



CAMINHOS INOVADORES NA CAPTURA DE CO₂: AVANÇO DE TECNOLOGIAS PARA TORNAR OS PROCESSOS INDUSTRIAIS SUSTENTÁVEIS

WALLAS DOUGLAS DE MACÊDO SOUZA

RESUMO

As tecnologias de captura de carbono desempenham um papel crítico na mitigação das mudanças climáticas, reduzindo os níveis de CO₂ atmosférico e transformando o carbono capturado em produtos valiosos. À medida que a urgência de abordar o aquecimento global se intensifica, o avanço das tecnologias de captura de carbono tem se tornado cada vez mais importante. Este estudo teve como objetivo sintetizar os avanços atuais na captura e utilização de CO₂, com foco na melhoria da eficiência energética, viabilidade econômica e integração de fontes de energias renováveis. Para isso, uma revisão sistemática da literatura foi conduzida, envolvendo a busca em bancos de dados científicos usando palavras-chave específicas, como "tecnologia de captura de CO₂" e "captura e utilização de carbono". Os artigos foram selecionados com base na relevância, com aqueles com foco em métodos de captura de CO₂, caminhos de utilização e desafios associados. Os dados foram então extraídos e categorizados em temas-chave, incluindo avanços tecnológicos, eficiência energética, considerações econômicas e aceitação pública. A revisão identificou desafios significativos nas tecnologias de sequestro de CO₂, incluindo alto consumo de energia, custos de capital e ceticismo público em relação aos avanços e potenciais das tecnologias de captura e uso de carbono (CCU). No entanto, inúmeras oportunidades também foram destacadas. Isso inclui o desenvolvimento de métodos de captura de baixa energia, o potencial para inovação tecnológica em materiais e processos e a integração de energia renovável para aumentar a eficiência do sistema. Além disso, um apoio político mais forte e iniciativas de conscientização pública foram identificados como cruciais para acelerar a escalabilidade dos processos. Embora os desafios permaneçam, as oportunidades para o avanço das tecnologias para a captura de CO₂ são fundamentais. Ao abordar esses desafios por meio da inovação, desenvolvimento de políticas e engajamento público, o uso de CO₂ pode se tornar uma pedra angular dos esforços globais para atingir a neutralidade de carbono. Investimento e colaboração contínuos são essenciais para concretizar todo o potencial dessas tecnologias na transição para um futuro sustentável.

Palavras-chave: Sequestro de carbono; Eficiência energética; Integração renovável; Emissão zero; Sustentabilidade ambiental.

1 INTRODUÇÃO

O CO₂ é o principal gás que colabora para o efeito estufa, uma vez que é responsável por, aproximadamente, 66% dos eventos atribuídos às mudanças climáticas (Davoodi *et al.*, 2023). Os EUA seguido da China são os países que têm buscado sair na frente no entendimento e solução dessa problemática, uma vez que são considerados os que mais investem em projetos para captura e armazenamento de carbono (Osman *et al.*, 2021). Nesse cenário, é urgente o entendimento relativo às questões técnicas, científicas, tecnológicas, ambientais e econômicas que apresentem relevância para a implementação de estratégias para a captura, armazenamento

e utilização de carbono (CCUS) (Mikulčić *et al.*, 2019; Koukouzas *et al.*, 2022; Davoodi *et al.*, 2023).

O objetivo deste estudo foi reunir, analisar e resumir sistematicamente os avanços atuais nas tecnologias de captura de carbono, com foco particular em estratégias para a captura de CO₂. Para isso, sintetizou-se dados de desenvolvimentos recentes em métodos de captura, desafios e oportunidades associados, buscando fornecer uma visão abrangente do estado da arte na gestão de CO₂. A ênfase colocada na identificação de soluções energeticamente eficientes, na viabilidade econômica e na integração de fontes de energia renováveis, destacou o papel crítico destas tecnologias no alcance da neutralidade das emissões de carbono.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo empregou uma revisão sistemática da literatura para sintetizar os avanços nas tecnologias de captura CO₂ (CCU), estruturada nas seguintes etapas:

- Pré-seleção dos artigos: realizou-se o levantamento nos bancos de dados científicos como Web of Science, Scopus, Science Direct e Google Scholar, buscando-se pelos seguintes termos principais: "captura de CO₂", "captura e utilização de carbono (CCU)", "conversão de CO₂", "eficiência energética em CCU" e "integração de energia renovável";
- Triagem e Critérios: como critério de inclusão, buscou-se artigos que focavam nos termos buscados na pré-seleção, enquanto como critério de exclusão adotou-se a existência de estudos sem validação experimental ou aqueles não focados especificamente nos termos elencados como critérios de inclusão;
- Seleção e Análise: Os artigos selecionados foram revisados na íntegra quanto à relevância e qualidade e, procedeu-se com a extração de informações importantes sobre métodos de captura, consumo de energia e análise econômica para tais tecnologias e,
- Síntese e Categorização: Os dados extraídos foram categorizados nos tópicos abordados nas seções de resultados e discussão. Posteriormente, as informações obtidas foram sintetizadas para fornecer uma visão abrangente dos avanços da área, o que garantiu a identificação e síntese da literatura relevante para abordar e atender ao objetivo estipulado nesse trabalho.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Visão geral das tecnologias de captura

A captura de carbono é a primeira etapa do processo para uso do CO₂ e, com isso, várias estratégias foram desenvolvidas para realizar uma separação eficiente, estando essas tecnologias alinhadas com a fonte (processos industriais, usinas de energia e atmosférico) e, podendo ser classificadas, principalmente, como: captura de pré-combustão, captura de pós-combustão e captura de combustão de oxcombustível (Osman *et al.*, 2021; Akeeb *et al.*, 2022; Olabi *et al.*, 2022; Yadav; Mondal, 2022; Zhao *et al.*, 2023).

Na pré-combustão, foca-se na remoção de CO₂ em combustíveis fósseis ou aqueles oriundos de biomassa, antes da etapa de combustão, evitando a emissão de gases poluentes para a atmosfera (Chen, 2022). Nesse caso, as tecnologias mais aplicadas envolvem absorção química ou física e adsorção por oscilação de pressão (PSA) (Zhao *et al.*, 2023). Aqui, na primeira etapa produz-se gás sintético pela exposição dos combustíveis a uma oxidação parcial de vapor ou oxigênio e, em seguida, um gás enriquecido em hidrogênio é obtido pela reação de deslocamento gás-água, enquanto que na captura pós-combustão, o sequestro de CO₂ ocorre após a queima dos combustíveis, hidrocarbonetos e pode ser realizado por membranas (Wu *et al.*, 2024; Fu *et al.*, 2024). Como vantagens, a captura pós-combustão possui fácil integração à infraestrutura existente, necessitando de pequenos ajustes à tecnologia básica de combustão, uma vez que não interage previamente durante a queima dos combustíveis (Akeeb *et al.*, 2022).

Já os processos em que se utiliza um oxícombustível, o oxigênio puro é empregado na combustão, permitindo a obtenção de um gás com alta pureza de CO₂, o que possibilita a redução das emissões de NO_x, porém, necessita de alta demanda energética para produção de O₂ de alta pureza (Carpenter; Long, 2017; Akeeb *et al.*, 2022).

Abaixo, descreve-se com mais detalhes os processos que tem exercido papel fundamental na busca pela emissão de CO₂ zero e/ou negativa, sendo eles:

a) Absorção química: solventes à base de amina (como a monoetanolamina), soluções salinas (carbonatos/bicarbonatos ou hidróxido) e amônia, são comumente usadas (Zhao *et al.*, 2023). Em geral, as vantagens desse método estão relacionadas, além de outras especificidades, à pouca sensibilidade dessas substâncias à pressão parcial de gases ácidos, sendo possível uma captura a nível de ppm, bem como, aos altos coeficientes de transferência de massa de absorção e dessorção. Já as desvantagens, são atreladas aos custos do processo, que incluem: regeneração do solvente, preço dos materiais, dependência do calor de absorção, corrosão, dentre outros, além dos danos ambientais (Borhani; Wang, 2019; Alabid; Dinca, 2022; Zhao *et al.*, 2023).

b) Absorção física: método na qual processos como o Selexol ou Rectisol são aplicados para absorver seletivamente CO₂ a partir do gás de síntese (Zhao *et al.*, 2023).

O Selexol consiste em um método físico de remoção de gás ácido que usa uma mistura de éter dimetilico e propilenoglicol como solvente para capturar seletivamente o CO₂ e sulfeto de hidrogênio (H₂S) do gás de síntese, em um processo de dois estágios, onde, no primeiro estágio remove-se o sulfeto de hidrogênio, enquanto no segundo estágio, efetua-se a remoção de CO₂ (Chen, 2022). Já o Rectisol é um processo que possui alta capacidade de captura de CO₂, que utiliza o metanol como solvente para a separação de impurezas geradas na gaseificação do carvão ou óleo pesado, dentre elas: cianeto de hidrogênio, aromáticos, compostos orgânicos de enxofre e hidrocarbonetos formadores de goma (Borhani; Wang, 2019).

Apesar das vantagens do metanol, como a sua alta disponibilidade, preço baixo quando comparados a outros solventes e alta flexibilidade para diferentes esquemas de fluxo, existem inconvenientes e limitações ligadas a maiores seletividades para H₂S em relação ao CO₂, bem como, sua alta pressão de vapor e fácil perda de solvente, dentre outras características que se aplicam a solventes para absorção física (Borhani; Wang, 2019).

c) Adsorção: os processos adsorptivos envolvem a adesão/ligação de componentes à superfície de um sólido com porosidade e, para a captura de carbono, eles são classificados de acordo com o método de regeneração ao qual o adsorvente é submetido (Aghel; Behaein; Alobaid, 2022).

Os principais métodos de regeneração são: a adsorção por oscilação de pressão (*pressure swing adsorption* - PSA), na qual reduz-se a pressão ao nível atmosférico; a adsorção por oscilação de temperatura (*temperature swing adsorption* - TSA), em que varia-se a temperatura entre 30-120 °C e, a adsorção por oscilação de vácuo (*vacuum swing adsorption* - VSA), realizando-se, nesse último caso, uma operação cíclica onde fecha-se a válvula de entrada, ou ainda, usa-se o vácuo (Aghel; Behaein; Alobaid, 2022; Wu *et al.*, 2024). Para a execução do PSA, por exemplo, emprega-se adsorventes sólidos, como zeólitas ou carvão ativado, para capturar CO₂ em alta pressão. Com isso, durante a regeneração dos adsorventes, enquanto reduz-se a pressão, o CO₂ é liberado em elevada concentração, permitindo seu sequestro (Zhao *et al.*, 2023).

Para essa finalidade, processo é influenciado por parâmetros como pressão (influencia a capacidade adsorvente e o comportamento isotérmico do processo), duração da etapa de adsorção (que envolve o tempo de residência e impacta na pureza do CO₂ obtido), a vazão de alimentação do gás para recuperação do CO₂ (por exemplo, advindo do biogás), temperatura

(implica no aumento ou redução da capacidade de adsorção) e relação purga/alimentação (impacta a eficácia da regeneração e, conseqüentemente, pureza do dióxido de carbono sequestrado) (Ali Abd *et al.*, 2024);

d) Separação por membranas: nessa técnica, a captura ocorre através do emprego de uma pressão, oferecendo seletividade à passagem de CO₂ enquanto retêm outros gases, sem a necessidade do uso de agentes químicos e etapas de regeneração (Hong *et al.*, 2021).

Apesar de novas membranas estarem em desenvolvimento, atualmente, o uso de membranas poliméricas para a separação de CO₂ tem como vantagens: baixo custo, alta durabilidade para aplicação na indústria, elevada eficiência e sua flexibilidade diante de outras tecnologias para esse intuito, estando seu desempenho atrelado ao mecanismo de separação, além da natureza e estrutura do material constituinte, que refletem em suas propriedades morfológicas e físicas, a exemplo de volume total de poros, distribuição do tamanho dos poros, dentre outras (Vinoba *et al.*, 2017).

Para essa metodologia de sequestro do CO₂, as limitações estão associadas a aplicações em pequena escala (Fu *et al.*, 2024). Todavia, tem-se considerado que essa é uma das estratégias mais promissoras para uma possível captura de CO₂ diretamente do ar (*direct air capture* - DAC) (Castro-Muñoz *et al.*, 2022);

e) Destilação criogênica: neste método, a mistura de gases é submetida a resfriamento sob temperaturas muito baixas, o que conduz à liquefação e possibilita a separação do CO₂. Entretanto, além de pouco investigada e ter sido verificada eficácia para elevadas concentrações do CO₂, tem-se observado um alto custo para o processo, dado seu consumo energético (Anugraha *et al.*, 2024; He *et al.*, 2025);

e) Novas tendências: Com o avanço e incentivo de pesquisas na área, novas estratégias e materiais tem sido aplicados na captura de carbono, dentre elas, estão o uso de estruturas metal-orgânicas (MOFs), catalisadores mais eficientes e duráveis para a reação de deslocamento de gás-água, além do desenvolvimento de tecnologias para integração e otimização de processos, como o ciclo combinado de reforma integrada (IRCC) e o ciclo combinado de gaseificação integrada (IGCC) (Zhao *et al.*, 2023; Patil *et al.*, 2024).

3.2 Desafios e Oportunidades

A implantação de tecnologias para a captura de carbono enfrenta vários desafios e oportunidades que entram em pauta tanto nas investigações científicas (que muitas vezes partem da iniciativa privada o interesse no estabelecimento de convênios para o desenvolvimento de pesquisas no contexto dessa temática), quanto em fóruns de discussões governamentais e do setor privado, visando-se alcançar o padrão de emissão zero de carbono. Nesse sentido, ressaltam-se alguns dos aspectos que foram identificados com o respectivo levantamento:

☐ Eficiência Energética:

* Desafios: O alto consumo de energia nos processos de captura de CO₂ limita a eficiência e aumenta os custos.

* Oportunidades: O desenvolvimento de métodos de captura de baixa energia e a integração de energia renovável podem melhorar a eficiência e reduzir custos.

☐ Viabilidade Econômica:

* Desafios: Altos custos operacionais e de capital impedem a adoção generalizada.

* Oportunidades: Ampliar tecnologias, otimizar processos e alavancar a precificação do carbono pode aumentar a viabilidade econômica.

☐ Integração de energia renovável:

* Desafios: A intermitência e a variabilidade das fontes de energia renováveis podem interromper os processos de CCU.

* Oportunidades: Sistemas híbridos e soluções de armazenamento de energia podem garantir a operação estável e contínua das tecnologias CCU.

□ Inovação Tecnológica:

- * Desafios: Escalabilidade e desempenho limitados das tecnologias atuais de CCU.
- * Oportunidades: Avanços em materiais, catalisadores e processos podem impulsionar a inovação e melhorar a escalabilidade.

□ Aceitação Ambiental e Social:

- * Desafios: Preocupações públicas sobre segurança, impacto ambiental e armazenamento de CO₂ a longo prazo.
- * Oportunidades: Comunicação transparente, apoio regulatório e projetos de demonstração podem construir a confiança e a aceitação do público.

□ Desenvolvimento de infraestrutura

- * Desafios: Infraestrutura insuficiente para transporte, armazenamento e utilização de CO₂.
- * Oportunidades: O investimento em infraestrutura e o desenvolvimento de hubs de CO₂ podem apoiar a implantação em larga escala.

□ Quadros Políticos e Regulamentares

- * Desafios: Políticas fragmentadas e incentivos inadequados criam incerteza.
- * Oportunidades: Políticas globais harmonizadas e incentivos mais fortes podem acelerar a adoção da CCU.

□ Conscientização e educação pública

- * Desafios: Baixa conscientização e desinformação podem levar à resistência.
- * Oportunidades: Campanhas educacionais e envolvimento da comunidade podem aumentar o apoio público aos projetos da CCU.

4 CONCLUSÃO

A revisão destacou o progresso significativo em métodos de captura de CO₂, mas que diante das altas demandas e custos de energia continuam sendo barreiras para a adoção generalizada. Contudo, existem oportunidades em inovação tecnológica, suporte a políticas e engajamento público, que podem impulsionar a implantação efetiva dessas tecnologias. Enfrentar esses desafios por meio de esforços colaborativos e investimentos estratégicos será crucial para atingir a neutralidade de carbono e mitigar as mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS

AGHEL, B.; BEHAEIN, S.; ALOBAID, F. CO₂ capture from biogas by biomass-based adsorbents: A review. **Fuel**, v. 328, p. 125276, 2022.

AKEEB, O. *et al.* Post-combustion CO₂ capture via a variety of temperature ranges and material adsorption process: a review. **Journal of Environmental Management**, v. 313, p. 115026, 2022.

ALABID, M.; DINCA, C. Parametrization study for optimal pre-combustion integration of membrane processes in BIGCC. **Sustainability**, v. 14, n. 24, p. 16604, 2022.

ALI ABD, A. *et al.* An overview of biogas upgrading via pressure swing adsorption: Navigating through bibliometric insights towards a conceptual framework and future research pathways. **Energy Conversion and Management**, v. 306, p. 118268, 2024.

ANUGRAHA, R. P. *et al.* Techno-economic analysis of CO₂ cryogenic distillation from high CO₂ content gas field: A case study in Indonesia. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 202, p. 226-234, 2024.

BORHANI, T. N.; WANG, M. Role of solvents in CO₂ capture processes: The review of selection and design methods. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 114, p. 109299, 2019.

CARPENTER, S. M.; LONG, H. A. Integration of carbon capture in IGCC systems. **Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) Technologies**, p. 445-463, 2017.

CASTRO-MUÑOZ, R. *et al.* A new relevant membrane application: CO₂ direct air capture (DAC). **Chemical Engineering Journal**, v. 446, p. 137047, 2022.

CHEN, Z. A review of pre-combustion carbon capture technology. **Advances in Economics, Business and Management Research**, v. 215, p. 524-528, 2022.

FU, J. *et al.* Techno-economic and life cycle assessment of membrane separation in post-combustion carbon capture: A review. **Gas Science and Engineering**, v. 129, p. 205401, 2024.

HE, T. *et al.* High ethane content enables efficient CO₂ capture from natural gas by cryogenic distillation. **Separation and Purification Technology**, v. 352, p. 128153, 2025.

HONG, C. H. *et al.* Progress in polyvinyl alcohol membranes with facilitated transport properties for carbon capture. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 6, p. 106783, 2021.

KOUKOUZAS, N. *et al.* Current CO₂ capture and storage trends in europe in a view of social knowledge and acceptance. A Short Review. **Energies**, v. 15, n. 15, p. 5716, 2022.

MIKULČIĆ, H. *et al.* Flexible carbon capture and utilization technologies in future energy systems and the utilization pathways of captured CO₂. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 114, p. 109338, 2019.

OLABI, A. G. *et al.* Assessment of the pre-combustion carbon capture contribution into sustainable development goals SDGs using novel indicators. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 153, p. 111710, 2022.

OSMAN, A. I. *et al.* Recent advances in carbon capture storage and utilisation technologies: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 19, p. 797-849, 2021.

PATIL, P. *et al.* Harnessing earth's green guardians: exploring carbon sequestration in agricultural practices. **International Journal of Environment and Climate Change**, v. 14, n. 6, p. 86-104, 2024.

VINOBA, M. *et al.* Recent progress of fillers in mixed matrix membranes for CO₂ separation: A review. **Separation and Purification Technology**, v. 188, p. 431-450, 2017.

WU, C. *et al.* A comprehensive review of carbon capture science and technologies. **Carbon Capture Science & Technology**, v. 11, p. 100178, 2024.

YADAV, S.; MONDAL, S. S. A review on the progress and prospects of oxy-fuel carbon

capture and sequestration (CCS) technology. **Fuel**, v. 308, p. 122057, 2022.

ZHAO, K. *et al.* Recent advances and future perspectives in carbon capture, transportation, utilization, and storage (cctus) technologies: a comprehensive review. **Fuel**, v. 351, p. 128913, 2023.