



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE SALINÓPOLIS
FACULDADE DE ENGENHARIA

**Prospecção Tecnológica para Captura, Utilização e Armazenamento
de CO₂: Perspectivas e Desafios para a Indústria Energética a partir
do método *technology roadmapping***

Vitória Cardoso Rocha ¹

¹Graduanda em Engenharia de Exploração e Produção de Petróleo pela Universidade Federal do Pará (UFPA), com interesse nas áreas de engenharia de reservatórios e tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCS). Atua em projetos acadêmicos voltados à inovação e sustentabilidade no setor energético, com foco na transição para uma economia de baixo carbono. Possui perfil proativo, determinado e voltado para o desenvolvimento técnico e interpessoal.

Vinculação: Universidade Federal do Pará – Campus Salinópolis.
E-mail: vitoria.rocha@salinopolis.ufpa.br

RESUMO

As mudanças climáticas e a crescente concentração de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera impulsionaram a necessidade de tecnologias eficazes para mitigação das emissões de gases de efeito estufa. Dentre essas, a Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS) se destaca como uma estratégia promissora para a transição energética e o cumprimento das metas globais de descarbonização. Este trabalho tem como objetivo realizar uma prospecção tecnológica de CCUS no período de 2020 a 2025, com ênfase nas perspectivas e desafios para a indústria energética. Para isso, foi aplicado o método *technology roadmapping*, baseado nas etapas Pré-prospectiva, Prospectiva e Pós-prospectiva.

A metodologia incluiu uma busca exploratória inicial, seguida de uma pesquisa sistemática em bases acadêmicas, totalizando a análise de 100 artigos científicos. Os dados foram organizados em análises macro (tendências temporais e geográficas), meso (categorização por tecnologia, viabilidade e escalabilidade) e micro (caracterização detalhada por subcategorias). Os resultados revelaram que as tecnologias de CCUS se encontram em avançado nível de maturidade tecnológica (TRL 7-9), sendo a captura pós-combustão com aminas, membranas seletivas e armazenamento geológico em aquíferos salinos as abordagens mais estudadas.

O estudo também identificou barreiras significativas à adoção em larga escala, como altos custos operacionais, limitações de infraestrutura e ausência de regulamentações específicas. A construção de *roadmaps* tecnológicos permitiu prever tendências de curto (2025–2030) e longo prazo (2030–2050), indicando um avanço no uso de tecnologias emergentes, como Captura Direta do Ar (DAC) e bioenergia com CCS (BECCS). A consolidação do CCUS depende da integração entre inovação tecnológica, incentivos regulatórios e aceitação social.

Este trabalho contribui para o entendimento estratégico das tecnologias de CCUS e reforça sua importância no combate às mudanças climáticas, promovendo a transição para uma economia de baixo carbono.

Palavras-chave: CCUS. Prospecção tecnológica. *Roadmapping*. Transição energética. Maturidade tecnológica.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) aprovado por:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Silvério Sirotheau Corrêa Neto - Orientador
Universidade Federal do Pará

Prof. Dr. Thiago Rafael da Silva Moura - Coorientador
Universidade Federal do Pará

Prof. Dr. José Leão de Luna
Universidade Federal do Pará

Prof. Dr. Thiago Henrique da Silva Barbosa
Universidade Federal do Pará

Assinatura do Orientador

Data de submissão: ____/____/____

Data de aprovação: ____/____/____

1. INTRODUÇÃO

As urgências climáticas representam um dos maiores desafios globais do século XXI, com impactos ambientais, sociais e econômicos cada vez mais evidentes desde o início da era pré-industrial. O aumento da concentração de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, em especial o dióxido de carbono (CO₂), tem sido apontado como o fator responsável pelo aquecimento global (IPCC, 2023). A elevação da temperatura média global já desencadeia eventos climáticos extremos, como ondas de calor, secas prolongadas, aumento do nível do mar, intensificação de furacões, tempestades tropicais, entre outros. (Nations, United, 2025)

Segundo o relatório IPCC (2023), as atividades humanas, principalmente a queima de combustíveis fósseis, são apontadas como as principais causas do aquecimento global. O efeito estufa é um processo natural que permite a manutenção da temperatura média da Terra em níveis compatíveis com a vida (Cerri *et al.*, 2023). No entanto, a intensificação desse efeito, causada pelo acúmulo excessivo de GEE, resulta em uma maior retenção de calor na atmosfera, elevando as temperaturas globais e desencadeando eventos climáticos extremos. O CO₂, responsável por aproximadamente 76% das emissões de gases globais, é um dos principais vetores desse processo, com um tempo de permanência na atmosfera que pode ultrapassar cem anos. (IPCC, 2023).

Diante deste cenário, a necessidade de reduzir as emissões de CO₂ tornou-se prioridade global diante da crescente evidência científica sobre as mudanças climáticas, assim as tecnologias de Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS) surge como uma solução promissora para mitigar as emissões de CO₂. Segundo Nations, United (2025), o acordo de Paris, estabelecido em 2015, definiu como objetivo limitar o aquecimento global a menos de 2°C em relação aos níveis pré-industriais, com a ambição de encurtar esse aumento para 1,5°C. Para atingir é essencial que as emissões líquidas globais de CO₂ sejam reduzidas em 45% até 2030 para atingir o zero de emissões (*Net Zero*) até 2050, exigindo uma transição acelerada para energias de baixo carbono e tecnologias de mitigação no setor energético.

De acordo com o relatório do CCS Brasil (CECS, 2023), a redução das emissões por si só não será suficiente para mitigar os impactos das mudanças climáticas, sendo essencial o desenvolvimento e a implementação de tecnologias de remoção de CO₂. O relatório destaca que, para alcançar os objetivos de neutralidade de carbono até 2050, será necessário capturar e armazenar centenas de milhões de toneladas de CO₂ anualmente. A abordagem de Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS) representa uma solução fundamental que pode ser implementada no prazo necessário. Essa estratégia requer uma abordagem diversificada que inclua tecnologias como captura

direta do ar (DACCS), bioenergia com captura e armazenamento de carbono (BECCS), reflorestamento e outras técnicas de remoção de carbono. Apesar do avanço das tecnologias de CCUS, o relatório aponta também desafios significativos, como custos elevados de implementação, necessidade de incentivos regulatórios, além de garantir infraestrutura para transporte e armazenamento do CO₂ capturado.

Este artigo tem como objetivo principal realizar uma prospecção das tecnologias de CCUS desenvolvidas de 2020 a 2025, com foco nas perspectivas e desafios para a Indústria Energética. A pesquisa analisa as abordagens mais promissoras para remoção, estocagem e utilização de CO₂ atualmente disponíveis no cenário global. Por meio do método *technology roadmapping*, o estudo avalia as características técnicas, a viabilidade econômica e o potencial de escalabilidade dessas tecnologias. A investigação contribui significativamente para o avanço do conhecimento sobre estratégias sustentáveis de mitigação das emissões de gases de efeito estufa, além de identificar os principais desafios ambientais que atualmente limitam a implementação em larga escala dessas soluções na indústria energética.

Este artigo está organizado em seções. A seção 2 apresenta uma breve visão geral de trabalhos relacionados à temática. A seção 3 apresenta o método proposto para a confecção das análises e dados. A seção 4 apresenta resultados e discussão. Finalmente, a seção 5 apresenta as considerações finais.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A crescente atenção global à mitigação das mudanças climáticas impulsionou um notável avanço na pesquisa e desenvolvimento de tecnologias de CCUS. Nesse contexto, a prospecção tecnológica tem desempenhado papel estratégico ao permitir a análise da viabilidade, escalabilidade e maturidade dessas soluções, com destaque para o método do *technology roadmapping* como ferramenta de planejamento tecnológico para o setor energético. A busca por emissões líquidas zero até 2050 demanda uma combinação robusta entre inovação, políticas públicas e infraestrutura, especialmente em setores considerados difíceis de descarbonizar, como siderurgia, cimento, petroquímica e geração termelétrica.

Dziejarski *et al.* (2023); Hekmatmehr *et al.* (2024) analisam o nível de prontidão tecnológica (TRL) de diferentes rotas de captura e separação de CO₂, identificando que a captura por pós-combustão com aminas e a captura por pré-combustão em plantas de gás natural já atingiram o TRL 9, ou seja, estágio comercial. Tecnologias emergentes como *oxy-fuel combustion*, *looping* químico (CLC) e captura direta do ar (DAC) permanecem em estágios de demonstração (TRL 6 a 7), com

forte dependência de pesquisa, desenvolvimento e políticas de incentivo para atingirem a viabilidade comercial. Além disso, os autores destacam que os custos da etapa de captura representam até 70% do investimento total em projetos CCUS, reforçando a necessidade de soluções mais eficientes, adaptadas a diferentes realidades industriais.

No que se refere ao armazenamento de CO₂, Ringrose (2020); Wang *et al.* (2023) destacam que décadas de pesquisa e experiências em projetos pioneiros, como Sleipner e Snøhvit, comprovaram a viabilidade e segurança do armazenamento geológico, especialmente em aquíferos salinos profundos e reservatórios exauridos de petróleo. O autor enfatiza que o sucesso desses projetos está diretamente relacionado à capacidade de modelagem geológica, ao monitoramento contínuo e à integração entre ciência e operação. Essas práticas garantem a contenção de longo prazo por meio de mecanismos naturais como armadilhas capilares e geoquímicas. Nesse sentido, o armazenamento geológico se consolida não apenas como tecnicamente viável, mas como a via mais escalável para contenção permanente do CO₂.

No caso brasileiro, o Relatório CCS Brasil (2023), o estudo da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2023) e a Allah, Marques e Carvalho (2024) reforçam o potencial estratégico do país na implementação de tecnologias CCUS, destacando bacias sedimentares como Santos, Campos, Recôncavo e Potiguar como áreas com alto grau de conhecimento geológico e infraestrutura pré-existente, favorecendo a implantação de projetos. A EPE (2023) estima que o Brasil poderia capturar e armazenar mais de 190 milhões de toneladas de CO₂ por ano, aproveitando inclusive infraestruturas de óleo e gás já existentes para projetos de armazenamento. No entanto, são apontados desafios importantes, como a ausência de marco regulatório específico, a necessidade de expandir a infraestrutura de transporte (dutos e terminais portuários) e o aumento da disponibilidade de dados geofísicos e sísmicos fora do eixo Sudeste. O relatório reforça que, para consolidar o Brasil como um hub regional de CCUS, será essencial integrar iniciativas regulatórias, mecanismos de financiamento público-privado e estratégias voltadas à certificação de créditos de carbono.

3 METODOLOGIA

Neste artigo apresentamos uma proposta a qual consiste em um levantamento bibliográfico sistemático de artigos científicos utilizando o método prospectivo proposto por (Borschiver e Silva, 2016). A abordagem consiste em três etapas: (1) etapa pré-prospectiva, (2) etapa prospectiva e (3) etapa pós-prospectiva como apresenta a Figura 1.

Figura 1 – Pipeline método *technology roadmapping*



Fonte: Borschiver e Silva (2016)

A prospecção tecnológica é um processo essencial para identificar e antecipar mudanças tecnológicas, permitindo a formulação de estratégias voltadas ao desenvolvimento econômico, social e científico (Coelho, 2003). Mais do que prever o futuro, os estudos prospectivos buscam traçar cenários possíveis, oferecendo suporte para escolhas estratégicas que possam contribuir positivamente para a inovação e a competitividade (Mayeroff, 2008). O avanço tecnológico deve estar alinhado às demandas da sociedade e do mercado, garantindo que os investimentos em pesquisa e desenvolvimento resultem em soluções aplicáveis e de alto impacto (Cruz *et al.*, 2021). Dessa forma, a prospecção tecnológica torna-se uma ferramenta indispensável para a identificação de novas tecnologias e a exploração de oportunidades de investimento no setor de CCUS na indústria energética. Além de impulsionar a sustentabilidade e o crescimento industrial e econômico, essa abordagem contribui de maneira decisiva para a promoção da responsabilidade ambiental.

Considerando o conceito de prospecção tecnológica, este trabalho adotou como metodologia o modelo proposto por Borschiver e Silva (2016), que é estruturado em três etapas principais: Pré-prospectiva, Prospectiva e Pós-prospectiva. Em seguida, apresentamos cada uma dessas etapas.

3.1 Etapa Pré-prospectiva.

A etapa Pré-prospectiva foi conduzida por meio de uma busca exploratória na base de pesquisa do *Google*, com o objetivo de identificar as primeiras referências teóricas sobre CCUS para adquirir um breve conhecimento básico sobre o assunto (Definição dos objetivos e escopo). Os resultados dessa etapa serviram como base para orientar as fases subsequentes, permitindo a condução de pesquisas e abordagens com maior criticidade e foco estratégico (Coleta das informações e dados). Dessa forma, a busca preliminar foi fundamental para definir as palavras-chave específicas que seriam utilizadas nas buscas orientadas na etapa prospectiva.

Para estabelecer um primeiro contato com a temática, foram utilizadas palavras-chave em inglês que possibilitaram o mapeamento de um número significativo de resultados na área, contribuindo para o embasamento teórico da pesquisa. Entre os termos de referência empregados na fase inicial destacam-se: *Carbon Capture and Storage* (CCS), *Carbon Capture, Utilisation and Storage* (CCUS), *Bioenergy with Carbon Capture and Storage* (BECCS), CO₂, e *Carbon Management and Capture Technologies*.

A primeira busca serviu como base para a estruturação de toda a metodologia de prospecção tecnológica aplicada nas etapas seguintes do trabalho. A partir dessa etapa inicial, foi possível definir com maior precisão as estratégias de busca e os critérios de seleção de documentos, além de identificar as palavras-chave e os filtros mais adequados para serem utilizados na segunda fase da pesquisa.

3.2 Etapa Prospectiva

A etapa Prospectiva foi conduzida por meio de uma busca sistemática em bases acadêmicas, como o Google Acadêmico e o *Web of Science* (WOS), com o objetivo de identificar as principais referências teóricas relevantes sobre CCUS. Foram realizadas buscas orientadas nas bases de dados acadêmicas utilizando as palavras-chave mencionadas anteriormente, empregando aspas para localizar as expressões exatas, bem como os operadores lógicos “AND” e “OR”, a fim de refinar os resultados e garantir maior precisão na recuperação dos documentos mais relevantes. Fez-se uso de filtros para busca nos campos de título, resumo ou palavra-chave, entre os anos de 2020 a 2025, e restrição de resultados somente a artigos de pesquisa e de revisão. Para garantir uma análise abrangente, palavras-chave em inglês combinado com operadores lógicos permitiram mapear um grande número de estudos na área, foram: “CO₂” AND/OR “capture” AND/OR “storage”; “Technological innovation” AND/OR “CCUS”; “Technological prospecting” AND/OR “capture” AND/OR “storage” AND/OR “carbon dioxide”; “Types of CO₂” AND/OR “storage” AND/OR “economy CCUS”.

A partir dos resultados obtidos nas buscas, os artigos considerados mais relevantes no estágio atual da pesquisa foram selecionados e analisados. Com base nesse material, foram realizadas análises em três níveis distintos — macro, meso e micro — conforme descrito a seguir.

3.2.1 Análise Macro

A organização sistemática dos resultados provenientes das buscas realizadas nas bases de dados de artigos permitiu a identificação da evolução temporal quantitativa ao longo do período analisado. Além disso, foi possível traçar o perfil geográfico do interesse na captura, armazenamento e utilização de CO₂, com base na análise dos países que mais produzem documentos sobre o tema. Para essa investigação, foram considerados todos os documentos encontrados entre 2020 e 2025 em cada base e para cada palavra-chave, possibilitando uma visão mais abrangente do assunto. No entanto, devido ao grande volume de documentos recuperados e à necessidade de uma leitura detalhada para as análises em nível meso e micro, as etapas subsequentes foram conduzidas apenas para um subconjunto dos documentos, selecionados conforme os filtros de pesquisa que serão apresentados na próxima seção.

3.2.2 Análise Meso

Na análise meso, foi realizada uma avaliação crítica dos documentos identificados. Para filtrar a quantidade de materiais analisados, artigos foram classificados por relevância, sendo selecionados os 20 primeiros de cada busca para leitura detalhada. Documentos que não estavam diretamente relacionados ao tema foram excluídos. No total, 60 artigos científicos foram escolhidos para análise aprofundada, seguindo critérios como: relevância nos resultados de busca, conforme o filtro “Ordenar por: relevância” das bases de conhecimento, e a presença entre os 20 principais resultados em múltiplas buscas.

A partir dos documentos selecionados, foi organizada uma base de dados na qual os documentos foram classificados de acordo com uma proposta de taxonomia. A definição dessas categorias foi baseada na identificação dos principais temas recorrentes nos documentos analisados, permitindo a organização das informações de forma estruturada e alinhada aos objetivos. Dessa forma, estabeleceu-se uma proposta de categorização: (1) Tecnologia, (2) Viabilidade e (3) Escalabilidade.

3.2.3 Análise Micro

Na etapa da análise micro são criadas subcategorias estabelecidas na meso. Para a execução dessa etapa, foi realizada uma análise detalhada de cada documento selecionado. Essa leitura possibilitou a identificação, compreensão e caracterização de uma ou mais subcategorias, com base

nas seguintes categorias e suas respectivas divisões. Na tabela 1 apresentamos a proposta da taxonomia da análise a nível micro.

Tabela 1- Proposta da taxonomia para CCUS para o método *technology roadmapping*

Taxonomia		
Etapa Meso		Etapa Micro
	Detalhes sobre a taxonomia	Subcategorias da análise
Tecnologias	Refere-se aos métodos utilizados para capturar, utilizar e armazenar CO ₂	Princípios e funcionamento
		Eficiência
		Materiais utilizados
		Requisitos operacionais
		limitações
		Avanços recentes
		Tendências
Viabilidade	Avaliação dos fatores determinantes a possibilidade de implementação das tecnologias de CCS/CCUS	Custos operacionais
		Implementação
		Comparação entre tecnologias
		Barreiras de adoção
Escalabilidade	Capacidade das tecnologias de CCS/CCUS de serem aplicadas	Desafios de implementação em larga escala
		Exigências de infraestrutura
		Maturidade da tecnologia (Tchnology Readness Level - TRL)
		Aceitação social
		Impactos regulatórios

Fonte: Do próprio autor (2025)

3.3. Etapa Pós-Prospectiva

A etapa Pós-prospectiva consistiu na utilização de todos os artigos selecionados durante a fase Prospectiva para a construção de um *roadmap* tecnológico. Esse *roadmap* tem como objetivo prever tendências e delinear possíveis cenários futuros relacionados ao desenvolvimento e à aplicação das tecnologias analisadas. No eixo vertical estão representadas as categorias da análise a nível meso e as subcategorias da análise a nível micro que foram utilizadas para classificar as temáticas principais abordadas por cada documento. Estas estão dispostas na parte esquerda do *roadmap*, em duas colunas. Já o eixo horizontal apresenta as categorias cronológicas às quais os documentos estão associados, representando o estágio atual. Assim, este eixo é dividido em 2 partes: estágio de curto prazo e longo prazo, da esquerda para a direita. Para o preenchimento do *roadmap*, foram utilizadas informações presentes nos 60 artigos, encontrados e selecionados anteriormente.

As tecnologias são dispostas horizontalmente no *roadmap*, organizadas em suas respectivas divisões e de acordo com a cronologia estabelecida. A associação com as taxonomias nos níveis meso e micro é representada por setas, cujo corpo se estende verticalmente, conectando cada tecnologia às categorias correspondentes. Dessa forma, é possível visualizar de maneira clara em quais taxonomias cada tecnologia se encaixa, permitindo uma leitura estruturada e estratégica do cenário tecnológico.

4 ANÁLISES E DISCUSSÕES

Nesta seção, serão apresentados os resultados obtidos ao longo das três etapas da prospecção tecnológica: Pré-Prospectiva, Prospectiva — com análises nos níveis macro, meso e micro — e Pós-Prospectiva, culminando na construção do *roadmap* tecnológico.

4.1 Pré-Prospectiva

A busca não sistemática realizada no *Google* utilizando os termos definidos na metodologia permitiu identificar as principais fontes de informação sobre CCUS. Os resultados indicaram que a maior parte do conhecimento disponível sobre o tema está concentrada em artigos científicos e trabalhos acadêmicos, como dissertações e teses. No entanto, outras fontes também se mostraram relevantes, incluindo notícias relacionadas às mudanças climáticas, publicações em *websites* de veículos de comunicação e empresas do setor, bem como relatórios técnicos elaborados por agências governamentais, organizações não governamentais e instituições de pesquisa.

A partir dessa análise preliminar, constatou-se a necessidade de refinar cuidadosamente a estratégia de busca nas etapas subsequentes, a fim de assegurar a seleção de documentos com maior rigor metodológico e relevância científica. Inicialmente, havia a intenção de utilizar quatro palavras-chave principais para a busca de artigos em bases acadêmicas. No entanto, observou-se que o volume de documentos recuperados era excessivamente abrangente, englobando um número significativo de publicações cujo escopo, em diversos casos, não apresentava uma correlação direta com o objeto de investigação.

Dessa forma, a etapa pré-prospectiva foi fundamental para ajustar a metodologia da pesquisa, permitindo a definição de palavras-chave mais específicas e a aplicação de filtros rigorosos nas bases acadêmicas utilizadas na etapa prospectiva. Esse refinamento garantirá uma seleção mais precisa de artigos relevantes, evitando a inclusão de publicações que não abordam diretamente as tecnologias de CCUS. Além disso, os *insights* obtidos nessa fase inicial forneceram um direcionamento mais

estratégico para a estruturação da prospecção tecnológica, garantindo que as próximas etapas sejam conduzidas com maior objetividade e critério.

4.2 Etapa Prospectiva

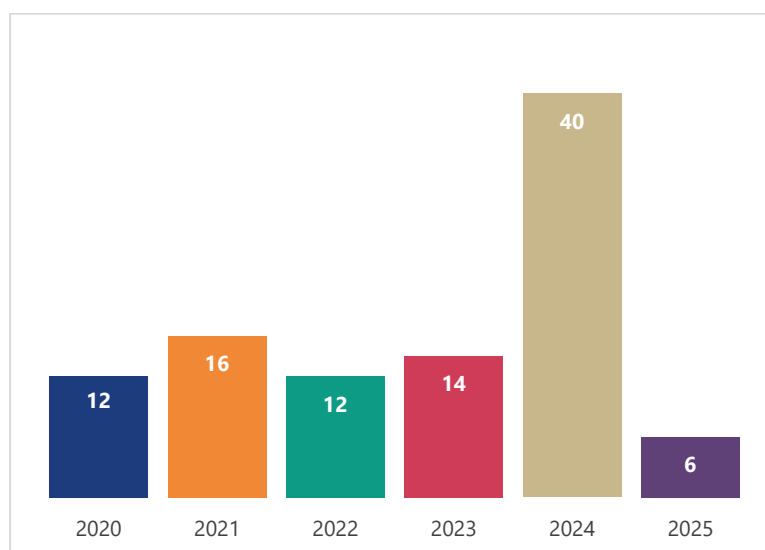
A seguir, são apresentados os resultados obtidos por meio da busca direcionada por artigos científicos e de revisão em bases acadêmicas. Além disso, são detalhadas as principais informações sobre as tecnologias atualmente empregadas no CCUS.

4.2.1 Análise Macro

Na etapa prospectiva a busca sistemática realizada em bases acadêmicas resultou em um grande volume de publicações sobre CCUS. No entanto, após a aplicação de refinamentos por relevância, período de publicação (2020-2025), tipo de documento (artigo científico e de revisão), foram selecionados 100 artigos para análise nas etapas subsequentes.

Os 100 artigos analisados permitiram a identificação das tendências temporais da produção científica sobre CCUS, bem como a distribuição geográfica dos países que mais fomentam pesquisas sobre o tema. Além disso, essa análise possibilitou uma visão aprofundada sobre as tecnologias mais relevantes e os principais desafios enfrentados para a implementação dessas soluções na indústria energética, considerando as particularidades de cada região.

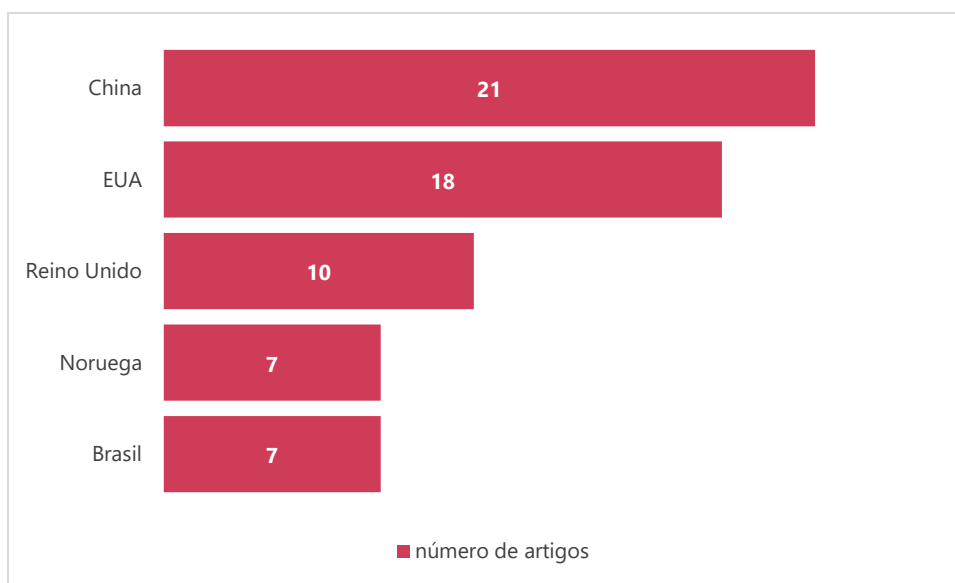
Gráfico 1 - Distribuição das Publicações por Ano



Fonte: Do próprio autor (2025)

O gráfico 1, demonstra um crescimento significativo no volume de publicações científicas sobre CCUS nos últimos anos. O número de artigos publicados manteve-se relativamente estável entre 2020 e 2023, variando entre 12 e 16 publicações anuais. Contudo, observa-se um salto expressivo em 2024, com 40 artigos publicados, evidenciando um aumento substancial no interesse pelo tema. Esse crescimento pode estar associado ao avanço das políticas globais de descarbonização, à crescente urgência na mitigação das emissões de CO₂ e ao fortalecimento de iniciativas governamentais e privadas voltadas à transição energética para um modelo mais sustentável. Já em 2025, apenas 6 artigos foram contabilizados até o momento, o que pode ser justificado pelo fato de que muitos estudos ainda estão em processo de publicação.

Gráfico 2 - Número de Publicações por País



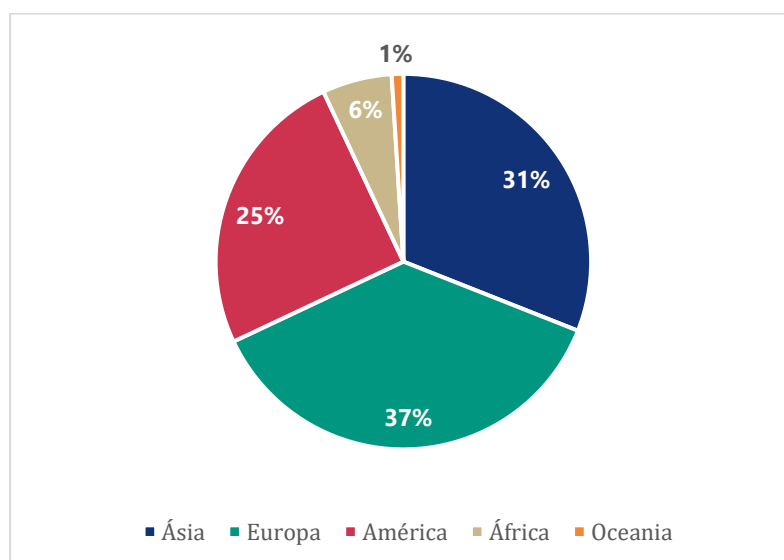
Fonte: Do próprio autor (2025)

O Gráfico 2 destaca os cinco países que mais produziram conhecimento sobre CCUS. A China (21 artigos) e os Estados Unidos (18 artigos) lideram as publicações, seguidos pelo Reino Unido (10 artigos), Noruega (7 artigos) e Brasil (7 artigos). A liderança da China e dos EUA pode ser explicada pelo alto volume de emissões de CO₂ desses países e pelo investimento em tecnologias de captura, armazenamento e utilização de carbono como estratégia para atender às metas de redução de emissões. O Reino Unido e a Noruega, por sua vez, possuem políticas ambientais rigorosas e um histórico de desenvolvimento de tecnologias sustentáveis. O Brasil surge como um destaque na América Latina, demonstrando crescente interesse na área, possivelmente impulsionado pelo

potencial de armazenamento de CO₂ em reservatórios geológicos e pela crescente busca por soluções sustentáveis no setor energético.

Apesar do Brasil apresentar um número significativo de publicações científicas e possuir um grande potencial para se tornar um *hub* de armazenamento de CO₂, especialmente em reservatórios depletados de óleo e gás em bacias sedimentares maduras, onde já existem estudos detalhados sobre as formações geológicas, a implementação prática da tecnologia de CCS ainda enfrenta desafios substanciais. Atualmente, não há projetos de CCS operacionais no país, e a única iniciativa de CCUS em desenvolvimento ocorre no pré-sal brasileiro, onde o CO₂ capturado é reinjetado em reservatórios para Recuperação Avançada de Petróleo (EOR), visando aumentar a eficiência da extração de hidrocarbonetos. Para consolidar o Brasil como um líder global na tecnologia CCS, será essencial superar barreiras regulatórias, econômicas e de infraestrutura.

Gráfico 3 – Distribuição das publicações por Continente



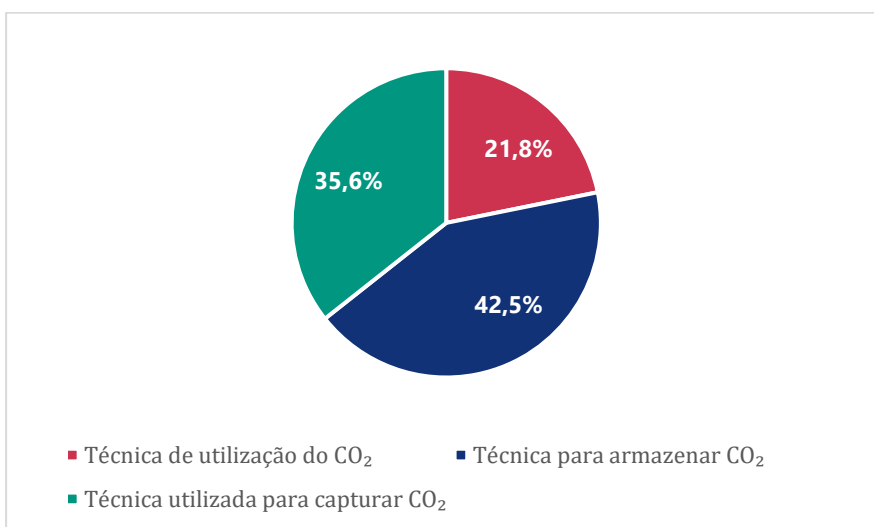
Fonte: Do próprio autor (2025)

O Gráfico 3 reforça a predominância da Europa (37%), seguida pela Ásia (31%) e América (25%), como as regiões que mais produzem conhecimento sobre CCUS. O investimento europeu em pesquisas voltadas para transição energética e redução das emissões pode explicar essa alta representatividade. Em contrapartida, as publicações oriundas da África (6%) e Oceania (1%) são significativamente menores, possivelmente devido à menor infraestrutura de pesquisa voltada para esse tema e à dependência de financiamento externo para o desenvolvimento de tecnologias de CCS.

4.2.2 Análise Meso

A análise realizada neste estudo permitiu uma avaliação detalhada das tecnologias de CCUS, bem como uma discussão crítica sobre sua viabilidade de implementação e os desafios enfrentados pela indústria energética. A partir dos 100 artigos identificados na etapa macro, foram selecionados 60 documentos para análise aprofundada, utilizando critérios de relevância e presença nos primeiros resultados das buscas. Os documentos foram organizados em três propostas de categoria taxonômica: tecnologias, viabilidade e escalabilidade, permitindo uma compreensão estruturada do panorama atual do desenvolvimento tecnológico em CCUS.

Gráfico 4 - Distribuição das Tecnologias Presentes nos Artigos

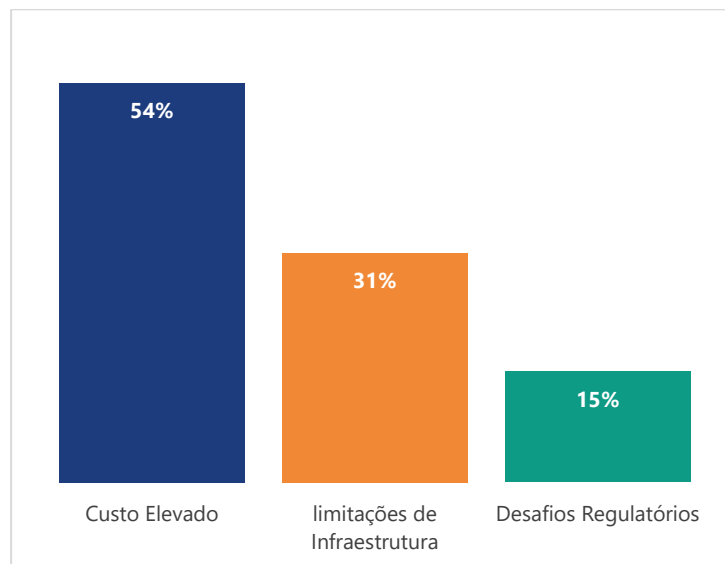


Fonte: Do próprio autor (2025)

A primeira categoria analisada refere-se às tecnologias utilizadas na captura, utilização e armazenamento de CO₂. O levantamento evidenciou que as pesquisas se concentram principalmente na captura de CO₂, representando 42,5% das publicações analisadas, enquanto o armazenamento foi abordado em 35,6% dos estudos e a utilização em 21,8%. Entre as principais tecnologias de captura, destacam-se os métodos pós-combustão, pré-combustão e *oxy-fuel combustion*, que são os mais amplamente empregados na indústria. Tecnologias emergentes, como Captura Direta do Ar (DAC) e *looping* químico (CLC), também foram identificadas, sugerindo um interesse crescente na busca por soluções mais eficientes e sustentáveis. Além disso, o uso de membranas seletivas aparece como uma alternativa promissora para otimizar a separação de CO₂, reduzindo custos e aumentando a eficiência dos processos.

No que se refere à utilização do CO₂, os resultados apontam para três principais abordagens: produção de combustíveis sintéticos, recuperação avançada de petróleo (EOR) e conversão química. A conversão química do CO₂ em produtos de valor agregado, como polímeros e combustíveis sintéticos, tem sido uma estratégia estudada para aumentar a viabilidade econômica da captura de carbono. No entanto, sua aplicação em larga escala ainda encontra desafios relacionados à infraestrutura e ao consumo energético. Em relação ao armazenamento, os artigos analisados destacam a importância dos reservatórios geológicos, como aquíferos salinos profundos, reservatórios de petróleo depletados e basaltos vulcânicos, como as opções mais viáveis. Além disso, técnicas de monitoramento avançado, como a tecnologia InSAR e análise micro sísmica, foram identificadas como fundamentais para garantir a segurança do armazenamento subterrâneo de CO₂.

Gráfico 5 - Principais Fatores Limitantes para Implementação das Tecnologias



Fonte: Do próprio autor (2025)

Apesar do avanço das tecnologias, a viabilidade da implementação do CCUS ainda enfrenta desafios significativos, especialmente no setor industrial. A análise revelou que 54% dos artigos mencionam o alto custo de implementação como o maior obstáculo para a adoção dessas tecnologias em larga escala. Além disso, 31% dos estudos destacam limitações de infraestrutura, indicando que a falta de instalações adequadas representa um entrave para a expansão do CCUS. Outro fator crítico identificado em 15% das publicações diz respeito aos desafios regulatórios, visto que ainda há uma carência de normativas claras e padronizadas para transporte, armazenamento e monitoramento do CO₂ capturado. Esses desafios ressaltam a necessidade de políticas públicas mais robustas e

incentivos governamentais para tornar as tecnologias de CCUS economicamente viáveis e acessíveis para diferentes setores industriais.

Tabela 2 - Nível de Maturidade Tecnológica (TRL) dos Artigos Analisados

Nível de TRL dos Artigos Análisados		
TRL 1-3	Pesquisas em laboratórios acadêmicos e institutos de inovação.	0,0%
TRL 4-6	Projetos pilotos e testes em ambientes simulados (exemplo: captura de CO ₂ em pequena escala).	25,3%
TRL 7-9	Implementação industrial e uso comercial (exemplo: uma usina termoeletrica equipada com captura de carbono operando regularmente).	73,8%

Fonte: Do próprio autor (2025)

Outro aspecto relevante abordado nesta análise foi o nível de maturidade tecnológica (*Technology Readiness Level* – TRL) das soluções de CCUS. Os resultados indicam que 73,8% dos artigos analisados discutem tecnologias em TRL 7-9, ou seja, já em fase de implementação industrial e uso comercial. Tecnologias classificadas como TRL 4-6, que representam projetos piloto e testes em ambientes simulados, foram mencionadas em 25,3% das publicações. Curiosamente, nenhum estudo analisado estava no nível TRL 1-3, sugerindo que a pesquisa acadêmica básica sobre CCUS já foi amplamente explorada nas últimas duas décadas, e que os esforços atuais estão direcionados para a aplicação prática e implementação industrial das tecnologias de captura e armazenamento de carbono.

Os resultados desta etapa indicam que as tecnologias CCUS já atingiram um alto grau de maturidade e viabilidade técnica, mas sua aplicação ainda é limitada por barreiras econômicas, infraestruturais e regulatórias. O avanço dessas tecnologias depende não apenas de melhorias na eficiência dos processos, mas também de estratégias governamentais que incentivem sua adoção por meio de subsídios, créditos de carbono e desenvolvimento de infraestrutura para transporte e armazenamento. Além disso, a colaboração entre indústria, academia e órgãos reguladores será essencial para reduzir custos e acelerar a adoção do CCUS como uma estratégia viável para a descarbonização da matriz energética global.

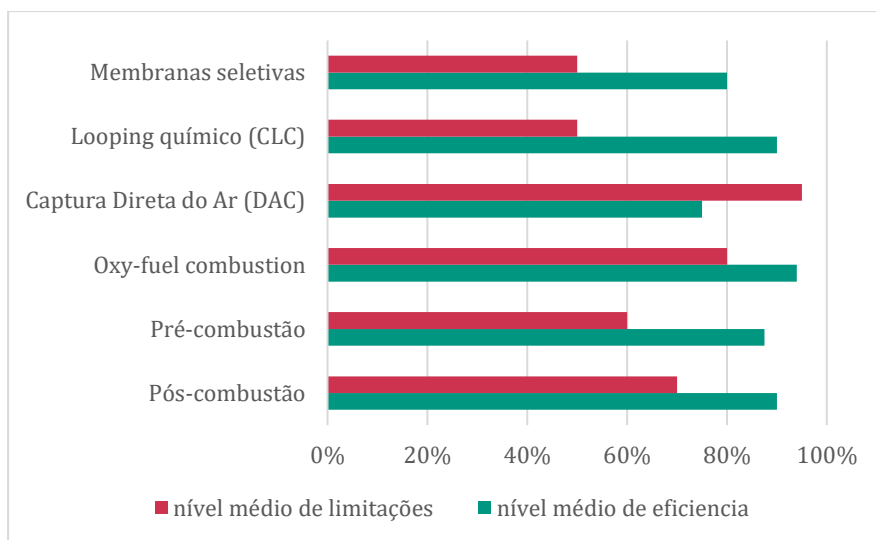
Com base nos resultados desta análise meso, a próxima etapa deste estudo investigará, em maior profundidade, as tendências emergentes, inovações e impactos econômicos das tecnologias de

CCUS, proporcionando uma visão ainda mais detalhada sobre o futuro da captura, armazenamento e utilização de CO₂ na indústria energética.

4.2.3 Análise Micro

A análise micro foi realizada com base em uma leitura aprofundada dos artigos previamente selecionados na etapa meso, permitindo a identificação de características específicas das tecnologias de captura, armazenamento e utilização de CO₂. Para isso, os artigos foram classificados segundo subcategorias detalhadas dentro das taxonomias estabelecidas, conforme apresentado na Tabela 1. Essa abordagem possibilitou uma compreensão mais refinada das inovações, desafios e perspectivas de implementação do CCUS na indústria energética.

Gráfico 6 - Principais Fatores Limitantes para Implementação das Tecnologias



Fonte: Do próprio autor (2025)

Os métodos tradicionais, como pós-combustão e pré-combustão, apresentam eficiência elevada (acima de 85%), sendo amplamente utilizados em processos industriais e em usinas termelétricas. O método *oxy-fuel combustion*, que queima combustível em um ambiente rico em oxigênio, alcança eficiências superiores a 90%, mas tem como principal limitação o alto consumo energético na separação do oxigênio.

Entre as tecnologias emergentes, a Captura Direta do Ar (DAC) oferece a vantagem de remover CO₂ diretamente da atmosfera, sendo uma alternativa promissora para mitigar emissões difusas. No entanto, sua eficiência pode variar amplamente (60-90%) dependendo do tipo de

adsorvente utilizado, e os custos operacionais elevados (US\$ 100-600/t de CO₂ capturado) ainda são um grande entrave para sua implementação comercial. O *looping* químico (CLC) e as membranas seletivas são tecnologias em desenvolvimento, que combinam eficiência moderada a alta (70-95%) com a necessidade de otimizações em escalabilidade e custos. O *looping* químico tem sido testado para aplicações industriais, mas sua maturidade tecnológica ainda se encontra em fase de projetos-piloto (TRL 4-6).

A eficiência da captura de CO₂ é um fator determinante para a escolha da tecnologia mais adequada a cada setor. Métodos como pós-combustão e pré-combustão são preferidos em indústrias com emissões concentradas, como cimento e aço, devido à sua alta eficiência e compatibilidade com infraestruturas existentes. Já a Captura Direta do Ar (DAC), embora promissora para mitigar emissões dispersas, enfrenta desafios relacionados a altos custos operacionais e consumo energético elevado. O avanço dessas tecnologias depende de pesquisa e inovação contínua, visando reduzir custos e aumentar a viabilidade de implementação em larga escala. Dessa forma, a adoção da tecnologia ideal requer um equilíbrio entre eficiência, custo operacional e infraestrutura disponível, garantindo maior aplicabilidade no setor energético e industrial.

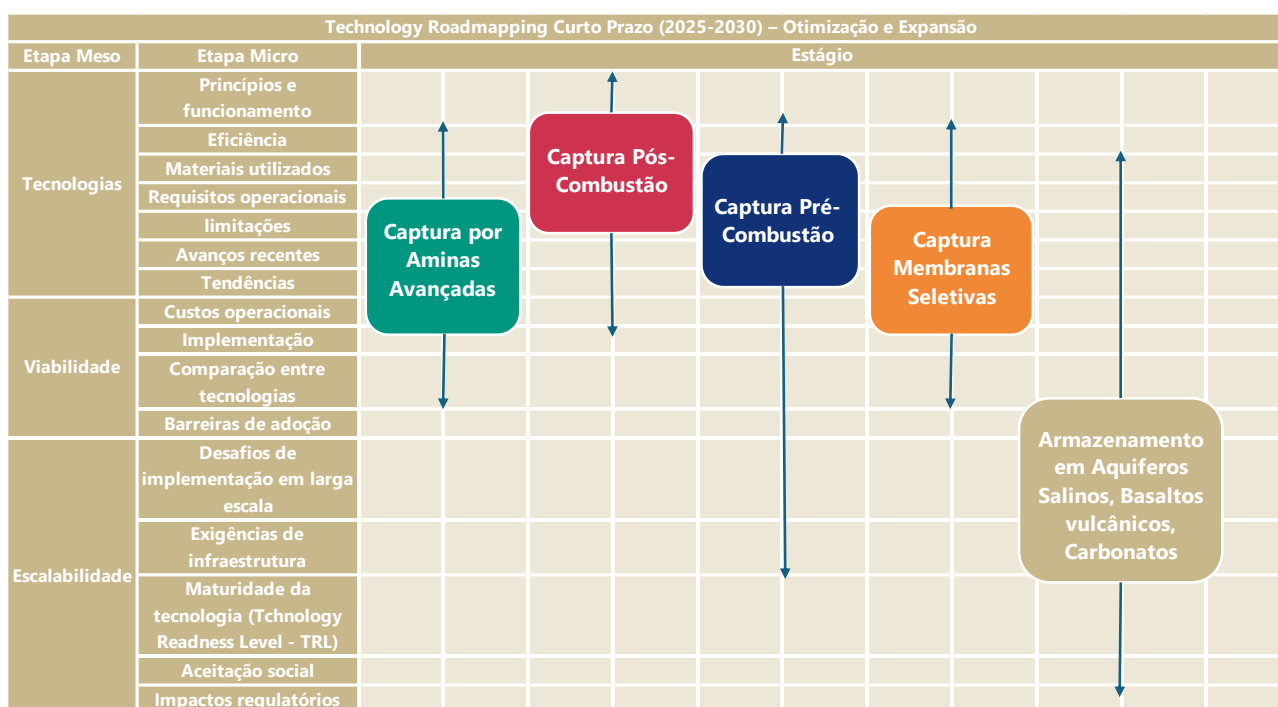
As tecnologias de utilização do CO₂, como produção de combustíveis sintéticos, recuperação avançada de petróleo (EOR) e conversão química, apresentam eficiência entre 60% e 90%, mas ainda enfrentam desafios econômicos e técnicos para adoção em larga escala. A dependência de hidrogênio verde encarece a produção de combustíveis sintéticos, enquanto o EOR pode gerar novas emissões caso o petróleo recuperado seja queimado. Já a conversão química requer maior aceitação industrial e melhorias em eficiência. Apesar do potencial para transformar emissões em produtos úteis, essas tecnologias exigem avanços na infraestrutura e incentivos para viabilizar sua escalabilidade.

As tecnologias de armazenamento de CO₂ são altamente eficientes (75-99%), com destaque para aquíferos salinos profundos, que oferecem maior segurança, mas exigem monitoramento contínuo. Reservatórios de petróleo depletados são viáveis, mas requerem gestão rigorosa para evitar riscos ambientais. Alternativas como basaltos vulcânicos e formações de carbonato promovem a mineralização do CO₂, embora o processo seja lento e dependa da geologia local. O nível de limitação varia entre baixo e médio-alto, dependendo da segurança e viabilidade do local, tornando essencial o desenvolvimento de padrões regulatórios claros para a adoção dessas tecnologias. Os maiores entraves das tecnologias de armazenamento estão relacionados ao monitoramento e principalmente a aceitação social, os padrões regulatórios poderiam incentivar o comércio do carbono e ampliar o assunto.

4.3 Etapa Pós-Prospectiva

O *roadmap* elaborado permite visualizar as tendências tecnológicas e identificar oportunidades de desenvolvimento futuro nesta área para a mitigação das mudanças climáticas. Os materiais de captura de CO₂ e novos processos de CCS são temas de alta relevância tanto no curto prazo quanto no longo prazo. Os *roadmaps* apresentados a seguir representam um resumo da relevância e do papel estratégico dessas tecnologias ao longo de diferentes horizontes temporais

Figura 2 - Technology Roadmapping Curto Prazo (2025-2050)



Fonte: Do próprio autor (2025)

No horizonte de curto prazo (2025-2030), o desenvolvimento das tecnologias de captura e armazenamento de CO₂ (CCS) será direcionado para a otimização dos processos existentes, melhorias na eficiência dos materiais e expansão da infraestrutura. A pesquisa e inovação em materiais avançados para captura de CO₂ terão um impacto significativo na redução dos custos operacionais e no aumento da eficiência. Tecnologias baseadas em aminas avançadas serão aprimoradas para minimizar a degradação química e reduzir o consumo energético, tornando a captura pós-combustão mais eficiente e economicamente viável para aplicação em usinas e setores industriais de alta emissão. Paralelamente, o avanço das membranas seletivas permitirá uma separação mais rápida e eficiente do CO₂, reduzindo os custos operacionais. Outra abordagem promissora envolve o uso de adsorventes

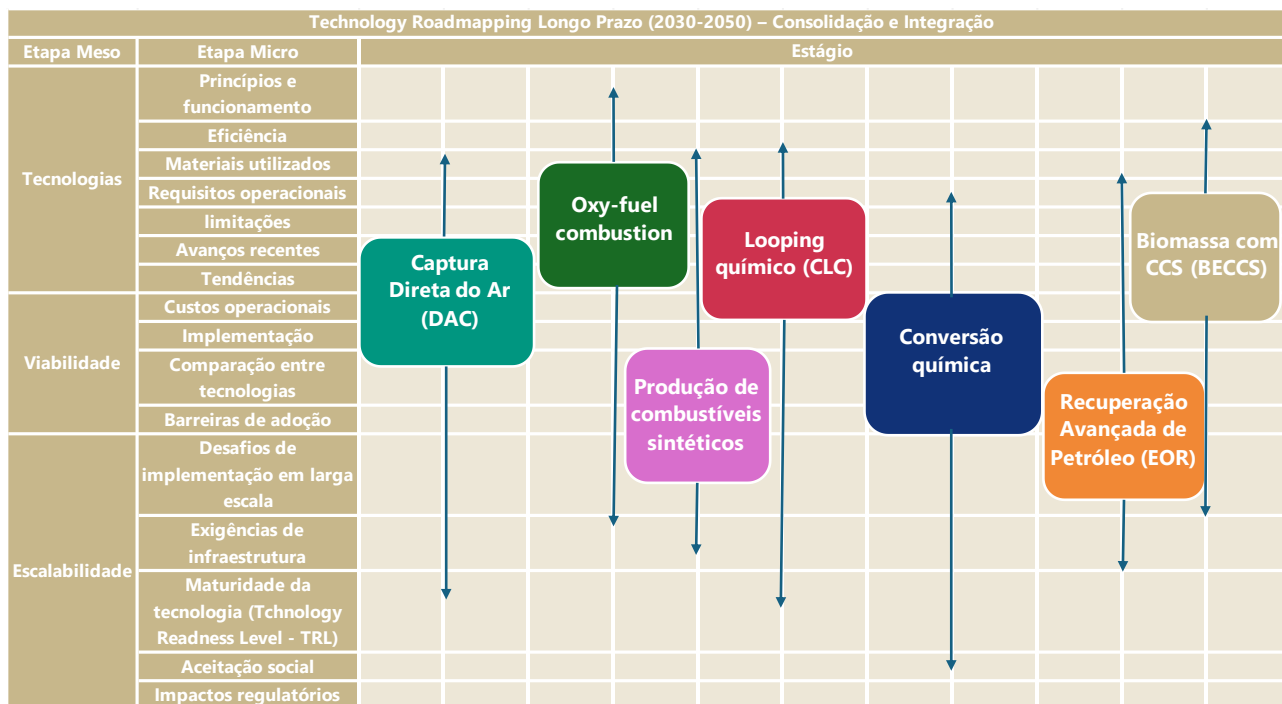
sólidos, que oferecem maior capacidade de captura e regeneração, diminuindo o impacto ambiental dos processos de separação.

Além da inovação em materiais, a otimização de processos de captura será um dos principais objetivos desse período. A captura por pós-combustão continuará sendo uma das abordagens mais viáveis para integração em usinas termelétricas e instalações industriais, permitindo a adaptação de sistemas já existentes sem necessidade de grandes modificações na infraestrutura. Outra tendência será a integração do CCS com a produção de hidrogênio azul, permitindo a redução das emissões de carbono associadas ao uso do gás natural, tornando a transição energética mais sustentável. Essas melhorias permitirão reduzir as barreiras econômicas e aumentar a aceitação das tecnologias de CCS no setor energético.

A viabilização dessas tecnologias dependerá fortemente da expansão da infraestrutura de CCS e da implementação de incentivos econômicos e regulatórios. O desenvolvimento de *hubs* industriais de CCS facilitará o compartilhamento de infraestrutura entre múltiplos setores, reduzindo custos e aumentando a eficiência do transporte e armazenamento do CO₂ capturado. Para incentivar a adoção em larga escala, políticas de precificação de carbono e subsídios governamentais serão fundamentais para tornar as tecnologias economicamente competitivas. No que diz respeito ao armazenamento, o uso de aquíferos salinos profundos, basaltos vulcânicos e formações carbonáticas continuará sendo uma das principais estratégias para a fixação segura e permanente do CO₂, minimizando riscos de vazamento e contribuindo para a estabilidade ambiental dos depósitos.

Dessa forma, o período entre 2025 e 2030 será marcado pela expansão e aprimoramento das tecnologias de CCS, promovendo avanços tanto na eficiência dos materiais e processos quanto na infraestrutura e viabilidade econômica. A combinação dessas estratégias permitirá que o CCS avance para uma fase de consolidação como ferramenta essencial para a mitigação das emissões industriais e energéticas, desempenhando um papel fundamental na redução do impacto ambiental e no avanço da economia de baixo carbono.

Figura 3 - Technology Roadmapping Longo Prazo (2030-2050)



Fonte: Do próprio autor (2025)

As tendências tecnológicas para CCUS entre 2030 e 2050 refletem um avanço significativo na eficiência, viabilidade econômica e integração com sistemas de energia e indústria. No longo prazo, espera-se que o CCUS se torne uma tecnologia amplamente implementada, com custos reduzidos e aplicação em setores estratégicos para a descarbonização global. Entre as principais tendências, destacam-se a melhoria dos processos de captura, a expansão da infraestrutura de armazenamento e transporte, a utilização do CO₂ para geração de valor e a consolidação do CCUS como parte de políticas climáticas e de economia circular.

No que diz respeito à captura de CO₂, as tendências apontam para o desenvolvimento de novos materiais e processos mais eficientes, reduzindo o consumo energético e os custos operacionais. Tecnologias emergentes, como membranas seletivas, adsorventes sólidos (MOFs, zeólitas) e líquidos iônicos híbridos, devem se tornar mais comuns, permitindo uma captura mais seletiva e econômica. Além disso, a Captura Direta do Ar (DAC), embora atualmente tenha custos elevados, tende a se tornar mais acessível e escalável, impulsionada pelo avanço de adsorventes de alta seletividade e regeneração térmica otimizada. A integração da captura criogênica em processos industriais também se destaca, especialmente para aplicações que requerem separação eficiente de CO₂ em misturas gasosas complexas.

No setor de armazenamento de CO₂, há uma forte tendência para o desenvolvimento de soluções geológicas avançadas, incluindo a carbonatação mineral em basaltos e reservatórios oceânicos profundos. O armazenamento em aquíferos salinos e reservatórios de petróleo depletados continuará sendo uma opção viável, mas será complementado por novos métodos de mineralização acelerada, que permitirão a fixação permanente do CO₂ com menor risco de vazamento. Paralelamente, o avanço de sensores remotos e tecnologias de monitoramento, como InSAR e micro sismologia, garantirá maior segurança no armazenamento subterrâneo, atendendo às demandas regulatórias e sociais por um controle rigoroso da integridade dos reservatórios.

A utilização do CO₂ capturado ganhará destaque à medida que novos processos de conversão química e biotecnológica forem aprimorados. O desenvolvimento de catalisadores avançados para transformar CO₂ em combustíveis sintéticos, plásticos e insumos químicos se tornará uma alternativa viável para agregar valor ao carbono capturado. A tendência de integração do CCUS com a economia circular permitirá a reutilização do CO₂ em processos industriais e agrícolas, criando um mercado secundário de carbono, reduzindo desperdícios e promovendo a descarbonização de múltiplos setores. Além disso, a integração com a produção de hidrogênio azul e verde proporcionará um ciclo energético mais sustentável, com menor impacto ambiental e maior eficiência na utilização dos recursos energéticos.

A infraestrutura de CCUS também passará por uma expansão global, com a construção de redes interligadas de transporte de CO₂ via dutos internacionais e o desenvolvimento de *hubs* estratégicos de armazenamento *offshore*. O estabelecimento de corredores de transporte de CO₂ permitirá que diversos países compartilhem a infraestrutura, otimizando custos e garantindo a viabilidade econômica do armazenamento em larga escala. Essa tendência será impulsionada por políticas de precificação de carbono e incentivos regulatórios, que estimulam investimentos na criação de uma infraestrutura global para o CCUS.

Por fim, a maturidade tecnológica e a aceitação social das soluções de CCUS aumentarão progressivamente, consolidando essa tecnologia como uma das principais estratégias para mitigar as mudanças climáticas. No longo prazo, espera-se que o CCUS esteja totalmente integrado às políticas ambientais globais, sendo utilizado como ferramenta essencial para atingir metas de emissões líquidas zero. A criação de normativas internacionais padronizadas, associada ao desenvolvimento de modelos econômicos mais acessíveis, permitirá que essa tecnologia seja implementada em diversas indústrias, garantindo sua viabilidade a longo prazo.

Dessa forma, as tendências para 2030-2050 apontam para um cenário onde o CCUS não apenas mitigará as emissões de carbono, mas também se tornará um componente essencial da economia global, viabilizando novas cadeias produtivas e incentivando uma transição energética mais sustentável e eficiente.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A prospecção tecnológica para o CCUS, apresentada neste estudo, possibilitou o mapeamento das principais tendências e desafios relacionados à implementação dessas tecnologias no setor energético. A partir do método *Technology Roadmapping*, foi possível identificar os avanços recentes, as barreiras técnicas e econômicas, bem como as perspectivas futuras para a consolidação do CCUS como uma ferramenta essencial na mitigação das mudanças climáticas e na transição para uma economia de baixo carbono.

A prospecção tecnológica para CCUS revelou que, no curto prazo (2025-2030), os avanços estarão focados na otimização de materiais e processos, como o aprimoramento de aminas avançadas, membranas seletivas e adsorventes sólidos. Além disso, a expansão da infraestrutura de CCS, com a criação de *hubs* industriais e políticas de precificação de carbono, será essencial para viabilizar sua implementação em larga escala. Já no longo prazo (2030-2050), tecnologias como Captura Direta do Ar (DAC) e biomassa com CCS (BECCS) ganharão relevância, contribuindo para emissões líquidas negativas. O armazenamento geológico em basaltos vulcânicos e aquíferos salinos profundos também será aprimorado, garantindo maior segurança na fixação do CO₂.

Apesar dos avanços, desafios como altos custos operacionais, infraestrutura limitada, barreiras regulatórias e resistência social ainda precisam ser superados para que o CCUS se torne uma solução amplamente adotada. A criação de normativas internacionais e incentivos financeiros será determinante para a expansão global dessas tecnologias. O Brasil, com seu potencial energético e capacidade de armazenamento geológico, pode desempenhar um papel estratégico na implementação do CCUS na América Latina. Assim, o avanço dessas tecnologias, aliado a políticas públicas eficazes, será essencial para o cumprimento das metas climáticas e a construção de um modelo energético mais sustentável.

Como trabalho futuro, sugere-se a ampliação desta pesquisa por meio da aplicação da metodologia de prospecção tecnológica em estudos de caso voltados à realidade brasileira, especialmente em regiões com elevado potencial de armazenamento geológico de CO₂. Além disso, é recomendada a análise da integração das tecnologias de CCUS com outras soluções de

descarbonização, como o uso de hidrogênio verde e iniciativas de economia circular. A construção de *roadmaps* regionais, alinhados às metas climáticas nacionais e políticas públicas, poderá contribuir significativamente para o fortalecimento da estratégia de transição energética do país. Tais estudos também podem aprofundar a avaliação dos aspectos regulatórios, econômicos e sociais que ainda representam barreiras à implementação em larga escala, promovendo, assim, o avanço efetivo das tecnologias de captura, utilização e armazenamento de carbono no contexto latino-americano.

REFERÊNCIAS

ALLAH, F.; MARQUES, A. da Silva; CARVALHO, M. *Current status, challenges and future prospects of carbon capture and storage (CCS) for thermal power plants* in Brazil. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, v. 136, p. 104198, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2024.104198>. Acesso em: 20 fev. 2025.

BORSCHIVER, Samuel; SILVA, Andrea. **Technology Roadmap – Planejamento estratégico para alinhar mercado-produto-tecnologia**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2016.

CENTRO DE EXCELÊNCIA EM CAPTURA E ARMAZENAMENTO DE CARBONO (CECS). **Relatório anual CCS Brasil 2022/2023**. Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: https://www.ccsbr.com.br/_files/ugd/11a7f0_f79d8b3570e04429974fa4a67d444881.pdf. Acesso em: 03 mar. 2025.

CERRI, C. E. P.; ABBRUZZINI, T. F.; CARVALHO, J. L. N.; CHERUBIN, M. R.; FRAZÃO, L. A.; MAIA, S. M. F.; OLIVEIRA, D. M. S. **Matéria orgânica do solo e o equilíbrio global de carbono**. In: Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical. 1. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2023. p. 211–654.

DZIEJARSKI, B.; KRZYŻYŃSKA, R.; ANDERSSON, K. *Current status of carbon capture, utilization, and storage technologies in the global economy: a survey of technical assessment*. *Fuel*, v. 342, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127776>.

COELHO, G. M. **Prospecção tecnológica: metodologias e experiências nacionais e internacionais**. Rio de Janeiro: INT, 2003.

CRUZ, Tatiane Tobias da; BALESTIERI, José A. Perrella; SILVA, João M. de Toledo; VILANOVA, Mateus R. N.; OLIVEIRA, Otávio J.; ÁVILA, Ivonete. *Life cycle assessment of carbon capture and storage/utilization: from current state to future research directions and opportunities*. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, v. 108, p. 103309, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2021.103309>. Acesso em: 25 fev. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Captura, Armazenamento e Utilização de Carbono no Brasil: Contribuições para a seleção de áreas de interesse**. Superintendência de Petróleo e Gás Natural, 2024.

HEKMATMEHR, H.; ESMAEILI, A.; POURMAHDI, M.; ATASHROUZ, S.; ABEDI, A.; ABUSWER, M. Ali; NEDELJKOVIC, D.; LATIFI, M.; FARAG, S.; MOHADDESPOUR, A. *Carbon capture technologies: A review on technology readiness level*. *Fuel*, v. 363, p. 130898, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.130898>. Acesso em: 26 fev. 2025.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva: IPCC, 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>. Acesso em: 21 mar. 2025.

MAYERHOFF, Z. D. V. L. **Uma análise sobre os estudos de prospecção tecnológica. Cadernos de Prospecção.** Salvador, v. 1, n. 1, p. 7-9, 2008.

RINGROSE, Philip. ***How to Store CO₂ Underground: Insights from Early-Mover CCS Projects.*** SpringerBriefs in Earth Sciences. Springer Nature Switzerland AG, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-33113-9>

UNITED NATIONS. ***The Paris Agreement.*** New York: UN, 2015. Disponível em: <https://www.un.org/en/climatechange/paris-agreement>. Acesso em: 22 fev. 2025.

WANG, Kai; LV, Weifeng; JI, Zemin; JIA, Ninghong; NI, Shumin; JIANG, Wen; CAO, Jinhong; ZHANG, Moxi. ***A Study on the Dissolution Behavior of Typical Minerals in Continental Deposited Reservoirs during CO₂ Geological Storage.*** Energies, v. 16, n. 7560, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en16227560>. Acesso em: 23 fev.2025.

AGRADECIMENTO

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, por me conceder o dom da vida e por conduzir cada passo da minha trajetória. Hoje, sinto-me realizada pelos planos Dele em minha vida e pelas conquistas que só foram possíveis graças à Sua presença constante.

Dedico este trabalho à minha mãe, Cláudia Cardoso, mulher forte, inspiradora e incansável. Ela acreditou em cada um dos meus sonhos e me deu a oportunidade de realizá-los. Esta vitória é nossa. Agradeço também à minha mãe de coração, Conceição Medeiros, por seu cuidado, amor e presença em todos os momentos. Ao meu padrinho, Nildo Wanzeller, minha eterna gratidão por suas palavras de incentivo e por acreditar em mim, mesmo quando nem eu mesma acreditava. Vocês foram meu alicerce e minha coragem.

Sou imensamente grata ao meu orientador, Prof. Dr. Silvério Sirotheau, por sua dedicação, paciência e profissionalismo. Mais do que orientar, ele me ensinou que não posso abraçar o mundo, mesmo acreditando que ele cabe na palma da minha mão. Suas palavras e direcionamentos foram fundamentais para que eu encontrasse o caminho que desejo seguir.

Agradeço, com carinho, a toda a minha família, que mesmo à distância sempre apoiou meus sonhos. Aos meus amigos de graduação, Lucas Rodrigo Freitas, Maria Eduarda Lemos e Juliana Neves, obrigada por tornarem essa jornada mais leve, divertida e cheia de boas lembranças. Às minhas amigas de infância, Ana Clara Assis e Luciana Alves, obrigada por estarem comigo em todos os ciclos da minha vida, inclusive neste, mesmo que tenham me julgado por escolher a engenharia ao invés da área da saúde.

Um agradecimento especial ao Professor José de Luna, que nunca permitiu que eu desistisse, mesmo nas vezes em que entrei chorando, dizendo que deveria ter feito psicologia. Ao Professor Edinaldo Teixeira, obrigada por me mostrar o quanto sou necessária e por reforçar que a proatividade é uma força transformadora. Como ele mesmo diz: “Engenheiro não pode ser tolo!”

Sou grata ao Laboratório de Inovação Interdisciplinar (LABX) e ao Laboratório de Ensino de Sedimentologia Aplicada (LSED) pela acolhida e pela oportunidade de conhecer mais de perto a vida acadêmica.

Agradeço ainda aos membros da banca, por gentilmente aceitarem o convite e contribuírem com seu conhecimento para este trabalho.

Por fim, embora tenha citado alguns nomes, estendo minha gratidão a todos que fizeram parte deste ciclo da minha vida. Cada um foi essencial nessa jornada, e levo comigo o aprendizado e o carinho de todos. Que venham os próximos capítulos! Como disse Clarice Lispector: *“Depois do medo, vem o mundo”*. Hoje, não tenho mais medo. Estou pronta para tudo o que está por vir, pois sei que o futuro é promissor.