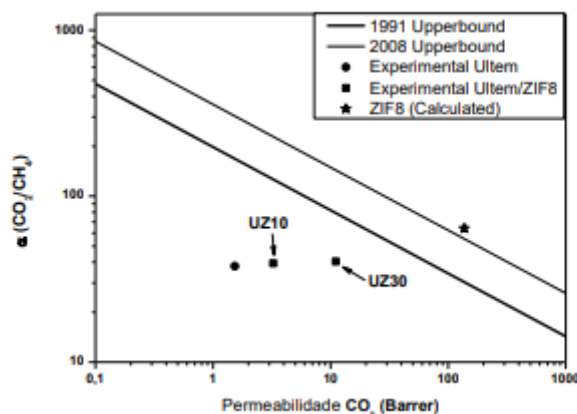
Fonte: Adaptado de literatura técnica (2025).

13. MEMBRANAS POLIMÉRICAS

As membranas poliméricas representam a principal tecnologia empregada atualmente na separação de dióxido de carbono em aplicações industriais. Essa predominância se deve, principalmente, à sua boa processabilidade, baixo custo de produção e versatilidade química (BAKER, 2002). Entre os polímeros mais empregados destacam-se o acetato de celulose

(CA), polisulfona (PSf), polietersulfona (PES) e poliimidas (PI), como o Matrimid® e o P84®, amplamente utilizados em processos comerciais de separação de gases.

Apesar das vantagens econômicas e operacionais, essas membranas enfrentam um desafio técnico fundamental, o compromisso entre permeabilidade e seletividade, conhecido como *trade-off* de Robeson. Esse fenômeno limita o desempenho das membranas poliméricas tradicionais, cujos resultados ainda se mantêm abaixo da chamada "linha limite superior de desempenho" estabelecida em estudos como os de Robeson (2008), como apresentado na Figura 4. Isso tem impulsionado a busca por soluções inovadoras para ampliar a eficiência desses materiais.

Figura 4 - Curva de Robenson CO₂/ CH₄

Fonte: EIRAS, 2020.

Para superar essas limitações, diferentes estratégias têm sido investigadas. Modificações estruturais nos polímeros base, como a introdução de grupos funcionais com afinidade pelo CO₂ ou o desenvolvimento de copolímeros em bloco, têm demonstrado avanços promissores. Além disso, a incorporação de fases inorgânicas ou nanomateriais tem levado ao desenvolvimento de membranas híbridas, que combinam a flexibilidade dos polímeros com a seletividade de materiais inorgânicos, como MOFs, resultando em estruturas com maior desempenho em processos de separação (BERGER et al., 2020).

Adicionalmente, o uso de transportadores facilitados, que interagem de forma reversível com o CO₂, representa uma alternativa para intensificar a difusão seletiva do gás, aproveitando sua reatividade química. Essas abordagens têm sido exploradas em diferentes estágios de desenvolvimento, incluindo projetos piloto, com potencial de aplicação em larga escala para mitigar emissões de CO₂ em setores como o energético e o petroquímico (YAMPOLSKY, 2011).

15.1 Mecanismos de Transporte em Membranas Poliméricas

O transporte de gases através de membranas poliméricas é um processo complexo que envolve diferentes mecanismos. A compreensão desses mecanismos é fundamental para otimizar o desempenho das membranas, especialmente para aplicações como a separação de CO₂. Basicamente, os mecanismos de transporte podem ser divididos em três categorias principais: difusão, solubilidade e transporte facilitado.

15.1.1 Difusão

A difusão é o mecanismo mais comum de transporte de gases em membranas poliméricas. Nesse processo, o gás entra na membrana, se dissolve na fase polimérica e, em seguida, difunde-se através da matriz polimérica devido a um gradiente de concentração. A taxa de difusão depende de vários fatores, incluindo o tamanho da molécula do gás, a viscosidade do polímero e a temperatura. A difusão do CO₂, por exemplo, é geralmente mais eficiente devido à sua menor massa molar em comparação com o N₂ (HAN; HO, 2021). A capacidade de difusão também pode ser influenciada pela estrutura da membrana, com materiais mais porosos oferecendo um caminho facilitado para o transporte de gases.

15.1.2 Solubilidade

A solubilidade do gás na membrana polimérica também desempenha um papel crucial no transporte. O CO₂, devido à sua alta solubilidade em muitos polímeros, é facilmente absorvido na matriz polimérica, o que facilita sua separação de outros gases, como o N₂. A interação entre as moléculas de CO₂ e os grupos funcionais presentes na cadeia polimérica pode melhorar a solubilidade, aumentando a eficiência da separação (DAI; DENG, 2020). Para melhorar a solubilidade, muitas membranas são modificadas quimicamente, como no caso das membranas funcionalizadas com grupos amina que reagem com o CO₂, facilitando a adsorção do gás e aumentando a seletividade (HAN; HO, 2021).

15.1.3 Transporte Facilitado

O transporte facilitado ocorre quando os grupos funcionais presentes na membrana interagem diretamente com o gás a ser separado, facilitando seu transporte. No caso da captura de CO₂, grupos amina ou outras estruturas funcionais podem se ligar quimicamente ao CO₂, formando adutos que ajudam na movimentação do gás através da membrana. Esse mecanismo é particularmente eficaz para gases como CO₂, que podem formar ligações reversíveis com os grupos amina, aumentando a seletividade e a capacidade de captura. O mecanismo de transporte facilitado é especialmente vantajoso para aumentar a eficiência das membranas de separação, já que permite um transporte mais rápido e seletivo sem

dependem exclusivamente da difusão (COMENSAÑA-GÁNDARA et al., 2019).

15.1.4 Efeito de Nanomateriais no Transporte de Gases

A incorporação de nanomateriais, como nanotubos de carbono (CNTs) ou zeólitas, nas matrizes poliméricas tem mostrado resultados promissores na melhoria do desempenho das membranas. Esses nanomateriais atuam como canais preferenciais para o transporte de CO₂, melhorando tanto a permeabilidade quanto a seletividade. A dispersibilidade dos nanomateriais na matriz polimérica é crucial para garantir que o transporte seja facilitado sem comprometimento da integridade da membrana. Além disso, a interação entre as superfícies dos nanomateriais e o CO₂ pode promover transporte facilitado, aumentando a taxa de difusão do gás através da membrana (GALIZIA et al., 2017).

15.1.5 Mecanismo de Transporte em Membranas Híbridas

Membranas híbridas, compostas por materiais poliméricos e inorgânicos, como sílica e zeólitas, podem oferecer vantagens em termos de desempenho, combinando os benefícios de cada material. O transporte de CO₂ em membranas híbridas ocorre através de múltiplos mecanismos, como a difusão molecular e o transporte facilitado. Os componentes inorgânicos, como as zeólitas, podem formar canais seletivos para o CO₂, enquanto a matriz polimérica facilita a absorção do gás. Essas membranas híbridas têm mostrado maior estabilidade térmica e resistência a pressões elevadas, o que as torna ideais para processos industriais de captura de CO₂ (DAI; DENG, 2020).

15.2 Relação entre Estrutura do Polímero e Desempenho na Separação de CO₂

A eficiência de membranas poliméricas na separação de dióxido de carbono está diretamente associada à estrutura molecular dos polímeros utilizados. Características como rigidez da cadeia polimérica, volume livre fracionário (FFV), polaridade e presença de grupos funcionais específicos influenciam substancialmente as propriedades de permeabilidade e seletividade dos materiais (HAN; HO, 2021).

Polímeros com estruturas rígidas e segmentos aromáticos, como as poliimidas (PI)

e os polímeros de microporosidade intrínseca (PIMs), tendem a apresentar altos valores de

permeabilidade ao CO₂, graças à maior disponibilidade de espaços livres que favorecem a difusão do gás (DAI; DENG, 2020). Além disso, a inserção de grupos funcionais como aminas, éteres ou carbonilas na cadeia polimérica tem sido uma estratégia recorrente para aumentar a solubilidade seletiva do dióxido, intensificando seu transporte através do mecanismo de solução-difusão (HAN; HO, 2020).

Contudo, as membranas poliméricas enfrentam um desafio técnico conhecido como o limite de Robeson, que expressa o trade-off entre seletividade e permeabilidade: ao aumentar uma dessas propriedades, normalmente a outra é comprometida. Esse equilíbrio tem impulsionado o desenvolvimento de novos materiais e arquiteturas poliméricas, como copolímeros em bloco, membranas compósitas e estruturas híbridas, visando superar os limites tradicionais das membranas comerciais (DAI; DENG, 2020).

Tais avanços são essenciais para o aprimoramento da tecnologia de captura de CO₂, especialmente em condições industriais, nas quais a estabilidade térmica, a resistência à plastificação e a durabilidade das membranas também desempenham papéis críticos.

15.3 Materiais Poliméricos Utilizados na Separação de CO₂

Os materiais poliméricos têm se destacado como a principal classe de membranas aplicadas na separação de CO₂, devido à sua versatilidade, processabilidade e custo relativamente baixo. Estima-se que mais de 90% das membranas atualmente utilizadas para separação de gases sejam poliméricas (DAI; DENG, 2020). Essa predominância se deve à possibilidade de síntese de estruturas moleculares ajustáveis, que permitem a otimização de propriedades como seletividade, permeabilidade e resistência mecânica.

Entre os polímeros mais utilizados destacam-se as poliimidas (PI), como Matrimid® e P84®, devido à sua elevada resistência térmica e boa estabilidade química, além de apresentarem desempenho promissor na separação de CO₂/N₂. As poliimidas possuem uma estrutura rígida e aromática, que favorece a seletividade sem comprometer significativamente a permeabilidade (HAN; HO, 2021).

Outro material amplamente estudado é o acetato de celulose (CA), conhecido por sua aplicação inicial em processos de separação de gases. Embora possua menor estabilidade térmica em comparação com outros polímeros de engenharia, o CA continua

sendo utilizado em aplicações de menor exigência térmica devido à sua biodegradabilidade e custo reduzido (DAI; DENG, 2020).

Adicionalmente, polímeros como polietersulfona (PES), polisulfona (PSf) e polímeros de microporosidade intrínseca (PIMs) têm sido amplamente investigados. Os PIMs, por exemplo, se destacam por apresentarem estruturas altamente rígidas e não empacotadas eficientemente, o que proporciona um elevado volume livre fracionário (FFV) e, conseqüentemente, maior permeabilidade ao CO₂ (HAN; HO, 2021).

A funcionalização de materiais poliméricos com grupos amina também tem sido uma estratégia promissora, permitindo que as membranas operem por transporte facilitado, aproveitando interações reversíveis entre o CO₂ e os grupos químicos presentes na matriz polimérica (DAI; DENG, 2020). Essa abordagem visa contornar a limitação imposta pelo limite superior de Robeson.

Dessa forma, a escolha e o desenvolvimento de materiais poliméricos adequados para a separação de CO₂ são fundamentais para o avanço de tecnologias de captura de carbono em escala industrial, especialmente no contexto da mitigação de emissões em fontes estacionárias, como usinas termoeletricas e processos industriais de combustão.

15.4 Desempenho de Membranas Poliméricas Comerciais

Atualmente, diversas membranas poliméricas estão disponíveis comercialmente para aplicações na separação de dióxido de carbono (CO₂), especialmente em contextos industriais como plantas de processamento de gás natural e recuperação de CO₂ em processos de combustão. Entre as opções mais amplamente utilizadas destacam-se membranas baseadas em poliimidas (PI), acetato de celulose (CA), polisulfona (PSf) e polietersulfona (PES), todas reconhecidas por seu desempenho relativamente eficiente e estabilidade operacional (DAI; DENG, 2020).

A membrana Matrimid®, derivada de poliimida, é amplamente empregada devido à sua alta seletividade para separação CO₂/N₂ e boa resistência térmica. No entanto, apresenta limitações quanto à resistência à plastificação sob altas pressões de CO₂, o que pode comprometer seu desempenho em longo prazo (HAN; HO, 2021). Por outro lado, o acetato de celulose, embora tenha menor estabilidade térmica e mecânica, é um dos materiais pioneiros nesse campo e ainda é aplicado devido ao seu baixo custo e facilidade de processamento.

A eficiência das membranas comerciais é comumente avaliada por meio de dois parâmetros principais: permeabilidade (medida em Barrer) e seletividade, especialmente na

relação CO_2/N_2 . Em geral, observa-se que quanto maior a seletividade, menor tende a ser a permeabilidade, evidenciando o chamado “*trade-off*” caracterizado no limite superior de Robeson. As membranas poliméricas comerciais atuais ainda operam abaixo dessa fronteira, o que impulsiona pesquisas voltadas ao desenvolvimento de novos materiais e técnicas de modificação para superação desse limite (DAI; DENG, 2020).

Além disso, membranas comerciais como P84®, Polaris® e PolyActive™ têm sido exploradas em projetos piloto e aplicações industriais por apresentarem maior estabilidade química e térmica, com desempenho competitivo frente às exigências operacionais. Essas membranas têm se mostrado promissoras em processos de pré e pós-combustão, além de sistemas integrados de captura de carbono (HAN; HO, 2021).

A contínua avaliação e melhoria dessas membranas são cruciais para garantir sua viabilidade econômica e técnica em larga escala, tornando-as uma ferramenta estratégica no combate às emissões industriais de gases de efeito estufa. A Tabela 2 traz uma comparação entre diferentes membranas poliméricas comerciais.

Tabela 2 - Comparação entre membranas poliméricas comerciais.

Membrana	Polímero Base	Permeabilidade CO_2 (Barrer)	Seletividade CO_2/N_2	Aplicação/Comentário
Matrimid® 5218	Poliimida aromática	10–30	30–40	Boa estabilidade térmica, usada em pós-combustão.
Pebax®	Poliamida + poliéter	100–200	10–15	Alta permeabilidade, boa para pressões moderadas.
Polyactive®	Copolímero de PEO-PBT	200–300	15–25	Transporte facilitado com CO_2 , flexível.
PPO (Ultem®)	Polifenileno-óxido	50–100	20–30	Boa resistência química, uso em misturas gasosas.
CA (Acetato de Celulose)	Polímero natural	5–15	10–20	Baixo custo, usada em separações simples.

Fonte: Autoria própria (2025).

15.5 Desafios e Perspectivas Futuras das Membranas Poliméricas na Captura de CO₂

Um dos principais obstáculos nos processos de separação de gases por membranas é o "*trade-off*" entre seletividade e permeabilidade. Membranas com alta seletividade geralmente apresentam baixa permeabilidade, e vice-versa, dificultando a obtenção de materiais que conciliem ambas as propriedades de forma ideal (COMESAÑA-GÁNDARA et al., 2019). Além disso, o fenômeno de plastificação das membranas, causado pela absorção excessiva de CO₂, pode levar à perda de seletividade e integridade estrutural da membrana (SANDERS et al., 2013).

Outro desafio significativo é a baixa resistência térmica das membranas poliméricas, que limita sua operação em temperaturas elevadas, comuns em processos industriais. A presença de impurezas nos gases de alimentação, como vapor d'água e compostos orgânicos voláteis, também pode afetar negativamente o desempenho e a durabilidade das membranas (KÁRÁSZOVÁ et al., 2020).

Para superar essas limitações, diversas estratégias têm sido investigadas no desenvolvimento de membranas poliméricas para separação de CO₂. Uma dessas abordagens é o uso de polímeros de microporosidade intrínseca (PIMs), que possuem estruturas rígidas e porosas, favorecendo uma alta permeabilidade sem comprometer a seletividade (COMESAÑA-GÁNDARA et al., 2019). Outra alternativa promissora é a incorporação de nanomateriais às matrizes poliméricas, como nanotubos de carbono e zeólitas, que podem melhorar significativamente as propriedades de transporte de gases, além de aumentar a resistência mecânica das membranas (GALIZIA et al., 2017).

Adicionalmente, a modificação química de polímeros com a introdução de grupos funcionais específicos nas cadeias poliméricas tem demonstrado potencial para aumentar a afinidade pelo CO₂, promovendo ganhos na seletividade (HAN; HO, 2021). Por fim, o desenvolvimento de membranas híbridas, que combinam componentes poliméricos e inorgânicos, tem sido uma estratégia eficaz para atingir um equilíbrio entre permeabilidade, seletividade e estabilidade térmica, ampliando as possibilidades de aplicação em condições industriais mais exigentes (DAI; DENG, 2020).

As perspectivas futuras para as membranas poliméricas na captura de CO₂ são promissoras, com pesquisas focadas na síntese de novos materiais, otimização de processos de fabricação e integração de sistemas de pré-tratamento de gases. A contínua inovação nesse campo é essencial para viabilizar tecnologias mais eficientes e sustentáveis na

mitigação das emissões de CO₂ em escala industrial.

15.6 Aplicações Industriais e Desafios de Escalonamento

As membranas poliméricas para captura de dióxido de carbono já vêm sendo aplicadas, ainda que em menor escala, em setores como o de processamento de gás natural, desempenhando papel relevante na separação de CO₂ e CH₄, com o objetivo de aprimorar a qualidade do biometano (BAKER, 2012). Também existem testes piloto em andamento em usinas termoelétricas, nos quais membranas comerciais, como Polaris® e PolyActive™, são utilizadas para a remoção de CO₂ de correntes de gases de combustão (DAI; DENG, 2020).

Apesar do avanço das pesquisas, a implementação em larga escala dessa tecnologia ainda encontra barreiras significativas. Entre os principais desafios, destacam-se o acúmulo de partículas e impurezas nos módulos de membranas (*fouling*), a degradação estrutural por plastificação sob altas pressões parciais de CO₂, bem como a limitação na compatibilidade com misturas gasosas complexas que contenham vapor d'água e compostos orgânicos voláteis (RAHMAN et al., 2021). Além disso, os custos associados à substituição e manutenção das membranas ainda se mostram elevados quando comparados a tecnologias convencionais, como a absorção química (BAKER, 2012).

Exemplos práticos de aplicação reforçam o potencial da tecnologia. A planta piloto da empresa Air Products, nos Estados Unidos, utiliza módulos de membranas para separação pós-combustão com eficiência superior a 90%. Já a empresa norueguesa MemfoACT tem desenvolvido membranas baseadas em poliimidas voltadas à purificação de biogás e à captura de CO₂ em ambientes marinhos (HAN; HO, 2021).

Essas experiências evidenciam que as membranas poliméricas representam uma alternativa viável para mitigação de emissões de carbono, especialmente se forem acompanhadas por avanços tecnológicos que proporcionem maior durabilidade, estabilidade química e viabilidade econômica (RAHMAN et al., 2021).

14. INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS OPERACIONAIS NA SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS

A eficiência da separação de CO₂ por membranas é fortemente influenciada por

diversos parâmetros operacionais. A otimização desses parâmetros é crucial para maximizar o desempenho do processo e reduzir os custos. Este tópico analisa os efeitos da temperatura, pressão e vazão na permeabilidade, seletividade e eficiência da separação.

A temperatura exerce um impacto significativo na permeabilidade da membrana e na seletividade do processo de separação. O aumento da temperatura geralmente resulta em um aumento da permeabilidade dos gases através da membrana. Esse fenômeno está associado ao aumento da mobilidade das moléculas de gás e ao aumento do volume livre dentro da matriz da membrana, facilitando o transporte dos gases (BAUER; SCHMIDT-WEINMAR, 2011). No entanto, o aumento da temperatura pode afetar a seletividade da membrana, pois a permeabilidade de diferentes gases pode variar de forma distinta. Estudos têm demonstrado que a temperatura ideal para a separação de CO₂ varia dependendo do material da membrana e das condições operacionais. Por exemplo, ROMANO et al. (2016) investigaram o efeito da temperatura na separação de CO₂/N₂ utilizando membranas de poliimida observando um aumento na permeabilidade do CO₂ com o aumento da temperatura, mas também uma ligeira diminuição na seletividade. Já BERNARDO et al. (2009) relataram resultados semelhantes com membranas de polidimetilsiloxano (PDMS), destacando a importância de encontrar um equilíbrio entre permeabilidade e seletividade. A solubilidade do CO₂ no material da membrana também é influenciada pela temperatura. Em geral, a solubilidade dos gases diminui com o aumento da temperatura, o que pode afetar a permeação do CO₂ através da membrana (LIN; FREEMAN, 2007). Portanto, a escolha da temperatura de operação deve considerar tanto os efeitos na difusão quanto na solubilidade do CO₂ para otimizar o processo de separação.

A pressão é outro parâmetro operacional fundamental que afeta a separação por membranas. O fluxo de um gás através de uma membrana é diretamente proporcional à diferença de pressão entre a alimentação e o permeado. O aumento da pressão de alimentação resulta em um aumento da força motriz para o transporte de gás, levando a um maior fluxo de gás através da membrana (BAKER, 2012). No entanto, a pressão também pode influenciar a seletividade da membrana. Em algumas membranas, o aumento da pressão pode causar a compactação da membrana, resultando em uma diminuição da permeabilidade e da seletividade (DRY, 2002). Além disso, a alta pressão pode levar à plastificação da membrana em alguns materiais poliméricos, alterando suas propriedades de separação (FLEMING; KOROS, 1986). REIS et al. (2018) estudaram o efeito da pressão na separação de CO₂ de misturas gasosas e demonstraram que existe uma pressão ótima que maximiza a recuperação de CO₂ sem comprometer a seletividade. A otimização

da pressão de operação é, portanto, essencial para alcançar um desempenho eficiente do processo de separação por membranas.

A vazão do gás de alimentação também desempenha um papel importante na eficiência da separação por membranas. A vazão influencia o tempo de residência do gás em contato com a membrana, o que afeta a quantidade de CO₂ que é separada. Uma vazão muito alta pode resultar em um tempo de residência curto, levando a uma separação incompleta do CO₂ (KULPRATHIPANJA, 2010). Por outro lado, uma vazão muito baixa pode aumentar o custo operacional do processo devido à necessidade de uma área de membrana maior. A distribuição da vazão ao longo da membrana também é um fator importante. A vazão não uniforme pode levar a variações na eficiência da separação em diferentes pontos da membrana. Nesse contexto, Geankoplis (2003) analisou o efeito da distribuição da vazão em módulos de membranas e concluiu que o desempenho da separação é significativamente impactado por zonas de estagnação ou de fluxo desigual. Ele demonstrou que o projeto inadequado do módulo pode causar desvio de fluxo ou canalização (flow channelling), reduzindo a área efetiva de separação e promovendo o fouling localizado. O autor destacou que a otimização do design do módulo, como a escolha adequada da geometria interna, do número de canais e da configuração do fluxo (paralelo, cruzado ou contracorrente), pode melhorar substancialmente a distribuição da vazão e, conseqüentemente, a eficiência do processo de separação por membranas.

15. PARÂMETROS DE DESEMPENHO PARA CAPTURA DE CO₂

O método de separação de CO₂ por membranas utiliza barreiras seletivas para isolar o dióxido de carbono de uma mistura gasosa, explorando as discrepâncias nas propriedades físico-químicas dos componentes. A diferença de pressão parcial do CO₂ através da membrana impulsiona este processo. A maioria das membranas poliméricas opera sob o mecanismo de solução-difusão, descrito pela Lei de Fick, segundo a Equação 1:

$$J_i = -D_i \left(\frac{dc_i}{dx} \right) \quad \text{Equação 1}$$

No qual, $-J_i$ representa o fluxo do componente i (mol·m⁻²·s⁻¹), D_i é o coeficiente de difusão do componente i (m²/s) e dc_i/dx ilustra o gradiente de concentração do componente i ao longo da extensão da membrana (mol/m³m) (FREEMAN, 1999; ROBESON, 2008).

A permeância é uma medida da facilidade com que um gás atravessa uma membrana sob a influência de uma diferença de pressão. Ela quantifica o fluxo de gás por

unidade de área da membrana e por unidade de diferença de pressão (BAKER, 2012). Esse parâmetro é calculado conforme indicado pela Equação 2:

$$\frac{P_i}{l} = \frac{J_i}{\Delta p_i} \quad \text{Equação 2}$$

Onde Δp_i representa a diferença de pressão parcial do componente i , medida em Pascal (Pa) ou bar, que impulsiona o fluxo do gás através da membrana; l simboliza a espessura da camada seletiva da membrana, que influencia diretamente a resistência à passagem do gás; P_i , refere-se à permeabilidade, uma propriedade intrínseca do material da membrana que indica a facilidade com que um gás específico a atravessa, sendo expressa em Barrer, onde 1 Barrer equivale a $1 \times 10^{-10} \text{ cm}^3(\text{STP}) \text{ cm}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ cmHg}^{-1}$ (ROWE et al., 2010; SHIMEKIT; OMAR, 2015).

A seletividade, representada por α^* na Equação 3, é uma medida da capacidade da membrana de distinguir entre dois gases diferentes. Ela é calculada pela razão das permeabilidades dos dois gases (P_i/P_j). Uma seletividade alta para o CO₂ indica que a membrana permite a passagem preferencial do CO₂ em relação o outro gás, resultando em uma separação mais eficiente (ROBESON, 2008; BERNARDO et al., 2009). Em termos práticos, quanto maior o valor de α^* , melhor a membrana é em separar o CO₂ de outro gás. No entanto, é importante lembrar que a seletividade ideal é um parâmetro teórico, e o desempenho real da membrana pode ser influenciado por diversos fatores, como a composição da mistura gasosa e as condições operacionais.

$$\alpha_{ij}^* = \frac{P_i}{P_j} \quad \text{Equação 3}$$

O fator de separação, representado por α na Equação 4, é uma medida do desempenho da membrana em condições reais de operação. Ele leva em consideração as frações molares dos componentes da mistura gasosa na alimentação (x) e no permeado (y). O fator de separação é calculado pela razão das razões das frações molares dos componentes no permeado e na alimentação. Ou seja, indica o quão bem a membrana está separando o CO₂ dos outros gases presentes na mistura em condições específicas de operação. Ele é o parâmetro mais relevante para avaliar o desempenho de membranas compostas ou módulos de membrana, pois leva em consideração a complexidade do sistema e as interações entre os componentes da mistura gasosa (BAKER, 2002; SHIMEKIT; OMAR, 2015).

$$\alpha_{ij} = \frac{y_{ij}y_j}{x_{ij}x_j} \quad \text{Equação 4}$$

16. ESTUDOS DE CASOS

A análise dos estudos de caso foi conduzida com base em trabalhos experimentais que avaliaram o desempenho de diferentes tipos de membranas poliméricas para separação de dióxido de carbono (CO_2). Os principais parâmetros analisados foram permeabilidade, seletividade, estabilidade térmica e química, além da resistência à plastificação — aspectos críticos para aplicações industriais.

No estudo de Han e Ho (2021), foram investigadas membranas funcionalizadas com grupos amina, que atuam como carreadores reversíveis de CO_2 por meio de transporte facilitado. Essa modificação resultou em seletividade CO_2/N_2 entre 25 e 30, com boa estabilidade operacional em temperaturas moderadas. A funcionalização favoreceu ainda a solubilidade do gás na matriz polimérica, intensificando a absorção seletiva.

Dai e Deng (2020) analisaram membranas híbridas, obtidas pela incorporação de nanopartículas inorgânicas (sílica e zeólitas) em matrizes poliméricas. Essas membranas apresentaram maior rigidez, resistência térmica e canais seletivos para o transporte do CO_2 . Os resultados mostraram permeabilidade acima de 100 Barrer e seletividade superior a 30 para a mistura CO_2/N_2 .

Galizia et al. (2017) exploraram a incorporação de nanotubos de carbono (CNTs) como reforço estrutural em membranas poliméricas. Os CNTs atuaram como canais preferenciais de transporte, resultando em permeabilidades entre 150 e 200 Barrer. A funcionalização dos nanotubos com grupos polares favoreceu sua dispersão na matriz, reduzindo aglomerações que poderiam comprometer a seletividade.

A Tabela 1 apresenta um resumo comparativo dos principais resultados obtidos nos estudos mencionados:

Tabela 3 – Comparação de Desempenho das Membranas para Separação de CO₂.

Resultados	Tipo de Membrana	Modificação realizada	Permeabilidades (Barrer)	Seletividade CO ₂ /N ₂
Han & Ho (2021)	Polimérica funcionalizada	Grupos amina (transporte facilitado)	90-100	25-30
Dai & Deng (2020)	Híbrida	Sílica e zeólitas	>100	>30
Galizia et al. (2017)	Polimérica + CNTs	Incorporação de nanotubos de carbono	150-200	15-20

Fonte: Autoria própria (2025).

Com base na comparação entre os estudos, observa-se que modificações estruturais — como a funcionalização química e a adição de fases inorgânicas — são estratégias eficazes para superar o limite superior de desempenho descrito por Robeson (2008). As membranas híbridas destacam-se pela alta permeabilidade, embora a seletividade possa ser afetada por dispersão não homogênea dos aditivos. Já as membranas funcionalizadas apresentam melhor seletividade, com desempenho influenciado pelo grau de estabilidade térmica dos grupos ativos. As membranas com CNTs oferecem excelente permeabilidade, desde que os nanotubos estejam adequadamente dispersos, evitando vias de transporte não seletivas.

Uma vez separado com eficiência, o CO₂ capturado pode ser reaproveitado ou armazenado, integrando estratégias de mitigação conhecidas como Carbon Capture and Utilization (CCU) e Carbon Capture and Storage (CCS). No contexto do CCU, o gás pode ser utilizado em processos industriais como recuperação avançada de petróleo (EOR), produção de combustíveis sintéticos, síntese de metanol, ureia e materiais de construção por mineralização (SAMANTA et al., 2012; WANG et al., 2011). Já no CCS, o CO₂ é injetado em formações geológicas profundas, como aquíferos salinos ou reservatórios de petróleo exauridos, podendo permanecer isolado da atmosfera por milhares de anos, conforme aponta o IPCC (2005), desde que sob rigoroso controle técnico e monitoramento contínuo.

Assim, o desempenho de membranas poliméricas está diretamente relacionado a

três fatores principais: a morfologia da membrana, a sua afinidade química com o CO₂, e a sua estabilidade sob condições reais de operação. A escolha da membrana ideal depende da aplicação específica e das exigências operacionais, incluindo temperatura, pressão e custo de síntese. O avanço contínuo nas tecnologias de modificação de membranas representa um passo fundamental rumo à descarbonização industrial e à viabilização de rotas sustentáveis para o uso do carbono capturado.

17. CONCLUSÃO

A crescente necessidade de mitigar as emissões de gases de efeito estufa impulsiona a busca por tecnologias mais eficientes e sustentáveis de captura de CO₂. Neste contexto, os processos de separação por membranas, especialmente os baseados em materiais poliméricos, têm se destacado como alternativas promissoras em comparação aos métodos convencionais.

O presente trabalho apresentou uma análise teórica e crítica sobre o uso de membranas poliméricas na separação de CO₂, com base em literatura científica recente. Foram discutidos os mecanismos de transporte, propriedades físico-químicas do gás, materiais utilizados, parâmetros operacionais e desempenho das membranas comerciais. A comparação entre diferentes abordagens, como membranas funcionalizadas, híbridas e com nanomateriais, permitiu identificar estratégias eficazes para superar os desafios técnicos impostos pelo compromisso entre permeabilidade e seletividade.

Os resultados indicam que, embora as membranas comerciais ainda operem abaixo da linha de desempenho ideal (limite de Robeson), há avanços significativos no desenvolvimento de novos materiais com maior estabilidade, seletividade e desempenho em condições industriais reais. Estratégias como o transporte facilitado, a funcionalização química e o uso de cargas inorgânicas demonstram potencial para tornar a separação por membranas mais eficiente e economicamente viável.

Além disso, a integração da tecnologia de membranas com estratégias de reaproveitamento (CCU) e armazenamento (CCS) do CO₂ capturado reforça sua importância dentro de políticas de transição energética e neutralidade de carbono. A captura seletiva do gás é o primeiro passo para a construção de cadeias produtivas circulares e ambientalmente responsáveis.

Portanto, apesar dos desafios tecnológicos, as membranas poliméricas representam

uma ferramenta estratégica para o controle de emissões industriais de CO₂ e para a promoção de práticas industriais mais sustentáveis.

18. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AARON, D.; TSOURIS, C. **Separation of CO₂ from flue gas: A review.** Separation Science and Technology, v. 40, n. 1-3, p. 321-348, 2005. DOI: 10.1081/SS-200041244. <https://doi.org/10.1081/SS-200041244>

AL-OBEIDANI, S. K. S. et al. **Chemical cleaning of oil contaminated polyethylene hollow fiber microfiltration membranes.** Journal of Membrane Science, v. 307, n. 2, p. 299-308, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2007.09.048>

ALVES, J. E. D. **Sustentabilidade, Aquecimento Global e o Decrescimento Demo-econômico.** Revista Espinhaço | UFVJM, [S.l.], p. 4-16, mar. 2017. ISSN 2317-0611.

AMEDI, H.; BASHIRI, M.; NASSERI, A. **A review on gas separation applications using polymeric membranes modified with nanoparticles.** International Journal of Nano Dimension, v. 7, n. 2, p. 115-132, 2016.

ASGHAR, M.; IQBAL, M.; HUSSAIN, T. **Membrane fouling control strategies for membrane-based wastewater treatment processes: a review.** Environmental Science and Pollution Research, v. 25, n. 6, p. 5316-5330, 2018.

BAKER, R. W. **Membrane technology and applications.** 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2004.

BAUER, T.; SCHMIDT-WEINMAR, H. G. **Modeling the influence of temperature on gas permeation through polymeric membranes.** Journal of Membrane Science, v. 378, n. 1-2, p. 19-27, 2011.

BERGER, S. et al. **Recent progress in mixed-matrix membranes for gas separation.** Journal of Applied Polymer Science, Hoboken, v. 137, n. 22, e48763, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.48763>.

BRASIL. Ministério da Saúde; Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. **Painel Vigiar: Poluição Atmosférica e Saúde Humana. 2024.** Disponível em: <https://www.gov.br/saude/pt-br/composicao/svsa/saude-ambiental/vigiar>. Acesso em: 5 jul. 2025.

COMESAÑA-GÁNDARA, B. et al. **Polymers of intrinsic microporosity (PIMs): bridging the gap between solution-processable and high-performance gas separation membranes.** Energy & Environmental Science, v. 12, p. 2733-2740, 2019.

DAI, Z.; DENG, L. **Membranes for CO₂ capture and separation: Progress in research and development for industrial applications.** Journal of Membrane Science, v. 601, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.117898>.

DRY, R. J. **The separation of gases by membranes.** Chemical Reviews, v. 102, n. 6, p. 1913-1934, 2002.

FASIHI, M.; BOGDANOV, D.; BREYER, C. **Techno-economic assessment of CO₂ direct air capture plants.** Journal of Cleaner Production, v. 224, p. 957-980, 2019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.03.086.

FINNEGAN, S. et al. **The carbon impact of a UK safari park - Application of the GHG protocol using measured energy data.** Energy, [s.l.], v. 153, p. 256-264, jun. 2018. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.033>

FLEMING, G. K.; KOROS, W. J. **Plasticization of glassy polymers in mixed gas service.** Macromolecules, v. 19, n. 8, p. 2185-2191, 1986. <https://doi.org/10.1021/ma00162a030>

FREEMAN, B. D. **Basis of permeability/selectivity tradeoff relations in polymeric gas separation membranes.** Macromolecules, v. 32, n. 2, p. 375-380, 1999. DOI: 10.1021/ma9814548. <https://doi.org/10.1021/ma9814548>

GALIZIA, M. et al. **Polymers for membrane CO₂ separation: A review.** Progress in Polymer Science, v. 68, p. 1-30, 2017.

GEANKOPOLIS, C. J. **Transport processes and separation process principles**. Prentice Hall Professional, 2003.

GEISE, G. M. et al. **Fundamental water and salt transport properties of polymeric materials**. Progress in Polymer Science, v. 39, n. 1, p. 1-42, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2013.07.001>

GUO, Z. et al. **Ceramic membrane bioreactor for industrial wastewater treatment: a critical review**. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, v. 42, n. 18, p. 1873-1927, 2012.

HABERT, A. C.; BORGES, C. P.; NOBREGA, R. **Processos de Separação por Membranas**. Rio de Janeiro: e-papers, 2006.

HAN, Y.; HO, W. S. W. **Polymeric membranes for CO₂ separation and capture**. Journal of Membrane Science, v. 628, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2021.119244>.

HEUGUES, M. **International environmental cooperation: a new eye on the greenhouse gas emissions' control**. Annals of Operations Research, 17 maio 2012. <https://doi.org/10.1007/s10479-012-1156-8>

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **CCUS in clean energy transitions**. Paris: IEA, 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions>. Acesso em: 15 jun. 2025.

IPCC. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>. Acesso em: 5 maio 2025.

IPCC. **Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage**. Cambridge University Press, 2005.

JAFARI, M.; RAHIMI, M. **Advances in polymeric membranes for CO₂/H₂ separation**. Journal of Membrane Science and Research, v. 5, n. 4, p. 268-277, 2019.

KÁRÁSZOVÁ, M. et al. **Challenges in post-combustion CO₂ capture by membrane separation: A review**. Chemical Engineering Journal, v. 390, p. 124584, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116448>

KARIMI, A.; JORFI, S.; GHAHREMANI, M. **Gas separation performance of polymeric membranes containing graphene oxide: A review**. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, v. 49, p. 1-12, 2017. DOI: 10.1016/j.jiec.2017.01.001. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2017.01.001>

KHOSRAVI, M.; RAHBAR, M. **Recent progress in cryogenic CO₂ separation technologies: a review of systems integration and process intensification**. Chemical Engineering and Processing - Process Intensification, v. 154, p. 108002, 2020.

LEE, S.-Y.; PARK, S.-J. **A review on solid adsorbents for carbon dioxide capture**. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, v. 23, p. 1-11, 2015. DOI: 10.1016/j.jiec.2014.09.001. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2014.09.001>

LIN, H.; FREEMAN, B. D. **Materials selection guidelines for gases separation membranes**. Journal of Molecular Structure, v. 739, n. 1-3, p. 57-74, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2004.07.045>

LOPES, S.; ROSSO, S. BIO. 1. ed. São Paulo: Saraiva, 2010. v. 1.

MADAENI, S. S. **The application of membrane technology for water disinfection**. Journal of Water Research, v. 33, n. 2, p. 301-308, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(98\)00212-7](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(98)00212-7)

MEDEIROS, C. A. S. **Poluição do ar: fontes, efeitos e controle**. Revista Tecnologia, v. 26, n. 2, p. 70-78, 2005.

MENDONÇA, M. J. C.; GUTIEREZ, M. B. S. **O Efeito Estufa e o Setor**

Energético Brasileiro. Rio de Janeiro: IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2000. (Texto de Discussão, n. 719).

MOLKI, B.; MOOSAVI, M.; HAGHIGHI, M. **Modeling and life cycle assessment of post-combustion CO₂ capture with polymeric membrane technology.** Journal of Cleaner Production, v. 170, p. 1225-1235, 2018.

MULDER, M. **Basic principles of membrane technology.** 2. ed. Dordrecht: Kluwer Academic, 1996. 564 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-1766-8>

MULIAWAN, E.; LI, K. **CO₂ solubility and transport in advanced polymer membranes: a review.** Separation and Purification Technology, v. 241, p. 116689, 2020.

NASA. **Climate change: how do we know?** 2023. Disponível em: <https://climate.nasa.gov/evidence/>. Acesso em: 5 jul. 2025.

NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE. **Climate Change: Evidence and Causes: Update** 2018. Washington, D.C.: National Academies Press, 2018.

NISHI, M. H. **O MDL e o atendimento aos critérios de elegibilidade e indicadores de sustentabilidade por diferentes atividades florestais.** 2003. 80 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2003.

NOROUZBAHARI, S.; HOSSEINI, S. S.; MOGHADAM, T. M. **Gas separation performance of polyurethane membranes incorporated with nanoporous materials.** Chemical Engineering Research and Design, v. 153, p. 527-540, 2020. DOI: 10.1016/j.cherd.2019.11.005.

OLIVEIRA, G. B. et al. **O Efeito Estufa.** Unesp - Faculdade de Ciência e Tecnologia, 2000. p. 1-29.

PINTO, A. M. S. **Alterações Climáticas: Estratégias de Ensino com enfoque CTS para alunos do 1º CEB.** 2010. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Aveiro,

Aveiro, 2010.

RAHMAN, M.; AHMED, S.; LEE, J. **Carbon dioxide separation using membranes**. Singapore: Springer, 2021.

RAJABZADEH, S. et al. **Membrane separation processes: a review on fouling mechanisms, control strategies and applications**. Journal of Water Process Engineering, v. 40, p. 101827, 2021.

REIS, M. A. M. et al. **Influence of operating parameters on CO₂ separation performance of hollow fiber membranes**. International Journal of Greenhouse Gas Control, v. 77, p. 13-22, 2018.

REZAEI, F. et al. **Concentration polarization and fouling in membrane distillation and reverse osmosis: similarities and differences**. Desalination, v. 452, p. 91-100, 2019.

ROBESON, L. M. **The upper bound revisited**. Journal of Membrane Science, Amsterdam, v. 320, n. 1-2, p. 390-400, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2008.04.030>

ROCHELLE, G. T. **Amine Scrubbing for CO₂ Capture**. Science, v. 325, n. 5948, p. 1652-1654, 2009. DOI: 10.1126/science.1176731.

ROMANO, M. C. et al. **Temperature dependence of gas transport properties in polyimide membranes for CO₂ separation**. Journal of Membrane Science, v. 514, p. 135-145, 2016.

ROWE, B. W.; FREEMAN, B. D.; PAUL, D. R. **Influence of temperature on the transport properties of crosslinked poly(ethylene glycol diacrylate) membranes**. Journal of Membrane Science, v. 360, n. 1-2, p. 58-69, 2010. DOI: 10.1016/j.memsci.2010.05.012.

RUBIN, E. S.; DAVIDSON, J. E.; HERZOG, H. J. **CCS at Scale: Lessons**

Learned and Opportunities. Energy Procedia, v. 63, p. 6363-6371, 2015.

SAMANTA, A. et al. **Post-combustion CO₂ capture using solid sorbents: a review.** Industrial & Engineering Chemistry Research, v. 51, n. 4, p. 1438-1463, 2012. <https://doi.org/10.1021/ie200686q>

SANDERS, D. F. et al. **Energy-efficient polymeric gas separation membranes for a sustainable future: A review.** Polymer, v. 54, p. 4729-4761, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2013.05.075>

SHAH, M. M.; HILL, A.; BRANDT, A. R. **A review of CO₂ capture technologies and utilization pathways.** Energy Procedia, v. 114, p. 650-658, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1209>

SHIMEKIT, B.; OMAR, W. **Optimization of polymeric membranes for gas separation processes: A review.** Chemical Engineering Research and Design, v. 104, p. 763-779, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2015.09.003>

SILVA, C. M. da. **Avaliação de gases efeito estufa na cidade do Rio de Janeiro.** 2012. 131 f. Dissertação (Mestrado em Química) - Instituto de Química, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

SODEIFIAN, G.; AZIZI, S.; HEMMATI-SARABI, S. **Investigating gas separation performance of polyurethane membranes for CO₂ capture.** Journal of Environmental Chemical Engineering, v. 7, n. 3, p. 103018, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103018>

SONG, C. et al. **Progress and expectation of carbon dioxide capture by electrochemical methods.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 82, p. 2650-2668, 2018.

ULBRICHT, M. **Advanced functional polymer membranes.** Polymer, v. 47, n. 7, p. 2217-2262, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2006.01.084>.

WANG, M. et al. **Post-combustion CO₂ capture with chemical absorption: a state-of-the-art review**. Chemical Society Reviews, v. 40, n. 7, p. 3351-3365, 2011.

WHO. **Climate change and health**. World Health Organization, 2021. Disponível em: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-and-health>. Acesso em: 9 jun. 2025.

WWF. **Relatório Planeta Vivo 2020: Rumo a uma sociedade positiva para a natureza**. São Paulo: WWF-Brasil, 2020. Disponível em: <https://www.wwf.org.br>. Acesso em: 8 jun. 2025.

YAMPOLSKY, J. **Polymeric gas separation membranes**. Macromolecules, Washington, DC, v. 44, n. 9, p. 3294-3310, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1021/ma200118e>.

ZHANG, Y. et al. **Recent advances in mixed matrix membranes for gas separation**. Separation and Purification Technology, Amsterdam, v. 111, p. 1-20, 2013.