



1º Encontro Interdisciplinar em Energia, Programa de Pós-graduação em Energia, Ufes



Tecnologias utilizadas para capturar CO₂ na indústria siderúrgica: uma análise bibliométrica

Technologies used to capture CO₂ in the steel industry: a bibliometric analysis

Aleson Pinto Santos^{1,*}, Lucas Alexandre Franklin Toé¹, Maristela de Araujo Vicente², Ana Paula Meneguelo²

¹ Aluno do Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, campus São Mateus, ES, Brasil

² Professora do Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, campus São Mateus, ES, Brasil

* Aleson Pinto Santos, E-mail: alesonsantos75@gmail.com

Resumo: A indústria siderúrgica possui uma alta demanda de energia, sendo responsável por elevadas emissões de dióxido de carbono (CO₂), que representam entre 7% e 9% das emissões globais. As tecnologias de Captura e Armazenamento de Carbono (CCS) surgem como alternativas essenciais para a descarbonização desse setor, contribuindo para o cumprimento das metas de emissões líquidas zero até 2050. Este estudo realizou uma análise bibliométrica e de anterioridade sobre as tecnologias aplicadas à captura de carbono em processos siderúrgicos, utilizando as bases *Web of Science*, *Scopus*, *Espacenet* e *Patentscope* no período de 2020 a 2025. Foram identificados 492 artigos e 10 patentes relevantes, predominando as rotas de pós-combustão com tecnologias de absorção e adsorção. Os resultados evidenciam crescente interesse global pelo tema, liderado por pesquisadores e instituições da China, com destaque para estudos que integram simulações computacionais e análises termoenergéticas. Verificou-se, ainda, que a substituição de combustíveis fósseis por biomassa, associada à CCS, pode alcançar emissões negativas. Contudo, os custos de implementação, eficiência comparativa entre rotas e integração de energias renováveis ainda merecem investimento. O avanço das pesquisas em modelagem, desenvolvimento de materiais e políticas de incentivo torna-se decisivo para viabilizar a transição da indústria siderúrgica rumo a uma economia de baixo carbono.

Palavras-chave: captura de carbono; dióxido de carbono; siderurgia; descarbonização; bibliometria.

Abstract: The steel industry has a high energy demand and is responsible for significant carbon dioxide (CO₂) emissions, accounting for between 7% and 9% of global emissions. Carbon Capture and Storage (CCS) technologies emerge as essential alternatives for the decarbonization of this sector, contributing to achieving net-zero emission targets by 2050. This study carried out a bibliometric and prior art analysis of technologies applied to carbon capture in steelmaking processes, using the *Web of Science*, *Scopus*, *Espacenet*, and *Patentscope* databases for the period from 2020 to 2025. A total of 492 articles and 10 relevant patents were identified, with post-combustion routes predominating, particularly those employing absorption and adsorption technologies. The results show a growing global interest in the topic, led by researchers and institutions from China, with emphasis on studies integrating computational simulations and thermoenergetic analyses. It was also found that replacing fossil fuels with biomass, combined with CCS, can achieve negative emissions. However, implementation costs, comparative efficiency among routes, and the integration of renewable energy sources still require further investment. Advances in modeling research, materials development, and incentive policies are crucial to enabling the transition of the steel industry toward a low-carbon economy.

Keywords: carbon capture; carbon dioxide; steel industry; decarbonization; bibliometrics.

1 Introdução

A abundante utilização dos combustíveis fósseis tem causado mudanças climáticas significativas, resultante do aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE), principalmente o Dióxido de Carbono (CO₂) (Filonchik et al., 2024). Entre os anos 2000 e 2023 as emissões de CO₂ em nível mundial aumentaram 51,7%. Os cinco países que mais emitiram GEE em 2023 foram: China, Estados Unidos, Índia, Rússia e Brasil. Juntos eles responderam por mais de 60% do CO₂ emitido em todo o mundo (EDGAR, 2024). O crescimento das emissões de GEE demonstra a necessidade de alternativas menos poluentes em todos os setores produtivos, incluindo a indústria de energia. As tecnologias de Captura e Armazenamento de Carbono (*Carbon Capture and Storage* – CCS) são consideradas indispensáveis no processo de descarbonização, principalmente em setores que necessitam dos combustíveis fósseis ou de difícil abatimento como a indústria siderúrgica (ANP, 2025).

Governos e universidades têm investido esforços para desenvolver pesquisas relacionadas à CCS visando atingir a meta global de emissões líquidas zero até 2050 (Net Zero) (Chen et al., 2022). A cada ano mais de 40 GtCO₂ são liberados na atmosfera. Projeções indicam tendência no crescimento das emissões, intensificando o aquecimento global e seus impactos adversos (GCP, 2024). Atualmente no mundo há 50 instalações de CCS em operação, podendo capturar 51 MtCO₂ por ano, representando aproximadamente 0,13% do total de CO₂ emitido. Para impulsionar investimentos na indústria de CCS, as nações líderes já possuem ou estão estabelecendo políticas e regulamentações, integrando os setores públicos e privados para remover barreiras, reduzir custos e desenvolver projetos. Há 44 novas instalações de CCS em construção com capacidade prevista para capturar mais 51 MtCO₂ por ano. Outros 534 projetos estão em fase de desenvolvimento, fomentando o cumprimento de metas climáticas (Global CCS Institute, 2025).

A tecnologia de CCS é uma estratégia fundamental para a descarbonização da indústria siderúrgica e para o cumprimento das metas climáticas (Paltsev et al., 2021). Atualmente é a única solução capaz de mitigar as emissões de CO₂ em indústrias de difícil abatimento (Pisciotta et al., 2022). No curto prazo, o aumento da eficiência energética pode reduzir as emissões de CO₂, no entanto, a longo prazo, para mitigar as mudanças climáticas, será necessário adotar tecnologias de descarbonização como a CCS (Ren et al., 2021). O processo siderúrgico é responsável por emitir entre 7 à 9% do total mundial de CO₂ devido ao alto consumo de combustíveis fósseis (Perpiñán et al., 2023), no entanto, a CCS pode equilibrar as emissões dessa fonte energética e reduzir o aquecimento global (Shen et al., 2022). Sua eficácia reside na capacidade de capturar o CO₂ emitido, principalmente de grandes fontes industriais, evitando sua liberação para a atmosfera ao armazená-lo em formações geológicas de forma segura por milhares de anos (Al Hameli, Belhaj e Al Dhuhoori, 2022). Apesar da promissora capacidade de redução de GEE, há riscos e desafios no processo. Os altos custos de infraestrutura, complexidades tecnológicas, potenciais impactos ambientais, aceitação pública e políticas públicas fazem parte dos desafios a serem superados. A identificação e o tratamento dessas incertezas podem nortear o combate às mudanças climáticas (Bose et al., 2024).

Para aumentar a aceitação pública e promover confiança na implementação de novos projetos de CCS é necessário envolver a comunidade local desde o início da proposta, desenvolvendo comunicação clara, educação e demonstração dos benefícios (Netto et al., 2020). As políticas públicas, como redução de impostos, precificação de carbono, contratos baseados em desempenho e financiamentos governamentais podem influenciar o investimento da tecnologia no setor industrial (Bose et al., 2024). Já em relação às incertezas ambientais, é essencial realizar uma análise detalhada e a longo prazo dos seguintes aspectos: heterogeneidade do subsolo, localização do fluxo, evolução da permeabilidade dos poços, estimativa das taxas e potencial de vazamentos (Paluszny et al., 2020). Em relação às complexidades tecnológicas, a análise dos vários métodos de captura de carbono e identificação da melhor rota por setor, permite o aumento da eficiência do processo juntamente com a redução de custos (Mondal et al., 2024).

Umas das formas para se analisar as informações científicas dentro de uma área de conhecimento é por meio da análise bibliométrica (Sousa, Almeida e Bezerra, 2024). A bibliometria é uma técnica para identificar dentro de um campo os padrões, tendências e impactos. Permite a análise de grandes quantidades (centenas ou milhares) de dados científicos, retornando informações como autores, publicações, citações e palavras-chave (Passas, 2024). Este estudo tem como objetivo realizar uma análise bibliométrica para verificar os métodos e tecnologias utilizadas na captura de carbono em indústrias siderúrgicas, destacando oportunidades para acelerar o processo de descarbonização nesse setor.

2 Metodologia

2.1 Bibliometria

Uma análise bibliométrica deve ser conduzida por meio de etapas críticas e bem estruturadas. Segundo Passas (2024), o processo inicia-se com a definição do objetivo da pesquisa, seguida pela coleta e pelo download dos dados. As etapas subsequentes envolvem o tratamento, a visualização, a análise e a interpretação dos resultados, utilizando-se softwares específicos para o processamento estatístico das informações. Nesta pesquisa, foram estabelecidas cinco etapas (Figura 1), sendo empregado o *software Bibliometrix* para a visualização e análise dos resultados.

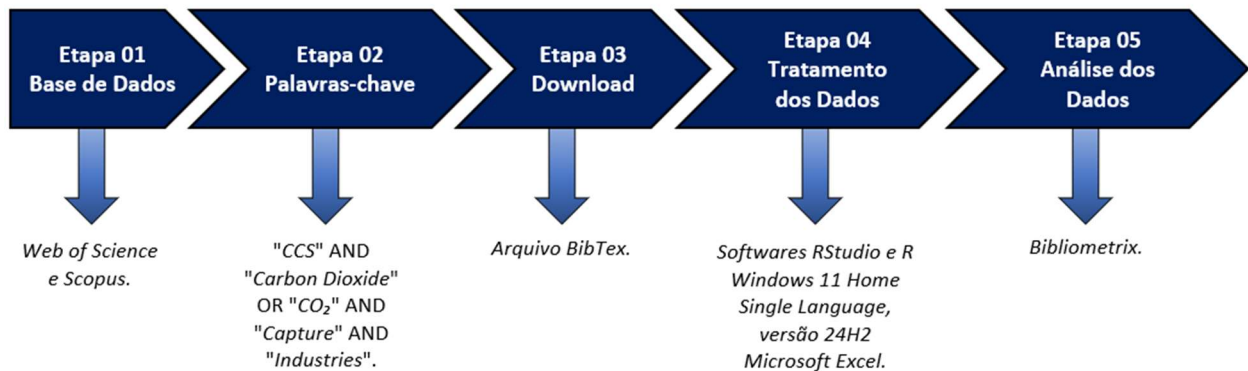


Figura 1. Etapas para desenvolvimento de análise bibliométrica sobre a captura e armazenamento de carbono.

A pesquisa utilizou as bases de dados *Web of Science* e *Scopus*. As palavras-chave aplicadas foram: "CCS" AND "Carbon Dioxide" OR "CO₂" AND "Capture" AND "Industries". Na plataforma *Web of Science*, foi selecionado o filtro "Topic", abrangendo título, resumo e palavras-chave, com o período de publicações delimitado entre 2020 e 2025. Na *Scopus*, utilizou-se o filtro "Article title, Abstract, Keywords", adotando o mesmo intervalo temporal. Como resultado, a *Web of Science* retornou 127 registros, enquanto a *Scopus* apresentou 774 registros. Na etapa seguinte, aplicaram-se filtros adicionais, restringindo a busca de publicações em língua inglesa e classificadas como "Article" ou "Review", resultando em 124 periódicos na *Web of Science* e 471 na *Scopus*. Na *Web of Science*, selecionou-se o campo "Export" no formato *BibTeX*, marcando os 124 registros e optando pelo conteúdo "Full Record and Cited References", o que gerou o arquivo "savedrecs.bib". Na *Scopus*, foram selecionados os campos "All", "Export" e "BibTeX", marcando as opções "Citation information", "Bibliographical information", "Abstract & Keywords", "Funding details" e "Other information", resultando no arquivo "scopus.bib".

Os arquivos exportados foram processados nos softwares *RStudio* (versão 5804.12.1.0) e *R* (versão 4.4.3.37843), executados em sistema operacional *Windows 11 Home Single Language*, versão 24H2. Após o tratamento dos dados, identificaram-se 492 periódicos distintos, os quais foram organizados e analisados em planilha do *Microsoft Excel*. A primeira análise considerou o fator de impacto dos periódicos, obtido por meio do *Journal Citation Reports* (JCR), sendo desconsiderados os registros que não possuíam esse indicador. Restaram 302 periódicos, que foram classificados conforme o método *Ordinatio*, o qual se baseia em três critérios principais: ano de publicação, fator de impacto e número de citações.

2.2 Pesquisa de anterioridade

A pesquisa de anterioridade refere-se à busca por métodos e técnicas existentes ou similares ao que se planeja desenvolver em um projeto de pesquisa. O objetivo é a verificação do ineditismo para criação, melhoria ou comparação de processos ou projetos, verificando se outros pesquisadores já propuseram projetos similares ao que se planeja executar. Nesta etapa da pesquisa, buscou-se os projetos e tecnologias relacionados à captura de carbono com ênfase nas indústrias siderúrgicas para que fosse possível comparar os métodos já empregados e as lacunas a explorar. A pesquisa de anterioridade foi organizada com dois objetivos: verificar o processo de captura de CO₂ em indústrias siderúrgicas e verificar os métodos de simulações computacionais destes processos.

Foram utilizadas duas bases de dados para realização da busca de anterioridade: *Espacenet* e *Patentscope*. Para a primeira etapa da pesquisa foram utilizadas as seguintes palavras-chave: "Carbon capture" AND "Steel industries". Após a busca, obteve-se 367 resultados na plataforma *Espacenet* e 8

resultados na plataforma *Patentscope*. Para segunda etapa da pesquisa, na plataforma *Patentscope* foram utilizadas as seguintes palavras-chave: "*Carbon capture*" AND "*Simulation*". Essa base de dados retornou 30 resultados. Na plataforma *Espacenet*, as mesmas palavras-chave retornaram 1.566 resultados, por esse motivo adotou-se mais palavras para a pesquisa, sendo elas: "*Carbon capture*" AND "*Simulation*" AND "*Post combustion*" AND "*Steel*", essa pesquisa retornou 82 resultados. A Figura 2 demonstra os resultados encontrados por pesquisa e a quantidade de documentos selecionados.

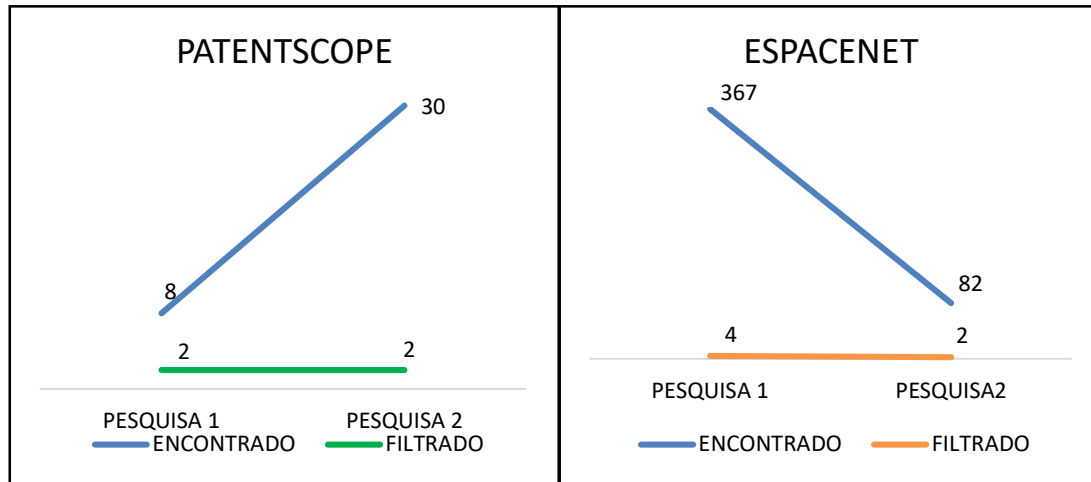


Figura 2. Relação do número de patentes encontradas e selecionadas nas plataformas *Patentscope* e *Espacenet* sobre a captura de carbono na indústria siderúrgica.

Entre os documentos encontrados, foi verificado a partir do título e resumo a relação entre o projeto disponível e o processo de captura de carbono na indústria siderúrgica. A maioria dos documentos não tinha relação. Na plataforma *Espacenet*, muitos documentos tratavam de modo isolado sobre a captura de carbono ou projetos siderúrgicos. Os documentos relacionados com o objetivo deste artigo foram separados para posterior leitura, comparação e verificações de lacunas para explorações. Após a seleção dos documentos, as informações dos autores, base encontrada, código do documento e descrição do projeto foram organizadas em formato de tabela para comparar os métodos utilizados com as lacunas existentes.

3 Resultados e discussões

3.1 Análise bibliométrica

Após a análise e tratamento dos dados, verificou-se que os 492 artigos foram publicados em 195 periódicos distintos, envolvendo 1.889 autores e 2.330 coautores no período de 2020 a 2025. Cada publicação apresentou, em média, 4,74 coautores por documento e 25,88 citações. Dentre os artigos identificados, 22 eram de autoria única, elaborados por 19 autores diferentes. Os dez periódicos com maior número de publicações sobre o tema concentram mais de 37% do total de artigos, enquanto os dez autores mais produtivos são responsáveis por aproximadamente 15% da produção científica identificada. Em termos de distribuição geográfica, a China destaca-se como o país com maior volume de publicações, correspondendo a cerca de 27,5% dos periódicos encontrados. O Brasil ocupa a 14ª posição, com 3,2% das publicações. O artigo mais citado globalmente também é de origem chinesa, publicado em 2020, e contabiliza 529 citações. A Tabela 1 apresenta os periódicos mais relevantes identificados na análise bibliométrica.

Foram identificadas 1.721 palavras-chave atribuídas pelos autores dos artigos analisados. As dez mais recorrentes concentram mais de 66% das ocorrências relacionadas ao tema. A Figura 3 apresenta o conjunto de palavras-chave mais utilizadas, destacando o tamanho das palavras por sua relevância e frequência de uso.

Destacam-se entre as palavras-chave os termos "*carbon dioxide*", "*carbon capture*" e "*carbon sequestration*", com 341, 239 e 152 ocorrências, respectivamente. Em conjunto, esses três termos correspondem a mais de 42,5% de todas as palavras-chave identificadas, evidenciando sua centralidade nas pesquisas relacionadas à captura e armazenamento de carbono, bem como sua relevância para a ampliação de resultados em estudos sobre o tema.

possível capturar entre 0,65 e 1,13 tCO₂ por taço produzido. Já Mio et al. (2022) compararam três rotas de captura de CO₂ (absorção com MDEA (metildietanolamina), separação por membranas e absorção com NaOH) a partir de análises termodinâmicas, simulações de processo e avaliação de ciclo de vida. Os resultados indicaram eficiências de captura entre 90% e 95%, sendo o processo com NaOH o mais vantajoso por converter diretamente o CO₂ em bicarbonato de sódio, agregando valor ao subproduto e reduzindo o impacto ambiental do processo.

Zecca et al. (2025) modelaram um método de captura de carbono por adsorção isotérmica e isobárica, alcançando eficiências de até 98%, especialmente quando associado a fontes renováveis de energia. Benavides et al. (2024) realizaram uma avaliação técnico-econômica de duas rotas de mitigação — CCS e H₂ — e observaram que, em comparação à produção convencional, os custos aumentam em 7% com o CCS, 18% com o hidrogênio azul e 79% com o hidrogênio verde. Os autores ressaltam que políticas públicas e incentivos econômicos são fundamentais para viabilizar a transição tecnológica no setor siderúrgico. De maneira semelhante, Harpprecht et al. (2022) alertam que a indústria do aço pode comprometer o alcance das metas climáticas globais, reforçando que medidas integradas de descarbonização, baseadas na substituição de combustíveis fósseis e na ampliação do uso de CCS, devem ser prioritárias para garantir a sustentabilidade do setor.

3.3 Análise comparativa entre patentes

Entre os 10 documentos de patentes selecionados, 6 resultaram da plataforma *Espacenet* e 4 da plataforma *Patentscope*. O período dos documentos encontrados contempla entre 2021 e 2024. A Tabela 2 relaciona os autores, data de publicação e código da patente.

Tabela 2. Patentes sobre a captura e armazenamento de carbono pesquisadas nas plataformas *Espacenet* e *Patentscope*.

CÓDIGO	TÍTULO	DIFERENCIAL	AUTOR(ES) / DATA
CN112731873A	Coordination control method of blast furnace combined cycle system and post-combustion carbon capture system	Controle do processo de captura de CO ₂	Xiao et al. (2021)
CN113051764A	Moisture source carbon capture competitive adsorption thermodynamic evaluation framework and calculation method	Avaliação termodinâmica da captura de CO ₂ por adsorção	Shuai et al. (2021)
EP3940114A1	Electrochemical-assisted carbon capture process	Captura de CO ₂ com nanopartículas	Luca (2022)
CN219897576U	Device for trapping carbon dioxide in flue gas in iron and steel industry	Redução da fuligem do processo de captura de CO ₂	Mingjie et al. (2023)
CN115770469A	Method for combining blast furnace gas purification with hot blast furnace carbon capture	Purificação de gases de saída do alto-forno e captura de CO ₂	Ping et al. (2023)
CN116305799	Carbon capture method and system	Simulação da captura de CO ₂ utilizando absorvente com propriedades complexas	Yubing et al. (2023)
CN222011888U	Carbon capture system of combustion device	Aumento da captura de CO ₂ a partir da recirculação de gases	Zhongping et al. (2024)
117839396	Coupling carbon capture process based on low-temperature phase change	Sistema híbrido para captura de CO ₂	Zhenbo et al. (2024)
20240293772	System and method for carbon capture and utilization	Conversão de gases de exaustão em hidrogênio	Vyrides (2024)
CN117334259	Simulation modeling method for post-combustion carbon capture system	Simulação de captura de CO ₂ integrando adsorção e <i>stripping</i>	Pei et al. (2024)

Foi verificado que as patentes para as indústrias siderúrgicas voltados à captura de carbono e de simulação da captura do carbono utilizam a rota pós-combustão integrando principalmente as tecnologias de absorção e adsorção. Demais tecnologias e processos de captura de carbono ainda são pouco explorados, deixando aberta a possibilidade de novas pesquisas.

Sete patentes tratam sobre a captura de carbono. A primeira, desenvolvida por Zhongping et al. (2024) não define a tecnologia de captura, mas propõe um circuito de recirculação interna de gases de exaustão

para aumentar a concentração de CO₂. A patente prevê o aumento da eficiência de captura do CO₂ e redução dos custos envolvidos no processo podendo ser integrada às tecnologias de adsorção ou absorção. Utilizando a tecnologia de adsorção, Luca (2022) apresenta um sistema de captura de CO₂ integrado com nanopartículas magnéticas regeneráveis. Essa patente se destaca pela eficiência, seletividade e possibilidade de regeneração do material adsorvente. Xiao et al. (2021) propõem um sistema de controle coordenado entre produção de energia a partir de gás de alto-forno e captura de CO₂. O sistema atua com múltiplos controladores que ajustam variáveis críticas de operação em tempo real para garantir eficiência energética, estabilidade térmica e desempenho de captura de carbono. Já Mingjie et al. (2023) apresentam dispositivo instalado em chaminés de saída de gases das siderúrgicas, para reduzir a fuligem resultante do processo de captura que afeta a pureza do CO₂. A proposta prevê rápida desmontagem e substituição do material adsorvente para aumentar a capacidade de captura de CO₂ do processo.

Utilizando a tecnologia de absorção, Ping et al. (2023) propuseram uma patente para purificar os gases resultantes do alto-forno integrado à captura de carbono. Nesse projeto, inicialmente realiza-se a dessulfuração profunda para aumentar a capacidade de captura do CO₂ e evitar a dificuldade de separação dos gases que demanda alto consumo energético. A patente prevê que a emissão de gases resultantes se limite à categoria ultrabaixa, reduzindo a poluição atmosférica. Com a mesma tecnologia de captura, Vyrides (2024) apresenta um processo de captura e uso do CO₂, transformando-o em hidrogênio ou outros produtos úteis, como metano ou ácidos orgânicos. O sistema promove valorização do carbono por meio de reações químicas com metais e reciclagem dos insumos, sendo aplicável tanto à mitigação quanto ao aproveitamento energético do CO₂. Da mesma forma, Zhenbo et al. (2024) utilizam a tecnologia de absorção, mas propõem um método integrado a um sistema híbrido. A patente combina membranas, ciclones e criogenia em baixa temperatura, otimizando a eficiência energética e a pureza do CO₂ capturado, especialmente em correntes com alta concentração de dióxido de carbono. Sua aplicação estende-se às usinas termelétricas a carvão, indústrias com processo oxidação e usinas siderúrgicas.

Três patentes tratam sobre a simulação do processo de captura de carbono. O primeiro, desenvolvido por Pei et al. (2024) descreve um método de modelagem e simulação com foco em superar limitações da modelagem tradicional quando as propriedades do líquido absorvente são desconhecidas ou complexas. Os autores identificam que os modelos atuais, baseiam-se na razão de líquido de absorção e nas propriedades físicas. Quando estes parâmetros são difíceis de obter, a simulação não é realizada. Para solucionar essa demanda, o modelo desenvolvido opera com dados operacionais reais, resolvendo equações de regressão linear com coeficientes indeterminados.

A segunda patente, desenvolvido por Yubing et al. (2023) apresenta um método com foco na combinação de duas rotas tecnológicas diferentes — adsorção por oscilação de pressão (PSA) e *stripping* (destilação) a baixa temperatura — visando melhorar a eficiência, pureza do CO₂ capturado e redução de custos energéticos. Similar a patente anterior, esse método permite comparar e otimizar os dois processos com base em parâmetros reais de operação, usando análise estatística para identificar os fatores mais relevantes, permitindo a aplicação deste processo em diferentes contextos industriais. A última patente, desenvolvida por Shuai et al. (2021) refere-se a um método e estrutura de avaliação termodinâmica para a captura de carbono por adsorção. Esse modelo pode ser aplicado em gases de combustão oriundos da indústria, gás natural, biogás e outras correntes industriais. Os autores propuseram cálculos de entalpia, entropia e energia livre de Gibbs, oferecendo uma base técnica para avaliar e otimizar materiais adsorventes em ambientes úmidos, superando limitações críticas das tecnologias atuais.

4 Conclusões

A análise bibliométrica permitiu identificar os principais métodos e tecnologias empregados na captura de carbono em indústrias siderúrgicas. A partir dos resultados, destacam-se as seguintes observações:

- a) As análises bibliométricas indicam que os projetos de captura de carbono aplicados à indústria siderúrgica têm priorizado a rota de pós-combustão, utilizando as tecnologias de absorção e adsorção como principais métodos de separação do CO₂ dos gases de exaustão. Essa preferência reflete a viabilidade operacional dessas técnicas frente às características específicas do processo siderúrgico, marcado por emissões contínuas e concentradas.
- b) Apesar dos avanços observados, verificam-se deficiências significativas em estudos comparativos entre os métodos de absorção e adsorção, sobretudo no que se refere à viabilidade técnica, eficiência e custos operacionais.
- c) A tecnologia de membranas ainda é pouco investigada na siderurgia, representando uma oportunidade promissora para diversificação e aprimoramento das rotas de captura.

- d) Há carência de estudos comparativos integrados envolvendo as rotas de pré-combustão, pós-combustão e oxidação, considerando parâmetros como rendimento, consumo energético e custo global.
- e) A substituição parcial ou total de combustíveis fósseis por biomassa surge como uma alternativa de mitigação na origem das emissões, porém ainda é pouco abordada nos estudos de viabilidade aplicados ao setor siderúrgico.
- f) Observou-se que as pesquisas de simulação computacional se concentram quase exclusivamente em sistemas de adsorção e absorção, sem incluir modelos baseados em membranas ou comparações dinâmicas entre diferentes rotas de captura, o que limita o avanço em previsibilidade e planejamento tecnológico.

Embora a captura de carbono na indústria siderúrgica apresente avanços significativos, é possível observar oportunidades para investimentos e explorações científicas e tecnológicas. O desenvolvimento de estudos integrados, que combinem modelagem computacional, análise econômica e avaliação operacional, pode ser fundamental para acelerar a descarbonização do setor e viabilizar sua transição efetiva para uma economia de baixo carbono.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) Código de Financiamento 001, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) pelo suporte financeiro para a realização da pesquisa.

Referências bibliográficas

- Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP (2025) ‘Relatório sobre a implementação do marco regulatório de CCUS no país’ [online]. Available at: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/relatorios/arquivos/relatorioccs.pdf> (accessed 8 August 2025)
- Al Hameli, F, Belhaj, H and Al Dhuhoori, M (2022) ‘CO₂ sequestration overview in geological formations: trapping mechanisms matrix assessment’, *Energies*, [e-journal], 15(20), p. 7805. <https://doi.org/10.3390/en15207805>
- Benavides, K, Gurgel, A, Morris, J, Mignone, B, Chapman, B, Kheshgi, H, Herzog H and Paltsev, S (2024) ‘Mitigating emissions in the global steel industry: representing CCS and hydrogen technologies in integrated assessment modeling’, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, [e-journal], v. 131, p. 103963. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2023.103963>
- Bose, D, Bhattacharya, R, Kaur, T, Pandya, R, Sarkar, A, Ray, A, Mondal, S, Mondal, A, Ghosh, P and Chemudupati, RI (2024) ‘Innovative approaches for carbon capture and storage as crucial measures for emission reduction within industrial sectors’, *Carbon Capture Science & Technology*, [e-journal], v. 12, p. 100238. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ccs.2024.100238>
- Chen, S, Liu, J, Zhang, Q, Teng, F and McLellan, BC (2022) ‘A critical review on deployment planning and risk analysis of carbon capture, utilization, and storage (CCUS) toward carbon neutrality’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [e-journal], v. 167, p. 112537. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112537>
- Emissions Database for Global Atmospheric Research – EDGAR (2024) ‘GHG emissions of all world countries’ [online]. Available at: https://edgar.jrc.ec.europa.eu/report_2024 (accessed 8 August 2025)
- Fan, Z and Friedmann, SJ (2021) ‘Low-carbon production of iron and steel: technology options, economic assessment, and policy’, *Joule*, [e-journal], 5(4), pp. 829–862. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.02.018>
- Filonchyk, M, Peterson, MP, Zhang, L, Hurynovich, V and He, Y (2024) ‘Greenhouse gases emissions and global climate change: examining the influence of CO₂, CH₄, and N₂O’, *Science of The Total Environment*, [e-journal], v. 935, p. 173359. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173359>

- Global Carbon Project – GCP (2024) ‘Fossil fuel CO₂ emissions increase again in 2024’ [online]. Available at: <https://globalcarbonbudget.org/fossil-fuel-co2-emissions-increase-again-in-2024/> (accessed 20 August 2025)
- Global CCS Institute (2025) ‘Global status of CCS 2024’ [online]. Available at: https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2025/03/PT_Status-Global-da-Captura-e-Armazenamento-de-Carbono_202502.pdf (accessed 20 August 2025)
- Harpprecht, C, Naegler, T, Steubing, B, Tukker, A and Simon, S (2022) ‘Decarbonization scenarios for the iron and steel industry in context of a sectoral carbon budget: Germany as a case study’, *Journal of Cleaner Production*, [e-journal], v. 380, p. 134846. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134846>
- Holappa, L (2020) ‘A general vision for reduction of energy consumption and CO₂ emissions from the steel industry’, *Metals*, [e-journal], 10(9), p. 1117. <https://doi.org/10.3390/met10091117>
- Leeson, D, Fennell, P, Shah, N, Petit, C and Dowell, NM (2017) ‘A techno-economic analysis and systematic review of carbon capture and storage (CCS) applied to the iron and steel, cement, oil refining and pulp and paper industries’, *Energy Procedia*, [e-journal], v. 114, pp. 6297-6302. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1766>
- Mio, A, Petrescu, L, Luca, AV, Galusnyak, SC, Fermeglia, M and Cormos, CC (2022) ‘Carbon dioxide capture in the iron and steel industry: thermodynamic analysis, process simulation, and life cycle assessment’, *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, [e-journal], 36(4), pp. 255–271. <https://doi.org/10.15255/CABEQ.2022.2123>
- Mondal, A, Gupta, SK, Yaduvanshi, S, Khan, M, Layek, S, Kudapa, VK and Mondal, S (2024) ‘Impact and potential of carbon sequestration and utilization: fundamentals and recent developments’, *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, [e-journal], 44(12), pp. 2018–2043. <https://doi.org/10.1080/19392699.2024.2305940>
- Netto, ALA, Câmara, G, Rocha, E, Silva, AL, Andrade, JCS, Peyerl, D and Rocha, P (2020) ‘A first look at social factors driving CCS perception in Brazil: A case study in the Recôncavo Basin’, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, [e-journal], v. 98, p. 103053. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2020.103053>
- Paltsev, S, Morris, J, Kheshgi, H and Herzog, H (2021) ‘Hard-to-abate sectors: the role of industrial carbon capture and storage (CCS) in emission mitigation’, *Applied Energy*, [e-journal], v. 300, p. 117322. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117322>
- Paluszny, A, Graham, CC, Daniels, KA, Tsaparlí, V, Xenias, D, Salimzadeh, S, Whitmarsh, L, Harrington, JF and Zimmerman, RW (2020) ‘Caprock integrity and public perception studies of carbon storage in depleted hydrocarbon reservoirs’, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, [e-journal], v. 98, p. 103057. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2020.103057>
- Passas, I (2024) ‘Bibliometric analysis: the main steps’, *Encyclopedia*, [e-journal], 4(2), pp. 1014-1025. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia4020065>
- Perpiñán, J, Peña, B, Bailera, M, Evely, V, Kannan, P, Raj, A, Lisbona, P and Romeo, LM (2023) ‘Integration of carbon capture technologies in blast furnace based steel making: a comprehensive and systematic review’, *Fuel*, [e-journal], v. 336, p. 127074. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127074>
- Pisciotta, M, Pilorgé, H, Feldmann, J, Jacobson, R, Davids, J, Swett, S, Sasso, Z and Wilcox, J (2022) ‘Current state of industrial heating and opportunities for decarbonization’, *Progress in Energy and Combustion Science*, [e-journal], v. 91, p. 100982. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pecs.2021.100982>
- Ren, M, Lu, P, Liu, X, Hossain, MS, Fang, Y, Hanaoka, T, O’Gallachoir, B, Glynn, J and Dai, H (2021) ‘Decarbonizing China’s iron and steel industry from the supply and demand sides for carbon neutrality’, *Applied Energy*, [e-journal], v. 298, p. 117209. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117209>

- Sousa, MNA, Almeida, EPO and Bezerra, ALD (2024) ‘Bibliometrics: what is it? What is it used for? And how to do it?’, *Cuadernos de Educación y Desarrollo*, [e-journal], 16(2), p. e3042. <https://doi.org/10.55905/cuadv16n2-021>
- Shen, J, Zhang, Q, Xu, L, Tian, S and Wang, P (2021) ‘Future CO2 emission trends and radical decarbonization path of iron and steel industry in China’, *Journal of Cleaner Production*, [e-journal], v. 326, p. 129354. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129354>
- Shen, M, Kong, F, Tong, L, Luo, Y, Yin, S, Liu, C, Zhang, P, Wang, L, Chu, PK and Ding, Y (2022) ‘Carbon capture and storage (CCS): development path based on carbon neutrality and economic policy’, *Carbon Neutrality*, [e-journal], 1(1), p. 37. <https://doi.org/10.1007/s43979-022-00039-z>
- Tanzer, SE, Blok, K and Ramírez, A (2020) ‘Can bioenergy with carbon capture and storage result in carbon negative steel?’, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, [e-journal], v. 100, p. 103104. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2020.103104>
- Toktarova A, Karlsson, I, Rootzén, J, Göransson, L, Odenberger, M and Johnsson, F (2020) ‘pathways for low-carbon transition of the steel industry-a swedish case study’, *Energies*, [e-journal], 13(15), p. 3840. <https://doi.org/10.3390/en13153840>
- Yang, F, Meerman, JC and Faaij, APC (2021) ‘Carbon capture and biomass in industry: A techno-economic analysis and comparison of negative emission options’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [e-journal], v. 144, p. 111028. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111028>
- Zaini, IN, Nurdawati, A, Gustavsson, J, Wei, W, Thunman, H, Gyllenram, R, Samuelsson, P and Yang, W (2023) ‘Decarbonising the iron and steel industries: production of carbon-negative direct reduced iron by using biosyngas’, *Energy Conversion and Management*, [e-journal], v. 281, p. 116806. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116806>
- Zecca, N, Lücking, L, Chisăliță, DA, Boon, J, Dijk, HAJ, Pieterse, JAZ, Giuffrida, A and Manzoloni, G (2025) ‘DISPLACE post-combustion carbon capture technology - integration in a steel plant for mitigation of CO2 emissions’, *Journal of Cleaner Production*, [e-journal], v. 491, p. 144739. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.144739>
- Zhang, K, Bokka, HK and Lau, HC (2022) ‘Decarbonizing the energy and industry sectors in Thailand by carbon capture and storag’ *Journal of Petroleum Science and Engineering*, [e-journal], v. 209, p. 109979. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109979>