

# ROTAS TECNOLÓGICAS

CAPTURA E UTILIZAÇÃO DE CO<sub>2</sub>  
COMO MATÉRIA-PRIMA PARA GERAÇÃO  
DE COMBUSTÍVEIS



## ROTAS TECNOLÓGICAS

CAPTURA E UTILIZAÇÃO DE CO<sub>2</sub>  
COMO MATÉRIA-PRIMA PARA GERAÇÃO  
DE COMBUSTÍVEIS

**CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA – CNI**

*Antonio Ricardo Alvarez Alban*  
Presidente

**Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial - SENAI**

*Antonio Ricardo Alvarez Alban*  
Presidente do Conselho Nacional

**SENAI – Departamento Nacional**

*Gustavo Leal Sales Filho*  
Diretor-Geral

## ROTAS TECNOLÓGICAS

CAPTURA E UTILIZAÇÃO DE CO<sub>2</sub>  
COMO MATÉRIA-PRIMA PARA GERAÇÃO  
DE COMBUSTÍVEIS



# LISTA DE FIGURAS

© 2024. SENAI – Departamento Nacional

Qualquer parte desta obra poderá ser reproduzida, desde que citada a fonte.

CNI

Observatório Nacional da Indústria

## FICHA CATALOGRÁFICA

S491r

Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial. Departamento Nacional.  
Rotas tecnológicas : captura e utilização de CO2 como matéria-prima para geração de combustíveis / Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial. Brasília : SENAI/DN, 2024.

169 p. : il.

ISBN 978-85-505-0576-3

1. Roadmap Tecnológico 2. Dióxido de Carbono 3. CCUS I. Título

CDU: 502.131

SENAI

Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial  
Departamento Nacional

**Sede**

Setor Bancário Norte

Quadra 1 – Bloco C

Edifício Roberto Simonsen

70040-903 – Brasília – DF

<http://www.portaldaindustria.com.br/senai/>

Serviço de Atendimento ao Cliente - SAC  
Tels.: (61) 3317-9989 / 3317-9992  
[sac@cni.com.br](mailto:sac@cni.com.br)

<b>Figura 1</b> - Anomalias globais de temperatura terrestre e oceânica. ....	21
<b>Figura 2</b> - Gráfico de níveis atmosféricos de CO2.....	23
<b>Figura 3</b> - Combustão de hidrocarbonetos, principal causa para o aumento de CO2 atmosférico.....	24
<b>Figura 4</b> - Distribuição das emissões globais de CO2 por setores (2019). ....	27
<b>Figura 5</b> - Distribuição global do consumo primário de energia, por fonte (2019).....	28
<b>Figura 6</b> - Distribuição da emissão industrial por setor (2018). ....	29
<b>Figura 7</b> - Infográfico apresentando os processos de captura de CO2. ....	32
<b>Figura 8</b> - Visão geral das abordagens de captura de CO2.....	33
<b>Figura 9</b> - Processo de sequestro de carbono e conversão de microalgas em biocombustíveis. ....	40
<b>Figura 11</b> - Rotas e implantação de CO2 como matéria-prima para produção de produtos químicos com valor agregado.....	43
<b>Figura 12</b> - Diagrama esquemático do ciclo de neutralização de carbono.....	45
<b>Figura 13</b> - Demanda de CO2 para produção de e-combustíveis. ....	48
<b>Figura 14</b> - Artigos / ano – cenários A-E. ....	55
<b>Figura 15</b> - Cenário A: captura do CO2   27.194 artigos / país. ....	57
<b>Figura 16</b> - Cenário B: utilização do CO2   118.671 artigos / país. ....	58
<b>Figura 17</b> - Cenário C: captura e utilização do CO2   16.647 artigos / país. ....	59
<b>Figura 18</b> - Cenário D: captura e utilização do CO2 para produção de biocombustíveis   266 artigos / país.....	60
<b>Figura 19</b> - Cenário E: captura e utilização do CO2 para produção de e-combustíveis   1.748 artigos / país.....	61
<b>Figura 20</b> - Cenário A: captura do CO2   27.194 artigos / afiliação.....	63
<b>Figura 21</b> - Cenário B: utilização do CO2   118.671 artigos / afiliação. ....	64
<b>Figura 22</b> - Cenário C: captura e utilização do CO2   16.647 artigos / afiliação. ....	65
<b>Figura 23</b> - Cenário D: captura e utilização do CO2 para produção de biocombustíveis   266 artigos / afiliação.....	66
<b>Figura 24</b> - Cenário E: captura e utilização do CO2 para produção de e-combustíveis   1.748 artigos / afiliação.....	67
<b>Figura 25</b> - Taxonomia cenário D: captura e utilização do CO2 para produção de biocombustíveis   204 artigos.....	69
<b>Figura 26</b> - Taxonomia cenário E: captura e utilização do CO2 para produção de e-combustíveis   928 artigos.....	72
<b>Figura 27</b> - Tendência de investimento ao longo dos anos. ....	83
<b>Figura 28</b> - Famílias de patentes por país de 1ª prioridade. ....	84
<b>Figura 29</b> - Mercados-alvo do depósito de patentes. ....	85
<b>Figura 30</b> - Principais depositantes das patentes identificadas. ....	86
<b>Figura 31</b> - Depósitos dos detentores nos últimos 20 anos.....	89

# SUMÁRIO

<b>Figura 32</b> - Indicadores dos depositantes.....	90
<b>Figura 33</b> - Domínios tecnológicos das patentes.....	91
<b>Figura 34</b> - Distribuição temporal das patentes relevantes.....	95
<b>Figura 35</b> - Famílias de patentes por país de 1ª prioridade.....	96
<b>Figura 36</b> - Mercados-alvo do depósito de patentes.....	97
<b>Figura 37</b> - Principais depositantes das patentes identificadas.....	98
<b>Figura 38</b> - Domínios tecnológicos das patentes.....	99
<b>Figura 39</b> - Mapas tecnológicos de todos os estágios.....	113
<b>Figura 40</b> - Mapa tecnológico do estágio atual (patentes caducadas).....	115
<b>Figura 41</b> - Mapa tecnológico do estágio curto/médio prazo (patentes concedidas e depositadas pendentes).....	117
<b>Figura 42</b> - Mapa tecnológico do estágio de longo prazo (estudos científicos e pesquisas em andamento).....	119

<b>1 OBJETIVO.....</b>	<b>13</b>
<b>2 CONTEXTUALIZAÇÃO: PROSPECTIVA TECNOLÓGICA E TECHNOLOGY ROADMAP .....</b>	<b>17</b>
<b>3 ETAPA PRÉ-PROSPECTIVA .....</b>	<b>21</b>
3.1 Contextualização da problemática ambiental.....	21
3.2 O papel do CO <sub>2</sub> na economia de carbono.....	23
3.3 Conhecendo as fontes de CO <sub>2</sub> .....	27
3.4 Desafios e potencialidades da captura de CO <sub>2</sub> .....	30
3.5 Logística do CO <sub>2</sub> capturado.....	37
3.6 Recursos e aplicações da utilização de CO <sub>2</sub> .....	37
3.6.1 Utilização física.....	38
3.6.2 Mineralização.....	38
3.6.3 Bioutilização.....	39
3.6.3.1 Captura de carbono por microalgas para uso na produção de biocombustíveis.....	39
3.6.4 Utilização química.....	42
3.6.4.1 Redefinindo a cadeia de suprimentos petroquímicos.....	43
<b>4 ETAPA PROSPECTIVA.....</b>	<b>51</b>
4.1 Artigos científicos.....	52
4.1.1 Busca em artigos científicos.....	52
4.1.2 Resultados da busca em artigos científicos.....	54
4.1.2.1 Análise macro.....	54
4.1.2.1.1 Análise temporal.....	54
4.1.2.1.2 Análise de país de origem.....	57
4.1.2.1.3 Análise de afiliação.....	62
4.1.2.2 Análise meso.....	68
4.1.2.3 Análise micro.....	74
4.2 Propriedades intelectuais.....	80
4.2.1 Busca em patentes.....	81
4.2.2 Resultado da busca em patentes.....	82
4.2.2.1 Análise macro.....	82
4.2.2.2 Análise meso e micro.....	92
4.3 Brasil: cenário atual.....	100
4.3.1 Marco Regulatório de CCUS.....	100
4.3.1.1 Projeto de Lei no 1.425/2022.....	101
4.3.1.2 Projeto de Lei nº 4.196/2023.....	102
4.3.1.3 Projeto de Lei nº 4.516/2023.....	104
4.3.1.4 Desafios e considerações dos PLs.....	106

4.3.2	Projetos CCUS em andamento .....	106
4.3.2.1	Petrobras .....	107
4.3.2.2	FS Agrisolutions .....	108
4.3.2.3	Institutos Nacionais de Ciência & Tecnologia (ICT).....	108
<b>5</b>	<b>ETAPA PÓS-PROSPECTIVA.....</b>	<b>111</b>
5.1	Roadmap tecnológico .....	111
5.1.1	Estágio atual.....	114
5.1.2	Curto e médio prazo .....	116
5.1.3	Longo prazo .....	119
5.1.4	Panorama geral da análise do mapa tecnológico.....	127
<b>6</b>	<b>ETAPA PÓS-ROADMAP TECNOLÓGICO .....</b>	<b>131</b>
6.1	Análise vertical .....	131
6.1.1	Estágio atual.....	131
6.1.2	Curto e médio prazo.....	132
6.1.3	Longo prazo .....	132
6.1.4	Panorama da análise vertical do mapa tecnológico.....	136
6.2	Análise horizontal .....	137
6.2.1	Tecnologias .....	138
6.2.2	Processos.....	140
6.2.3	Aplicação .....	141
6.2.4	Panorama da análise horizontal do mapa tecnológico.....	142
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>145</b>

# 1 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um Roadmap Tecnológico para a captura e utilização de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) como matéria-prima na geração de combustíveis, em colaboração entre o Instituto SENAI de Inovação em Biomassa (ISI Biomassa) de Três Lagoas/MS, Federação das Indústrias do Estado de Mato Grosso do Sul (Sistema FIEMS) e Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI).

Atualmente, a atividade de captura, utilização e armazenamento de carbono (do inglês carbon capture, utilization, and storage - CCUS) não está regulamentada no Brasil, sendo objeto de projetos de lei em tramitação no Congresso Nacional. O PL nº 1425/2022 (proposto pelo senador Jean-Paul Prates) “disciplina a exploração da atividade de armazenamento permanente de CO<sub>2</sub> de interesse público, em reservatórios geológicos ou temporários, e seu posterior reaproveitamento”<sup>1</sup>. O PL nº 4.196/2023 (proposto pelo deputado Alceu Moreira) “cria a política decenal de descarbonização da matriz energética dos equipamentos e motores do Ciclo Diesel; dispõe sobre o Sistema de Informação da Qualidade do Diesel B ao consumidor final; dispõe sobre o Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV), o Programa Nacional de Diesel Verde (PNDV), o marco legal da Captura e Estocagem de Dióxido de Carbono”<sup>2</sup>. E, por fim, o PL nº 4.516/2023 (“PL Combustível do Futuro”, proposto pelo Poder Executivo Federal) “dispõe sobre a promoção da mobilidade sustentável de baixo carbono, o Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação, o Programa Nacional de Diesel Verde e o marco legal da captura e da estocagem geológica de dióxido de carbono”<sup>3</sup>. Dentro desse contexto, a utilização de CO<sub>2</sub> como matéria-prima para combustíveis destaca-se como uma área de interesse estratégica.

Vale ressaltar a definição dos termos de combustíveis que podem ser produzidos a partir da captura e utilização do CO<sub>2</sub>:

- a) biocombustível: é um combustível produzido a partir de materiais biológicos renováveis, como plantas, resíduos agrícolas ou algas. No entanto, também pode incluir combustíveis produzidos a partir do CO<sub>2</sub> que foi capturado do ar, processo conhecido como bioenergia com captura e armazenamento de carbono (BECCS). A captura de CO<sub>2</sub> durante o crescimento das plantas, que são usadas para produzir biocombustíveis, ajuda a compensar as emissões de CO<sub>2</sub> quando o biocombustível é queimado, resultando em um ciclo neutro de carbono<sup>4</sup>;

1 BRASIL. **Projeto de Lei nº 1.425/2022**. Disciplina a exploração da atividade de armazenamento permanente de dióxido de carbono de interesse público, em reservatórios geológicos ou temporários, e seu posterior reaproveitamento. Disponível em: <https://www.congressonacional.leg.br/materias/materias-bicamerais/-/ver/pl-1425-2022>. Acesso em: 08 abr. 2024.

2 BRASIL. **Projeto de Lei nº 4.196/2023**. Cria a política decenal de descarbonização da matriz energética dos equipamentos e motores do Ciclo Diesel; dispõe sobre o Sistema de Informação da Qualidade do Diesel B ao consumidor final; dispõe sobre o Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV), o Programa Nacional de Diesel Verde (PNDV), o marco legal da Captura e Estocagem de Dióxido de Carbono e dá outras providências. Disponível em: <https://www.congressonacional.leg.br/materias/materias-bicamerais/-/ver/pl-4196-2023>. Acesso em: 08 de abr. 2024.

3 BRASIL. **Projeto de Lei nº 4.516/2023**. Dispõe sobre a promoção da mobilidade sustentável de baixo carbono, o Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação, o Programa Nacional de Diesel Verde e o marco legal da captura e da estocagem geológica de dióxido de carbono. Disponível em: <https://www.congressonacional.leg.br/materias/materias-bicamerais/-/ver/pl-4516-2023>. Acesso em: 08 abr. 2024.

4 Microalgae Bioenergy with Carbon Capture and Storage (BECCS): An emerging sustainable bioprocess for reduced CO<sub>2</sub> emission and biofuel production. *Bioresource technology reports*, v. 7, set. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100270>. Acesso em: 08 abr. 2024.

b) e-combustível: refere-se a combustíveis sintéticos produzidos pela combinação de CO<sub>2</sub> e hidrogênio (H<sub>2</sub>), geralmente obtido por eletrólise da água usando energia renovável. Esses combustíveis, conhecidos como e-combustíveis ou e-fuels, podem ser utilizados em motores de combustão interna semelhantes aos combustíveis convencionais, como gasolina e diesel. O CO<sub>2</sub> utilizado na produção desses combustíveis é capturado do ar ou de fontes industriais, tornando-os potencialmente neutros em carbono, especialmente se a energia utilizada na sua produção for proveniente de fontes renováveis<sup>5</sup>.

O resultado final deste projeto específico será apresentado em uma análise temporal, relacionando tendências tecnológicas e de mercado, bem como fatores críticos relacionados a produtos e tecnologias.

Para alcançar esse objetivo, foram analisados diversos tipos de documentos técnicos, abrangendo desde relatórios anuais, artigos científicos e patentes até relatórios técnicos, teses e informações disponíveis nos sites eletrônicos das empresas identificadas, considerando diferentes horizontes de tempo, incluindo curto, médio e longo prazo, além do momento presente. A elaboração do *Roadmap Tecnológico* foi dividida em quatro fases principais:

- a) etapa pré-prospectiva: uma pesquisa preliminar para identificar os principais conceitos e definir a abordagem do estudo;
- b) etapa prospectiva: uma busca mais direcionada de documentos técnicos, como artigos científicos e patentes, seguida por uma análise detalhada;
- c) etapa pós-prospectiva: organização das análises em um mapa temporal das tendências observadas;
- d) etapa pós-roadmap: análise vertical e longitudinal dos players envolvidos, abordando trajetória tecnológica, competências, parcerias e concorrências.
- e) O relatório está estruturado em sete tópicos, incluindo conceitos sobre prospectiva tecnológica e *roadmap*, além de detalhes sobre cada etapa do processo.

<sup>5</sup> SINGH, H. et al. A critical review of technologies, costs, and projects for production of carbon-neutral liquid e-fuels from hydrogen and captured CO<sub>2</sub>. *Energy Advances*, v. 1, n. 9, p. 580-605, 2022. Disponível em: DOI: <https://doi.org/10.1039/D2YA00173J>. Acesso em: 08 abr. 2024.

## 2 CONTEXTUALIZAÇÃO: PROSPECTIVA TECNOLÓGICA E TECHNOLOGY ROADMAP

Os estudos de prospectiva tecnológica fornecem uma visão das principais tendências globais, permitindo a segmentação dessas tecnologias por setores econômicos. Esses estudos ajudam a identificar tecnologias promissoras que podem ser úteis para organizações ou países específicos, além de apontar possíveis oportunidades de parcerias. A sistematização do monitoramento tecnológico, incluída na prospectiva tecnológica e de inovação, tem como objetivo reunir esforços para identificar e priorizar uma agenda de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), bem como para alocar recursos financeiros e políticas públicas de forma mais eficiente.

A análise prospectiva é definida como um conjunto de atividades e métodos utilizados para antecipar o comportamento de variáveis socioeconômicas, políticas, culturais e tecnológicas, assim como os efeitos de suas interações. Essa definição pode ser aprimorada ao considerar conceitos relacionados à gestão do conhecimento, abordando fontes de informação. A prospectiva tecnológica pode variar em complexidade, desde a análise de uma única tecnologia para uma empresa até um exercício prospectivo mais amplo, envolvendo todo um setor econômico ou questões sociais.

A literatura menciona diversos métodos de prospectiva tecnológica, como análise de cenários, entrevistas com especialistas, matriz *SWOT*, *brainstorming*, entre outros<sup>6</sup>. Neste estudo serão exploradas metodologias prospectivas, incluindo análise quantitativa e qualitativa de documentos técnicos (artigos e patentes), também conhecidas como bibliometria e patentometria, além do roadmap tecnológico.

### 2.1 ARTIGOS CIENTÍFICOS E PROPRIEDADES INTELECTUAIS COMO FONTE DE INFORMAÇÃO TECNOLÓGICA

A informação engloba todo conhecimento técnico, econômico, mercadológico, gerencial, social, entre outros, que, por sua aplicação, contribui para o progresso, seja por meio do aperfeiçoamento ou da inovação. A informação científica é o conhecimento que representa um avanço no entendimento universal sobre determinado fato ou fenômeno em determinado momento da evolução da ciência. Esse conhecimento resulta de pesquisas científicas conduzidas segundo o método científico<sup>7</sup>.

<sup>6</sup> BORSCHIVER, S.; SILVA, A. L. R. **Technology Roadmap**: planejamento estratégico para alinhar mercado-produto-tecnologia. 2016. Disponível em: ISBN: 9788571933866. Acesso em: 08 abr. 2024.

<sup>7</sup> AGUIAR, A. C. Informação e atividades de desenvolvimento científico, tecnológico e industrial: tipologia proposta com base em análise funcional. **Ciência da Informação**, v. 20, n. 1, 1991.

A informação científica e tecnológica compreende diferentes tipos de busca por conhecimento sobre tecnologias disponíveis, servindo de orientação para pesquisas e teses, constituindo uma base sólida para novos investimentos na indústria.

Quando se trata de informações científicas e tecnológicas, destacam-se o uso de artigos científicos, importantes fontes de informações tecnológicas provenientes do meio científico, encontrados em bases de dados como *Web of Science*, *Scopus* e *Science Direct*, e o uso de bancos de patentes, como o *Orbit*, *Derwent* e o Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI) do Governo Federal do Brasil.

Os artigos científicos são um dos principais meios de disseminação dos resultados de pesquisas científicas. Para assegurar a autoria e formalizar os resultados, é essencial a publicação em periódicos científicos. Eles não apenas transmitem conhecimento original e de qualidade como também servem como base para corroborar estudos existentes e inspirar novas pesquisas.

Por outro lado, a análise de documentos de patentes é uma das formas mais eficazes de verificar o desenvolvimento tecnológico em determinada área. As patentes são indicadores importantes de inovação e podem ser utilizadas para medir resultados de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), produtividade e desenvolvimento tecnológico em uma indústria específica.

Atualmente, a documentação de patentes é considerada a fonte mais rica e detalhada de informações técnicas disponíveis em todo o mundo, além de ser uma importante fonte de informações sobre tendências de mercado. O número de patentes concedidas é um indicador relevante para avaliar a capacidade de um país ou empresa de transformar conhecimento científico em produtos ou resultados tecnológicos.

Tanto os artigos científicos quanto os documentos de patentes são fontes valiosas de informação científica e tecnológica, fornecendo insights sobre o estado atual e futuro de determinadas áreas de pesquisa e desenvolvimento. Eles desempenham um papel crucial na geração de inteligência competitiva, permitindo que empresas e organizações avaliem tendências de mercado, identifiquem oportunidades e tomem decisões estratégicas com base em informações sólidas.

## 2.2 TECHNOLOGY ROADMAP

Dentro do campo da prospectiva tecnológica, destaca-se a ferramenta do roadmap como uma abordagem versátil e abrangente para análise e monitoramento de tendências de mercado, trajetórias tecnológicas e identificação de oportunidades de negócio.

O *Technology Roadmapping* (TRM) é uma técnica essencial para o planejamento e gerenciamento corporativo, sendo utilizada em empresas de manufatura e serviços para alinhar objetivos organizacionais e recursos tecnológicos. Ele possibilita um planejamento colaborativo dinâmico, permitindo que as equipes trabalhem juntas e tracem caminhos para alcançar seus objetivos.

As origens do TRM remontam à indústria norte-americana nos anos 1970 e 1980, especialmente com empresas como Motorola e Corning. A Motorola, em particular, foi pioneira na aplicação do TRM, influenciando muitas outras empresas nos setores de eletrônica, telecomunicações, automotivo e aeroespacial<sup>8</sup>.

Desde então, o TRM tem se expandido globalmente, com um aumento significativo na pesquisa e aplicação desse método nas empresas. O *roadmap* tecnológico, como parte do TRM, representa uma ferramenta poderosa para apoiar o planejamento tecnológico e gerencial, permitindo visualizar interações dinâmicas entre recursos, objetivos organizacionais e mudanças no ambiente.

Esses *roadmaps* podem assumir diversas formas de apresentação, sendo o modelo genérico, baseado no tempo e com várias camadas representando perspectivas comerciais e tecnológicas, o mais comum.

Os *roadmaps* conectam estratégias tecnológicas com estratégias de negócios, ajudando a focar o planejamento futuro e fornecendo informações para tomada de decisões. Eles auxiliam na estruturação do processo de planejamento, identificando lacunas no planejamento estratégico e priorizando vantagens competitivas sustentáveis.

<sup>8</sup> DRUMMOND, P. H. F. O planejamento tecnológico de uma empresa de base tecnológica de origem acadêmica por intermédio dos métodos *technology roadmapping* (TRM), *technology stage-gate* (TSG) e processo de desenvolvimento de produtos (PDP) tradicional. [S.l.: s.n.], 2005.

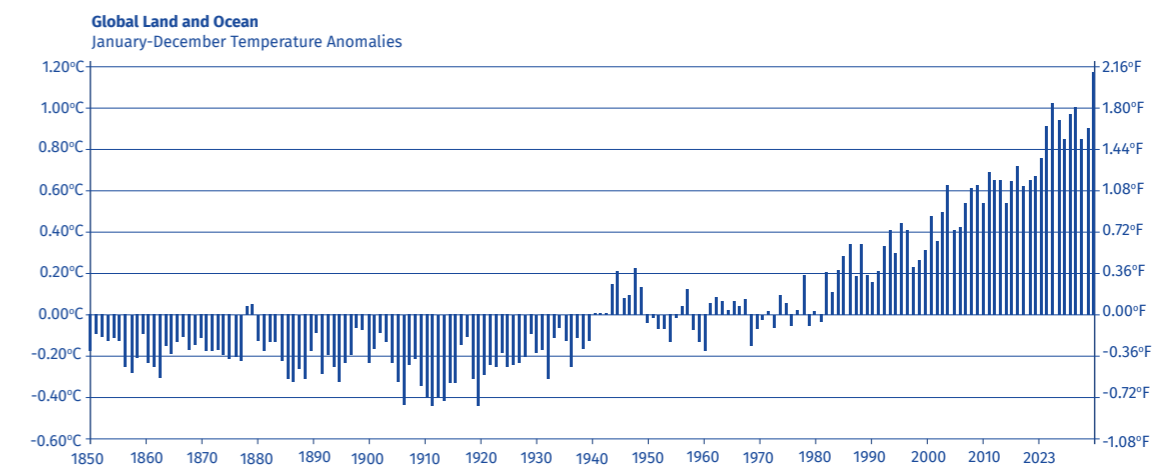
## 3 ETAPA PRÉ-PROSPECTIVA

A fase inicial de nossa prospectiva tecnológica, denominada etapa pré-prospectiva, é crucial para a delimitação dos conceitos essenciais relacionados ao nosso tema de estudo: captura e utilização de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) como matéria-prima para a geração de combustíveis. Nesta fase, realizamos uma pesquisa preliminar para identificar os principais aspectos da tecnologia, fornecendo uma base sólida para a estratégia de busca de documentos técnicos nas etapas subsequentes. O objetivo é reunir informações fundamentais sobre o tema, que serão utilizadas para subsidiar o desenvolvimento do roadmap tecnológico final.

### 3.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DA PROBLEMÁTICA AMBIENTAL

O aquecimento global é, inquestionavelmente, resultado das atividades humanas, principalmente devido às emissões de gases de efeito estufa (GEEs) desde a Revolução Industrial. Hoje, a temperatura média da superfície terrestre está em 1,20 °C mais elevada em relação ao período de 1850 a 1930 (**Figura 1**). As emissões globais de GEEs continuam a crescer de forma geral, impulsionadas por práticas insustentáveis relacionadas ao uso de energia, uso da terra, estilos de vida e padrões de consumo e produção<sup>9</sup>.

**Figura 1** - Anomalias globais de temperatura terrestre e oceânica.



Fonte: NOAA - Annual 2023 Global Climate Report<sup>10</sup>.

<sup>9</sup> INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA. **World Energy Outlook 2022**. Disponível em: [www.iea.org](http://www.iea.org). Acesso em: 08 abr. 2024.

<sup>10</sup> NATIONAL CENTERS FOR ENVIRONMENTAL INFORMATION - NOAA. **Annual 2023 Global Climate Report**. Disponível em: <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202313>. Acesso em: 08 abr. 2024.

A influência humana na mudança climática já afeta diversas áreas, causando alterações nos padrões climáticos e eventos extremos ao redor do mundo. As consequências negativas são generalizadas, como impactos significativos na segurança alimentar e hídrica, na saúde humana, nas economias e na sociedade, além de causar perdas e danos relacionados à natureza e às pessoas. Infelizmente, comunidades vulneráveis, que historicamente contribuíram menos para as mudanças climáticas atuais, são as mais afetadas por esses efeitos adversos.

O combate à mudança climática vem sendo impulsionado por esforços realizados em diferentes níveis de governança, por acordos climáticos internacionais, ambições nacionais cada vez maiores e uma crescente conscientização pública. As políticas de mitigação têm levado a uma redução na intensidade global de energia e de carbono, com vários países conseguindo reduzir suas emissões de GEEs há mais de uma década. As tecnologias de baixa emissão (ou de emissão zero) estão se tornando mais acessíveis, o planejamento e a implementação de inovações têm progredido com opções energéticas, de mobilidade e industriais. E, embora o financiamento global para mitigação e adaptação tenha aumentado desde 2020, ainda está aquém das necessidades para controlar o aquecimento global.

Existem disparidades entre as ambições mundiais e a soma das expectativas nacionais declaradas no combate às mudanças climáticas, que são agravadas pelas diferenças entre as pretensões e a implementação real de medidas. No que diz respeito à mitigação, a NDC brasileira (do inglês *Nationally Determined Contribution*), define metas ambiciosas para reduzir as emissões de GEEs do Brasil<sup>11</sup>.

O país se comprometeu, em 2005, a alcançar uma redução de 37% até 2025 e de 43% até 2030, em relação às emissões. Em 2021, o Brasil aumentou sua meta climática, estabelecendo uma redução de 50% até 2030 e buscando atingir a neutralidade nas emissões até 2050. Em linhas gerais, toda a emissão de GEE produzida pelo país será compensada por meio da captura/conversão de carbono, como plantio de florestas, recuperação de biomassas ou uso de outras tecnologias mais avançadas. Essas medidas demonstram o compromisso do Brasil em atuar com protagonismo nas mudanças climáticas e adotar ações significativas para reduzir seus impactos ambientais<sup>12</sup>.

O mais recente relatório do IPCC, *Intergovernmental Panel on Climate Change*, AR61, considera diferentes estratégias de mitigação de emissões nos principais setores. Essas estratégias englobam processos que buscam melhorar a eficiência e o reaproveitamento de materiais, substituir fontes de energia por combustíveis sustentáveis e incorporar projetos de captura, armazenamento e utilização de carbono<sup>13</sup>.

Apesar dos avanços, ainda existem lacunas nessa transição, com muitas iniciativas focadas principalmente na redução de riscos de curto prazo, o que dificulta a adaptação transformacional. Em alguns setores e regiões, temos a disparidade tanto entre medidas rígidas quanto flexíveis em

11 BNDES. **Painel NDC**: nossa contribuição para as metas de redução de emissões do Brasil. BNDES. 2023. Disponível em: <https://bndes.gov.br/wps/portal/site/home/desenvolvimento-sustentavel/resultados/emissoes-evitadas>. Acesso em: 09 abr. 2024.

12 CCS BRASIL. **1st Annual CCS Report in Brazil (2023)**. Disponível em: [https://www.ccsbr.com.br/\\_files/ugd/11a7f0\\_bee7db824b4f4fd5ad6d35ae32b31d6f.pdf](https://www.ccsbr.com.br/_files/ugd/11a7f0_bee7db824b4f4fd5ad6d35ae32b31d6f.pdf). Acesso em: 10 abr. 2024.

13 IPCC. **Synthesis Report (SYR) of the IPCC sixth assessment report (AR6)**: climate change 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>. 12 abr. 2024

relação à capacidade de adaptação, e essa inconformidade afeta de forma desproporcional os grupos mais vulneráveis. Portanto, obstáculos sistêmicos, como falta de financiamento, de conhecimento e desafios práticos, incluindo a falta de alfabetização e dados climáticos, dificultam o progresso dessa empreitada e limita significativamente a ação climática, especialmente nos países em desenvolvimento.

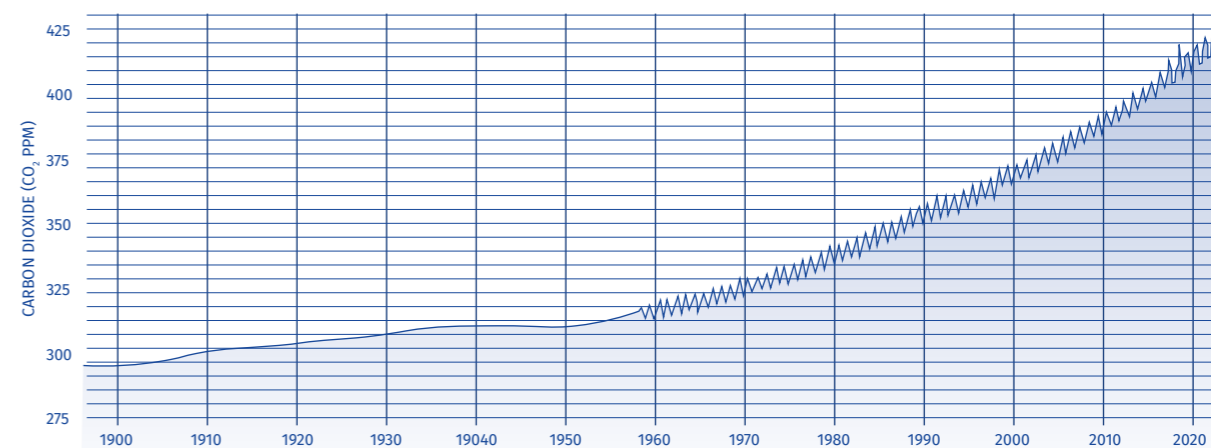
Temos, hoje, uma janela de oportunidade que está se fechando rapidamente para garantir um futuro habitável e sustentável para todos. Ações que priorizem equidade, justiça climática, justiça social e inclusão, resultam em maior sustentabilidade, benefícios mútuos, apoio a mudanças transformadoras e avanço no desenvolvimento resiliente ao clima. Respostas de adaptação são necessárias imediatamente para reduzir os riscos crescentes dessas mudanças climáticas. Transições equilibradas são fundamentais para o progresso da adaptação associada a ambições sociais mais profundas na mitigação acelerada.

### 3.2 O PAPEL DO CO<sub>2</sub> NA ECONOMIA DE CARBONO

A crescente preocupação com as mudanças climáticas globais tem então destacado a importância da redução das emissões de CO<sub>2</sub> como um dos principais GEEs responsáveis pelo aquecimento do planeta.

Dados científicos revelam um aumento contínuo nas concentrações de CO<sub>2</sub> na atmosfera ao longo do último século (**Figura 2**), atingindo níveis sem precedentes na história recente da Terra. Essa elevação nas concentrações de CO<sub>2</sub>, como sabido, tem sido associada a uma série de impactos adversos nas condições climáticas, ecossistemas e comunidades humanas ao redor do mundo<sup>14,15</sup>.

**Figura 2** - Gráfico de níveis atmosféricos de CO<sub>2</sub>.



Fonte: 2 Degrees Institute Real-time and historical CO<sub>2</sub> levels<sup>16</sup>.

14 RITCHIE, H.; ROSER, M. **CO<sub>2</sub> emissions. 2020**. Disponível em: <https://ourworldindata.org/co2-emissions>. Acesso em: 12 abr. 2024.

15 2 DEGREES INSTITUTE. **Real-time and historical CO<sub>2</sub> levels**. Disponível em: <https://www.co2levels.org>. Acesso em: 10 abr. 2024.

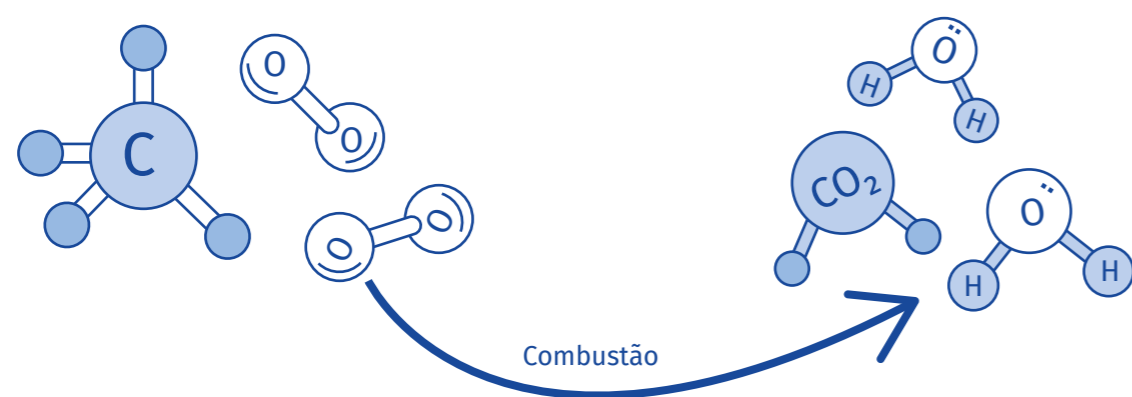
16 2 DEGREES INSTITUTE. **Real-time and historical CO<sub>2</sub> levels**. Disponível em: <https://www.co2levels.org>. Acesso em: 10 abr. 2024.

Os impactos das mudanças climáticas são variados e abrangem desde o aumento das temperaturas médias globais e o derretimento das calotas polares até eventos climáticos extremos, como secas, tempestades e inundações mais frequentes e intensas. Além disso, os ecossistemas terrestres e marinhos estão sofrendo alterações significativas, afetando a biodiversidade, os ciclos de vida das espécies e os serviços ecossistêmicos essenciais para a sobrevivência humana.

Diante desse cenário, esforços mundiais têm sido realizados para mitigar os efeitos das mudanças climáticas e reduzir as emissões de CO<sub>2</sub>. Acordos internacionais, como a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (1992) e o Acordo de Paris (2015), estabelecem metas e compromissos para limitar o aumento da temperatura global e promover a transição para uma economia de baixo carbono. Além disso, iniciativas de governos, empresas e sociedade civil visam a promover a adoção de práticas sustentáveis e a implementação de tecnologias de baixa emissão de carbono.

As emissões de CO<sub>2</sub> são amplamente atribuídas à extração e queima de hidrocarbonetos fósseis, um processo que pode ser simplificado como uma reação entre combustíveis e oxigênio, resultando em CO<sub>2</sub> e água (Figura 3). Portanto, a redução do uso de combustíveis fósseis é essencial para diminuir as emissões de CO<sub>2</sub>. No entanto, alguns setores industriais, como a siderurgia e a produção de cimento, geram emissões inevitáveis de gás carbônico devido aos processos, não necessariamente associadas a fontes fósseis. Nesses casos, são necessários materiais e rotas de produção alternativas para mitigar as emissões. Adicionalmente, existem fontes de CO<sub>2</sub> que não são de origem fóssil, como materiais biogênicos ou resíduos industriais, as quais também precisam ser consideradas.

**Figura 3 - Combustão de hidrocarbonetos, principal causa para o aumento de CO<sub>2</sub> atmosférico.**



Fonte: Adaptado de DECHEMA - Carbon for power-to-X-suitable CO<sub>2</sub> sources and integration in PtX value chains<sup>17</sup>.

17 DECHEMA. Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. Carbon for Power-to-X-Suitable CO<sub>2</sub> Sources and integration in PtX value chains. abr. 2024.

Assim, o setor produtivo, incluindo a indústria de energia, enfrenta a necessidade premente de uma transformação profunda para lidar eficazmente com as mudanças climáticas. Nesse cenário, o CCUS tem sido reconhecido como uma tecnologia crucial e complementar para alcançar as metas de emissões líquidas zero até 2050, desempenhando um papel fundamental na transição da matriz energética.

O CCUS é uma ferramenta essencial para compensar as emissões que não podem ser evitadas durante as atividades econômicas, agindo em conjunto com esforços de eficiência energética e mitigação de emissões. Esse recurso é particularmente relevante em setores industriais nos quais a redução de emissões é desafiadora, seja devido à dependência de combustíveis fósseis em seus processos ou pela inviabilidade de alternativas como a eletrificação.

O CCUS é uma atividade que se baseia em tecnologias em diferentes estágios de maturidade. De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA)<sup>18</sup>, essa prática abrange a captura de CO<sub>2</sub>, geralmente proveniente de fontes com alta emissão do gás, como usinas termelétricas, indústrias com emissões difíceis de reduzir ou processos de produção de combustíveis. Além disso, envolve a utilização do CO<sub>2</sub> capturado em diversas aplicações, como na fabricação de metanol, na indústria de cimento ou na indústria alimentícia. Quando não é utilizado localmente, o CO<sub>2</sub> capturado é comprimido e transportado por meio de dutos, navios, caminhões ou trens para ser injetado e armazenado em formações geológicas profundas, como reservatórios de petróleo ou gás esgotados e reservatórios salinos<sup>19</sup>.

Ao longo de seu ciclo, o CCUS emprega uma variedade de tecnologias e abre oportunidades para pesquisa, inovação e desenvolvimento, com diferentes rotas tecnológicas capazes de viabilizar sua implementação.

O sistema de Bioenergia com Captura e Armazenamento de Carbono (BECCS) é um processo que visa a capturar e armazenar o carbono gerado pela produção de bioenergia. Durante seu ciclo de vida, as plantas absorvem o CO<sub>2</sub> da atmosfera, incorporando-o à biomassa. Quando essa biomassa é processada nas dornas de fermentação para a produção de combustíveis, o CO<sub>2</sub> é liberado, normalmente sendo emitido na atmosfera. O objetivo do processo de BECCS é capturar esse CO<sub>2</sub>, seja nas plantas de produção de combustíveis ou na geração de energia elétrica a partir de biomassa, e armazená-lo geologicamente. A captura de CO<sub>2</sub> da produção de etanol de primeira geração é a rota mais desenvolvida do BECCS, com operações em andamento desde o final dos anos 2000. Outras rotas que envolvem a geração de CO<sub>2</sub> a partir do uso da biomassa para fins energéticos, como a cocombustão em altos-fornos e cimenteiras, ainda estão em fase de demonstração ou piloto<sup>20</sup>.

O processo de captura direta de CO<sub>2</sub> do ar, também conhecido como Direct Air Carbon Capture and Storage (DACCS) ou Direct Air Capture (DAC), é uma tecnologia relativamente nova. Consiste em unidades de captura que extraem o ar em ambientes abertos, onde a origem do CO<sub>2</sub> não está vinculada diretamente a uma fonte específica de emissão. Durante o processo de captura direta, o CO<sub>2</sub> presente no ar é separado por meio de processos físico-químicos dos demais

18 AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA - IEA. How new business models are boosting momentum on CCUS. 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/commentaries/how-new-business-models-areboosting-momentum-on-ccus>. Acesso em: 11 abr. 2024.

19 AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA - IEA. Tracking clean energy progress. 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/tracking-clean-energy-progress-2023>. Acesso em: 11 abr. 2024.

20 AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCUMBUSTÍVEIS - ANP. Relatório sobre a implementação do marco regulatório de CCUS do país. Superintendência de Tecnologia e Meio Ambiente - STM. [S.l.]: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2024.

componentes, que são devolvidos à atmosfera. No momento, existem 27 plantas de DACCS comissionadas e operando em pequena escala em todo o mundo, com uma capacidade de capturar cerca de 0,01 Mt CO<sub>2</sub>/ano, além de vários projetos em desenvolvimento. Entretanto, o custo dessa tecnologia é significativamente alto, sendo a opção de captura mais dispendiosa disponível. Isso se deve, em grande parte, à baixa concentração de CO<sub>2</sub> no ar, o que representa o principal desafio na separação e contribui para os custos elevados do processo<sup>21 22</sup>.

O Carbon Capture and Storage (CCS) envolve a captura do CO<sub>2</sub> em fontes estacionárias, como termelétricas e indústrias, seguida pelo seu armazenamento permanente em um reservatório geológico designado para esse fim específico. Integrar o CCS na cadeia de produção de hidrogênio é uma abordagem estratégica, onde o CO<sub>2</sub> é capturado durante a reforma a vapor do gás natural e posteriormente armazenado. Essa integração resulta na obtenção de um combustível de baixo carbono com um potencial significativo tanto no mercado nacional quanto internacional. Além disso, ao combinar o CCS com atividades que consomem gás natural, como termelétricas, por exemplo, capturando o CO<sub>2</sub> gerado após o uso do gás natural e, em seguida, armazenando-o, fortalece-se seu papel na transição energética. Essa abordagem oferece a oportunidade de minimizar as emissões de gases de efeito estufa associadas a essas atividades, contribuindo para uma matriz energética mais sustentável<sup>23 24</sup>.

O CO<sub>2</sub> também pode ser capturado para uso direto ou indireto, constituindo o que chamamos de Carbon Capture and Utilization (CCU). Embora seja mais conhecido pelo seu uso na indústria de fertilizantes e na recuperação avançada de petróleo, o CO<sub>2</sub> está encontrando crescente aplicação em outras áreas, impulsionado por projetos de pesquisa e desenvolvimento no Brasil e no mundo. Esses projetos exploram o potencial do CO<sub>2</sub> como matéria-prima na produção de combustíveis sintéticos, como metanol e diesel, e de outros combustíveis. O CCU desempenha um papel importante no adiamento ou prevenção da liberação do CO<sub>2</sub> na atmosfera, contribuindo para a descarbonização em diferentes setores. Vários fatores influenciam o impacto do CCU na redução de carbono, incluindo a origem do CO<sub>2</sub>, o produto final gerado, a intensidade de carbono da energia utilizada no processo e o tempo de retenção do CO<sub>2</sub> no produto resultante. Esses aspectos são essenciais para entender o verdadeiro potencial do CCU na mitigação das emissões de carbono e no avanço em direção a uma economia mais sustentável<sup>25 26</sup>.

21 CCS BRASIL. 1st Annual CCS Report in Brazil (2023). Disponível em: [https://www.ccsbr.com.br/\\_files/ugd/11a7f0\\_bee7db824b4f4fd5ad6d35ae32b31d6f.pdf](https://www.ccsbr.com.br/_files/ugd/11a7f0_bee7db824b4f4fd5ad6d35ae32b31d6f.pdf). Acesso em: 10 abr. 2024.

22 AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS – ANP. Relatório sobre a implementação do marco regulatório de CCUS do país. Superintendência de Tecnologia e Meio Ambiente – STM. [S.l.]: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2024.

23 CCS BRASIL. 1st Annual CCS Report in Brazil (2023). Disponível em: [https://www.ccsbr.com.br/\\_files/ugd/11a7f0\\_bee7db824b4f4fd5ad6d35ae32b31d6f.pdf](https://www.ccsbr.com.br/_files/ugd/11a7f0_bee7db824b4f4fd5ad6d35ae32b31d6f.pdf). Acesso em: 10 abr. 2024.

24 AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS – ANP. Relatório sobre a implementação do marco regulatório de CCUS do país. Superintendência de Tecnologia e Meio Ambiente – STM. [S.l.]: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2024.

25 CCS BRASIL. 1st Annual CCS Report in Brazil (2023). Disponível em: [https://www.ccsbr.com.br/\\_files/ugd/11a7f0\\_bee7db824b4f4fd5ad6d35ae32b31d6f.pdf](https://www.ccsbr.com.br/_files/ugd/11a7f0_bee7db824b4f4fd5ad6d35ae32b31d6f.pdf). Acesso em: 10 abr. 2024.

26 AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS – ANP. Relatório sobre a implementação do marco regulatório de CCUS do país. Superintendência de Tecnologia e Meio Ambiente – STM. [S.l.]: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2024.

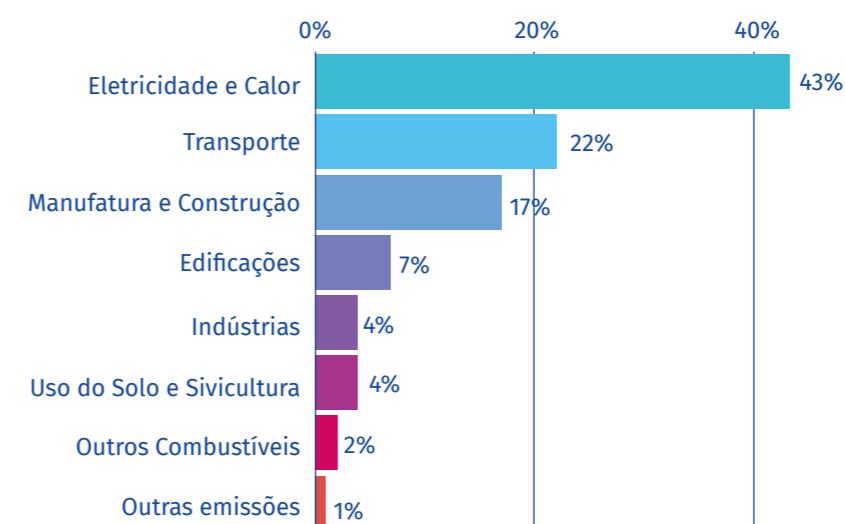
### 3.3 CONHECENDO AS FONTES DE CO<sub>2</sub>

Diversas fontes pontuais de CO<sub>2</sub> variam em concentração e consumo de energia para o processo de captura. Por esse motivo, a escolha da fonte não apenas precisa atender à qualidade e quantidade necessárias para as rotas de utilização do CO<sub>2</sub>, mas também impacta a pegada de carbono e, portanto, a sustentabilidade do produto final.

As fontes pontuais são plantas estacionárias que emitem CO<sub>2</sub> para a atmosfera como consequência de seus processos de produção. Essas emissões podem resultar de um processo de combustão (emissões relacionadas à energia) ou de uma reação do processo na qual o CO<sub>2</sub> é um subproduto (emissões relacionadas ao processo).

A **Figura 4** mostra a participação das emissões totais de CO<sub>2</sub> em 2019, globalmente<sup>27</sup>. O setor de energia inclui todas as indústrias que extraem, produzem e entregam energia na forma de eletricidade e calor. Devido principalmente à combustão de combustíveis fósseis, bem como resíduos industriais e municipais não renováveis, o setor de energia é responsável por 43% das emissões totais de CO<sub>2</sub> em todo o mundo<sup>28</sup>. Em 2019, 84% do consumo global de energia primária foi fornecido por combustíveis fósseis (33% de petróleo, 27% de carvão e 24% de gás), enquanto energia nuclear e renovável representaram 4,3% e 11,4%, respectivamente (**Figura 5**)<sup>29</sup>.

**Figura 4 - Distribuição das emissões globais de CO<sub>2</sub> por setores (2019).**



Fonte: Adaptado de Ritchie e Roser (2020) - CO<sub>2</sub> and Greenhouse Gas Emissions<sup>30</sup>.

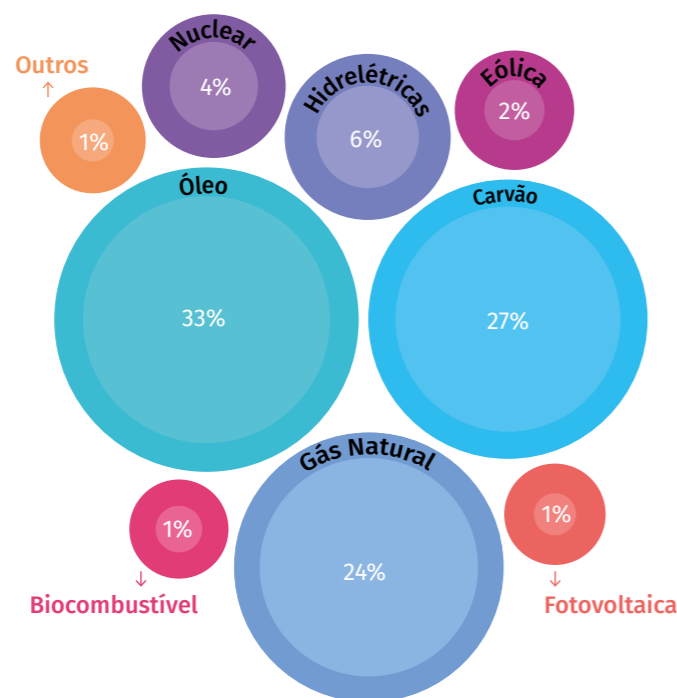
27 RITCHIE, H.; ROSER, M. CO<sub>2</sub> and greenhouse gas emissions, emissions by sector. 2020. Disponível em: <https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions>. Acesso em: 11 abr. 2024.

28 RITCHIE, H.; ROSER, M. CO<sub>2</sub> and greenhouse gas emissions, emissions by sector. 2020. Disponível em: <https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions>. Acesso em: 11 abr. 2024.

29 RITCHIE, H.; ROSER, M. CO<sub>2</sub> and greenhouse gas emissions, emissions by sector. 2020. Disponível em: <https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions>. Acesso em: 11 abr. 2024.

30 RITCHIE, H.; ROSER, M. CO<sub>2</sub> and greenhouse gas emissions, emissions by sector. 2020. Disponível em: <https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions>. Acesso em: 11 abr. 2024.

**Figura 5** - Distribuição global do consumo primário de energia, por fonte (2019).



Fonte: Adaptado de Ritchie e Roser (2020), Overview of global energy<sup>31</sup>.

Neste setor, 72% das emissões de CO<sub>2</sub> são causadas pelo uso de carvão, que tem o maior fator de emissão entre todos os combustíveis fósseis. As concentrações de CO<sub>2</sub> nos gases de combustão em usinas termelétricas a carvão e a gás variam entre 10-15% e 4-5%, respectivamente<sup>32 33</sup>.

A longo prazo, o setor de energia tem a possibilidade de substituir sua geração a partir de combustíveis fósseis por produção de energia renovável. Esforços estão sendo feitos em todo o mundo para descarbonizar o setor e suas emissões de gases de efeito estufa, incluindo o CO<sub>2</sub>.

O setor industrial representa 4% das emissões globais de CO<sub>2</sub>. Em 2018, as emissões de CO<sub>2</sub> do setor industrial totalizaram 8,54 GtCO<sub>2</sub> e sua participação setorial é mostrada na **Figura 6**<sup>34</sup>.

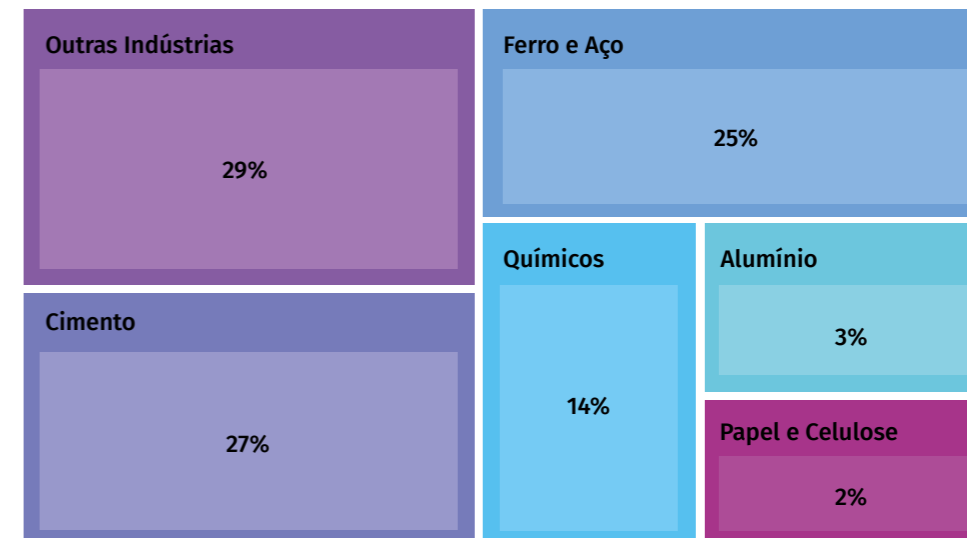
31 RITCHIE, H.; ROSER, M. CO<sub>2</sub> and greenhouse gas emissions, emissions by sector. 2020. Disponível em: <https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions>. Acesso em: 11 abr. 2024.

32 FOSTERAND, V.; BEDROSYAN, D. Understanding CO<sub>2</sub> emissions from the global energy sector World Bank Group. 2014. Disponível em: <http://documents.worldbank.org/curated/en/873091468155720710/Understanding-CO2-emissions-from-the-global-energy-sector>. Acesso em: 15 abr. 2024.

33 GLOBAL CCS INSTITUTE. CO<sub>2</sub> Capture technologies: post combustion capture (PCC). 2012. Disponível em: <https://www.globalccsinstitute.com/archive/hub/publications/29721/co2-capture-technologies-pcc.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2024.

34 AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA - IEA. Industry direct CO<sub>2</sub> emissions in the sustainable development scenario, 2000-2030. 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/industry-directco2-emissions-in-the-sustainable-development-scenario-2000-2030>. Acesso em: 15 abr. 2024.

**Figura 6** - Distribuição da emissão industrial por setor (2018).



Fonte: Adaptado de IEA - Industry direct CO<sub>2</sub> emissions in the Sustainable Development Scenario, 2000-2030<sup>35</sup>.

A indústria química engloba unidades operacionais que processam matérias-primas em diferentes processos para fabricar uma grande variedade de produtos químicos. O CO<sub>2</sub> é gerado ao longo das diferentes cadeias de valor na indústria química, seja pela combustão de combustíveis fósseis ou como subproduto em diferentes reações químicas.

Em 2021, as emissões de CO<sub>2</sub> na indústria química corresponderam a 925 MtCO<sub>2</sub>. Cerca de um quarto dessas emissões de CO<sub>2</sub> são emissões relacionadas ao processo, enquanto o restante é emitido por processos de combustão para gerar energia térmica. A indústria química e petroquímica é responsável por cerca de 14% das emissões industriais totais 24.

As emissões relacionadas ao processo são adequadas para captura devido à alta concentração de CO<sub>2</sub> e ao consequente baixo requisito de energia para a separação. Apenas um número limitado de produtos químicos básicos é responsável pela maioria das emissões neste setor: amônia (417 MtCO<sub>2</sub>), metanol (250 MtCO<sub>2</sub>) e produtos químicos de alto valor (258 MtCO<sub>2</sub>)<sup>36</sup>.

Resíduos sólidos, líquidos e gasosos são gerados em diversos setores, incluindo energia, indústria e residências. Esses resíduos precisam ser tratados adequadamente para reduzir impactos ambientais e sociais. Na gestão de resíduos sólidos, a incineração é uma fonte significativa de emissões de CO<sub>2</sub>. Quanto às águas residuais, o tratamento é um processo intensivo em energia, contribuindo para as emissões de gases de efeito estufa.

35 AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA - IEA. Industry direct CO<sub>2</sub> emissions in the sustainable development scenario, 2000-2030. 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/industry-directco2-emissions-in-the-sustainable-development-scenario-2000-2030>. Acesso em: 15 abr. 2024.

36 AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA - IEA. **Chemicals**. 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/chemicals>. Acesso em: 15 abr. 2024.

A produção industrial e de energia é uma fonte importante de CO<sub>2</sub>, assim como o ar atmosférico, cuja concentração aumentou em 47% desde a Revolução Industrial, passando de 280 ppm para cerca de 412 ppm em 2019. Esse aumento se deve ao fato de que a quantidade de CO<sub>2</sub> natural e antropogênica emitida é maior que aquela retirada da atmosfera por processos naturais, como a fotossíntese<sup>37</sup>.

As fontes pontuais de CO<sub>2</sub> reduzirão consideravelmente até 2050, como consequência dos compromissos dos países de atingir emissões líquidas zero, reduzindo substancialmente o uso de combustíveis fósseis. De acordo com esses objetivos, as emissões restantes de fontes pontuais consistirão em emissões de processos inevitáveis, emissões biogênicas e uma pequena parcela de emissões fósseis, que devem ser compensadas por CCUS.

### 3.4 DESAFIOS E POTENCIALIDADES DA CAPTURA DE CO<sub>2</sub>

A aplicação de técnicas de captura de CO<sub>2</sub> em um contexto industrial varia com base em diversos fatores. Parâmetros como a identificação de instrumentos adequados, sua eficácia e os custos associados devem ser considerados. Métodos comuns de remoção de CO<sub>2</sub> variam de simples tratamentos de lavagem direta a sistemas de reciclagem sofisticados. Esses métodos foram inicialmente desenvolvidos para limpar o tratamento de gás natural e a recuperação de H<sub>2</sub> a partir de gás de síntese. Hoje, esses processos têm sido cada vez mais aplicados na captura de CO<sub>2</sub> de várias fontes, como gases de exaustão. Esses fluxos de gases frequentemente contêm vários contaminantes (água, nitrogênio, sulfeto de hidrogênio, hidrocarbonetos etc.), além disso, a presença de oxigênio pode representar desafios para sistemas de separação específicos.

A escolha da tecnologia mais adequada depende de fatores como composição do gás de exaustão, considerações econômicas e os produtos-alvo desejados. Portanto, a seleção de tecnologias apropriadas para fontes específicas de emissão industrial depende desses fatores para otimizar a redução de emissões de carbono e maximizar a eficiência. Diversas tecnologias foram desenvolvidas para abordar o problema crítico da captura de CO<sub>2</sub> e reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Cada uma dessas tecnologias tem suas vantagens e limitações, tornando-as adequadas para diferentes aplicações e indústrias<sup>38</sup>.

Além da captura direta do ar (DAC), dependendo se a separação do CO<sub>2</sub> ocorre antes ou depois de um processo de combustão e da pureza do oxigênio utilizado, os processos de captura de CO<sub>2</sub> podem ser categorizados em três abordagens principais: pós-combustão, pré-combustão e

captura de combustão com oxigênio, cada uma com suas vantagens e desafios únicos. As vantagens e desvantagens desses processos são resumidas no infográfico apresentado na **Figura 7**<sup>39</sup>.

A **Figura 8** oferece uma visão geral desses três processos. Devido à necessidade de materiais adequados e condições específicas para atender aos requisitos de alta temperatura, a pesquisa e desenvolvimento de aplicação da tecnologia de captura pré-combustão e de captura por combustão em oxigênio, são relativamente limitadas. Em contraste, a captura pós-combustão é uma tecnologia amplamente utilizada e madura na indústria, com boa seletividade de CO<sub>2</sub> e eficiência de captura. Várias técnicas de captura pós-combustão, incluindo absorção química, adsorção, membrana, criogenia, hidrato e microbiana são exploradas atualmente. Essas estratégias de captura de CO<sub>2</sub> desempenham um papel crucial no avanço das tecnologias de CCUS e na redução do impacto ambiental da combustão de combustíveis fósseis. Pesquisadores continuam a explorar melhorias na eficiência e na relação custo-benefício para acelerar a adoção desses métodos na luta contra as mudanças climáticas<sup>40 41</sup>.

A tecnologia de absorção é fundamentada no princípio de dissolver o CO<sub>2</sub> em um solvente líquido ou absorvente sólido. Essa abordagem é extensivamente aplicada em sistemas de captura pós-combustão, onde os gases de exaustão são tratados para eliminar o CO<sub>2</sub> após a combustão. A seleção cuidadosa do solvente e das condições do processo desempenha um papel crucial na eficiência da captura baseada em absorção.

37 BUIS, A. **The atmosphere: getting a handle on carbon dioxide**. 2022. Disponível em: <https://climate.nasa.gov/news/2915/the-atmosphere-getting-a-handle-on-carbon-dioxide/>. Acesso em: 15 abr. 2024.

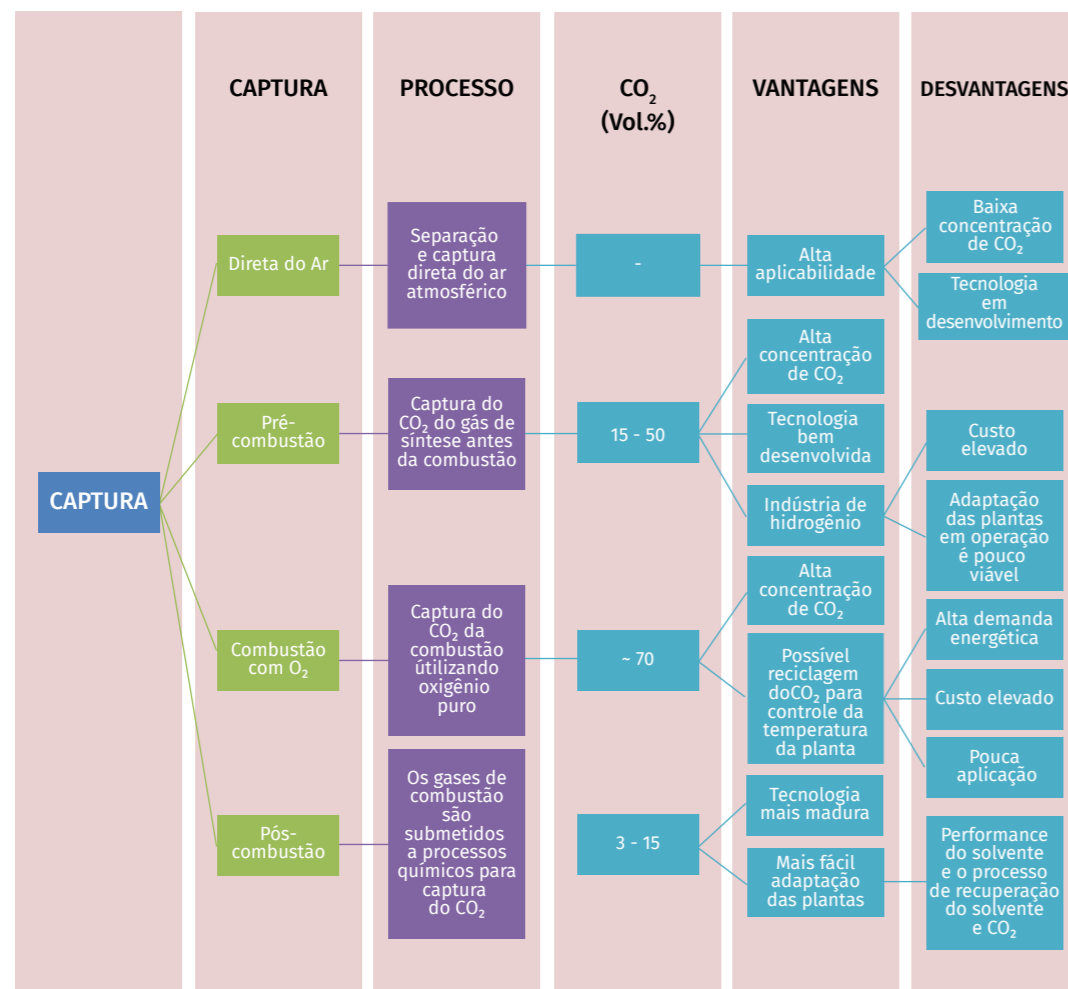
38 CSONG, C. *et al.* Cryogenic-based CO<sub>2</sub> capture technologies: state-of-the-art developments and current challenges. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 101, p. 265-278, 2019. Disponível em: DOI:10.1016/j.rser.2018.11.018. Acesso em: 16 abr. 2024.

39 FU, L. *et al.* Research progress on CO<sub>2</sub> capture and utilization technology. **Journal of CO<sub>2</sub> Utilization**, v. 66, p. 102260, 2022. Disponível em: DOI.org/10.1016/j.jcou.2022.102260. Acesso em: 16 abr. 2024.

40 CSONG, C. *et al.* Cryogenic-based CO<sub>2</sub> capture technologies: state-of-the-art developments and current challenges. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 101, p. 265-278, 2019. Disponível em: DOI:10.1016/j.rser.2018.11.018. Acesso em: 16 abr. 2024.

41 FU, L. *et al.* Research progress on CO<sub>2</sub> capture and utilization technology. **Journal of CO<sub>2</sub> Utilization**, v. 66, p. 102260, 2022. Disponível em: DOI.org/10.1016/j.jcou.2022.102260. Acesso em: 16 abr. 2024.

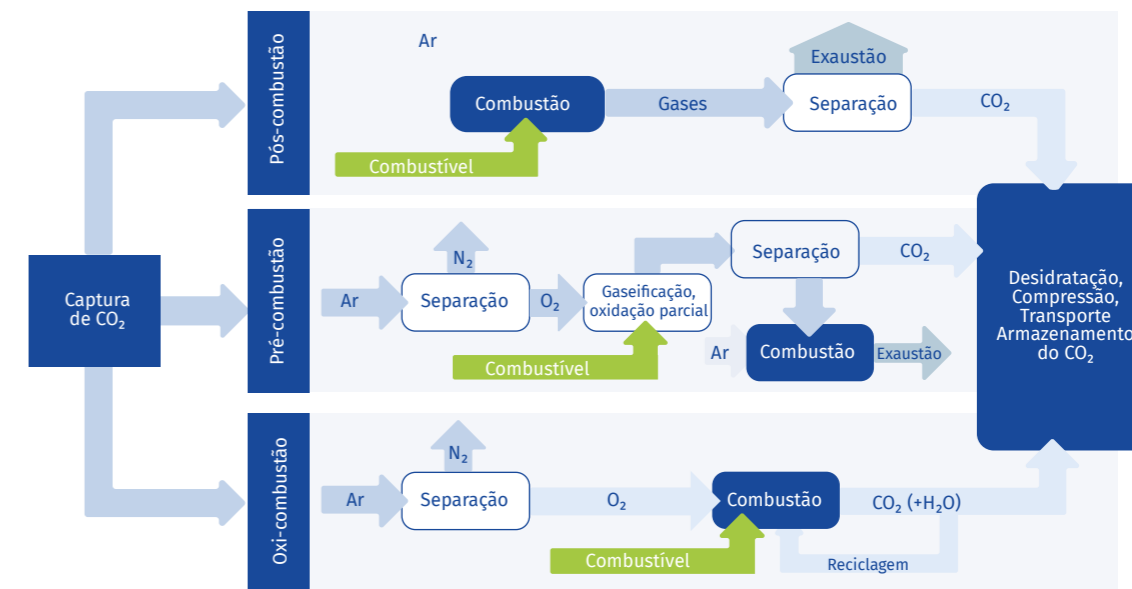
Figura 7 - Infográfico apresentando os processos de captura de CO<sub>2</sub>.



Fonte: Adaptado de Research progress on CO<sub>2</sub> capture and utilization technology<sup>42</sup>.

42 FU, L. et al. Research progress on CO<sub>2</sub> capture and utilization technology. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, v. 66, p. 102260, 2022. Disponível em: DOI.org/10.1016/j.jcou.2022.102260. Acesso em: 16 abr. 2024.

Figura 8 - Visão geral das abordagens de captura de CO<sub>2</sub>.



Fonte: Adaptado de Research progress on CO<sub>2</sub> capture and utilization technology<sup>43</sup>.

Na indústria química e petroquímica, os processos de absorção são comumente utilizados para remover o CO<sub>2</sub> de correntes de processo. Essencialmente, esse processo retira o CO<sub>2</sub> de gases de produtos, como hidrogênio, gás de síntese, gás natural e amônia, garantindo que o gás resultante atenda aos requisitos específicos do processo ou produto. A absorção é viabilizada pela interação química ou física entre o solvente líquido ou a matriz sólida e o CO<sub>2</sub>, permitindo a absorção seletiva do CO<sub>2</sub> enquanto preserva oxigênio, nitrogênio e outros constituintes do gás de combustão. Posteriormente, a solução enriquecida com CO<sub>2</sub> é transferida para uma coluna de regeneração, onde o CO<sub>2</sub> é separado eficientemente do solvente, possibilitando sua reciclagem para tratamentos adicionais de gases de combustão.

Entre as tecnologias de captura de CO<sub>2</sub>, a absorção química é a mais avançada (nível de maturidade tecnológica=9) e amplamente adotada comercialmente. Além de sua maturidade, essa tecnologia pode ser integrada a instalações existentes. Contudo, melhorias são necessárias para mitigar desafios como alto consumo de energia, baixa capacidade de carga de CO<sub>2</sub>, alta taxa de reposição de solvente e corrosão do equipamento<sup>44 45 46</sup>.

A adsorção é baseada na atração do CO<sub>2</sub> pela superfície de um material adsorvente sólido. É especialmente relevante em sistemas de captura pré-combustão e pós-combustão.

43 FU, L. et al. Research progress on CO<sub>2</sub> capture and utilization technology. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, v. 66, p. 102260, 2022. Disponível em: DOI.org/10.1016/j.jcou.2022.102260. Acesso em: 16 abr. 2024.

44 RITTER, J. A.; EBNER, A. D. Carbon dioxide separation technology: R&D needs for the chemical and petrochemical industries. *Chemical Industry Vision*, v. 2020, p. 287, 2007.

45 AARON, D.; TSOURIS, C. Separation of CO<sub>2</sub> from flue gas: a review. *Separation science and technology*, v. 40, n. 1-3, p. 321-348, 2005. Disponível em: DOI: 10.1081/SS-200042244. Acesso em: 17 abr. 2024.

46 YU, C. H. et al. A review of CO<sub>2</sub> capture by absorption and adsorption. *Aerosol and air quality research*, v. 12, n. 5, p. 745-769, 2012. Disponível em: DOI: 10.4209/aaqr.2012.05.0132. Acesso em: 16 abr. 2024.

A eficiência da adsorção depende da escolha do material adsorvente, das condições operacionais e dos métodos de regeneração.

Os métodos de adsorção envolvem uma etapa inicial de pré-tratamento, seguida pelo uso de adsorventes sólidos, como carvão ativado, zeólitos ou estruturas metal-orgânicas. Geralmente, são empregadas múltiplas câmaras de adsorção para garantir uma operação contínua. No entanto, essa abordagem apresenta algumas limitações, como baixa seletividade e capacidade de adsorção de CO<sub>2</sub> nos adsorventes disponíveis, menor eficiência de remoção em comparação com outras tecnologias e desafios associados à regeneração e reutilização dos adsorventes<sup>47</sup>.

A adsorção por variação de pressão (PSA) é um método eficiente de separação e purificação de gases, conhecido pela sua baixa demanda energética e alta taxa de regeneração. Apesar de enfrentar desafios, como a manipulação de altas concentrações de CO<sub>2</sub> e a seletividade limitada dos adsorventes disponíveis, a PSA continua sendo uma opção viável para a captura de carbono em gases de combustão. Além disso, o CO<sub>2</sub> produzido como subproduto na produção de hidrogênio por reforma de metano pode ser capturado usando o método de PSA, embora a pureza do CO<sub>2</sub> obtido possa ser um desafio para sua comercialização. Esforços estão em andamento para desenvolver sistemas de PSA capazes de processar esse gás residual em correntes ricas em hidrogênio e CO<sub>2</sub>, aumentando sua viabilidade como fonte comercial de CO<sub>2</sub><sup>48</sup>.

A tecnologia de separação por membranas utiliza membranas seletivas que permitem a passagem do CO<sub>2</sub> enquanto bloqueiam outros gases. Essa abordagem é adequada para aplicações com requisitos específicos de pureza, como purificação de gás natural e de biogás. A eficiência da separação por membranas depende da seleção do material da membrana e das condições operacionais.

A técnica de difusão por membrana é amplamente adotada nas indústrias de combustíveis e química devido à sua eficiência e versatilidade. As membranas podem ser de diversos tipos, como poliméricas, cerâmicas e metálicas, cada uma com suas características específicas. Uma das principais vantagens das membranas é sua capacidade de separar os componentes de uma mistura sem a necessidade de agentes separadores ou mudanças de fase, o que reduz os custos de processamento. Além disso, os sistemas de membrana têm um tamanho compacto e exigem pouca manutenção, tornando-os ideais para diversas aplicações industriais. Sua modularidade permite operação em múltiplos estágios e facilita a escalabilidade linear, gerenciando custos de forma eficaz. No entanto, esses sistemas enfrentam desafios, como o equilíbrio entre seletividade e permeabilidade das membranas, bem como a sensibilidade a gases corrosivos, o que exige pré-tratamento adequado<sup>49</sup>.

Apesar desses desafios, a separação por membrana é preferida na indústria devido às suas baixas emissões de carbono e à capacidade de operar como um sistema contínuo de separação. Essa abordagem se baseia no princípio de que a membrana “separa seletivamente” os componentes desejados, permitindo que outros componentes passem. No contexto das tecnologias de captura de CO<sub>2</sub>, as membranas desempenham um papel crucial na filtragem do CO<sub>2</sub> dos fluxos de gases de exaustão, com propriedades da membrana e parâmetros do processo influenciando significativamente o desempenho global.

A separação criogênica envolve o resfriamento dos gases de combustão a temperaturas extremamente baixas para condensar e separar o CO<sub>2</sub> de outros componentes. Os processos criogênicos consomem muita energia, mas oferecem alta pureza e eficiência. Eles são frequentemente empregados em aplicações em larga escala e são cruciais para a liquefação do CO<sub>2</sub> para armazenamento e transporte.

Os métodos criogênicos, exploram as propriedades de condensação e de sublimação do CO<sub>2</sub> sob condições específicas de temperatura. Essas abordagens fornecem CO<sub>2</sub> excepcionalmente puro, muitas vezes excedendo 99,99%, destacando-se entre outras tecnologias de separação. No entanto, a separação criogênica requer energia substancial para refrigeração e a remoção de impurezas como água e hidrocarbonetos pesados. Como é mais eficaz para fluxos de CO<sub>2</sub> de alta pureza, ela encontra aplicação em processos como pré-combustão e combustão com oxigênio, além da produção de etanol por fermentação.

Para implantar a destilação criogênica para separação de CO<sub>2</sub> de correntes de gases de exaustão, é necessária a remoção preliminar de outros componentes gasosos e partículas. Este método manipula temperatura e pressão para liquefazer CO<sub>2</sub> enquanto mantém o nitrogênio no estado gasoso, com base nos diferentes pontos de ebulição dos gases na mistura. Embora ofereça alta pureza sem solventes químicos, a separação criogênica envolve consumo significativo de energia e custos operacionais elevados, especialmente para manter alta pressão e evitar a formação de sólidos. Uma concentração de CO<sub>2</sub> superior a 50% é tipicamente recomendada para otimizar a eficiência energética neste processo<sup>50 51</sup>.

O princípio fundamental da captura microbiana de CO<sub>2</sub> é usar a fotossíntese de microrganismos para absorver e fixar o CO<sub>2</sub>. Possui características de baixo consumo de energia, sem corrosão, proteção ambiental verde etc., e pode converter diretamente o CO<sub>2</sub> em matéria orgânica, mas precisa de cultivo em grande escala para obter bons resultados. De acordo com estatísticas, o sequestro líquido de carbono de microrganismos autotróficos pode atingir 7 bilhões de toneladas por ano, o que indica que o sequestro de carbono microbiano é realmente um método eficaz para melhorar as mudanças climáticas globais.

47 YU, C. H. et al. A review of CO<sub>2</sub> capture by absorption and adsorption. *Aerosol and air quality research*, v. 12, n. 5, p. 745-769, 2012. Disponível em: DOI: 10.4209/aaqr.2012.05.0132. Acesso em: 16 abr. 2024.

48 CREAMER, A. E.; GAO, B. Carbon-based adsorbents for postcombustion CO<sub>2</sub> capture: a critical review. *Environmental science & technology*, v. 50, n. 14, p. 7276-7289, 2016. Disponível em: DOI: 10.1021/acs.est.6b00627. Acesso em: 30 abr. 2024.

49 FONT-PALMA, C.; CANN, D.; UDEMU, C. *Review of cryogenic carbon capture innovations and their potential applications*, v. 7, n. 3, p. 58, 2021.

50 JI, G.; ZHAO, M. Membrane separation technology in carbon capture. *Recent advances in carbon capture and storage*, p. 59-90, 2017. Disponível em: DOI: 10.5772/65723.C. Acesso em: 17 abr. 2024.

51 SINGH, R. Introduction to membrane technology. *Hybrid Membrane Systems for Water Purification*, p. 1-56, 2005. Disponível em: DOI: 10.1016/B978-185617442-8/50002-6. Acesso em: 10 maio 2024.

Como uma das tecnologias emergentes de captura de CO<sub>2</sub>, ela está totalmente alinhada com o conceito de proteção ambiental verde, não tóxica e inofensiva, e mostra um bom prospecto de desenvolvimento<sup>52</sup>.

As microalgas tornaram-se uma boa escolha para a sequestro de carbono microbiano devido à forte capacidade reprodutiva, rápida taxa fotossintética e ciclo de crescimento curto. No entanto, a taxa de sequestro de carbono do método de fixação de microalgas tradicional é apenas de 5 a 20%<sup>53</sup>.

A captura eficiente de CO<sub>2</sub> apresenta uma série de desafios técnicos, econômicos e regulatórios que precisam ser superados para viabilizar sua implementação em larga escala. Ao mesmo tempo, essa área oferece oportunidades significativas para o desenvolvimento tecnológico e a inovação em busca de soluções sustentáveis para mitigar as emissões de gases de efeito estufa.

Um dos principais desafios técnicos na captura de CO<sub>2</sub> é a implementação de tecnologias eficientes e economicamente viáveis para capturar o CO<sub>2</sub> de fontes estacionárias, como usinas de energia a carvão e indústrias pesadas, bem como de processos industriais. Embora existam várias tecnologias de captura disponíveis, como absorção química, adsorção física e membranas permeáveis, muitas delas enfrentam desafios relacionados à eficiência energética, custos de implantação e operacionais, e à necessidade de tratamento adicional do CO<sub>2</sub> capturado.

Além dos desafios técnicos, há também desafios econômicos significativos associados à captura de CO<sub>2</sub>. Os altos custos de capital e operacionais das tecnologias de captura, juntamente com a falta de incentivos financeiros adequados, podem dificultar a viabilidade econômica dos projetos de captura de CO<sub>2</sub>. Além disso, a falta de regulamentação e políticas de precificação de carbono pode limitar o desenvolvimento de mercados para o CO<sub>2</sub> capturado, reduzindo assim o potencial de investimento nessa área.

No entanto, apesar dos desafios, a captura de CO<sub>2</sub> também oferece oportunidades significativas para o desenvolvimento tecnológico e econômico. A busca por soluções inovadoras para a captura eficiente de CO<sub>2</sub> tem estimulado o surgimento de novas tecnologias e abordagens, incluindo o desenvolvimento de materiais avançados, processos de captura mais eficientes e sistemas de armazenamento seguro do CO<sub>2</sub> capturado ou processos para sua utilização.

### 3.5 LOGÍSTICA DO CO<sub>2</sub> CAPTURADO

Após a etapa de captura, o transporte do CO<sub>2</sub> capturado até o local de armazenamento ou de uso é crucial. A seleção do método de transporte adequado deve levar em conta as características geográficas e econômicas da região, bem como a estrutura de cada projeto. Fatores como quantidade de CO<sub>2</sub>, distância a ser percorrida e custos associados são considerações-chave.

O transporte por dutos geralmente emerge como a opção mais econômica, eficiente e menos poluente para grandes volumes. A engenharia para seleção de materiais e gestão de segurança é bem estabelecida com redes de dutos já existentes em vários países, como nos EUA, onde uma ampla malha de 8 mil quilômetros já está em funcionamento<sup>54</sup>.

Outra alternativa viável para o transporte de grandes volumes a longas distâncias é o transporte marítimo. Embora não seja amplamente adotado até o momento, não apresenta grandes desafios tecnológicos, pois é semelhante ao transporte de outros produtos, como gás natural liquefeito (GNL). A flexibilidade do transporte marítimo pode facilitar a instalação inicial de centros de distribuição antes da implantação de dutos, tornando-se uma escolha economicamente viável para trajetos longos.

O transporte por via rodoviária ou ferroviária é uma terceira opção, normalmente usada para atender áreas remotas onde os dutos não são viáveis. No entanto, esses métodos geralmente transportam volumes menores e tendem a ser mais onerosos, além de exigirem considerações adicionais sobre as emissões de CO<sub>2</sub> geradas pelo próprio transporte.

### 3.6 RECURSOS E APLICAÇÕES DA UTILIZAÇÃO DE CO<sub>2</sub>

Após o transporte, o destino do CO<sub>2</sub> pode ser sua utilização ou armazenamento permanente. Um grande número de projetos de CCS foi lançado ao redor do mundo para armazenar o CO<sub>2</sub> capturado. No entanto, devido ao alto custo e à incerteza do armazenamento de carbono (como o vazamento potencial de CO<sub>2</sub> armazenado no solo e a possibilidade de pequenos terremotos causados pelo CO<sub>2</sub> sob pressão), há uma preferência crescente pela tecnologia CCU que pode reutilizar o CO<sub>2</sub>. Portanto, o "U" em CCU tornou-se uma direção importante para lidar com o CO<sub>2</sub>. Em comparação com o armazenamento de CO<sub>2</sub>, a grande maioria da utilização de CO<sub>2</sub> não pode remover permanentemente o CO<sub>2</sub> da atmosfera para alcançar emissões negativas.

Além disso, deve ficar claro que as emissões líquidas zero de CO<sub>2</sub> provavelmente não serão alcançadas apenas com a utilização de CO<sub>2</sub>, pois a eletricidade consumida no processo de

<sup>52</sup> FU, L. et al. Research progress on CO<sub>2</sub> capture and utilization technology. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, v. 66, p. 102260, 2022.

<sup>53</sup> LUO, M. Y. et al. Experimental study on CO<sub>2</sub> fixation from simulated flue gas by *Chlorella vulgaris*. *Chem. Ind. Eng. Prog.*, v. 34, n. 4, p. 1147-1151, 2015.

<sup>54</sup> GLOBAL CCS INSTITUTE. **CCUS hubs study**. 2023. Disponível em: [https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2023/11/WA-CCUS-Hubs-Study-Summary\\_Nov2023-2.pdf](https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2023/11/WA-CCUS-Hubs-Study-Summary_Nov2023-2.pdf). Acesso em: 22 abr. 2024.

utilização de CO<sub>2</sub> aumentará as emissões de CO<sub>2</sub>. No entanto, do ponto de vista da estabilidade de longo prazo e dos benefícios econômicos, a utilização de CO<sub>2</sub> também desempenha um papel fundamental na abordagem do problema do CO<sub>2</sub>. Especificamente, o “U” é definido como a utilização de recursos do CO<sub>2</sub>, que inclui principalmente a utilização física, química, biológica e mineralização do CO<sub>2</sub>.

### 3.6.1 Utilização física

A utilização física do CO<sub>2</sub> é amplamente aplicada em várias indústrias, como alimentos, bebidas, petróleo e gás, para diferentes processos, como a produção de bebidas carbonatadas, armazenamento de alimentos frescos e soldagem com gás de CO<sub>2</sub>. Além disso, o CO<sub>2</sub> também é utilizado na indústria do tabaco, onde é injetado nas células do tabaco para expandi-las e melhorar a qualidade do produto final. Outra aplicação importante é a limpeza com CO<sub>2</sub> supercrítico, que é uma técnica eficaz para remover poluentes de superfícies de itens. Além disso, o CO<sub>2</sub> supercrítico é usado na extração de compostos valiosos de materiais orgânicos, como na indústria de alimentos, cosméticos e medicamentos.

No entanto, é importante destacar que muitas dessas aplicações apenas adiam a liberação de CO<sub>2</sub> na atmosfera e não contribuem diretamente para a redução das emissões. Portanto, para alcançar a descarbonização, é essencial desenvolver e implementar tecnologias de CCS eficazes, como a fraturação com CO<sub>2</sub> supercrítico, que pode melhorar a eficiência da produção de petróleo e gás, enquanto armazena permanentemente o CO<sub>2</sub> no subsolo. Essas tecnologias desempenham um papel crucial na mitigação das mudanças climáticas e na transição para uma economia de baixo carbono<sup>55</sup>.

### 3.6.2 Mineralização

O CO<sub>2</sub> pode formar vários precipitados de carbonato por meio do processo de mineralização e ser utilizado de forma eficaz. Existem dois processos principais de mineralização: direta e indireta. A mineralização direta imita o processo de intemperismo de minerais de CO<sub>2</sub> na natureza, enquanto a mineralização indireta envolve a conversão de matérias-primas mineralizadas em produtos intermediários com aditivos químicos antes de reagir com CO<sub>2</sub>.

As matérias-primas para armazenamento mineral de CO<sub>2</sub> incluem minérios silicatados naturais e óxidos alcalinos em resíduos sólidos industriais, como CaO e MgO. Esses materiais reagem com o CO<sub>2</sub> para formar carbonatos inorgânicos estáveis, fornecendo uma maneira segura e eficaz de sequestrar permanentemente o CO<sub>2</sub>. No entanto, é importante garantir que os carbonatos não sejam utilizados em atividades que possam liberar CO<sub>2</sub> do sal para garantir o armazenamento permanente.

<sup>55</sup> 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, p. 127776, 2023.

A mineralização de CO<sub>2</sub> também oferece a possibilidade de produzir produtos carbonatados com benefícios econômicos, como materiais de construção. Além disso, a mineralização de resíduos sólidos industriais alcalinos pode ser uma opção eficaz para controlar as emissões de poluentes do ar industrial. No entanto, o desenvolvimento e a implementação da tecnologia de mineralização de CO<sub>2</sub> ainda enfrentam desafios significativos, como otimizar os processos de reação e reduzir os custos e perdas de energia associados. Ainda assim, a mineralização de CO<sub>2</sub> é considerada uma das formas eficientes de conversão de CO<sub>2</sub>, com potencial para reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> enquanto se reduzem os resíduos sólidos industriais<sup>56</sup>.

### 3.6.3 Bioutilização

A tecnologia de utilização biológica (bioutilização) de CO<sub>2</sub> refere-se ao processo de projetar novos sistemas e vias fotossintéticas artificiais, simulando a fotossíntese de plantas ou microrganismos na natureza, para converter eficientemente o CO<sub>2</sub> em diferentes produtos de alto valor. A pesquisa atual sobre bioutilização de CO<sub>2</sub> concentra-se principalmente na conversão de fertilizantes de aerossol de plantas e na sequenciação de carbono de microalgas para a produção de biocombustíveis<sup>57</sup>.

O fertilizante gasoso vegetal, que utiliza CO<sub>2</sub> na fotossíntese das plantas, é a forma mais direta de bioutilização, com eficácia e sustentabilidade inerentes. Ao mesmo tempo, o CO<sub>2</sub> é um gás indispensável no processo de crescimento das plantas. Sob condições fechadas, certa quantidade de CO<sub>2</sub> é introduzida na estufa, o que é benéfico para a fotossíntese das plantas e promove o crescimento vegetal. Utilizar CO<sub>2</sub> como fertilizante gasoso vegetal pode aumentar o rendimento das plantas, sendo de operação simples e baixo custo. A quantidade de CO<sub>2</sub> liberada da estufa depende da concentração inicial. Dentro de uma faixa específica, quanto maior a concentração de CO<sub>2</sub>, melhor o efeito de crescimento das plantas.

Atualmente, o fertilizante gasoso vegetal suspenso é principalmente utilizado no mercado, sendo conveniente de operar e apresentando notáveis benefícios econômicos. É um meio indispensável para o aumento do rendimento e da renda das culturas modernas de estufa<sup>58</sup>.

<sup>56</sup> WANG, F.; DREISINGER, D. Status of CO<sub>2</sub> mineralization and its utilization prospects. *Miner Mater*, v. 1, n. 4, 2022.

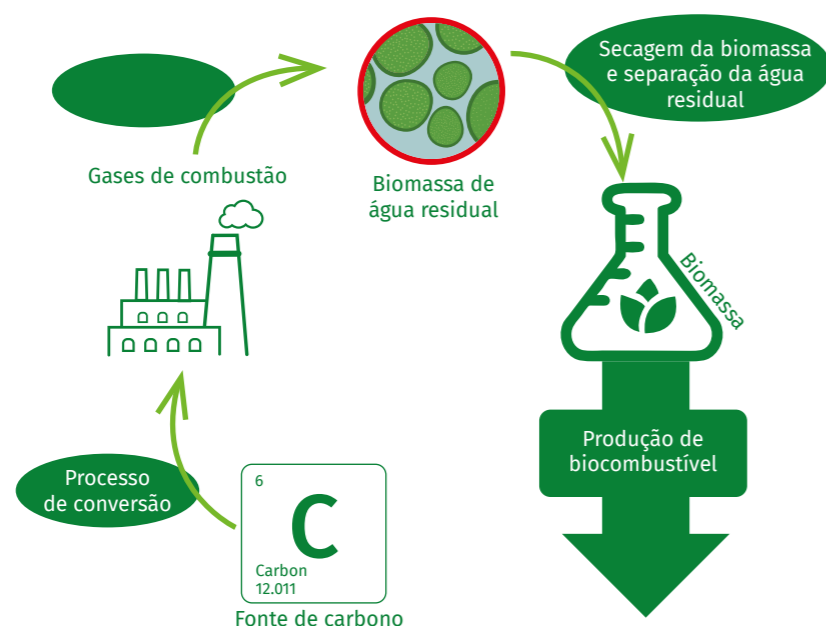
<sup>57</sup> 163. **CO<sub>2</sub> bio-utilization technology will help carbon neutrality, and the commercialization prospects of various breakthrough technologies are expected.** Disponível em: <https://c.m.163.com/news/a/GOT6MLKQ0532PL1J.html>. Acesso em: 22 abr. 2024.

<sup>58</sup> HASSANIEN, R. E.; LI, M.; LIN, W. D. Advanced applications of solar energy in agricultural greenhouses. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 54, p. 989-1001, 2016.

### 3.6.3.1 Captura de carbono por microalgas para uso na produção de biocombustíveis

Entre os caminhos de utilização do CO<sub>2</sub>, o uso para cultivar microalgas e convertê-las em biocombustíveis é considerado uma opção atrativa. Comparado com o método de utilização que requer a injeção de CO<sub>2</sub> de alta pureza, as microalgas podem absorver diretamente o CO<sub>2</sub> nos gases de exaustão. A captura de carbono por microalgas para a produção de biocombustíveis é mostrada na **Figura 9**<sup>59 60</sup>.

**Figura 9** - Processo de sequestro de carbono e conversão de microalgas em biocombustíveis.



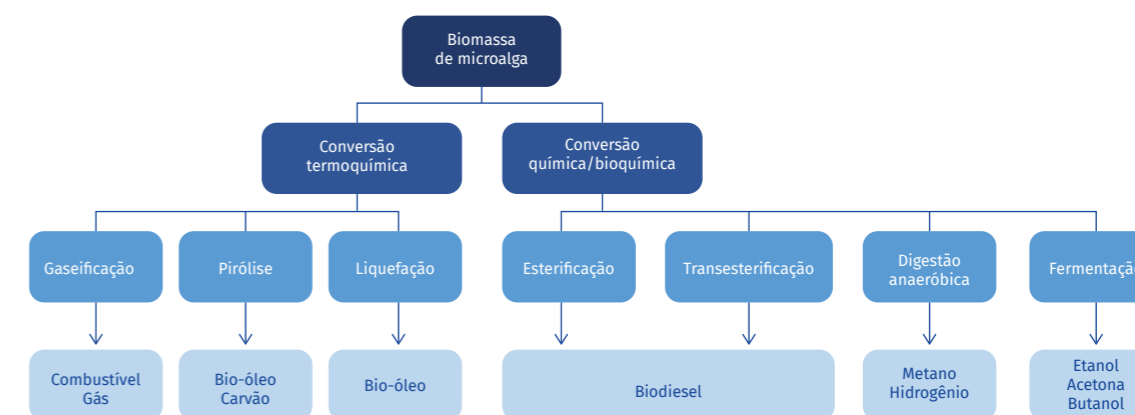
**Fonte:** Adaptado de Carbon capture and utilization technologies: a literature review and recent advances<sup>61</sup>.

A biomassa microalgal obtida por meio desse processo tem alto teor de água. Portanto, a secagem da biomassa microalgal úmida é uma etapa crucial antes da conversão em biocombustíveis. Ao mesmo tempo, o alto consumo de energia no processo de secagem é o principal problema que dificulta o desenvolvimento da tecnologia de captura de carbono por microalgas para a síntese de biocombustíveis.

As microalgas podem obter diferentes biocombustíveis por meio de três processos de conversão diferentes: químico, bioquímico e termoquímico (**Figura 10**).

59 HEPBURN, C. *et al.* The technological and economic prospects for CO<sub>2</sub> utilization and removal. *Nature*, v. 575, n. 7781, p. 87-97, 2019.  
60 RAZZAK, S. A. *et al.* Integrated CO<sub>2</sub> capture, wastewater treatment and biofuel production by microalgae culturing - a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 27, p. 622-653, 2013.  
61 BAENA-MORENO, F. M. *et al.* Carbon capture and utilization technologies: a literature review and recent advances. *Energy Sources, Part A: recovery, utilization, and environmental effects*, v. 41, n. 12, p. 1403-1433, 2019.

**Figura 10** - Processo de sequestro de carbono e conversão de microalgas em biocombustíveis.



**Fonte:** Adaptado de Biohydrogen production from anaerobic digestion and its potential as renewable energy<sup>62</sup>.

A conversão química de microalgas é principalmente por transesterificação para produzir biodiesel. Esse processo de conversão geralmente requer a adição de excesso de etanol para promover a formação de componentes leves na estrutura do biodiesel. O biodiesel obtido é não tóxico, degradável e renovável. A transformação bioquímica inclui dois tipos de digestão anaeróbica e fermentação.

O pré-tratamento da biomassa microalgal geralmente é necessário para a conversão em metano, hidrogênio e vários produtos de álcool. A conversão termoquímica é uma tecnologia de conversão promissora, incluindo pirólise, liquefação hidrotérmica (HTL) e gaseificação. Entre eles, o processo de transformação de HTL não requer um processo de secagem intensivo em energia e é um método de tratamento que age diretamente na biomassa microalgal úmida. Os produtos resultantes são principalmente bio-óleo. O HTL é muito atraente para a produção de combustíveis líquidos a partir de biomassa úmida e espera-se que seja uma tecnologia-chave para resolver o problema do gargalo do processo de consumo excessivo de energia na secagem<sup>63</sup>.

O uso de microalgas para captura de carbono visando à produção de biocombustíveis tem vantagens óbvias. Embora o armazenamento de CO<sub>2</sub> seja reduzido, o cultivo de microalgas não pode competir com o mercado alimentar. Do ponto de vista técnico, a utilização de CO<sub>2</sub> para cultivar microalgas e convertê-las em biocombustíveis tem grande potencial de produção. No entanto, a economia desta abordagem de utilização é complexa, e mais pesquisas ou melhorias técnicas são necessárias para apoiar a viabilidade econômica<sup>64</sup>.

62 KHAN, M. A. *et al.* Biohydrogen production from anaerobic digestion and its potential as renewable energy. *Renewable Energy*, v. 129, p. 754-768, 2018.  
63 GODIN, J. *et al.* Advances in recovery and utilization of carbon dioxide: a brief review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 9, n. 4, p. 105644, 2021.  
64 SIDDIKI, Sk Y. A. *et al.* Microalgae biomass as a sustainable source for biofuel, biochemical and biobased value-added products: an integrated biorefinery concept. *Fuel*, v. 307, p. 121782, 2022.

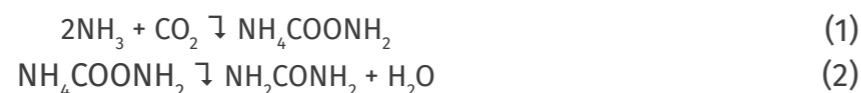
### 3.6.4 Utilização química

Na indústria química, o CO<sub>2</sub> é uma matéria-prima importante. Utilizando o CO<sub>2</sub> como reagente, por meio de reações químicas apropriadas, muitos produtos químicos como ureia, ácido salicílico, éter dimetílico, ácidos orgânicos, hidrocarbonetos, álcoois, aminas, ésteres e poliésteres podem ser sintetizados. A **Figura 11** resume vários produtos químicos gerados a partir de CO<sub>2</sub>.

Assim como na utilização física, os produtos sintetizados pela utilização química serão eventualmente oxidados em diferentes escalas de tempo para CO<sub>2</sub>, que será emitido na atmosfera. Os produtos gerados pela conversão química do CO<sub>2</sub> podem ser classificados em três categorias: produtos químicos a granel, combustíveis orgânicos e materiais poliméricos.

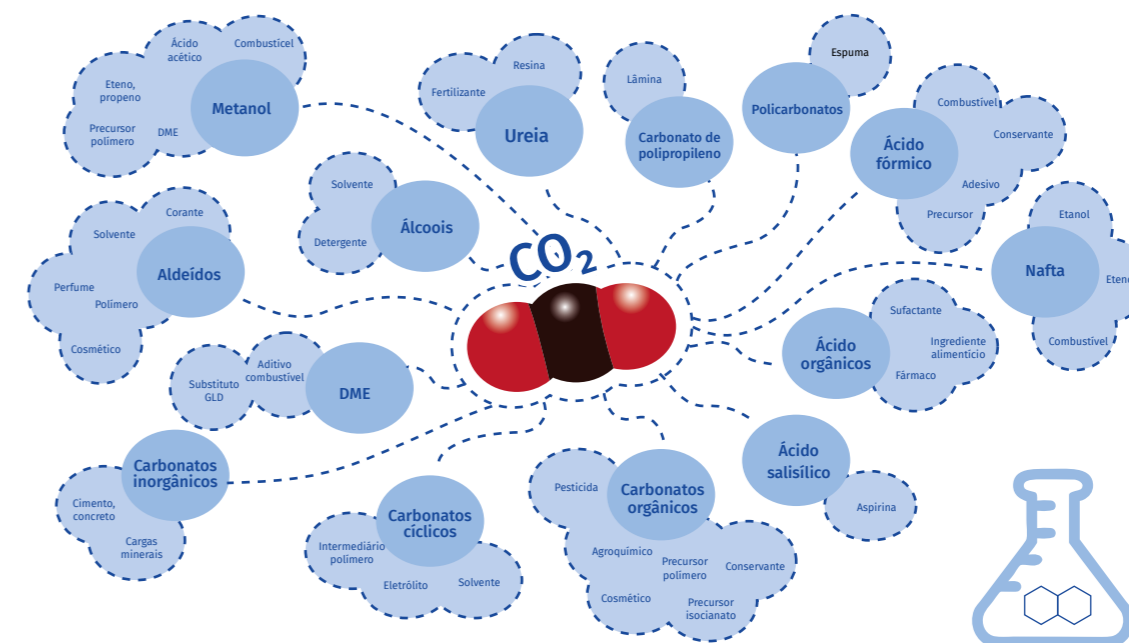
Nas aplicações tradicionais da indústria química, os produtos químicos mais representativos para a utilização do CO<sub>2</sub> são a ureia e o ácido salicílico, sendo a produção de ureia a via de utilização química mais importante para o CO<sub>2</sub>.

Os principais métodos de produção industrial de ureia são a reação de amônia e CO<sub>2</sub>. O processo de preparação da ureia consiste em duas etapas de reação. A síntese de metilamônio por NH<sub>3</sub> supercrítico e CO<sub>2</sub> e a desidratação do metilamônio para formar ureia (Reações 1 e 2). A síntese de ureia consome cerca de 80% da produção global de amônia e várias condições de processo para a síntese de ureia dessa maneira são alta temperatura e alta pressão<sup>65</sup>.



65 SHI, J. G.; LIU, Z. J.; LIU, C. S. Advances in urea production technology using carbon dioxide. *Sino-Global Energy*, v. 24, n. 1, p. 68-79, 2019.

**Figura 11** - Rotas e implantação de CO<sub>2</sub> como matéria-prima para produção de produtos químicos com valor agregado.



Fonte: Adaptado de DECHEMA - Carbon for power-to-X-suitable CO<sub>2</sub> sources and integration in PtX value chains<sup>66</sup>.

O ácido salicílico pode ser sintetizado por CO<sub>2</sub> e fenol em altas temperaturas e pressões. Similar à síntese de ureia, o processo de síntese de ácido salicílico tem condições ruins, tempo de reação longo e grande consumo de energia<sup>67</sup>.

O CO<sub>2</sub> pode ser convertido em materiais poliméricos de valor agregado, como poliésteres cíclicos e poliésteres. Poliésteres cíclicos são moléculas cíclicas de éteres e possuem amplas aplicações em catalisadores, líquidos iônicos, cosméticos, produtos farmacêuticos e assim por diante. A polimerização de éteres cíclicos pode ser realizada por CO<sub>2</sub> e álcoois para preparar poliésteres cíclicos. Poliésteres são um tipo de polímero com ligações éster na cadeia principal, amplamente utilizados em embalagens, fibras, têxteis e assim por diante<sup>68</sup>.

#### 3.6.4.1 Redefinindo a cadeia de suprimentos petroquímicos

A indústria petroquímica estabeleceu os fundamentos para uma série de cadeias de valor downstream. Com uma produção global avaliada em cerca de 6 trilhões de dólares americanos (em 2017) e em constante crescimento até os dias de hoje, esse setor ressalta

66 DECHEMA. *Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. Carbon for Power-to-X-Suitable CO<sub>2</sub> Sources and integration in PtX value chains*. abr. 2024.

67 ZHANG, J. L.; YANG, T. H. Chemical utilization of carbon dioxide as a resource. *Coal Chemical Industry*, v. 44, n. 3, p.1-15, 2016.

68 QIN, Y. S.; WANG, X. H.; WANG, F. S. Synthesis and properties of carbon dioxide based copolymers. *Sci. Sin. Chim.*, v. 48, n. 8, p. 883-893, 2018.

sua importância econômica. No entanto, sua forte dependência de recursos fósseis exige urgentemente uma transição para fontes mais sustentáveis. Tanto como fonte de energia quanto de matéria-prima, os recursos fósseis tornaram esse setor um dos principais contribuintes para as emissões globais de CO<sub>2</sub> na indústria<sup>69 70</sup>.

A própria escala de produção pode se tornar um desafio durante o processo de transformação. A produção de plásticos, por exemplo, aumentou em 360 Mt/a apenas em 2018. Em 2020, a produção de amônia na indústria de fertilizantes atingiu 175 Mt/a, enquanto outra base química crucial, o metanol, alcançou cerca de 100 Mt/a em 2019<sup>71</sup>.

Para substituir essas cadeias de valor fósseis, estão sendo adotadas novas rotas de produção para promover um futuro sustentável no setor químico e petroquímico, por meio de tecnologias inovadoras. Os recursos fósseis serão substituídos por matérias-primas alternativas que também contenham carbono, visando à produção de hidrocarbonetos. Entre as opções comuns para estabelecer fontes alternativas de carbono estão a biomassa, processos de reciclagem e a captura de CO<sub>2</sub> de diversas fontes.

Embora a biomassa apresente capacidades limitadas e as abordagens de economia circular ainda não estejam amplamente implementadas, o CO<sub>2</sub> emerge como um componente essencial na busca por fontes de carbono limpas.

No entanto, essa transição não ocorre sem custos significativos. Análises tecnoeconômicas indicam que a desfossilização completa do setor petroquímico resultará em um aumento de mais de 35% nos custos de energia e matéria-prima. As alternativas de baixo carbono, embora promissoras, exigirão investimentos substanciais e medidas regulatórias adicionais para alcançarem competitividade frente aos produtos baseados em combustíveis fósseis<sup>72</sup>.

#### 3.6.4.2 Produção de combustíveis sintéticos a partir de CO<sub>2</sub>

O CO<sub>2</sub> capturado pode ser sintetizado em combustíveis orgânicos como metano, metanol, ácido fórmico e éter dimetílico por hidrogenação catalítica. Ao contrário dos combustíveis fósseis convencionais, esse e-combustível produzido pela hidrogenação do CO<sub>2</sub> não gera emissões adicionais de CO<sub>2</sub> após o uso. Após a combustão do combustível, o CO<sub>2</sub> é liberado de volta para a atmosfera, onde pode ser recapturado para sintetizar o combustível, criando um ciclo neutro em carbono (**Figura 12**)<sup>73</sup>.

69 GALÁN-MARTÍN, Á. *et al.* Sustainability footprints of a renewable carbon transition for the petrochemical sector within planetary boundaries. *One Earth*, v. 4, n. 4, p. 565-583, 2021. Disponível em: DOI: 10.1016/j.oneear.2021.04.001. Acesso em: 30 abr. 2024

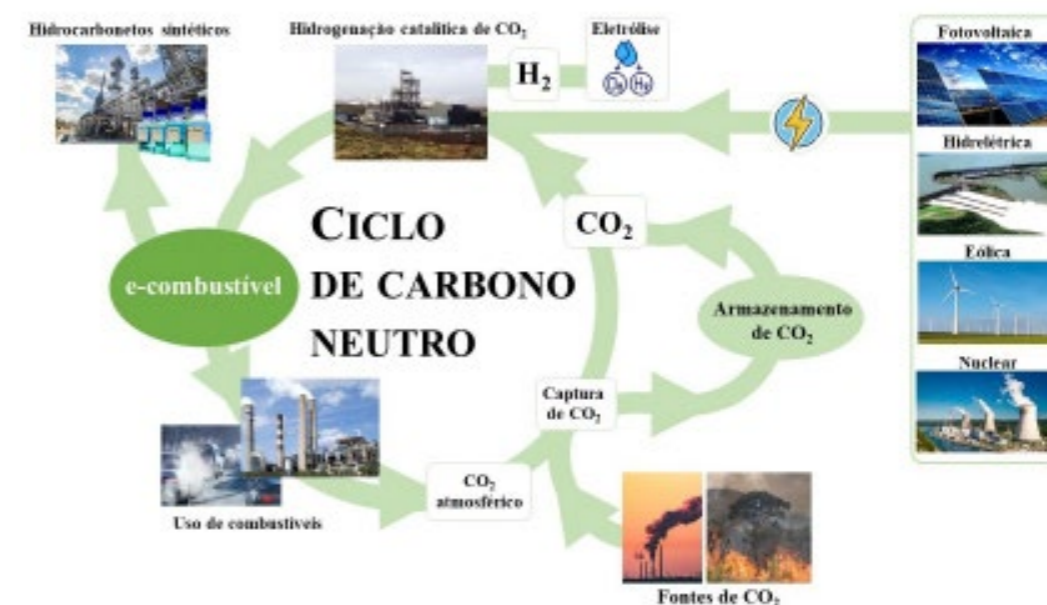
70 INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA. *The future of petrochemicals*. 2018. Disponível em: [https://iea.blob.core.windows.net/assets/bee4ef3a-8876-4566-98cf-7a130c013805/The\\_Future\\_of\\_Petrochemicals.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/bee4ef3a-8876-4566-98cf-7a130c013805/The_Future_of_Petrochemicals.pdf). Acesso em: 10 maio 2024.

71 SAYGIN, D.; GIELEN, D. Zero-emission pathway for the global chemical and petrochemical sector. *Energies*, v. 14, n. 13, p. 3772, 2021. Disponível em: DOI: 10.3390/en14133772. Acesso em: 10 abr. 2024

72 SAYGIN, D.; GIELEN, D. Zero-emission pathway for the global chemical and petrochemical sector. *Energies*, v. 14, n. 13, p. 3772, 2021. Disponível em: DOI: 10.3390/en14133772. Acesso em: 10 abr. 2024

73 KAR, S. *et al.* Advances in catalytic homogeneous hydrogenation of carbon dioxide to methanol. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, v. 23, p. 212-218, 2018.

**Figura 12** - Diagrama esquemático do ciclo de neutralização de carbono.



**Fonte:** Adaptado de Research progress on CO<sub>2</sub> capture and utilization technology.

O metano é um combustível doméstico e industrial importante e o principal componente do gás natural. Quando a proporção de H<sub>2</sub> para CO<sub>2</sub> na hidrogenação do CO<sub>2</sub> é igual a 4, resulta na formação de CH<sub>4</sub> pela reação de metanização (Reação 3). A reação de metanização de CO<sub>2</sub> foi proposta pelo químico francês Paul Sabatier, então também é chamada de reação de Sabatier. A reação é exotérmica e requer aquecimento na presença de catalisadores. Atualmente, após muitos estudos, os componentes ativos Co, Ni, Ru etc. foram relatados como catalisadores eficientes<sup>74</sup>.



A conversão de CO<sub>2</sub> em metanol é de particular importância porque o metanol tem excelentes características de combustão e é um dos principais combustíveis de transporte. A hidrogenação catalítica do CO<sub>2</sub> pode sintetizar metanol (Reação 4), mas frequentemente também leva à reação reversa do deslocamento gás-água (Reverse Water-Gas Shift, RWGS – Reação 5).

A ocorrência da reação RWGS consumirá parte do H<sub>2</sub>, resultando em um rendimento de metanol mais baixo. Ao mesmo tempo, as duas reações trarão um aumento na produção de água, enfraquecendo assim o efeito catalítico do catalisador. Portanto, a seleção do catalisador é a chave para a hidrogenação catalítica do CO<sub>2</sub> para metanol.

74 WU, H. C. *et al.* Influence of sodium-modified Ni/SiO<sub>2</sub> catalysts on the tunable selectivity of CO<sub>2</sub> hydrogenation: effect of the CH<sub>4</sub> selectivity, reaction pathway and mechanism on the catalytic reaction. *Journal of Colloid and Interface Science*, v. 586, p. 514-527, 2021.



O éter dimetílico (DME) é um bom combustível auxiliar para veículos. O DME pode ser preparado diretamente por hidrogenação de CO<sub>2</sub> ou ser desidratado a partir de metanol produzido pela hidrogenação de CO<sub>2</sub> (Reações 6 e 7)<sup>75</sup>.



O ácido fórmico é considerado uma matéria-prima potencial para células a combustível de baixa temperatura. A Reação 8 mostra a fórmula de hidrogenação de CO<sub>2</sub> para sintetizar ácido fórmico.



Atualmente, os catalisadores homogêneos são os mais estudados para a hidrogenação de CO<sub>2</sub> para ácido fórmico. Em comparação com os catalisadores heterogêneos, os sistemas catalíticos homogêneos têm condições mais suaves e maior eficiência catalítica<sup>76</sup>.

Uma vez que essas tecnologias ainda não estão disponíveis em escala industrial completa, há desenvolvimento necessário para substituir os processos baseados em combustíveis fósseis. No entanto, a maturidade e o potencial do e-combustível crescem rapidamente e uma multiplicidade de rotas de produção estão sendo desenvolvidas para uma escala industrial.

Uma grande vantagem da produção dos e-combustíveis reside na integração perfeita na infraestrutura já existente e, além disso, tecnologias como o processo Fischer-Tropsch são bem conhecidas e foram desenvolvidas ao longo de um extenso período de tempo.

Vários projetos internacionais trabalham na implementação dessas tecnologias para atingir uma escala comercial. A construção de uma planta pela empresa alemã INERATEC começou em 2023 e produzirá 2.500 t de combustível por ano. De 10.000 t de CO<sub>2</sub> biogênico até 4,6 milhões de litros de e-combustíveis serão produzidos no parque industrial Höchst. A fonte de carbono para este projeto vem de uma planta de biogás. A organização sem fins lucrativos alemã Atmosfair usa 2,3% de DAC e uma planta de biogás para fornecimento de CO<sub>2</sub> em um

projeto de e-querosene. A Norsk e-Fuels também segue uma abordagem combinada com DAC e CO<sub>2</sub> de correntes de resíduos gasosos biogênicos<sup>77</sup>.

No total, a Norsk e-Fuels pretende produzir até 250 milhões de litros de e-combustíveis até 2030, com foco no setor de aviação (80%) e nafta residual como matéria-prima para a indústria

<sup>75</sup> JIN, C. L. *et al.* CO<sub>2</sub> Chemistry-actuality and expectation. *Progress in Chemistry*, v. 22, n. 06, p. 1102, 2010.

<sup>76</sup> RUMAYOR, M.; DÓMINGUEZ-RAMOS, A.; IRABIEN, A. Formic acid manufacture: carbon dioxide utilization alternatives. *Applied Sciences*, v. 8, n. 6, p. 914, 2018.

<sup>77</sup> HAUPTMEIER, K. *Norsk e-fuel industrializing PTL for the renewable markets of tomorrow*. 2022.

química<sup>78</sup>. Uma planta de metanol verde na Tasmânia pela Abel Energy será abastecida com carbono biogênico para produzir cerca de 200.000 a 300.000 t por ano<sup>79</sup>. Na França, 300.000 t de CO<sub>2</sub> por ano serão capturadas pela fabricante de aço ArcelorMittal em cooperação com ENGIE e Infinium para a produção de e-combustível em um projeto chamado Reuze<sup>80</sup>. Uma planta chinesa capturará 150.000 t de CO<sub>2</sub> por ano de outros processos industriais para gerar 100.000 t de metanol por ano. Nos Estados Unidos, a empresa Infinium usará 18.000 t de CO<sub>2</sub> por ano para produzir e-querosene e e-diesel<sup>81</sup>.

Todos esses empreendimentos são os primeiros passos para alcançar a escala industrial para a produção de e-combustíveis. A longo prazo, uma fonte sustentável e suficiente de CO<sub>2</sub> como matéria-prima precisa ser fornecida para esses combustíveis sintéticos.

A valorização de fontes de pontos industriais torna possível cobrir a demanda para a implementação dessas tecnologias. No entanto, há um perigo de gargalo, uma vez que todos os setores visam a se tornar neutros em carbono até 2050 e estão ansiosos para reduzir as emissões de CO<sub>2</sub>. Com o tempo, essas fontes de carbono diminuirão. Portanto, fontes de carbono alternativas de origem biogênica, e especialmente a implantação de DAC, se tornarão mais importantes no futuro (**Figura 13**). Embora a DAC em grande escala ainda não esteja estabelecida a curto prazo, cenários de longo prazo mostram que a demanda de CO<sub>2</sub> aumentará drasticamente.

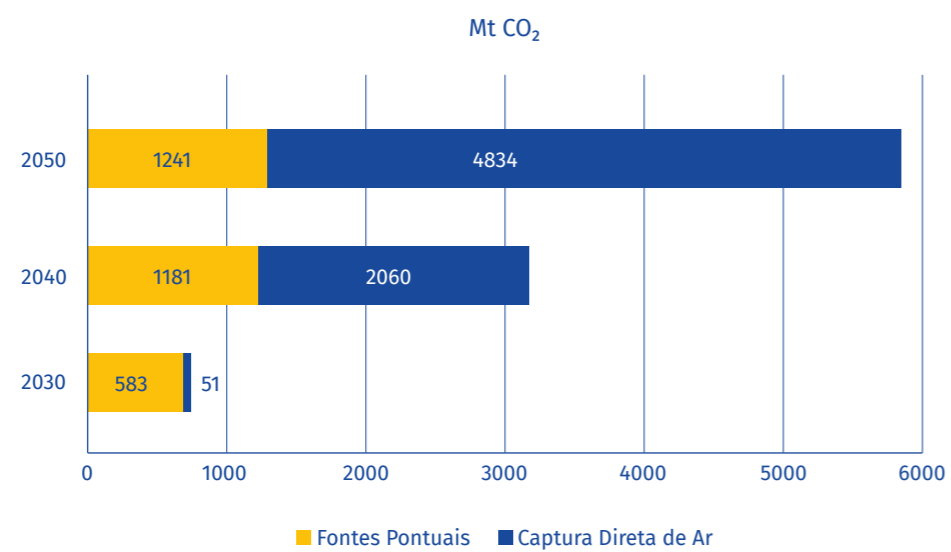
<sup>78</sup> ENGIE. *Engie and Infinium unveil a partnership to develop an industrial hub on an European scale to produce synthetic fuel in Dunkirk*. Feb. 2022. Disponível em: <https://en.newsroom.engie.com/news/engie-and-infinium-unveil-a-partnership-to-develop-an-industrial-hub-on-an-european-scale-to-produce-synthetic-fuel-in-dunkirk-a098-314df.html>. Acesso em: 10 maio 2024.

<sup>79</sup> CARBON RECYCLING INTERNATIONAL. *The sailboat CO<sub>2</sub> to green methanol project*: chemical products from recycled CO<sub>2</sub>. 2022. Disponível em: [https://www.carbonrecycling.is/projects\\_2022](https://www.carbonrecycling.is/projects_2022). Acesso em maio/2024. Acesso em: 25 abr. 2024.

<sup>80</sup> E-FUEL ALLIANCE. *Selection of announced or already existing production sites*. 2024. Disponível em: <https://www.efuel-alliance.eu/efuels/efuels-production-map>. Acesso em: 25 abr. 2024.

<sup>81</sup> RAM, M. *et al.* *Power fuels in a renewable energy world*. Global volumes, costs, and trading 2030 to 2050. Lappeenranta, Berlin: LUT University and Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), 2020.

**Figura 13** - Demanda de CO<sub>2</sub> para produção de e-combustíveis.



**Fonte:** DECHEMA - Carbon for power-to-X-suitable CO<sub>2</sub> sources and integration in PtX value chains<sup>82</sup>.

## 4 ETAPA PROSPECTIVA

A segunda etapa, denominada “etapa prospectiva”, é fundamentada em uma metodologia refinada com base nas informações obtidas na fase anterior (pré-prospectiva). Nessa etapa, são utilizadas palavras-chave mais específicas para uma busca mais direcionada, abrangendo documentos técnicos como artigos científicos e patentes. Esses documentos são então submetidos a uma análise detalhada, na qual são avaliados critérios como ano de publicação, país de origem, tipo de autor e enfoque em relação ao objeto de estudo. Essa abordagem permite uma investigação mais precisa e aprofundada das tendências e desenvolvimentos relevantes no campo em questão.

Com base nos documentos selecionados conforme a prospectiva tecnológica (bibliometria e patenteometria), as informações extraídas foram analisadas em diferentes níveis: macro, meso e micro:

- a) macro - nesta etapa os documentos foram examinados de acordo com os seguintes critérios:
  - análise temporal: esta análise envolveu a distribuição do número de artigos publicados por ano, dentro do intervalo temporal definido no escopo do projeto;
  - país: foi realizada uma análise da distribuição dos artigos publicados por país de origem dos autores;
  - afiliação: foi feita uma análise da distribuição de artigos de acordo com a instituição cujo autor principal é afiliado, como centro de pesquisa, universidade, empresa etc.
- b) meso - os documentos foram categorizados de acordo com seus aspectos mais relevantes relacionados ao tema (cenários D e E);
- a) micro - este nível se refere às características específicas de cada taxonomia identificada na análise meso.

Além disso, também foram pesquisados a legislação brasileira para o marco regulatório de CCUS e os projetos de pesquisa em andamento no país. Isso proporciona uma visão holística do estado atual e futuro das tecnologias de captura e utilização de CO<sub>2</sub> no Brasil, evidenciando o compromisso do país com a inovação e a sustentabilidade.

Cabe ressaltar que esses níveis de análise fornecem uma visão abrangente e detalhada sobre os documentos selecionados, permitindo uma compreensão mais profunda das tendências, colaborações e aspectos relevantes no campo da prospectiva tecnológica.

## 4.1 ARTIGOS CIENTÍFICOS

Essa etapa de mapeamento e análise de artigos científicos no âmbito da captura e utilização de CO<sub>2</sub> como matéria-prima para geração de combustíveis envolveu a seleção de estratégias de busca por palavras-chave na base de dados do Web of Science<sup>83</sup>.

O Web of Science, uma plataforma desenvolvida pela Clarivate Analytics, é amplamente reconhecido como uma das maiores fontes de literatura técnica e científica revisada por pares. Ele oferece uma visão abrangente do que está sendo publicado sobre determinado tema, permitindo encontrar informações de instituições específicas ou de autores em particular.

A plataforma abrange uma vasta coleção de periódicos acadêmicos, revistas científicas revisadas por pares, livros, capítulos de livros e outros tipos de literatura científica. É uma ferramenta essencial para buscar artigos científicos, analisar citações, rastrear o impacto de pesquisas e identificar tendências em diferentes campos do conhecimento.

Além disso, o Web of Science oferece recursos adicionais, como gráficos de tendências de pesquisa e acesso a artigos publicados recentemente, tornando-se valioso para a comunidade acadêmica na disseminação e avanço do conhecimento científico.

A escolha do Web of Science se deu pela sua vasta cobertura, facilidade de *download* de documentos, relevância dos artigos disponíveis e pela estrutura amigável do site, que facilita análises detalhadas.

### 4.1.1 Busca em artigos científicos

Para a pesquisa na plataforma consideramos cenários A-E, e foram utilizadas as seguintes palavras-chave para cada cenário:

- A. CO<sub>2</sub> capture;
- B. CO<sub>2</sub> use;
- C. capture and use of CO<sub>2</sub>;
- D. capture and use of CO<sub>2</sub> for biofuel production;
- E. capture and use of CO<sub>2</sub> for e-fuels production.

Para este relatório, foram selecionados artigos que tratam da captura do CO<sub>2</sub>, da utilização do CO<sub>2</sub>, da captura e utilização do CO<sub>2</sub>, da captura e utilização do CO<sub>2</sub> para produção de biocombustíveis e da captura e utilização do CO<sub>2</sub> para produção de e-combustíveis. A seleção

83 CLARIVATE. **Web Of Science Platform**. 2024. Disponível em: <https://clarivate.com/products/scientific-and-academic-research/research-discovery-and-workflow-solutions/webofscience-platform/>. Acesso em: 02 abr. 2024.

levou em consideração artigos científicos mais recentes, com maior impacto, visibilidade e citações na área acadêmica. A pesquisa final foi realizada em 13 de maio de 2024, às 10h, horário de Brasília. Os artigos científicos foram limitados entre 2019 e maio/2024.

Durante esta etapa, foram conduzidos testes de palavras-chave para determinar a combinação que resultaria na melhor seleção de documentos dentro do escopo desejado, conforme apresentado na **Tabela 1**:

**Tabela 1** - Combinações de palavras-chaves testadas e número de artigos encontrados.

Cenário	Combinação de palavras-chave	Nº de artigos encontrados
A	'Carbon capture' or 'CO <sub>2</sub> capture'	27.194
B	'Carbon use' or 'CO <sub>2</sub> use'	118.671
C	'carbon capture and use' or 'CO <sub>2</sub> capture and use'	16.647
D	'Carbon capture and use and biofuel production' or 'CO <sub>2</sub> capture and use and biofuel production'	266
E	'Carbon capture and use and e-fuel production' or 'CO <sub>2</sub> capture and use and e-fuel production'	1.748

Fonte: Elaboração própria (2024).

A diferença no número de artigos encontrados entre os cenários de captura de CO<sub>2</sub> e utilização de CO<sub>2</sub> (cenários A e B, respectivamente) é bastante significativa, o que indica uma disparidade na atenção dada a esses dois aspectos da gestão do CO<sub>2</sub>.

No cenário A, que se concentra na captura de CO<sub>2</sub>, foram encontrados 27.194 artigos. Isso sugere que há um interesse considerável na pesquisa sobre métodos e tecnologias para capturar o CO<sub>2</sub> da atmosfera ou de fontes industriais. Isso é compreensível, dada a urgência em encontrar soluções para mitigar as emissões de CO<sub>2</sub> e combater as mudanças climáticas.

Por outro lado, no cenário B, que aborda a utilização de CO<sub>2</sub>, o número de artigos encontrados é muito maior, totalizando 118.671. Isso indica que há um interesse ainda maior na pesquisa sobre como utilizar o CO<sub>2</sub> de maneira eficaz e produtiva. Isso inclui o desenvolvimento de tecnologias para transformar o CO<sub>2</sub> em produtos úteis, como combustíveis, materiais de construção e produtos químicos, em vez de simplesmente armazená-lo.

A diferença nos números entre os cenários A e B reflete uma mudança de foco na comunidade científica, passando da simples captura para a utilização ativa do CO<sub>2</sub> como recurso. Isso sugere um reconhecimento crescente da importância não apenas de reduzir a concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera, mas também de encontrar maneiras de transformar o CO<sub>2</sub> em uma oportunidade para a inovação e o desenvolvimento sustentável.

No cenário D, que se concentra na produção de biocombustíveis a partir do CO<sub>2</sub> capturado, foram encontrados apenas 266 artigos. Isso sugere que há um interesse limitado na pesquisa sobre a aplicação da captura de CO<sub>2</sub> especificamente para a produção de biocombustíveis. Isso pode ser atribuído a vários fatores, incluindo desafios técnicos e econômicos associados à conversão eficiente de CO<sub>2</sub> em biocombustíveis, bem como a competição com outras fontes de biocombustíveis.

Por outro lado, no cenário E, que aborda a produção de e-combustíveis a partir do CO<sub>2</sub> capturado, o número de artigos encontrados é consideravelmente maior, totalizando 1.748. Isso indica um interesse maior na pesquisa sobre a utilização do CO<sub>2</sub> para a produção de combustíveis sintéticos, conhecidos como e-combustíveis. Esses combustíveis têm o potencial de oferecer uma alternativa de baixa emissão de carbono aos combustíveis fósseis, especialmente em setores difíceis de descarbonizar, como transporte aéreo e marítimo.

A diferença nos números entre os cenários D e E pode refletir a crescente ênfase na produção de combustíveis sintéticos como parte da transição para uma economia de baixo carbono. Enquanto os biocombustíveis têm sido uma opção amplamente explorada, os e-combustíveis estão emergindo como uma área de pesquisa promissora devido à capacidade de aproveitar o CO<sub>2</sub> como matéria-prima e integrá-lo em ciclos de carbono fechados.

#### 4.1.2 Resultados da busca em artigos científicos

Na fase inicial da elaboração do roadmap tecnológico para a captura e utilização de CO<sub>2</sub> como matéria-prima para geração de combustíveis, iniciamos com a seleção de palavras-chave e estratégias de busca em artigos científicos por meio da plataforma Web of Science, conforme demonstrado na **Tabela 1**.

Com base nos resultados obtidos, a análise macro foi realizada para todos os cenários (A-E), e as análises meso e micro foram realizadas somente para os cenários D e E.

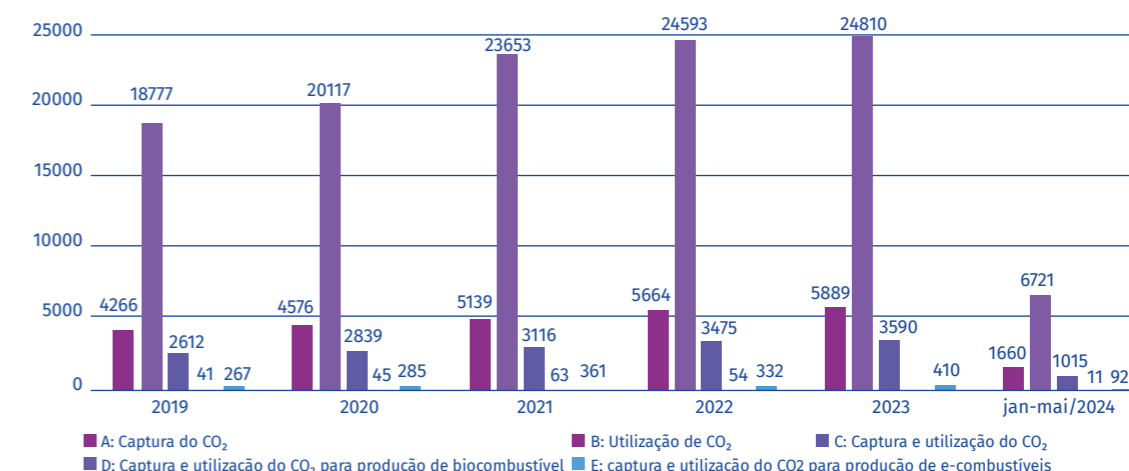
##### 4.1.2.1 Análise macro

###### 4.1.2.1.1 Análise temporal

A análise inicial se concentrou na distribuição das publicações ao longo dos últimos cinco anos (2019-2023, e janeiro-maio de 2024). Essa análise ajuda a projetar tendências de crescimento ou declínio nas pesquisas científicas nas áreas específicas de conhecimento. A série temporal foi construída com base em todos os documentos recuperados na busca para os cenários A-E, proporcionando uma visão abrangente da evolução do campo ao longo do tempo. **A Figura 14** mostra o resultado para todos os cenários.

Conduzimos uma investigação inicial empregando a palavra-chave “CO<sub>2</sub> capture” - cenário A. A análise revelou que a maioria das publicações ocorreu nos anos de 2021, 2022 e 2023, totalizando 5.139, 5.664 e 5.889 artigos publicados por ano, respectivamente. Esses números sugerem um aumento no interesse e na atividade de pesquisa relacionados à captura de CO<sub>2</sub> ao longo desses anos.

**Figura 14 - Artigos / ano – cenários A-E.**



Fonte: Elaboração própria (2024).

Essa tendência ascendente pode ser atribuída a vários fatores, incluindo a crescente conscientização sobre as mudanças climáticas e a necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Além disso, avanços tecnológicos e políticas ambientais mais rigorosas podem estar impulsionando a pesquisa e o desenvolvimento de métodos eficazes de captura de CO<sub>2</sub>. A compreensão dessas tendências temporais é fundamental para orientar futuras investigações e iniciativas no campo da captura de CO<sub>2</sub> e mitigação das mudanças climáticas.

Conforme indicado na **Figura 14**, conduzimos uma nova análise com o termo “CO<sub>2</sub> use”. No cenário B, identificamos um total de 118.671 publicações. Assim como no cenário A, observamos que a maioria das publicações ocorreu nos anos de 2021, 2022 e 2023, com 23.653, 24.593 e 24.810 artigos publicados por ano, respectivamente.

Esses resultados sugerem um interesse significativo e crescente na pesquisa sobre o uso de CO<sub>2</sub> como matéria-prima durante os anos recentes. É importante notar que a quantidade de publicações relacionadas ao uso de CO<sub>2</sub> é substancialmente maior que as relacionadas à sua captura, como evidenciado pela diferença nos números de artigos entre os cenários A e B.

Essa disparidade pode ser atribuída a vários fatores, incluindo o crescente reconhecimento das oportunidades de mitigação das mudanças climáticas por meio da utilização de CO<sub>2</sub> como recurso em vez de considerá-lo apenas como um resíduo poluente. Além disso,

avanços tecnológicos e iniciativas governamentais para promover a economia circular e a sustentabilidade podem estar impulsionando a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias que aproveitam o CO<sub>2</sub> de maneira mais eficaz.

Ao expandir nossa busca com as palavras-chave “capture and use of CO<sub>2</sub>”, observamos uma tendência semelhante aos cenários anteriores, como destacado no cenário C. Mais uma vez, a maior parte das publicações ocorreu nos anos de 2021, 2022 e 2023, com 3.116, 3.475 e 3.590 artigos publicados por ano, respectivamente.

Essa consistência nos resultados ao longo dos anos sugere uma continuidade no interesse e na atividade de pesquisa relacionada à captura e utilização de CO<sub>2</sub>. Além disso, a abordagem de captura e utilização de CO<sub>2</sub> pode ser vista como uma abordagem mais abrangente e integrada para lidar com as emissões de CO<sub>2</sub>. Em vez de apenas capturar e armazenar o CO<sub>2</sub>, essa abordagem busca aproveitá-lo como matéria-prima para produzir produtos úteis.

Ao empregar a busca com as palavras-chave “capture and use of CO<sub>2</sub> for biofuel production” no cenário D, observamos uma redução significativa no número de publicações por ano em comparação com os cenários anteriores. É importante ressaltar que, nessa busca refinada, foram identificados apenas 266 artigos. Assim como nos cenários anteriores (A, B e C), o período de 2021 a 2023 se destacou como o período com o maior número de publicações.

Em 2021, foram publicados 63 artigos, seguidos por 54 artigos em 2022 e 52 artigos em 2023 (**Figura 14**). Isso indica que, embora haja um interesse contínuo na pesquisa sobre a captura e utilização do CO<sub>2</sub> para a produção de biocombustíveis, o foco nesse campo específico pode ser relativamente menor em comparação com pesquisas mais abrangentes sobre a captura e uso do CO<sub>2</sub> em geral. Essa redução no número de publicações pode sugerir uma área de pesquisa mais especializada e talvez menos explorada, abrindo espaço para estudos mais aprofundados e inovações significativas nesse campo específico.

Na busca realizada no cenário E, utilizando a palavra-chave “capture and use of CO<sub>2</sub> for the production of e-fuels”, identificamos um total de 1.748 publicações. Assim como nos cenários anteriores (A a D), o período de 2021 a 2023 se destacou como o período com o maior número de publicações. Em 2021, foram publicados 361 artigos, seguidos por 332 artigos em 2022 e 410 artigos em 2023 (**Figura 14**).

Esses resultados revelam um interesse significativo na pesquisa sobre a captura e utilização do CO<sub>2</sub> para a produção de e-combustíveis, especialmente nos últimos anos. Esse aumento no número de publicações pode refletir uma crescente conscientização sobre a importância de encontrar soluções sustentáveis para o setor de combustíveis, dada a crescente preocupação com as mudanças climáticas e a necessidade de reduzir as emissões de carbono.

Além disso, a quantidade relativamente maior de publicações no cenário E em comparação com o cenário D sugere que há um interesse considerável na produção de e-combustíveis a partir do CO<sub>2</sub> em comparação com a produção de biocombustíveis. Isso pode ser atribuído à

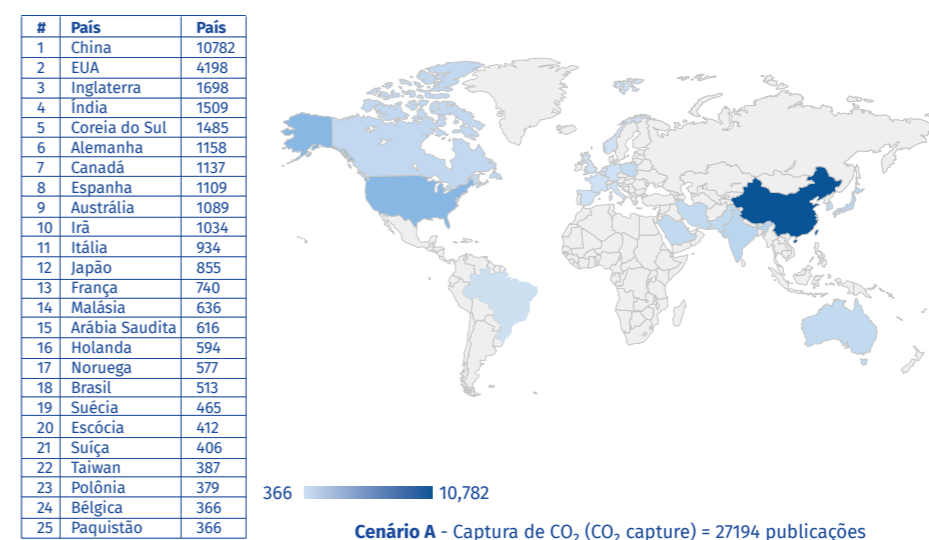
crescente ênfase na busca por alternativas renováveis e de baixo carbono para combustíveis convencionais, impulsionando assim a pesquisa e o desenvolvimento nessa área específica.

#### 4.1.2.1.2 Análise de país de origem

A segunda análise realizada tem como objetivo compreender a origem geográfica do conhecimento científico. Essa informação é crucial para identificar possíveis parcerias e desenvolver políticas públicas de cooperação entre países. Essas parcerias podem ser voltadas para o estudo de um determinado tema ou para explorar potenciais mercados, tanto como consumidores quanto como fornecedores, para a tecnologia em desenvolvimento. Essa compreensão geográfica permite uma abordagem estratégica na busca por colaborações e oportunidades de mercado.

A busca realizada para o cenário A gerou um conjunto de 27.194 artigos sobre a captura de CO<sub>2</sub>. **A Figura 15** revela uma distribuição geográfica dessas publicações, com destaque para a China, com 10.782 artigos, seguida pelos Estados Unidos, com 4.780 artigos. Esses números indicam um considerável interesse e atividade de pesquisa nesses dois países em relação à captura de CO<sub>2</sub>. Essa predominância pode refletir seus esforços para lidar com questões relacionadas às emissões de CO<sub>2</sub> e encontrar soluções de captura para mitigar os impactos das mudanças climáticas. Vale ressaltar que o Brasil também contribui para esse cenário, ocupando o 18º lugar com 513 artigos, o que evidencia seu envolvimento na pesquisa sobre esse tema crucial para a sustentabilidade ambiental.

**Figura 15 - Cenário A: captura do CO<sub>2</sub> | 27.194 artigos / país.**

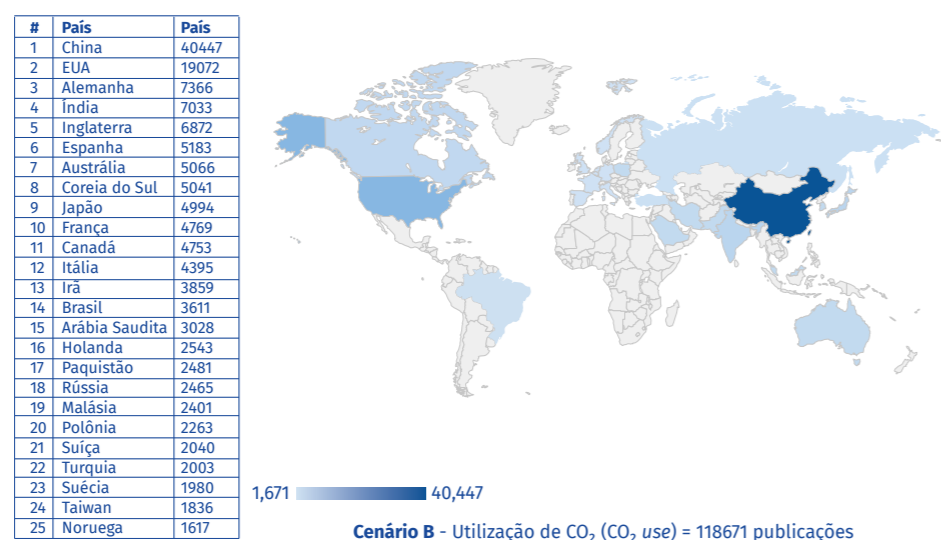


Fonte: Elaboração própria (2024).

Após refinarmos a estratégia de busca com a palavra-chave “CO<sub>2</sub> use”, conforme mostrado na **Figura 16**, realizamos uma nova análise. No cenário B, foram identificadas um total de 118.671 publicações. É relevante destacar que tanto a China quanto os Estados Unidos mantêm a liderança em termos de número de publicações relacionadas ao tema, com 40.447 e 19.072 artigos, respectivamente. Esses números evidenciam a significativa contribuição desses países para a pesquisa e desenvolvimento de tecnologias e aplicações envolvendo o uso do CO<sub>2</sub>. Vale ressaltar que o Brasil também está presente nesse cenário, ocupando o 14º lugar com 3.611 artigos, demonstrando seu engajamento na exploração desse campo científico.

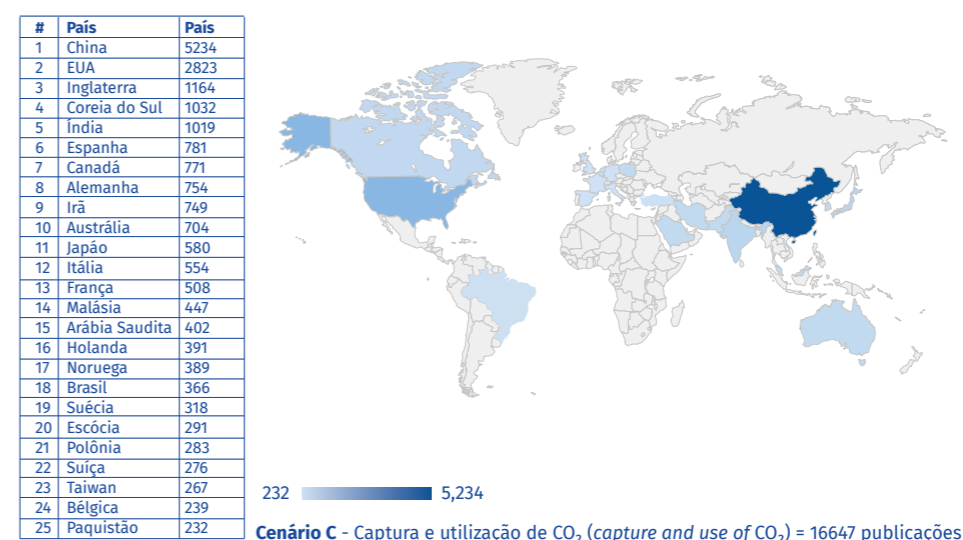
Ao direcionarmos nossa busca para a palavra-chave “capture and use of CO<sub>2</sub>”, observamos que o cenário C (**Figura 17**) ainda mantém um considerável volume de publicações, totalizando 16.647 artigos. Este cenário representa uma ampla gama de estudos sobre a captura e utilização do CO<sub>2</sub>, abrangendo diversas aplicações e potenciais usos desse recurso. China e Estados Unidos continuam liderando em termos de número de publicações neste contexto, com 5.234 e 2.823 artigos, respectivamente. Além disso, é interessante notar que o Brasil também se destaca, ocupando a 18ª posição com 366 artigos.

**Figura 16 - Cenário B: utilização do CO<sub>2</sub> | 118.671 artigos / país.**



Fonte: Elaboração própria (2024).

**Figura 17 - Cenário C: captura e utilização do CO<sub>2</sub> | 16.647 artigos / país.**



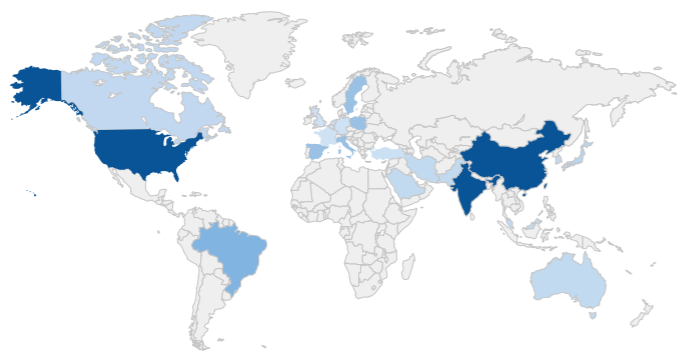
Fonte: Elaboração própria (2024).

No cenário D, que se concentra na busca por “capture and use of CO<sub>2</sub> for biofuel production”, observamos uma significativa redução no número total de artigos, chegando a apenas 266. Apesar de China e Estados Unidos continuarem liderando em termos de quantidade de artigos relacionados à produção de biocombustíveis, é interessante notar uma distribuição mais equilibrada entre os países nesse cenário específico (**Figura 18**). Nesse contexto, o Brasil se destaca ocupando o 4º lugar, com 23 artigos relacionados ao tema.

Essa posição relevante do Brasil indica sua crescente contribuição para a pesquisa e desenvolvimento de tecnologias relacionadas à produção de biocombustíveis a partir da captura e utilização do CO<sub>2</sub>. Essa participação demonstra o potencial do país em contribuir significativamente para a inovação e avanço nesse campo, destacando-se como um importante player na busca por soluções sustentáveis para a matriz energética global.

**Figura 18** - Cenário D: captura e utilização do CO<sub>2</sub> para produção de biocombustíveis | 266 artigos / país.

#	País	País
1	EUA	49
2	Índia	37
3	China	34
4	Brasil	23
5	Malásia	22
6	Espanha	19
7	Suécia	18
8	Alemanha	16
9	Inglaterra	14
10	Itália	14
11	Canadá	11
12	Irã	10
13	Austrália	8
14	Holanda	8
15	Áustria	7
16	Catar	7
17	Arábia Saudita	7
18	Paquistão	6
19	Emirados Árabes	6
20	Taiwan	6
21	França	5
22	México	5
23	Suíça	5
24	Escócia	5



5 49

**Cenário D** - Captura e utilização de CO<sub>2</sub> para produção de biocombustíveis (capture and use of CO<sub>2</sub> for biofuel production) = 266 publicações

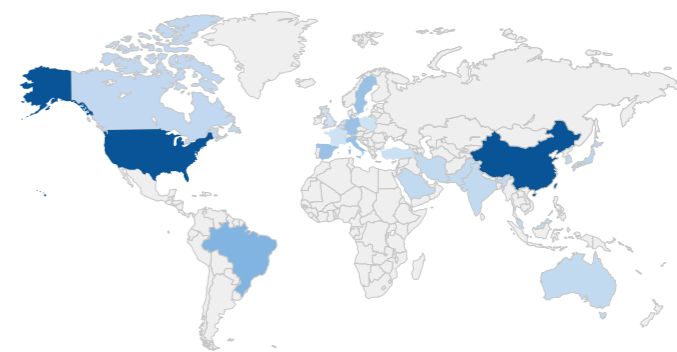
Fonte: Elaboração própria (2024).

O Brasil se destaca nesse cenário devido a diversos fatores. Primeiramente, sua extensa extensão territorial e recursos naturais favoráveis, como terras aráveis e clima propício, criam um ambiente adequado para a produção de biocombustíveis a partir de matérias-primas orgânicas. Além disso, o país possui uma longa história e expertise no desenvolvimento de biocombustíveis, especialmente o etanol derivado da cana-de-açúcar. Esse conhecimento se estende à pesquisa e desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e sustentáveis. O Brasil tem um compromisso sólido com a energia renovável e a sustentabilidade ambiental, refletido em investimentos governamentais e apoio à pesquisa nessa área. Essa abordagem tem contribuído para o reconhecimento internacional do Brasil como um importante centro de inovação em energia renovável.

No cenário E (**Figura 19**), focado na palavra-chave “capture and use of CO<sub>2</sub> for the production of e-fuels”, observamos um aumento expressivo na quantidade de artigos relacionados ao tema. Esse cenário reflete um interesse crescente na produção de combustíveis sintéticos como alternativa aos combustíveis fósseis.

**Figura 19** - Cenário E: captura e utilização do CO<sub>2</sub> para produção de e-combustíveis | 1.748 artigos / país.

#	País	País
1	EUA	296
2	China	290
3	Espanha	148
4	Alemanha	145
5	Inglaterra	138
6	Itália	131
7	Canadá	99
8	Austrália	94
9	Índia	88
10	Brasil	85
11	Coreia do Sul	82
12	Holanda	74
13	França	57
14	Irã	56
15	Suíça	55
16	Suécia	55
17	Arábia Saudita	55
18	Malásia	51
19	Bélgica	48
20	Noruega	48
21	Portugal	46
22	Polônia	38
23	Escócia	38
24	Dinamarca	37



37 296

**Cenário E** - Captura e utilização de CO<sub>2</sub> para produção de e-combustíveis (capture and use of CO<sub>2</sub> for the production of e-fuels) = 1748 publicações

Fonte: Elaboração própria (2024).

A China e os Estados Unidos ainda lideram em publicações nesse tema, com 290 e 272 artigos, respectivamente. O Brasil também se destaca, com 85 publicações, mostrando seu envolvimento e interesse no desenvolvimento de tecnologias relacionadas aos e-fuels.

O destaque do Brasil nesse contexto pode ser atribuído a diversos fatores. Primeiramente, o país possui uma indústria petrolífera robusta e uma vasta experiência na produção e exportação de petróleo e derivados. Esse conhecimento e infraestrutura podem ter impulsionado a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias relacionadas aos e-fuels como uma alternativa aos combustíveis fósseis. Além disso, o Brasil possui recursos naturais abundantes, como terras aráveis e biomassa, que podem ser aproveitados na produção de matérias-primas para e-fuels. A expertise do país na produção de biocombustíveis também pode ser aplicada à produção de e-fuels, aumentando sua relevância nesse campo.

O compromisso do Brasil com a sustentabilidade ambiental e a redução das emissões de gases de efeito estufa também desempenha um papel importante. O desenvolvimento de tecnologias de captura e uso de CO<sub>2</sub> para a produção de e-fuels está alinhado com os objetivos nacionais de mitigação das mudanças climáticas.

O destaque do Brasil nesses cenários não apenas reflete seu compromisso com a inovação e a sustentabilidade ambiental, mas também ressalta sua capacidade de contribuir de forma significativa para a busca de soluções para os desafios globais das mudanças climáticas. A posição estratégica do país como um dos principais produtores de conhecimento científico relacionado à captura e utilização de CO<sub>2</sub> demonstra sua expertise e engajamento

no desenvolvimento de tecnologias e estratégias para mitigar os impactos ambientais causados pelas emissões de gases de efeito estufa.

Além disso, a presença brasileira nesses cenários sugere um potencial significativo para o desenvolvimento de soluções tecnológicas inovadoras e estratégias eficazes para enfrentar os desafios das mudanças climáticas. Como um país com vastos recursos naturais e uma indústria em crescimento, o Brasil está bem posicionado para explorar e desenvolver abordagens sustentáveis para a captura e utilização de CO<sub>2</sub>, contribuindo assim para a transição para uma economia de baixo carbono.

Essa participação ativa do Brasil na pesquisa e desenvolvimento relacionados à captura e utilização de CO<sub>2</sub> não apenas fortalece sua posição como um líder regional em questões ambientais, mas também o coloca como um parceiro estratégico importante para iniciativas internacionais voltadas para a mitigação das mudanças climáticas. Com uma base sólida de conhecimento científico e tecnológico, o país está bem equipado para enfrentar os desafios ambientais e econômicos do século XXI e liderar o caminho em direção a um futuro mais sustentável e resiliente.

#### 4.1.2.1.3 Análise de afiliação

Uma análise importante a se considerar é a distribuição das publicações de acordo com o tipo de instituição à qual os autores estão vinculados. Isso nos permite avaliar se as inovações em estudo despertam interesse comercial, especialmente se houver um grande número de contribuições de empresas.

No cenário A, ao usar a palavra-chave “CO<sub>2</sub> capture”, foram identificadas 27.194 publicações provenientes de várias instituições. Destacam-se a Chinese Academy of Sciences, com 1.255 artigos, e o United States Department of Energy (DOE), com 748 artigos, como as instituições com o maior volume de publicações (**Figura 20**).

**Figura 20** - Cenário A: captura do CO<sub>2</sub> | 27.194 artigos / afiliação.



Fonte: Elaboração própria (2024).

A Chinese Academy of Sciences<sup>84</sup> (Academia Chinesa de Ciências) é a principal instituição de pesquisa da China, fundada em 1949, em Pequim. É uma instituição do Conselho de Estado da China e abriga mais de 120 institutos de pesquisa em todo o país. Reconhecida internacionalmente, a Academia Chinesa de Ciências desempenha um papel crucial no avanço da ciência e tecnologia em várias disciplinas.

Por outro lado, o United States Department of Energy<sup>85</sup> (Departamento de Energia dos Estados Unidos) é uma agência governamental dos Estados Unidos responsável pela política energética e pela segurança nuclear. Fundado em 1977, o DOE supervisiona programas relacionados à produção e distribuição de energia, pesquisa nuclear, conservação de energia e desenvolvimento de tecnologias de energia limpa. Além disso, o DOE é responsável pela administração de laboratórios nacionais de energia, onde importantes pesquisas científicas são conduzidas.

Ambas as instituições, a Chinese Academy of Sciences e o DOE, desempenham papéis fundamentais na pesquisa e no desenvolvimento de tecnologias relacionadas à captura de CO<sub>2</sub>. Seu envolvimento reflete o compromisso de seus respectivos países em abordar questões relacionadas à mudança climática e à sustentabilidade energética.

No cenário B, **Figura 21**, ao utilizar a palavra-chave “CO<sub>2</sub> use”, foram identificadas 118.671 publicações. Mais uma vez, a Academia Chinesa de Ciências se destacou como a principal instituição

<sup>84</sup> CHINESE ACADEMY OF SCIENCE. **Chinese academy of science**. 2024. Disponível em: [HTTPS://ENGLISH.CAS.CN/](https://ENGLISH.CAS.CN/). Acesso em: 10 maio 2024.

<sup>85</sup> US DEPARTMENT OF ENERGY. **US department of energy**. 2024. Disponível em: <https://www.energy.gov/>. Acesso em: 10 de maio de 2024.

contribuinte, com 6.125 publicações. Em segundo lugar, está o Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) da França, com 3.049 artigos, seguido pelo DOE, com 2.816 publicações.

O Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS)<sup>86</sup> é a maior organização de pesquisa da França e uma das maiores do mundo. Fundado em 1939, é uma instituição multidisciplinar que abrange diversas áreas do conhecimento, desde ciências naturais e exatas até ciências humanas e sociais.

Na busca subsequente, cenário C, com a palavra-chave “capture and use of CO<sub>2</sub>”, observou-se uma tendência semelhante aos cenários A e B, com a Academia Chinesa de Ciências liderando com 586 publicações e o DOE dos EUA com 542 publicações (**Figura 22**).

**Figura 21 - Cenário B: utilização do CO<sub>2</sub> | 118.671 artigos / afiliação.**



Fonte: Elaboração própria (2024).

86 CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE. **Centre national de la recherche scientifique**. 2024. Disponível em: <https://www.cnrs.fr/fr> Acesso em: 10 maio 2024.

**Figura 22 - Cenário C: captura e utilização do CO<sub>2</sub> | 16.647 artigos / afiliação.**



Fonte: Elaboração própria (2024).

No cenário D, **Figura 23**, ao utilizar a palavra-chave “capture and use of CO<sub>2</sub> for biofuel production”, foram identificados 266 artigos, com a Universiti Teknologi Petronas e o DOE com 14 e 13 artigos, respectivamente. A Universiti Teknologi Petronas, com sede na Malásia, é uma universidade de renome internacional, conhecida por sua excelência em pesquisa e desenvolvimento nas áreas de engenharia e energia. Fundada em 1997, a universidade tem uma forte ênfase na inovação e colaboração com a indústria, especialmente no setor de energia.



ativamente com instituições acadêmicas e industriais em todo o mundo. No contexto da produção de e-combustíveis a partir da captura e utilização de CO<sub>2</sub>, o CSIC contribui com sua expertise em ciências físicas e químicas, desenvolvendo novas tecnologias e soluções para enfrentar os desafios energéticos e ambientais contemporâneos.

A participação da USP com 23 artigos nesse contexto reflete o compromisso do Brasil com a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias energéticas avançadas. Como uma das principais universidades da América Latina, a USP desempenha um papel significativo na promoção da ciência e da inovação em nível nacional e internacional, contribuindo para o avanço do conhecimento e o desenvolvimento de soluções para questões ambientais e energéticas globais.

#### 4.1.2.2 Análise meso

Com o objetivo de compreender o tema central de cada documento, os artigos (dos cenários D e E) foram categorizados de acordo com as taxonomias listadas nas tabelas a seguir (as 5 mais representativas). Observa-se que, selecionando somente os 5 termos mais representativos, o número de artigos do cenário D foi de 266 para 204 (**Tabela 2 e Figura 25**), e no cenário E, foi de 1.748 para 928 artigos (**Tabela 3 e Figura 26**).

**Tabela 2 - Taxonomia cenário D: captura e utilização do CO<sub>2</sub> para produção de biocombustíveis | 204 artigos.**

Área de publicação   Cenário D	Nº de artigos encontrados
Fotoprodutividade	98
Energia e combustíveis	45
Bioengenharia	23
Catalisadores	20
Ciência dos materiais de papel e madeira	18

Fonte: Elaboração própria (2024).

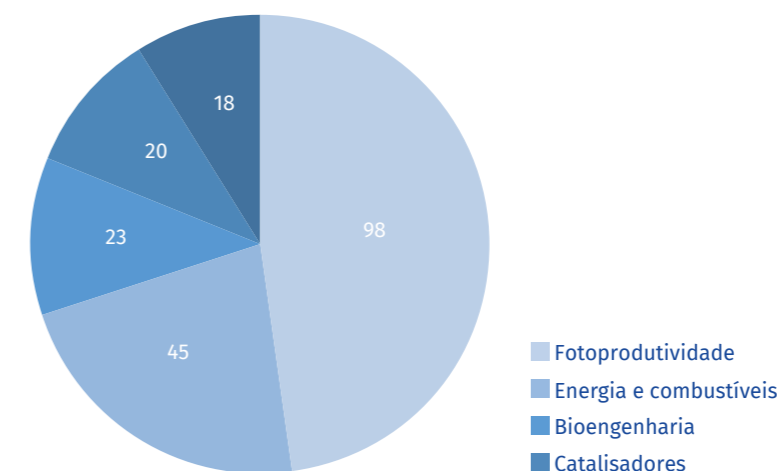
A dominância da “Fotoprodutividade”, com 98 artigos<sup>91 92 93 94 95</sup>, como a principal área de pesquisa no cenário D indica um forte empenho na exploração de tecnologias que aproveitam a luz solar para a produção de biocombustíveis. Esta área de estudo é vital para aumentar

91 ELOKA-EBOKA, A. C.; INAMBAO, F. L. Effects of CO<sub>2</sub> sequestration on lipid and biomass productivity in microalgal biomass production. *Applied Energy*, v. 195, p. 1100-1111, 2017.  
92 LI, S.; LI, X.; HO, S. H. Microalgae as a solution of third world energy crisis for biofuels production from wastewater toward carbon neutrality: an updated review. *Chemosphere*, v. 291, p. 132863, 2022.  
93 HOSSEINI, N. S.; SHANG, H.; SCOTT, J. A. Biosequestration of industrial off-gas CO<sub>2</sub> for enhanced lipid productivity in open microalgal cultivation systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 92, p. 458-469, 2018.  
94 BARAHOEI, M.; HATAMIPOUR, M. S.; AFSHARZADEH, S. CO<sub>2</sub> capturing by chlorella vulgaris in a bubble column photo-bioreactor; effect of bubble size on CO<sub>2</sub> removal and growth rate. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, v. 37, p. 9-19, 2020.  
95 CHENG, J. *et al.* Mutate Chlorella sp. by nuclear irradiation to fix high concentrations of CO<sub>2</sub>. *Bioresource technology*, v. 136, p. 496-501, 2013.

a eficiência e a viabilidade econômica da produção de biocombustíveis. Tecnologias como a fotossíntese artificial e os sistemas de bioenergia fotocatalítica têm o potencial de transformar CO<sub>2</sub> e água em combustíveis usando a energia solar, imitando processos naturais com maior eficiência. Este foco é crucial para países como o Brasil, em que a disponibilidade de luz solar é abundante, facilitando a implementação de tais tecnologias.

A área de “Energia e Combustíveis”, com 45 artigos<sup>96 97 98 99 100</sup>, continua sendo uma parte significativa da pesquisa sobre captura e utilização de CO<sub>2</sub> para a produção de biocombustíveis. Este campo abrange diversas abordagens para converter biomassa e CO<sub>2</sub> capturado em combustíveis líquidos e gasosos. Os estudos incluem processos de fermentação, pirólise, e gaseificação, que são cruciais para transformar biomassa em formas de energia utilizáveis, como biocombustíveis.

**Figura 25 - Taxonomia cenário D: captura e utilização do CO<sub>2</sub> para produção de biocombustíveis | 204 artigos.**



Fonte: Elaboração própria (2024).

96 KUMAR, M. *et al.* Carbon dioxide capture, storage and production of biofuel and biomaterials by bacteria: A review. *Bioresource technology*, v. 247, p. 1059-1068, 2018.  
97 RAZZAK, S. A. *et al.* Integrated CO<sub>2</sub> capture, wastewater treatment and biofuel production by microalgae culturing - a review. *Renewable and sustainable energy reviews*, v. 27, p. 622-653, 2013.  
98 KIM, S. *et al.* Carbon-negative biofuel production. *Environmental Science & Technology*, v. 54, n. 17, p. 10797-10807, 2020.  
99 LOZANO, E. M.; PEDERSEN, T. H.; ROSENDAHL, L. A. Integration of hydrothermal liquefaction and carbon capture and storage for the production of advanced liquid biofuels with negative CO<sub>2</sub> emissions. *Applied Energy*, v. 279, p. 115753, 2020.  
100 MISHRA, A. *et al.* Biomass energy with carbon capture and storage (BECCS). In: *Current developments in biotechnology and bioengineering*. [s./l.]: Elsevier, 2020. p. 399-427.

Com 23 artigos<sup>101 102 103 104</sup>, a “Bioengenharia” é outra área fundamental, focada em manipulações biológicas e genéticas para otimizar a produção de biocombustíveis. Pesquisas nesta área se concentram em desenvolver e modificar microrganismos ou enzimas que podem participar do processo de conversão do CO<sub>2</sub> em biocombustíveis com maior eficiência. Por exemplo, engenheiros biológicos trabalham na criação de cepas de algas geneticamente modificadas que podem realizar a fotossíntese de maneira mais eficiente, utilizando CO<sub>2</sub> capturado para produzir lipídios que são posteriormente convertidos em biocombustíveis. Este campo é essencial para aumentar a produtividade e reduzir os custos de produção, tornando os biocombustíveis mais competitivos em relação aos combustíveis fósseis.

A pesquisa em “Catalisadores”, com 20 artigos<sup>105 106 107</sup>, é vital para o desenvolvimento de materiais e processos que facilitam a conversão de CO<sub>2</sub> em biocombustíveis. Catalisadores eficientes podem acelerar as reações químicas necessárias para converter CO<sub>2</sub> e outras matérias-primas em biocombustíveis, reduzindo a energia necessária para o processo e, portanto, os custos. Estudam-se tanto catalisadores homogêneos quanto heterogêneos, além de novos materiais catalíticos como nanomateriais e compostos metálicos que podem melhorar significativamente a eficiência e seletividade das reações de conversão.

Com 18 artigos<sup>108 109</sup>, a “Ciência dos Materiais de Papel e Madeira” pode parecer menos intuitiva, mas é relevante para a utilização de resíduos de biomassa na produção de biocombustíveis. Esta área de pesquisa investiga como resíduos de madeira, papel e celulose, e outros materiais de base biológica podem ser convertidos em fontes de energia viáveis, com o CO<sub>2</sub>. Técnicas como hidrólise enzimática e fermentação são exploradas para decompor esses materiais em açúcares fermentáveis, que podem ser convertidos em bioetanol ou outros biocombustíveis. Esta abordagem não só ajuda a aproveitar resíduos que, de outra forma, seriam descartados, mas também contribui para a sustentabilidade ao reciclar materiais e reduzir a necessidade de matérias-primas virgens.

A categorização dos artigos no cenário E revela as principais áreas de foco na pesquisa relacionada à captura e utilização de CO<sub>2</sub> para a produção de e-combustíveis.

101 NISAR, A. *et al.* Bio-conversion of CO<sub>2</sub> into biofuels and other value-added chemicals via metabolic engineering. **Microbiological Research**, v. 251, p. 126813, 2021.  
102 AKASH, S. *et al.* Biotechnology to convert carbon dioxide into biogas, bioethanol, bioplastic and succinic acid using algae, bacteria and yeast: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 21, n. 3, p. 1477-1497, 2023.  
103 CANTERA, S. *et al.* Microbial conversion of carbon dioxide and hydrogen into the fine chemicals hydroxyectoine and ectoine. **Bioresource Technology**, v. 374, p. 128753, 2023.  
104 SARAVANAN, A. *et al.* CO<sub>2</sub> bio-mitigation using genetically modified algae and biofuel production towards a carbon net-zero society. **Bioresource Technology**, v. 363, p. 127982, 2022.  
105 KHDARY, N. H. *et al.* Metal oxides as catalyst/supporter for CO<sub>2</sub> capture and conversion, review. **Catalysts**, v. 12, n. 3, p. 300, 2022.  
106 TYAGI, P. *et al.* Metal catalyst for CO<sub>2</sub> capture and conversion into cyclic carbonate: progress and challenges. **Materials Today**, 2023.  
107 SHAO, B. *et al.* Synergistic promotions between CO<sub>2</sub> capture and in-situ conversion on Ni-CaO composite catalyst. **Nature Communications**, v. 14, n. 1, p. 996, 2023.  
108 LAMNINI, S. *et al.* Phosphorylated/amine-impregnated cellulosic paper for direct CO<sub>2</sub> capture. **Materials Chemistry and Physics**, v. 318, p. 129298, 2024.  
109 ADEGOKE, K. A. *et al.* Cellulose derivatives and cellulose-metal-organic frameworks for CO<sub>2</sub> adsorption and separation. **Journal of CO<sub>2</sub> Utilization**, v. 64, p. 102163, 2022.

**Tabela 3 - Taxonomia cenário E: captura e utilização do CO<sub>2</sub> para produção de e-combustíveis | 928 artigos.**

Área de publicação   Cenário E	Nº de artigos encontrados
Energia e combustíveis	393
Catalisadores	322
Eletroquímica	85
Ciência da sustentabilidade	64
Termodinâmica	64

Fonte: Elaboração própria (2024).

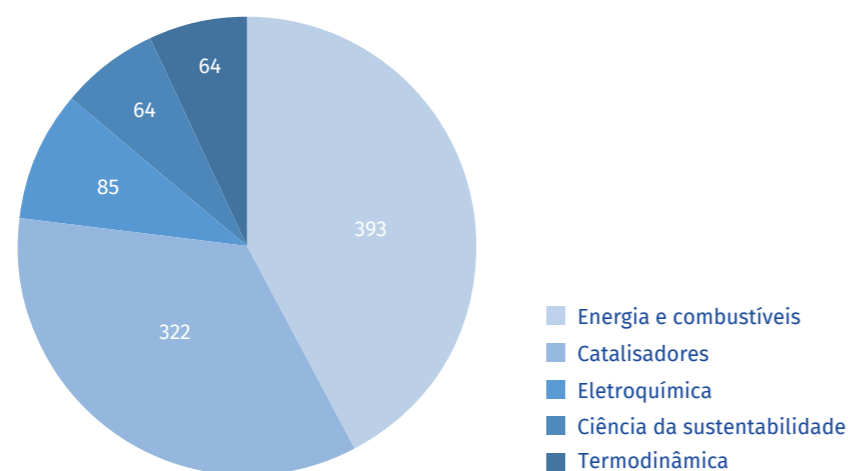
Com 393 artigos<sup>110 111 112</sup> “Energia e Combustíveis” é a área mais representativa, destacando uma intensa investigação sobre a integração de CO<sub>2</sub> capturado em sistemas energéticos para a produção de e-combustíveis. A pesquisa nesta área abrange a conversão de CO<sub>2</sub> em combustíveis sintéticos líquidos e gasosos, que são essenciais para a transição para uma economia de baixo carbono.

A produção de e-combustíveis representa uma alternativa promissora aos combustíveis fósseis, com potencial para reduzir significativamente as emissões de CO<sub>2</sub>. Os e-combustíveis podem ser utilizados em motores de combustão interna e infraestruturas existentes, facilitando a transição sem necessidade de mudanças radicais. A tecnologia inclui o desenvolvimento de processos como a conversão eletroquímica e termoquímica de CO<sub>2</sub> em combustíveis. A pesquisa está focada em aumentar a eficiência destes processos, tornando-os mais viáveis economicamente. Tecnologias como a hidrólise a vapor e a síntese de Fischer-Tropsch são áreas de interesse particular.

O foco é criar uma economia mais sustentável, onde os e-combustíveis possam substituir os combustíveis tradicionais em diversas aplicações, desde transporte até a geração de energia. A integração de e-combustíveis em sistemas energéticos existentes é vista como uma forma de reduzir a dependência de combustíveis fósseis e mitigar as mudanças climáticas.

110 MA, X. *et al.* C<sub>2</sub> feedstock-based biomanufacturing of value-added chemicals. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 73, p. 240-245, 2022.  
111 GUPTA, R. *et al.* Biochemical conversion of CO<sub>2</sub> in fuels and chemicals: status, innovation, and industrial aspects. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 14, n. 3, p. 3007-3030, 2024.  
112 LIU, Z. *et al.* Third-generation biorefineries as the means to produce fuels and chemicals from CO<sub>2</sub>. **Nature Catalysis**, v. 3, n. 3, p. 274-288, 2020.

**Figura 26 - Taxonomia cenário E: captura e utilização do CO<sub>2</sub> para produção de e-combustíveis**  
| 928 artigos.



Fonte: Elaboração própria (2024).

A segunda área mais representativa, com 322 artigos<sup>113 114</sup> é “Catalisadores”. Isso reflete a importância dos avanços em catalisadores que podem converter CO<sub>2</sub> em combustíveis de forma eficiente. Os catalisadores desempenham um papel crucial na eficiência dos processos de conversão de CO<sub>2</sub>. Catalisadores eficientes reduzem a energia necessária para as reações químicas, aumentando a viabilidade dos processos.

Pesquisas focam em catalisadores de base metálica, incluindo platina, níquel e ligas, bem como materiais de suporte que melhoram a estabilidade e a atividade catalítica. Alguns estudos procuram respostas de como tornar esses processos escaláveis e economicamente viáveis para produção em larga escala, essencial para a adoção comercial dos e-combustíveis. Desenvolvimentos recentes em catalisadores heterogêneos e homogêneos mostram potencial para aplicações industriais.

Com 85 artigos<sup>115 116</sup> a “Eletroquímica” destaca-se como uma área vital, indicando o uso de processos eletroquímicos para a conversão de CO<sub>2</sub>. Dentre os processos eletroquímicos, temos tecnologias como a eletro-redução e co-eletrólise que são promissoras para a produção sustentável de combustíveis e produtos químicos. Estes processos utilizam energia elétrica para converter CO<sub>2</sub> em gás de síntese e compostos úteis, como metanol e ácido fórmico.

<sup>113</sup> D'AMORE, F. *et al.* Turning CO<sub>2</sub> from fuel combustion into e-Fuel? Consider alternative pathways. *Energy Conversion and Management*, v. 289, p. 117170, 2023.

<sup>114</sup> RAMIREZ, A.; SARATHY, S. M.; GASCON, J. CO<sub>2</sub> derived e-fuels: research trends, misconceptions, and future directions. *Trends in chemistry*, v. 2, n. 9, p. 785-795, 2020.

<sup>115</sup> SULLIVAN, I. *et al.* Coupling electrochemical CO<sub>2</sub> conversion with CO<sub>2</sub> capture. *Nature Catalysis*, v. 4, n. 11, p. 952-958, 2021.

<sup>116</sup> OVERA, S. *et al.* Electrochemical approaches for CO<sub>2</sub> conversion to chemicals: a journey toward practical applications. *Accounts of Chemical Research*, v. 55, n. 5, p. 638-648, 2022.

A eletroquímica oferece métodos eficientes, utilizando energia elétrica, possivelmente de fontes renováveis, para conduzir reações químicas. A integração com fontes de energia renovável, como solar e eólica, é uma área de pesquisa chave, buscando sinergias que possam reduzir a pegada de carbono global. Pesquisas focam em superar os desafios técnicos, como a eficiência de conversão e a durabilidade dos eletrodos. O desenvolvimento de eletrocatalisadores mais robustos e a otimização dos parâmetros operacionais são áreas críticas de investigação.

“Ciência da Sustentabilidade”, com 64 artigos<sup>117 118</sup>, sublinha a integração de práticas sustentáveis na captura e utilização de CO<sub>2</sub>. Essa área aborda os impactos ambientais e socioeconômicos das tecnologias de e-combustíveis, promovendo soluções viáveis a longo prazo. Estudos analisam o ciclo de vida dos e-combustíveis, avaliando sua pegada de carbono e impacto ambiental global. Os artigos incluem estudos sobre as políticas necessárias para apoiar a adoção de tecnologias de e-combustíveis. A criação de incentivos fiscais, subsídios e regulamentações ambientais são discutidas como formas de promover o desenvolvimento e a adoção de e-combustíveis. A pesquisa ajuda a garantir que as novas tecnologias de captura e utilização de CO<sub>2</sub> sejam benéficas em um contexto mais amplo, considerando a sustentabilidade econômica e ambiental, e inclui a análise de modelos de negócios sustentáveis e a implementação de tecnologias em larga escala.

Também com 64 artigos<sup>119 120</sup>, a “Termodinâmica” é crucial para entender os princípios energéticos que governam os processos de captura e conversão de CO<sub>2</sub>. Pesquisas ajudam a otimizar as condições operacionais e a eficiência energética dos sistemas de produção de e-combustíveis. A termodinâmica fornece insights sobre as condições de reação ótimas e a minimização de perdas de energia. A compreensão detalhada dos aspectos termodinâmicos é fundamental para melhorar a eficiência e reduzir os custos de produção. Estudos focam na análise energética e na termodinâmica de processos não equilíbrio para maximizar a eficiência dos sistemas, minimizando a energia necessária para converter CO<sub>2</sub> em e-combustíveis, incluindo a modelagem computacional e a simulação de processos para identificar as melhores condições operacionais.

O destaque do Brasil no cenário D (**Figura 18**) e sua presença significativa no cenário E (**Figura 19**), como discutido na análise macro, refletem o compromisso do país com a inovação e a sustentabilidade ambiental. Esses campos emergentes oferecem ao país a oportunidade de aproveitar sua expertise em energias renováveis e liderar em tecnologias de captura e utilização de CO<sub>2</sub>.

<sup>117</sup> MERTENS, J. *et al.* Carbon capture and utilization: More than hiding CO<sub>2</sub> for some time. *Joule*, v. 7, n. 3, p. 442-449, 2023.

<sup>118</sup> RAMIREZ, A.; SARATHY, S. M.; GASCON, J. CO<sub>2</sub> derived e-fuels: research trends, misconceptions, and future directions. *Trends in chemistry*, v. 2, n. 9, p. 785-795, 2020.

<sup>119</sup> RIGAUD, J.; DE PAEPE, W.; LAGET, H. Thermodynamic assessment of the conversion of a typical ccgt power plant to a fully e-fuel fired unit. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, v. 144, n. 12, p. 121012, 2022.

<sup>120</sup> INAC, S.; MIDILLI, A. The integrated hydro-solar e-fuel production for a tea factory: preliminary design and thermodynamic analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 67, p. 979-990, 2024.

Diversos fatores contribuem para o destaque do Brasil nessas áreas. Os recursos naturais abundantes do Brasil, como biomassa e energia solar, são fundamentais para a produção de combustíveis sustentáveis. O país dispõe de vastas quantidades de biomassa provenientes de resíduos agrícolas e florestais, com a cana-de-açúcar desempenhando um papel central na produção de etanol. Além disso, a alta incidência de radiação solar favorece o desenvolvimento de tecnologias para a produção de e-combustíveis, utilizando processos que convertem CO<sub>2</sub> em combustíveis por meio da energia solar.

O investimento em pesquisa é outro fator crucial. Instituições brasileiras têm uma longa tradição em pesquisa e desenvolvimento de biocombustíveis, com muitos avanços em processos de fermentação e refino de etanol. Recentemente, o país também tem investido significativamente em tecnologias de captura e utilização de CO<sub>2</sub> para a produção de e-combustíveis, com centros de pesquisa e universidades explorando novas formas de converter CO<sub>2</sub> em combustíveis sintéticos líquidos e gasosos.

Parcerias e colaborações internacionais têm fortalecido a posição do Brasil. No campo dos biocombustíveis, o Brasil tem colaborado globalmente, compartilhando conhecimento e tecnologias com outros países e empresas. Na área de e-combustíveis, parcerias com universidades e institutos de pesquisa internacionais permitem o intercâmbio de conhecimento e aceleram o desenvolvimento de tecnologias inovadoras.

Políticas governamentais de incentivo têm sido fundamentais para o avanço do Brasil nesses campos. Para os biocombustíveis, existem mandatos de mistura de etanol na gasolina e incentivos fiscais para produtores<sup>2,3</sup>. Mais recentemente, o governo brasileiro tem introduzido políticas que promovem a captura e utilização de CO<sub>2</sub> e o desenvolvimento de tecnologias de e-combustíveis, refletindo um compromisso com a redução das emissões de carbono<sup>2,3</sup>.

O Brasil está bem posicionado para liderar ambos os campos, contribuindo significativamente para a mitigação das mudanças climáticas e a transição global para uma economia sustentável. Seu destaque nesses cenários sugere um potencial significativo para o desenvolvimento de soluções tecnológicas inovadoras e estratégias eficazes para enfrentar os desafios ambientais e energéticos do futuro.

#### 4.1.2.3 Análise micro

Aprofundando a análise meso, discutimos a seguir os dois assuntos mais estudados nos cenários D e E (Tabela 4). Com essa abordagem, o número de artigos no cenário D reduziu-se para 124, enquanto no cenário E diminuiu para 386. Esta redução reflete a seleção criteriosa dos temas mais relevantes, permitindo uma compreensão mais detalhada e focada das subáreas de maior impacto na pesquisa sobre a captura e utilização de CO<sub>2</sub>.

**Tabela 4** - Subtaxonomia – cenário D (captura e utilização do CO<sub>2</sub> para produção de biocombustíveis | 124 artigos) e cenário E (captura e utilização do CO<sub>2</sub> para produção de e-combustíveis | 386 artigos).

Subtema	Número de artigos encontrados
Cenário D: captura e utilização do CO <sub>2</sub> para produção de biocombustíveis	
Microalga	98
Gaseificação	26
Cenário E: captura e utilização do CO <sub>2</sub> para produção de e-combustíveis	
Síntese de Fischer-Tropsch	304
Eletro-redução do CO <sub>2</sub>	82

Fonte: Elaboração própria (2024).

O subtema das microalgas é o mais representado no cenário D, com 98 artigos, refletindo a significativa atenção dada a essa área de pesquisa. As microalgas<sup>121</sup> são um foco central devido à sua alta eficiência fotossintética e capacidade de fixar CO<sub>2</sub> atmosférico diretamente, tornando-as um recurso valioso para a captura de carbono e a produção sustentável de biocombustíveis. A biomassa resultante das microalgas é rica em lipídios, que podem ser convertidos em biocombustíveis, como biodiesel, além de outros bioprodutos valiosos.

Pesquisas nesta área<sup>122 123</sup> visam a otimizar a produtividade das microalgas por diversas estratégias. Uma área de foco é o desenvolvimento de cepas geneticamente modificadas que possuem maior rendimento de biomassa e conteúdo lipídico, aumentando a eficiência da produção de biocombustíveis. Além disso, são investigados sistemas de cultivo que sejam economicamente viáveis em larga escala, como fotobiorreatores e tanques abertos, que podem maximizar a exposição à luz solar e otimizar o uso de nutrientes.

Outro aspecto importante das microalgas é a sua capacidade de crescer em condições diversas, incluindo água salgada e terrenos não agrícolas. Isso evita a competição com culturas alimentares e permite a utilização de áreas não aráveis, ampliando o potencial de produção sem impactar negativamente a agricultura. As microalgas também podem ser cultivadas utilizando águas residuais, o que não só fornece os nutrientes necessários para seu crescimento, mas também contribui para a purificação da água, integrando processos de biorremediação.

Adicionalmente, a pesquisa sobre microalgas inclui o desenvolvimento de tecnologias para a colheita e extração eficiente dos lipídios. Processos inovadores de extração, como

121 KURT, E. *et al.* Perspectives for using CO<sub>2</sub> as a feedstock for biomanufacturing of fuels and chemicals. *Bioengineering*, v. 10, n. 12, p. 1357, 2023.  
122 MISHRA, A. *et al.* Biomass energy with carbon capture and storage (BECCS). In: *Current developments in biotechnology and bioengineering*. [S.l.]: Elsevier, 2020. p. 399-427.  
123 SARAVANAN, A. *et al.* CO<sub>2</sub> bio-mitigation using genetically modified algae and biofuel production towards a carbon net-zero society. *Bioresource Technology*, v. 363, p. 127982, 2022.

a extração assistida por solvente e a extração supercrítica, estão sendo explorados para melhorar a viabilidade econômica da produção de biodiesel de microalgas.

A relevância das microalgas na pesquisa de biocombustíveis é apoiada por suas vantagens ambientais e econômicas. Elas representam uma fonte renovável de energia que pode contribuir significativamente para a redução das emissões de CO<sub>2</sub>, oferecendo uma alternativa sustentável aos combustíveis fósseis. A pesquisa contínua e o desenvolvimento tecnológico nessa área são essenciais para superar os desafios atuais e realizar o potencial das microalgas como uma solução viável e escalável para a produção de biocombustíveis.

O Brasil tem um potencial significativo para se destacar na pesquisa e produção de biocombustíveis a partir de microalgas. O país possui um clima favorável para o cultivo de microalgas durante todo o ano, além de vastos recursos hídricos que podem ser utilizados para essa finalidade. Instituições de pesquisa brasileiras têm investido em estudos avançados sobre microalgas, explorando tanto a bioprospectiva de espécies nativas quanto a engenharia genética para desenvolver cepas com alta produtividade.

Além disso, o Brasil tem uma forte tradição em biotecnologia e bioengenharia, com uma infraestrutura robusta de pesquisa que pode apoiar o desenvolvimento e a implementação de tecnologias de cultivo e processamento de microalgas. O governo brasileiro também tem incentivado iniciativas de energia renovável e sustentabilidade, proporcionando um ambiente propício para investimentos e parcerias internacionais.

A gaseificação, com 26 artigos<sup>124 125</sup>, é o segundo subtema mais estudado no cenário D, destacando-se como uma área de pesquisa significativa na captura e utilização de CO<sub>2</sub> para a produção de biocombustíveis. Este processo termoquímico transforma materiais carbonosos, como biomassa, em gás de síntese (syngas), que é uma mistura de hidrogênio e monóxido de carbono (H<sub>2</sub> + CO). O syngas pode ser posteriormente convertido em biocombustíveis líquidos, como metanol e etanol, através de processos adicionais de síntese química.

A pesquisa na área de gaseificação se concentra em vários aspectos críticos. Estudos buscam otimizar as condições operacionais da gaseificação, como temperatura, pressão e composição da matéria-prima, para maximizar a produção de syngas e a eficiência energética do processo. Tecnologias avançadas, como gaseificação por plasma e reatores de leito fluidizado, estão sendo exploradas para alcançar melhores rendimentos e maior eficiência.

Além disso, há uma ênfase significativa na redução dos custos operacionais associados à gaseificação. Isso inclui o desenvolvimento de tecnologias que possam operar de maneira mais eficiente, utilizando menos energia e produzindo menos resíduos. A implementação

de catalisadores eficientes no processo de gaseificação também pode ajudar a reduzir os custos, melhorando a conversão de biomassa em syngas.

Outro aspecto importante da pesquisa é a exploração de diferentes tipos de biomassa. A gaseificação é uma tecnologia flexível que pode utilizar uma ampla variedade de matérias-primas, incluindo resíduos agrícolas e florestais, resíduos sólidos urbanos e cultivos energéticos dedicados. Pesquisas investigam como diferentes tipos de biomassa se comportam no processo de gaseificação e quais ajustes são necessários para otimizar a conversão de cada tipo de material.

A gaseificação é considerada uma tecnologia promissora por sua flexibilidade e potencial para utilizar diversas fontes de biomassa, contribuindo para uma produção de biocombustíveis mais sustentável e diversificada. Ao aproveitar resíduos agrícolas e florestais, a gaseificação pode ajudar a reduzir a dependência de combustíveis fósseis e a mitigar problemas de descarte de resíduos, promovendo uma economia circular.

A pesquisa também explora a integração da gaseificação com outras tecnologias de captura e utilização de CO<sub>2</sub>. Por exemplo, o syngas produzido pode ser combinado com hidrogênio verde, obtido através da eletrólise da água utilizando fontes de energia renovável, para aumentar a produção de biocombustíveis e reduzir ainda mais as emissões de CO<sub>2</sub>.

O Brasil possui um grande potencial para se destacar na área de gaseificação, graças à sua abundância de biomassa, incluindo resíduos agrícolas e florestais, que podem ser utilizados como matéria-prima. A vasta extensão territorial e a diversidade de ecossistemas fornecem uma fonte sustentável e renovável de biomassa para processos de gaseificação. Além disso, o país tem uma infraestrutura robusta de pesquisa em biotecnologia e energias renováveis, com instituições dedicadas ao desenvolvimento de tecnologias inovadoras para a conversão de biomassa em biocombustíveis.

Instituições de pesquisa brasileiras têm investido significativamente no estudo da gaseificação, buscando otimizar os processos e explorar novas fontes de biomassa. Parcerias com organizações internacionais e o apoio de políticas governamentais que incentivam a pesquisa e o desenvolvimento em energias renováveis são fatores que contribuem para o avanço dessa tecnologia no Brasil.

No cenário E, a síntese de Fischer-Tropsch (FT) emerge como o subtema dominante, com 304 artigos dedicados ao estudo desta tecnologia<sup>126 127 128</sup>. O processo FT é um método catalítico

126 PANZONE, C. *et al.* Power-to-Liquid catalytic CO<sub>2</sub> valorization into fuels and chemicals: focus on the Fischer-Tropsch route. **Journal of CO<sub>2</sub> Utilization**, v. 38, p. 314-347, 2020.

127 MARTÍN, N.; CIRUJANO, F. G. Multifunctional heterogeneous catalysts for the tandem CO<sub>2</sub> hydrogenation-Fischer Tropsch synthesis of gasoline. **Journal of CO<sub>2</sub> Utilization**, v. 65, p. 102176, 2022.

128 PRATSCHNER, S. *et al.* Evaluation of CO<sub>2</sub> sources for power-to-liquid plants producing fischer-tropsch products. **Journal of CO<sub>2</sub> Utilization**, v. 72, p. 102508, 2023.

124 ZHU, Y. *et al.* Achieving zero CO<sub>2</sub> emissions from integrated biomass gasification with CO<sub>2</sub> capture and utilization (IGCCU). **Chemical Engineering Journal**, v. 474, p. 145767, 2023.

125 WANG, J. *et al.* Enhanced hydrogen production from catalytic biomass gasification with in-situ CO<sub>2</sub> capture. **Environmental Pollution**, v. 267, p. 115487, 2020.

que transforma syngas, derivados da captura de CO<sub>2</sub>, em hidrocarbonetos líquidos. Esses hidrocarbonetos podem ser refinados em combustíveis sintéticos que substituem os combustíveis fósseis tradicionais, como gasolina, diesel e querosene.

A pesquisa na área da síntese de FT está concentrada em vários aspectos críticos. Um dos principais focos é o desenvolvimento de catalisadores mais eficientes e duráveis. Catalisadores de alta performance são essenciais para aumentar a taxa de conversão de syngas em hidrocarbonetos líquidos e para prolongar a vida útil dos reatores de FT. Materiais como cobalto e ferro são frequentemente usados como base para os catalisadores, e os pesquisadores estão explorando maneiras de melhorar sua atividade e estabilidade através de modificações químicas e físicas.

Além do desenvolvimento de catalisadores, a otimização das condições de reação é um foco central da pesquisa. Ajustes na temperatura, pressão e composição do syngas são necessários para maximizar a produção de hidrocarbonetos desejados e minimizar a formação de subprodutos indesejados. A modelagem e a simulação de processos desempenham um papel crucial na identificação das melhores condições operacionais, ajudando a guiar experimentos e a escalar a tecnologia de forma eficiente.

A síntese de FT é particularmente significativa para a produção de e-combustíveis devido à capacidade de se integrar à infraestrutura existente de refino e distribuição de combustíveis. Os combustíveis sintéticos produzidos pelo processo FT podem ser utilizados diretamente nos motores e sistemas de combustão atuais, sem a necessidade de modificações significativas. Isso facilita a adoção de e-combustíveis como uma alternativa viável aos combustíveis fósseis, apoiando a transição para uma economia de baixo carbono.

A eletro-redução do CO<sub>2</sub>, com 82 artigos<sup>129-130</sup>, é a segunda área mais pesquisada no cenário E, refletindo o crescente interesse na conversão eletroquímica do CO<sub>2</sub> em produtos químicos e combustíveis valiosos. Este processo utiliza energia elétrica para reduzir o CO<sub>2</sub> em compostos como metanol, etanol e hidrocarbonetos, que podem ser utilizados como e-combustíveis ou como matéria-prima para a indústria química.

A pesquisa em eletro-redução do CO<sub>2</sub> está focada em vários aspectos críticos para melhorar a eficiência e viabilidade econômica do processo. Uma área central é o desenvolvimento de eletrodos mais eficientes. Eletrodos de alta performance são essenciais para aumentar a taxa de conversão de CO<sub>2</sub> e melhorar a seletividade para os produtos desejados. Materiais catalíticos, como óxidos metálicos e nanomateriais, estão sendo investigados por suas propriedades únicas que podem aumentar a atividade catalítica e a estabilidade dos eletrodos.

129 OVERA, S. *et al.* Electrochemical approaches for CO<sub>2</sub> conversion to chemicals: a journey toward practical applications. *Accounts of Chemical Research*, v. 55, n. 5, p. 638-648, 2022.

130 XU, A. *et al.* Theories for electrolyte effects in CO<sub>2</sub> electroreduction. *Accounts of Chemical Research*, v. 55, n. 4, p. 495-503, 2022.

Além do desenvolvimento de novos materiais, a otimização das condições de reação é fundamental para maximizar a conversão do CO<sub>2</sub>. Pesquisadores estão explorando diferentes parâmetros operacionais, como a densidade de corrente, a composição do eletrólito e a temperatura, para encontrar as condições ideais que promovam uma alta eficiência de conversão e uma baixa formação de subprodutos indesejados. Técnicas de modelagem e simulação são frequentemente utilizadas para entender melhor os mecanismos de reação e guiar os experimentos de laboratório.

A eletro-redução do CO<sub>2</sub> é particularmente promissora devido à sua compatibilidade com fontes renováveis de energia. As energias solar e eólica podem ser usadas para alimentar o processo eletroquímico, tornando a conversão de CO<sub>2</sub> uma solução verdadeiramente sustentável. Esta integração com energias renováveis não apenas reduz a pegada de carbono do processo, mas também oferece uma maneira de armazenar energia intermitente em forma de combustíveis líquidos, que são mais fáceis de armazenar e transportar.

Além disso, a eletro-redução do CO<sub>2</sub> pode ser realizada em condições relativamente amenas de temperatura e pressão, o que potencialmente reduz os custos operacionais e aumenta a segurança do processo. A escalabilidade também é um fator importante, e a pesquisa está focada em como escalar a tecnologia de laboratório para aplicações industriais, garantindo que os avanços científicos possam ser traduzidos em soluções comerciais viáveis.

No contexto do Brasil, a eletro-redução do CO<sub>2</sub> representa uma oportunidade significativa para alavancar suas vastas fontes de energia renovável, como hidrelétricas, solar e eólica. O país tem o potencial de se tornar um líder na pesquisa e desenvolvimento desta tecnologia, contribuindo para a produção sustentável de e-combustíveis. As instituições de pesquisa brasileiras estão ativamente explorando esta área, com foco em desenvolver materiais catalíticos inovadores e otimizar os processos de conversão para as condições locais.

O apoio governamental e as políticas de incentivo à pesquisa e inovação em energias renováveis são cruciais para o avanço da produção de e-combustíveis, tanto por síntese de FT quanto por eletro-redução do CO<sub>2</sub> no Brasil<sup>131</sup>. Parcerias internacionais também desempenham um papel vital, permitindo a troca de conhecimentos e tecnologias avançadas, acelerando o progresso nesta área promissora.

A análise dos subtemas mais estudados nos cenários D e E revela diferenças significativas nos números de artigos entre o primeiro e o segundo subtema em cada cenário. Essas diferenças refletem a intensidade e o foco da pesquisa em áreas específicas dentro dos temas gerais de captura e utilização de CO<sub>2</sub> para a produção de biocombustíveis e e-combustíveis.

No cenário D, que se concentra na captura e utilização de CO<sub>2</sub> para a produção de biocombustíveis, o subtema das microalgas é o mais representado, com 98 artigos. Em contraste, o segundo subtema mais estudado, a gaseificação, possui apenas 26 artigos.

Essa diferença acentuada, com microalgas tendo quase quatro vezes mais artigos que a gaseificação, destaca o maior interesse e potencial percebido nas microalgas para a produção de biocombustíveis. As microalgas são altamente valorizadas por sua eficiência fotossintética e capacidade de crescer em condições que não competem com a produção de alimentos, enquanto a gaseificação, embora promissora, enfrenta desafios tecnológicos e econômicos que podem limitar sua atratividade em comparação com as microalgas.

No cenário E, focado na captura e utilização de CO<sub>2</sub> para a produção de e-combustíveis, a diferença entre os subtemas é ainda mais pronunciada. A síntese de Fischer-Tropsch (FT) lidera com 304 artigos, enquanto a eletro-redução do CO<sub>2</sub> tem 82 artigos. A FT tem quase quatro vezes mais artigos que a eletro-redução, refletindo seu papel crucial na conversão de syngas em hidrocarbonetos líquidos e sua capacidade de integração com a infraestrutura existente de refino e distribuição de combustíveis. A ênfase na FT pode ser atribuída à sua maturidade tecnológica e ao seu potencial para produção em larga escala, o que é vital para a transição para uma economia de baixo carbono. Por outro lado, a eletro-redução do CO<sub>2</sub>, embora promissora, está em estágios relativamente iniciais de desenvolvimento e enfrenta desafios técnicos significativos, como a eficiência dos eletrodos e a durabilidade dos materiais catalíticos.

Essas diferenças no número de artigos entre os subtemas indicam onde a comunidade científica vê maiores oportunidades e desafios. No cenário D, a pesquisa intensiva em microalgas sugere um reconhecimento de seu potencial único para a produção sustentável de biocombustíveis. No cenário E, a dominância da síntese de Fischer-Tropsch reflete uma confiança na sua viabilidade e importância estratégica para a produção de e-combustíveis.

No contexto brasileiro, essas diferenças também podem orientar as prioridades de pesquisa e desenvolvimento. A forte ênfase nas microalgas no cenário D alinha-se bem com os recursos naturais do Brasil<sup>132</sup>, como vastas áreas de cultivo não agrícola e abundante luz solar, enquanto a síntese de FT no cenário E pode se beneficiar da expertise brasileira em processos industriais e energias renováveis. Ao entender essas dinâmicas, o Brasil pode direcionar seus esforços para áreas com maior impacto potencial, fortalecendo sua posição como líder em tecnologias de captura e utilização de CO<sub>2</sub>.

## 4.2 PROPRIEDADES INTELECTUAIS

Compreender o panorama tecnológico é crucial para empresas e instituições que buscam se manter na vanguarda do desenvolvimento, pois ele não apenas revela as tendências emergentes, mas também identifica lacunas no conhecimento e oportunidades de colaboração. Nesse contexto, a análise de patentes desempenha um papel fundamental uma vez que, além de serem concedidas a inventores como reconhecimento por suas criações,

representam também uma fonte rica de informações sobre o estado atual da tecnologia e as direções futuras da inovação.

Além de proteger as criações individuais, as patentes servem como um indicador do progresso tecnológico em diversas áreas, desde novos produtos e processos até avanços em ciência e engenharia. Ao construir um roadmap tecnológico, a análise de patentes se apresenta como uma ferramenta indispensável, pois integrar dados patentário nesse processo permite não apenas mapear as tendências tecnológicas atuais, mas também antecipar as direções futuras da inovação.

Além disso, a análise de patentes ajuda empresas e institutos de inovação a identificar potenciais parceiros de colaboração e a avaliar a viabilidade comercial de novas tecnologias, fornecendo assim suporte para o desenvolvimento estratégico e a tomada de decisões assertivas. Em resumo, a análise de patentes é um componente essencial na construção de um roadmap tecnológico eficaz, capacitando organizações a se adaptarem às demandas de um ambiente de inovação dinâmico e em constante evolução.

Para realizar esta busca de patentes foi utilizada a plataforma Questel Orbit, que é uma das ferramentas líderes no mercado para pesquisa e análise de patentes. Questel Orbit oferece um banco de dados abrangente, cobrindo informações de patentes de diversas jurisdições ao redor do mundo. A plataforma permite realizar buscas avançadas, análises de tendências tecnológicas, monitoramento de concorrentes e visualização de dados através de gráficos interativos. Além disso, a plataforma fornece recursos para a gestão de portfólios de patentes, facilitando a tomada de decisões estratégicas em relação à propriedade intelectual.

### 4.2.1 Busca em patentes

A partir de diferentes combinações em inglês de palavras-chave relacionadas a captura de CO<sub>2</sub>, uso de CO<sub>2</sub>, captura e utilização de CO<sub>2</sub> para produção de biocombustíveis e de e-combustíveis, poucas foram as patentes encontradas que correlacionam com captura de CO<sub>2</sub> e sua utilização para produção de biocombustível. A **Tabela 5** mostra os resultados de pesquisa de acordo com a aderência dos resultados ao escopo do estudo.

<sup>132</sup> FAPITEC. **Governo de Sergipe apoia projeto que utiliza microalgas para absorção de CO<sub>2</sub>**. 2021. Disponível em: <https://fapitec.se.gov.br/governo-de-sergipe-apoia-projeto-que-utiliza-microalgas-para-absorcao-de-co2/> Acesso em: 29 abr. 2024.

**Tabela 5 - Resultados de patentes por palavra-chave.**

Item	Palavras-chave	Resultados
1	carbon capture	3331
2	carbon use	151
3	carbon and capture and use	7019
4	carbon and capture and use and biofuel production	17
5	carbon use or CO <sub>2</sub> use	189
5.1 a	carbon use or CO <sub>2</sub> use and biofuel	4
5.1 b	carbon use or CO <sub>2</sub> use and biofuel production	0
5.2	carbon use or CO <sub>2</sub> use and electrofuel or efuel	0
6	carbon capture or CO <sub>2</sub> capture	4922
6.1 a	carbon capture or CO <sub>2</sub> capture and biofuel	41
6.1 b	carbon capture or CO <sub>2</sub> capture and biofuel production	9
6.2	carbon capture or CO <sub>2</sub> capture and electrofuel or efuel	0
7	electrofuel or efuel	8

Fonte: Elaboração própria (2024).

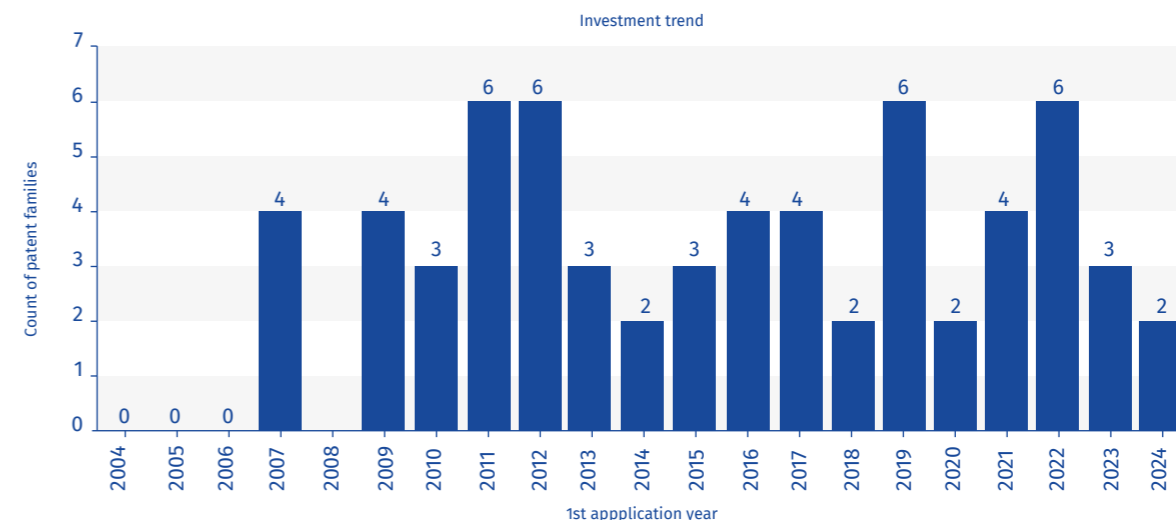
Para a análise do panorama geral e do conteúdo das patentes identificadas, foram selecionadas 65 patentes mais relevantes dos últimos 20 anos no que se refere à aderência ao escopo do estudo (captura de CO<sub>2</sub> e sua utilização para produção de biocombustível e e-combustível), que é apresentada a seguir.

#### 4.2.2 Resultado da busca em patentes

##### 4.2.2.1 Análise macro

A análise macro das 65 patentes identificadas iniciou-se com a investigação da evolução das aplicações ao longo do tempo. A **Figura 27** revela que a maior parte dos depósitos se concentra nos últimos 10 anos, exibindo períodos de variação entre crescimento e declínio. Os picos de depósitos foram observados nos anos de 2011, 2012, 2019 e 2022.

**Figura 27 - Tendência de investimento ao longo dos anos.**



Fonte: Elaboração própria (2024).

Esses picos indicam momentos de maior atividade e interesse na área de tecnologia abordada pelas patentes. O aumento de depósitos em 2011 e 2012 pode estar associado a um período de intensificação das pesquisas e desenvolvimento de novas tecnologias, possivelmente impulsionado por políticas de incentivo e financiamento de projetos inovadores. A continuidade desse crescimento em 2019 e 2022 sugere uma retomada do interesse e avanço significativo nas soluções tecnológicas, refletindo possivelmente novos desafios e oportunidades no setor.

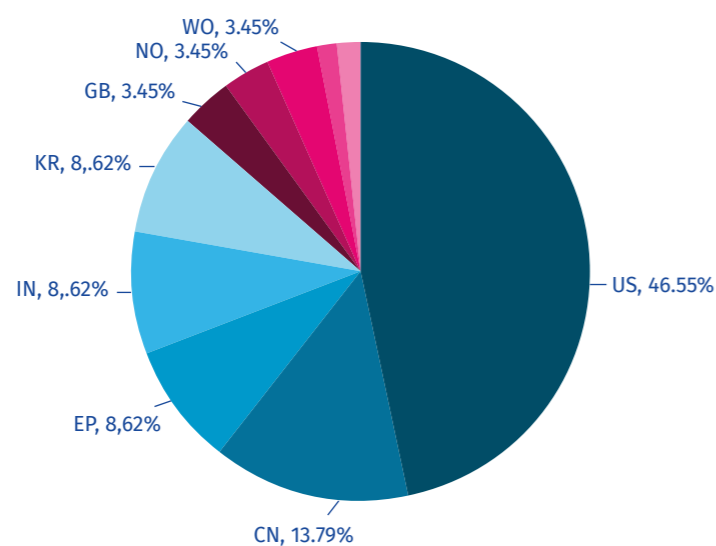
O declínio observado entre esses picos pode ser resultado de diversos fatores, incluindo ciclos econômicos, mudanças nas políticas de financiamento, ou a maturação de certas tecnologias que temporariamente reduziram a necessidade de novas patentes. No entanto, a retomada nos depósitos em anos recentes, especialmente em 2022, pode indicar uma nova onda de inovação, possivelmente direcionada por urgências ambientais e a necessidade crescente de soluções tecnológicas sustentáveis.

Essa análise temporal das patentes é crucial para entender os padrões de inovação e os períodos de maior dinamismo no campo tecnológico. Identificar esses picos e vales ajuda a traçar estratégias de investimento e desenvolvimento, garantindo que os esforços de pesquisa e inovação estejam alinhados com as tendências e necessidades emergentes do mercado e da sociedade.

A análise da origem da inovação por país depositante revela que as famílias de patentes se concentram principalmente nos Estados Unidos (46,55%) e na China (13,79%), conforme mostrado na **Figura 28**. Este gráfico fornece uma visão clara da estratégia de patentes no setor estudado e é um bom indicador dos principais centros de PD&I. A alta concentração de patentes nos Estados

Unidos indica uma liderança na pesquisa e desenvolvimento tecnológico, provavelmente devido ao forte ecossistema de inovação, incluindo universidades, empresas e laboratórios de pesquisa de ponta. Da mesma forma, a China, com um percentual significativo de depósitos, demonstra seu crescente papel como um centro global de inovação tecnológica.

**Figura 28** - Famílias de patentes por país de 1ª prioridade.



Fonte: Elaboração própria (2024).

Essa concentração de patentes nos Estados Unidos e na China também pode ser correlacionada com os resultados discutidos anteriormente sobre a origem dos artigos científicos. Ambos os países são líderes na produção de conhecimento científico, o que se reflete na quantidade de patentes registradas. A predominância de patentes nesses países sugere que eles estão na vanguarda das inovações tecnológicas e possuem uma estratégia robusta para proteger suas invenções, facilitando a comercialização e aplicação prática das tecnologias desenvolvidas.

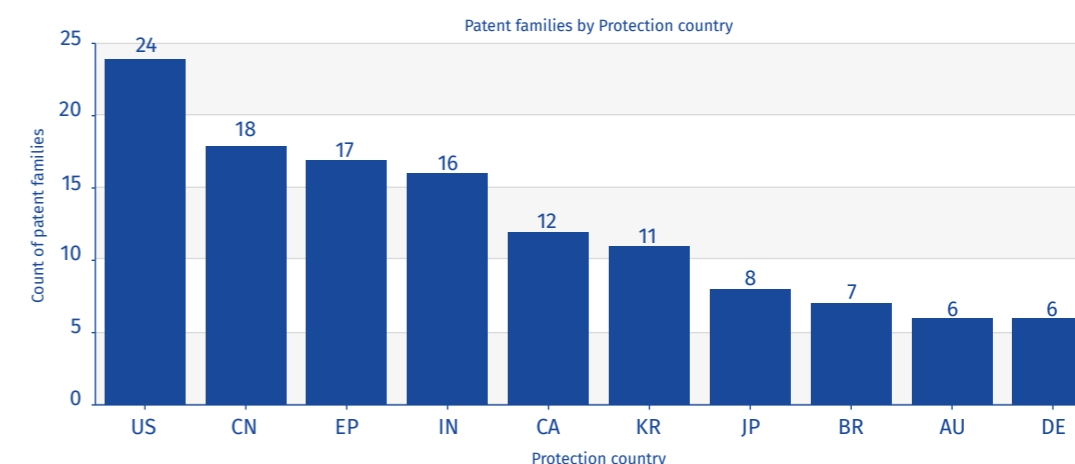
Além disso, a análise dos artigos científicos revelou que tanto os Estados Unidos quanto a China estão fortemente envolvidos em pesquisas avançadas relacionadas à captura e utilização de CO<sub>2</sub>, bem como à produção de biocombustíveis e e-fuels. Essa correlação entre a produção de conhecimento e a proteção de invenções por meio de patentes evidencia a importância desses países como líderes globais em inovação tecnológica.

Portanto, a concentração de patentes nos Estados Unidos e na China, juntamente com seus altos índices de publicações científicas, sublinha a interconexão entre a pesquisa acadêmica e a inovação tecnológica. Esses dados fornecem uma compreensão aprofundada dos locais

onde as atividades de P&D estão mais avançadas e oferecem insights sobre as estratégias de inovação adotadas por diferentes países. A predominância desses países na geração de novas tecnologias reflete não apenas a sua capacidade de inovar, mas também a eficácia de suas políticas de incentivo à pesquisa e desenvolvimento.

De maneira similar à análise das localizações das proteções tecnológicas, foi realizada uma investigação detalhada dos principais países onde as publicações de patentes ocorrem, permitindo entender melhor as estratégias de proteção dos depositantes em relação aos mercados de interesse para a introdução dessas tecnologias. A **Figura 29** destaca os mercados dos Estados Unidos, China e Europa como os principais alvos das estratégias de proteção.

**Figura 29** - Mercados-alvo do depósito de patentes.



Fonte: Elaboração própria (2024).

Essa análise revela que os Estados Unidos, China e Europa são os mercados prioritários para a proteção de novas tecnologias, refletindo sua importância como principais centros econômicos e tecnológicos globais. A preferência por esses mercados indica que os depositantes veem nesses locais o maior potencial de comercialização e adoção de suas inovações. Os Estados Unidos, com seu robusto ecossistema de inovação e forte proteção de propriedade intelectual, continuam a ser um destino atrativo para registros de patentes. A China, com sua rápida ascensão como líder em pesquisa e desenvolvimento, oferece um vasto mercado consumidor e incentivos governamentais para a inovação tecnológica. A Europa, com sua diversidade de economias avançadas e políticas progressistas em sustentabilidade e inovação, representa um mercado essencial para a inserção de tecnologias emergentes.

Ao correlacionar essa análise com os resultados previamente discutidos sobre os países de origem dos estudos, observa-se uma consonância entre os locais de alta atividade de pesquisa

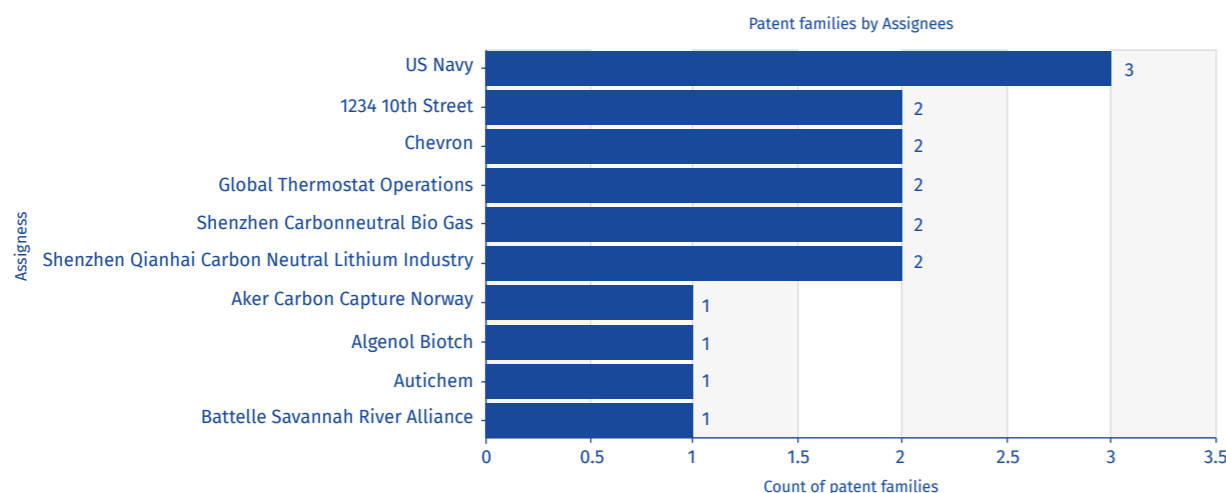
científica e os mercados-alvo para proteção de patentes. Esta convergência sugere que os países que lideram em produção acadêmica e científica também são os mais atraentes para a proteção e eventual comercialização de tecnologias inovadoras. A preferência por registrar patentes em múltiplas jurisdições reforça a estratégia dos depositantes de garantir uma ampla proteção de suas invenções, maximizando assim o alcance e impacto de suas tecnologias.

Além disso, essa estratégia de proteção multinacional pode indicar a intenção dos depositantes de estabelecer uma presença comercial forte e competitiva nos mercados mais dinâmicos e tecnologicamente avançados. A escolha de proteger inovações nos Estados Unidos, China e Europa destaca a importância desses mercados não apenas como hubs de desenvolvimento tecnológico, mas também como plataformas críticas para a disseminação e adoção global de novas tecnologias.

Portanto, a análise das publicações de patentes e suas respectivas localizações fornece uma visão abrangente das estratégias de proteção e comercialização adotadas pelos inventores e empresas. Ela destaca a interconexão entre a produção de conhecimento, proteção de propriedade intelectual e as oportunidades de mercado, sublinhando a importância de uma abordagem estratégica integrada para maximizar o impacto das inovações tecnológicas.

A **Figura 30** apresenta os dez principais depositantes de pedidos de registro das patentes selecionadas, destacando a diversidade e a relevância dos atores envolvidos na inovação tecnológica. A US Navy lidera com três patentes depositadas, evidenciando o papel estratégico das instituições governamentais e militares na pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias.

**Figura 30 - Principais depositantes das patentes identificadas.**



Fonte: Elaboração própria (2024).

A atuação da US Navy<sup>133</sup> nesse setor reflete não apenas o interesse estratégico das forças armadas dos Estados Unidos em reduzir a pegada de carbono de suas operações, mas também em garantir a segurança energética por meio de soluções sustentáveis. A inovação tecnológica promovida pela US Navy pode incluir o desenvolvimento de processos avançados para a captura de CO<sub>2</sub> em ambientes marítimos e terrestres, bem como a conversão deste em combustíveis sintéticos e outros produtos químicos úteis. Essas tecnologias são cruciais para as operações da marinha, proporcionando fontes alternativas de energia que podem ser produzidas localmente, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis tradicionais e aumentando a resiliência operacional. Além disso, as patentes da US Navy podem estimular colaborações com o setor privado e outras instituições governamentais, acelerando a transferência de tecnologia e a implementação de soluções inovadoras no mercado civil, beneficiando a sociedade como um todo.

Além da US Navy, outras entidades significativas, como 1234 10th Street, Chevron, Global Thermostat Operations, Shenzhen Carbon Neutral Bio Gas e Shenzhen Carbon Neutral Lithium Industry, aparecem com duas patentes cada.

A presença de empresas como a Chevron<sup>134</sup>, uma líder global no setor de energia, destaca a crescente conscientização da indústria de combustíveis fósseis sobre a necessidade de adotar tecnologias de captura e utilização de CO<sub>2</sub>. O engajamento da Chevron nesse campo reflete a pressão regulatória e a demanda dos consumidores por práticas mais sustentáveis, e também uma mudança de paradigma dentro da própria indústria. Empresas como a Chevron estão reconhecendo a importância de mitigar as emissões de carbono e estão investindo em soluções inovadoras para enfrentar os desafios ambientais e climáticos. Essas iniciativas podem não apenas reduzir o impacto ambiental das operações da empresa, mas também abrir novas oportunidades de negócios em mercados emergentes de energia limpa e sustentável.

A Global Thermostat Operations (GTO)<sup>135</sup> é uma empresa reconhecida no setor de tecnologias verdes, com uma história de compromisso com a inovação e soluções sustentáveis para os desafios ambientais. Seu foco principal está em oferecer soluções eficazes e economicamente viáveis para reduzir as emissões de carbono e mitigar os impactos das mudanças climáticas. A GTO atua em diversos segmentos do mercado, incluindo energia, indústria, transporte e infraestrutura. Suas soluções abrangem desde tecnologias de captura de carbono até sistemas de armazenamento e utilização de CO<sub>2</sub>. A empresa tem sido pioneira no desenvolvimento de novas abordagens e parcerias estratégicas para impulsionar a adoção de tecnologias limpas e sustentáveis em todo o mundo.

<sup>133</sup> US NAVY. **US Navy**. 2024. Disponível em: <https://www.navy.mil/>. Acesso em: 08 maio 2024.

<sup>134</sup> CHEVRON. **Moving towards a lower carbon future**. 2024. Disponível em: <https://www.chevron.com/>. Acesso em: 11 de maio de 2024.

<sup>135</sup> GLOBAL THERMOSTAT OPERATIONS. **The air carbon solution**. 2024. Disponível em: <https://www.globalthermostat.com/>. Acesso em: 11 de maio de 2024.

Quanto às empresas chinesas Shenzhen Carbon Neutral Bio Gas e Shenzhen Carbon Neutral Lithium Industry, elas surgem em um contexto de crescente importância da China no cenário global de tecnologias limpas e sustentáveis. Ambas as empresas têm um histórico de investimento significativo em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias de captura de carbono, alinhadas aos objetivos ambiciosos do país em alcançar a neutralidade.

A Shenzhen Carbon Neutral Bio Gas se destaca no mercado de biogás, desenvolvendo tecnologias avançadas para a produção de biocombustíveis a partir de resíduos orgânicos. Sua abordagem inovadora visa não apenas reduzir as emissões de gases de efeito estufa, mas também a aproveitar recursos sustentáveis para gerar energia limpa e renovável. Por outro lado, a Shenzhen Carbon Neutral Lithium Industry é uma empresa líder no setor de energia e baterias, focada em reduzir as emissões de carbono ao longo da cadeia de produção de baterias de íon-lítio.

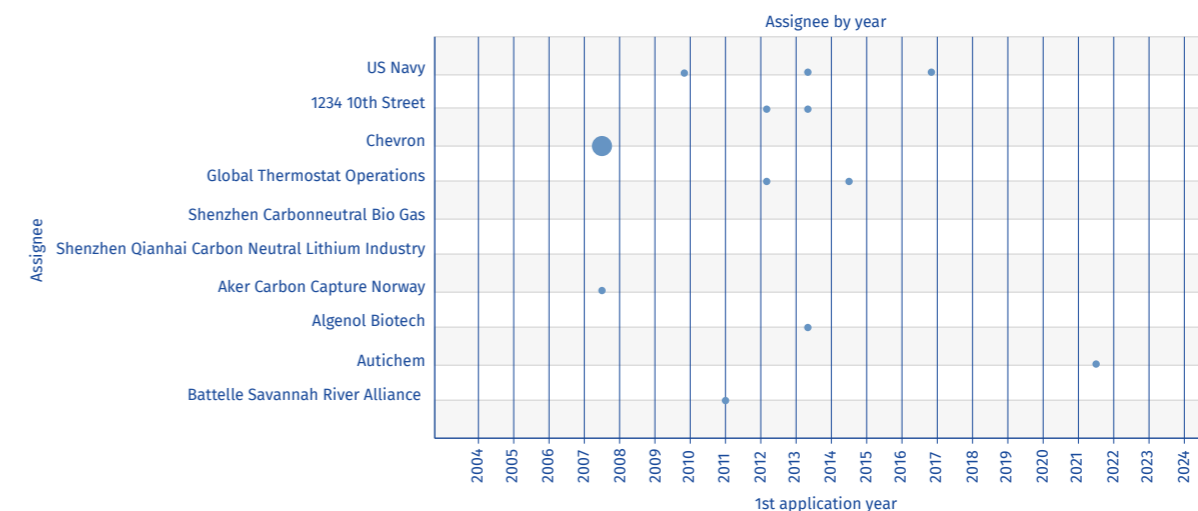
Essas empresas refletem o compromisso do setor privado com a sustentabilidade, e também destacam o papel crucial do mercado na promoção da inovação e na adoção de soluções para os desafios climáticos globais. Essa diversidade de depositantes revela um cenário competitivo e colaborativo onde tanto entidades públicas quanto privadas estão ativamente envolvidas no avanço das tecnologias de captura e utilização de CO<sub>2</sub>. A presença de múltiplos setores - desde instituições governamentais até empresas de energia e startups tecnológicas - sublinha a amplitude e a importância dessas inovações para diversas indústrias.

A análise dos principais depositantes também proporciona insights valiosos sobre as tendências e prioridades em pesquisa e desenvolvimento. A concentração de patentes entre esses atores sugere áreas específicas de inovação e aplicações potenciais para essas tecnologias. Além disso, a distribuição geográfica e setorial dos depositantes pode influenciar significativamente o ritmo de desenvolvimento e a adoção das tecnologias de captura e utilização de CO<sub>2</sub>.

Portanto, os dados apresentados na Figura 30 não apenas identificam os líderes em inovação, mas também refletem as estratégias amplas e multifacetadas de desenvolvimento tecnológico e comercialização. A análise dessas tendências pode ajudar a direcionar políticas, investimentos e colaborações futuras, promovendo uma abordagem mais integrada e eficaz para enfrentar os desafios das mudanças climáticas e promover a sustentabilidade global.

A **Figura 31** apresenta uma análise detalhada das publicações de patentes ao longo do tempo, revelando padrões interessantes entre os principais depositantes.

**Figura 31** - Depósitos dos detentores nos últimos 20 anos.

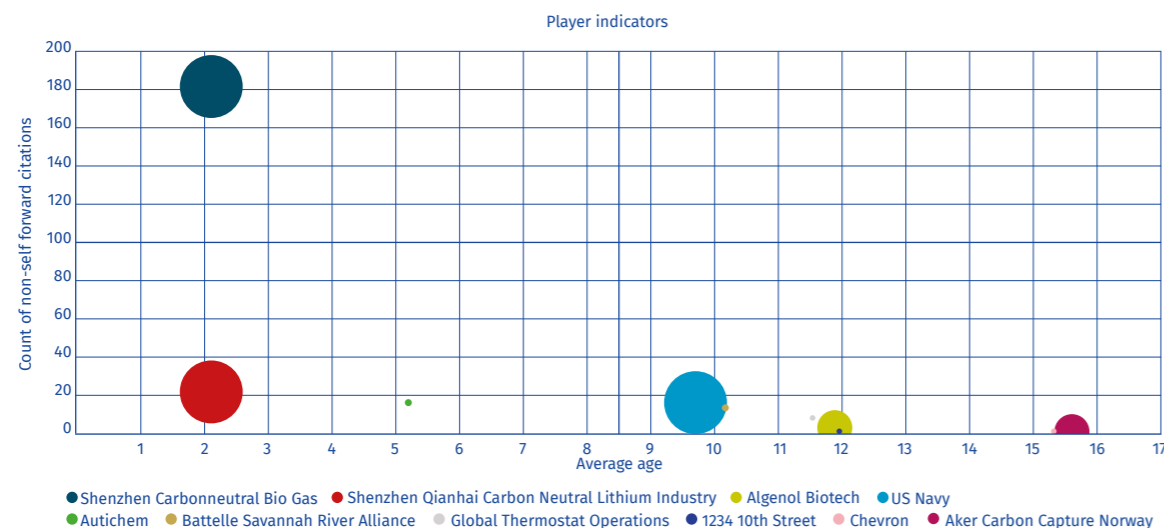


**F**  
Fonte: Elaboração própria (2024).

Observa-se que a US Navy, a 1234 10th Street e a Global Thermostat Operations realizaram depósitos de patentes de forma mais distribuída ao longo de diferentes anos. Este comportamento sugere uma estratégia contínua e sustentada de desenvolvimento e proteção de novas tecnologias. Em contraste, outros depositantes, como Chevron e as empresas chinesas Shenzhen Carbon Neutral Bio Gas e Shenzhen Carbon Neutral Lithium Industry, concentraram suas atividades de registro de patentes em um único ano. Este padrão pode indicar picos específicos de inovação ou lançamentos estratégicos de novas tecnologias nesses períodos.

Outra análise dos depositantes se refere ao posicionamento de mercado dos mesmos a partir das patentes selecionadas. Na **Figura 32**, um gráfico de bolhas ilustra os 10 principais detentores de tecnologia entre os resultados identificados. Este gráfico oferece uma visão detalhada sobre a posição competitiva e a influência tecnológica dos depositantes.

**Figura 32 - Indicadores dos depositantes.**



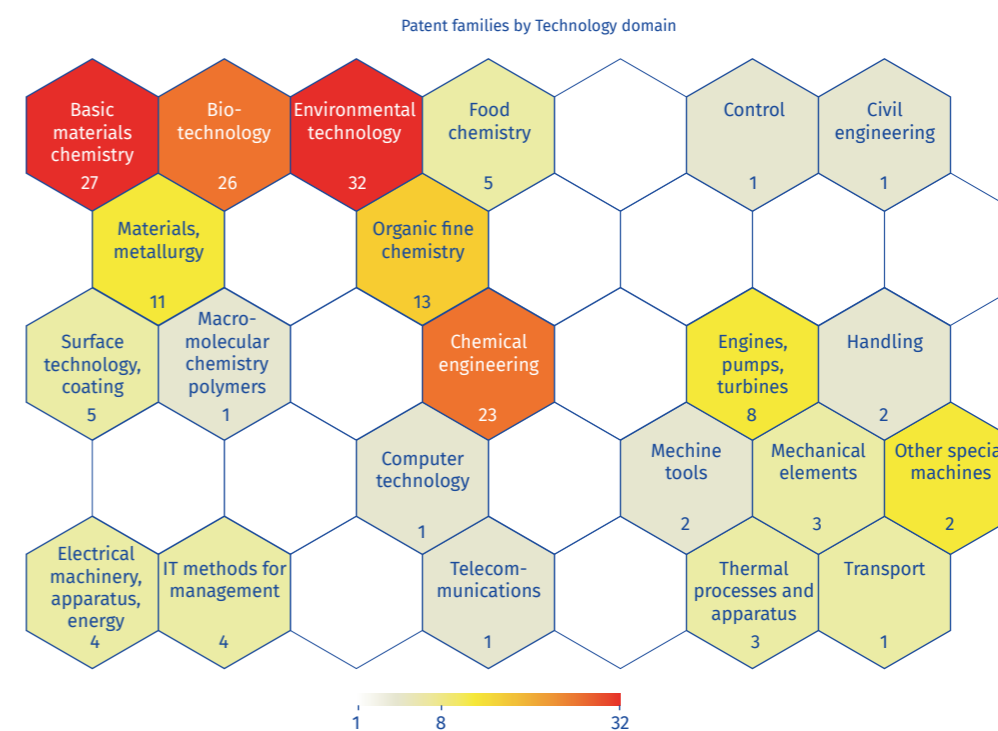
Fonte: Elaboração própria (2024).

No gráfico de bolhas, o número de citações futuras (eixo vertical) indica a relevância e o impacto das patentes ao longo do tempo, enquanto a idade média do portfólio (eixo horizontal) fornece insights sobre a maturidade das tecnologias desenvolvidas. O tamanho das bolhas representa o potencial competitivo do depositante: quanto maior a bolha, maior o potencial de competição dentro do setor. Esta métrica é crucial para entender quais empresas ou instituições têm uma presença robusta e são mais influentes no campo de captura e utilização de CO<sub>2</sub>.

Além disso, o posicionamento das bolhas no eixo horizontal revela o pioneirismo dos depositantes. Aqueles mais à esquerda do gráfico possuem carteiras de patentes mais recentes, indicando inovações mais novas e potencialmente disruptivas. Por outro lado, depositantes posicionados mais à direita são considerados pioneiros com um impacto duradouro e estabelecido no campo, sugerindo que suas tecnologias têm resistido ao teste do tempo e continuam a ser altamente citadas e relevantes. Este tipo de análise permite identificar os líderes atuais, e os emergentes no desenvolvimento de tecnologias de captura e utilização de CO<sub>2</sub>.

Ao analisar os domínios tecnológicos das 65 patentes selecionadas, a **Figura 33** mostra a concentração das tecnologias nos domínios de Tecnologia Ambiental, Química de Materiais Básicos e Biotecnologia. Esta análise baseia-se nos códigos da Classificação Internacional de Patentes (IPC) contidos em um conjunto de patentes, sendo os códigos agrupados em 35 campos tecnológicos. Uma patente pode estar presente em mais de um agrupamento, o que permite uma visão abrangente dos focos de inovação.

**Figura 33 - Domínios tecnológicos das patentes.**



Fonte: Elaboração própria (2024).

Essa distribuição indica áreas-chave de interesse e foco para a inovação no campo da captura e utilização de CO<sub>2</sub>. A predominância da Tecnologia Ambiental reflete o interesse em soluções ambientalmente amigáveis e sustentáveis para lidar com as emissões de CO<sub>2</sub>. Isso pode incluir tecnologias de captura de carbono, processos de sequestro de carbono, bem como abordagens de gestão e mitigação de impactos ambientais relacionados às atividades de captura e utilização de CO<sub>2</sub>.

Quanto à Química de Materiais Básicos, sua alta representação indica um foco nas propriedades e aplicações de materiais essenciais na captura, armazenamento e conversão de CO<sub>2</sub>, como catalisadores, adsorventes e membranas seletivas.

Por fim, a Biotecnologia sugere um interesse crescente na utilização de organismos vivos, processos biológicos e biomateriais para desenvolver soluções sustentáveis e eficazes para capturar e converter o CO<sub>2</sub> em produtos úteis. Isso pode incluir avanços em biotecnologia aplicada à engenharia genética de microrganismos ou cultivos de plantas para absorção de CO<sub>2</sub>.




Esses dados ressaltam a diversidade e a interdisciplinaridade das abordagens tecnológicas necessárias para enfrentar os desafios associados às mudanças climáticas e à transição para uma economia de baixo carbono.

Além dos domínios tecnológicos com maior concentração de patentes, aqueles com menor presença podem revelar potenciais novos usos para patentes já depositadas. Isso sugere oportunidades para inovação e diversificação, onde tecnologias desenvolvidas para uma aplicação específica podem ser adaptadas para novos contextos ou mercados emergentes. Assim, a análise dos domínios tecnológicos não só identifica os principais focos de desenvolvimento, mas também aponta para futuras direções de pesquisa e aplicação, ampliando o horizonte para novas inovações e soluções tecnológicas.


#### 4.2.2.2 Análise meso e micro

Na análise detalhada dos aspectos meso e micro do estudo de patentes, examinamos minuciosamente os 65 resultados encontrados, identificando 16 patentes que se concentram especificamente na produção de combustível, conforme destacado no **Tabela 6**.

**Tabela 6 - Resultados das patentes concentradas especificamente em produção de combustível pela utilização do CO<sub>2</sub>.**

#	Título	Situação jurídica		Responsáveis
1	(EP3681266) Methods of agricultural production of brassica carinata oilseed crop	Granted	Alive	
2	(US20130023044) System and Method for Fuel Generation from Algae	Lapsed	Dead	JAGS
3	(US8863435) Architecture for symbiotic livestock and biofuel production	Granted	Alive	 
4	(US9376656) Photobioreactor system and method for the growth of algae for biofuels and related products	Lapsed	Dead	Bartilson Brad W
5	(EP2606107) Solid phase biomass carbon storage (spbcs)	Granted	Alive	1234 10th Street
6	(IN202441016247) A system and method of ai-directed algae for better carbon capture to boost biofuel	Pending	Alive	Jaya Madhuri R Khatoon Uzma S K Leela Sai K P Mrunalika K

#	Título	Situação jurídica		Responsáveis
7	(IN202311064382) Process for carbon capture, its electro-catalytic reduction and conversion to biofuel for blended petrol	Pending	Alive	
8	(EP3523403) Method and system for improving the greenhouse gas emission reduction performance of biogenic fuels, heating mediums and combustion materials and/or for enriching agricultural areas with carbon-containing humus	Pending	Alive	Feldmann Lennart Feldmann Marc
9	(US10577248) Methods and systems for large scale carbon dioxide utilization from Lake Kivu via a CO <sub>2</sub> industrial utilization hub integrated with electric power production and optional cryo-energy storage	Granted	Alive	<b>Simbuka Energy LLC</b>
10	(EP3349563) Devices, systems and methods for enhanced biomass growth in greenhouses	Granted	Alive	<b>Carbon Sink LLC</b>
11	(US9101093) Water/carbonate stripping for CO <sub>2</sub> capture adsorber regeneration and CO <sub>2</sub> delivery to photoautotrophs	Lapsed	Dead	
12	(TW201511816) A low-energy consumption system for CO <sub>2</sub> adsorption, concentration and energy conversion	Lapsed	Dead	
13	(EP2586870) Process for producing a biocrude from microalgae	Granted	Alive	
14	(US8076122) Process for integrating conversion of hydrocarbonaceous assets and photobiofuels production using an absorption tower	Lapsed	Dead	
15	(US8076121) Integrated process for conversion of hydrocarbonaceous assets and photobiofuels production	Lapsed	Dead	

#	Título	Situação jurídica		Responsáveis
16	(EP2521790) Biological and chemical process utilizing chemoautotrophic microorganisms for the chemosynthetic fixation of carbon dioxide and/or other inorganic carbon sources into organic compounds, and the generation of additional useful products	Granted	Alive	KIVERDI 

Fonte: Elaboração própria (2024).

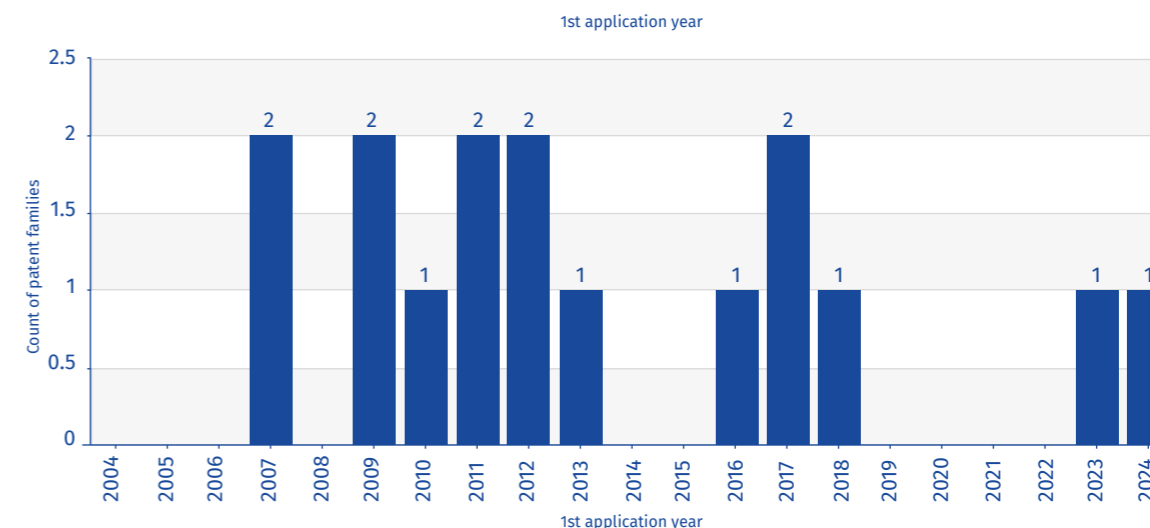
As patentes concedidas e ativas (granted, alive) foram oficialmente concedidas pelas autoridades de patentes, significando que passaram pelo processo de revisão e foram aprovadas. Além disso, estão ativas, o que indica que os titulares continuam a pagar as taxas de manutenção necessárias para mantê-las em vigor. Estas patentes têm validade legal, permitindo aos titulares direitos exclusivos sobre as inovações descritas.

Já as patentes pendentes e ativas (pending, alive) estão no processo de revisão por parte das autoridades de patentes. Elas foram submetidas, mas ainda não foram oficialmente concedidas. O status “ativa” indica que a aplicação está sendo processada e está dentro do período de validade do pedido. Patentes pendentes podem fornecer uma indicação das tendências e futuras inovações tecnológicas.

Por fim, as patentes caducadas e “mortas” (lapsed, dead) foram concedidas anteriormente, mas os titulares não mantiveram o pagamento das taxas de manutenção ou elas expiraram devido ao fim de seu período de validade. Como resultado, as patentes não estão mais em vigor. Isso significa que as inovações descritas nessas patentes não estão mais protegidas legalmente, permitindo que qualquer pessoa utilize as tecnologias sem infringir direitos de propriedade intelectual.

Foi realizada uma análise temporal das 16 patentes relevantes, conforme apresentado na **Figura 34**. Notavelmente, os depósitos concentram-se principalmente entre os anos de 2007 e 2013, com apenas duas patentes registradas entre 2023 e 2024, indicando duas flutuações temporais distintas ao longo das últimas duas décadas.

**Figura 34** - Distribuição temporal das patentes relevantes.



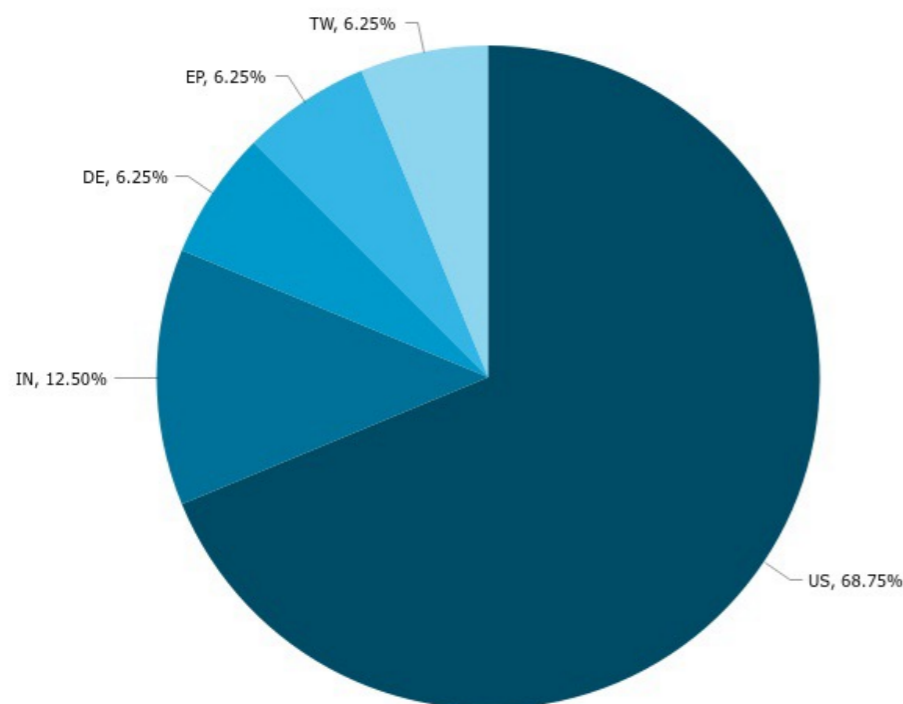
Fonte: Elaboração própria (2024).

Essa tendência temporal sugere períodos de maior ou menor atividade de inovação e desenvolvimento tecnológico no campo da produção de combustíveis, o que pode ser influenciado por fatores como avanços científicos, mudanças na regulamentação e demanda de mercado. A compreensão dessas flutuações temporais pode fornecer insights valiosos sobre os ciclos de inovação e ajudar na identificação de oportunidades e desafios para futuras pesquisas e desenvolvimentos.

A análise da distribuição de patentes por país depositante revela uma concentração significativa nas famílias de patentes originárias dos Estados Unidos, representando 68,75% do total, e da Índia, com 12,50%, conforme ilustrado na **Figura 35**.

A presença notável da Índia na análise meso/micro, mas não na análise macro, pode ser explicada por várias razões. Primeiro, pode refletir um foco mais recente e específico da Índia em tecnologias de produção de combustíveis a partir de CO<sub>2</sub>, alinhado com suas políticas energéticas e ambientais. A Índia tem investido significativamente em energias renováveis e tecnologias de captura e utilização de carbono como parte de seus esforços para enfrentar as mudanças climáticas e reduzir a dependência de combustíveis fósseis importados. Isso pode ter resultado em um número crescente de patentes relacionadas a essas tecnologias nos últimos anos.

**Figura 35** - Famílias de patentes por país de 1ª prioridade.



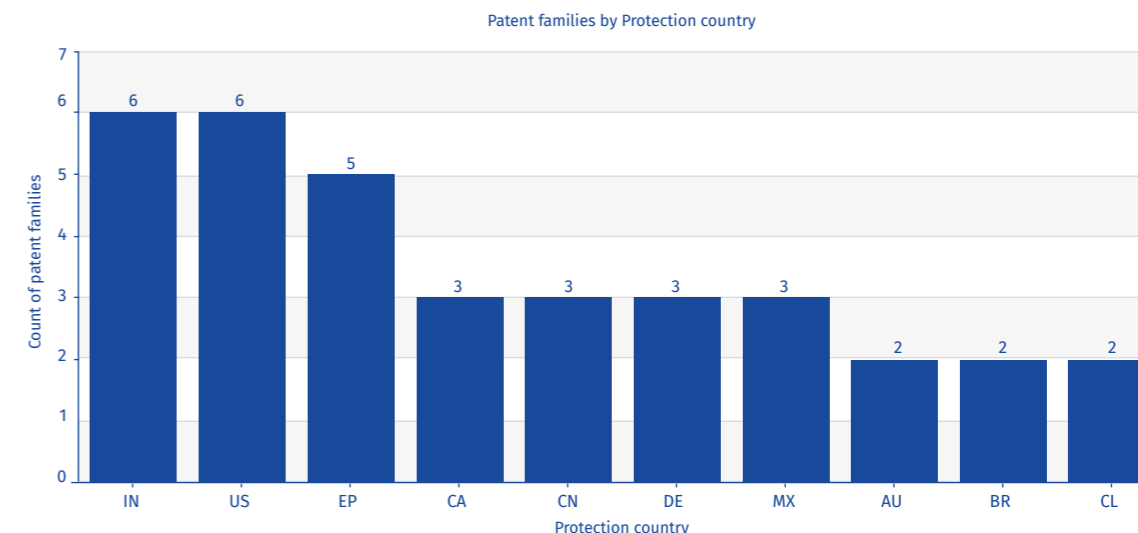
Fonte: Elaboração própria (2024).

Além disso, a estratégia de proteção de patentes na Índia pode ser mais seletiva e direcionada, concentrando-se em áreas de aplicação prática e imediata, enquanto a análise macro poderia incluir um conjunto mais amplo e diversificado de tecnologias que não são especificamente focadas na produção de combustíveis. A Índia também pode estar focada em inovações que são particularmente relevantes para suas necessidades locais, como o uso de biomassa disponível no país para produção de biocombustíveis, refletindo suas prioridades de desenvolvimento sustentável.

Esse padrão pode refletir a liderança desses países em inovação e desenvolvimento tecnológico no campo da produção de combustíveis, bem como suas estratégias de proteção de propriedade intelectual. Além disso, pode indicar diferenças nas prioridades de pesquisa e desenvolvimento entre as nações, refletindo suas necessidades específicas e áreas de especialização. Essa distribuição geográfica das patentes ressalta a importância da colaboração internacional e da transferência de conhecimento para impulsionar ainda mais a inovação nesse setor, aproveitando as vantagens e complementaridades entre as diferentes regiões e expertise científica.

A análise dos mercados-alvo das patentes selecionadas, destacada na **Figura 36**, revela a Índia, Estados Unidos e Europa como os principais locais de interesse para a proteção das tecnologias identificadas.

**Figura 36** - Mercados-alvo do depósito de patentes.

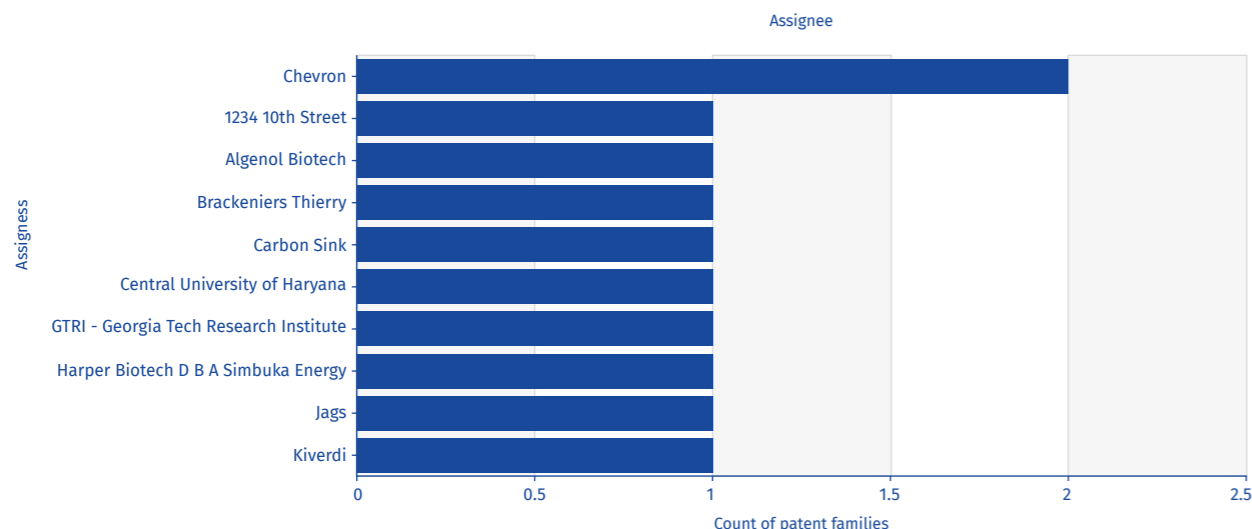


Fonte: Elaboração própria (2024).

Essa distribuição geográfica sugere uma estratégia de proteção global adotada pelos depositantes, visando a alcançar os mercados mais significativos e promissores para suas inovações. A presença dessas regiões como alvos prioritários de proteção pode refletir a demanda por tecnologias relacionadas à produção de combustíveis em tais mercados, e o potencial dessas regiões para investimentos em pesquisa e desenvolvimento, bem como para a implementação e adoção de novas soluções tecnológicas. Essa análise ressalta a importância de considerar as dinâmicas regionais e globais ao desenvolver estratégias de proteção de propriedade intelectual, bem como ao buscar oportunidades de mercado e parcerias para comercializar e implementar essas tecnologias de forma eficaz e sustentável.

Ao observarmos os depositantes das patentes, como evidenciado na **Figura 37**, notamos uma distribuição menos concentrada de posse das tecnologias em comparação com a análise macro.

**Figura 37 - Principais depositantes das patentes identificadas.**

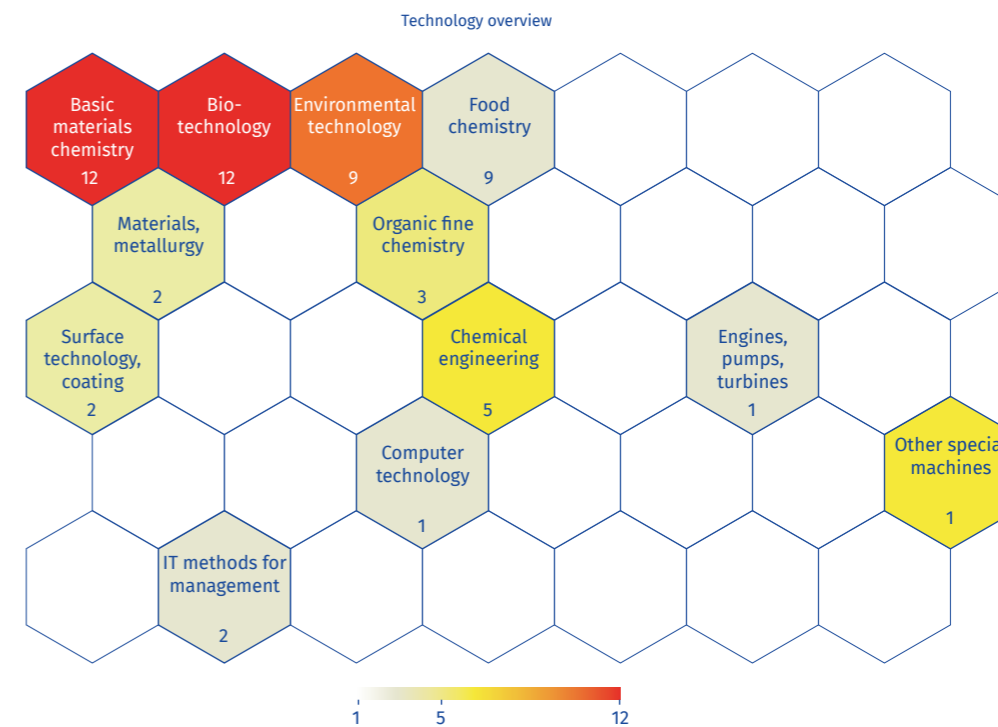


Fonte: Elaboração própria (2024).

Isso sugere uma diversificação na titularidade das patentes, com uma variedade de entidades envolvidas na inovação nesse campo. No entanto, merece destaque a presença da CHEVRON como detentora de duas patentes, o que ressalta o engajamento ativo de grandes players do setor de energia nas pesquisas relacionadas à captura e utilização de CO<sub>2</sub>. Essa participação significativa da CHEVRON pode indicar seu interesse estratégico em desenvolver e proteger tecnologias nesse domínio, bem como seu potencial papel como líder ou influenciador no avanço dessas inovações. Além disso, a presença de outros depositantes, mesmo que com menos patentes, aponta para a diversidade de atores e abordagens na busca por soluções para os desafios relacionados às emissões de carbono e à transição para fontes de energia mais limpas e sustentáveis.

As 16 patentes analisadas revelam uma concentração significativa em certos domínios tecnológicos, com destaque para Química de Materiais Básicos, Biotecnologia e Tecnologia Ambiental, conforme ilustrado na **Figura 38**.

**Figura 38 - Domínios tecnológicos das patentes.**



Fonte: Elaboração própria (2024).

Os resultados obtidos na busca de artigos científicos (Tabela 4) podem ser correlacionados com as patentes analisadas para uma compreensão mais aprofundada das tendências e focos de pesquisa. Nos artigos científicos, observou-se um forte interesse em temas como microalgas e gaseificação para biocombustíveis no cenário D, e em tecnologias como a síntese de Fischer-Tropsch e eletro-redução de CO<sub>2</sub> para e-combustíveis no cenário E. Esses temas destacam as áreas de pesquisa mais promissoras e inovadoras, focadas em desenvolver métodos eficientes e sustentáveis para a conversão de CO<sub>2</sub> em combustíveis.

O domínio de Química de Materiais Básicos abrange a pesquisa sobre catalisadores, essencial tanto para a síntese de Fischer-Tropsch quanto para a eletro-redução de CO<sub>2</sub>. Nos artigos científicos, a eficiência e inovação em catalisadores foram temas centrais, buscando melhorar a conversão de CO<sub>2</sub> em combustíveis sintéticos. As patentes neste campo provavelmente incluem novos materiais catalíticos e métodos para aumentar a eficiência dos processos químicos, corroborando a importância desta área na pesquisa de e-combustíveis.

No domínio de Biotecnologia, a correlação direta com o subtema das microalgas na produção de biocombustíveis é evidente. As pesquisas científicas sobre microalgas exploram sua capacidade de fixar CO<sub>2</sub> e produzir biomassa rica em lipídios, que pode ser convertida em biocombustíveis. As patentes em biotecnologia provavelmente incluem inovações em

cepas de microalgas, técnicas de cultivo e processos de conversão, confirmando o interesse contínuo e o avanço tecnológico nesta área.

A concentração de patentes em Tecnologia Ambiental reflete um alinhamento com o interesse observado nos artigos científicos. A ênfase neste domínio abrange tanto as microalgas quanto os processos de gaseificação e outras tecnologias de captura de CO<sub>2</sub>, indicando um foco global em soluções sustentáveis para a mitigação das emissões de carbono. Isso sugere que tanto a pesquisa acadêmica quanto as inovações tecnológicas estão convergindo para enfrentar desafios ambientais críticos.

A correlação entre as patentes e os artigos científicos revela um panorama coerente das principais áreas de inovação e desenvolvimento tecnológico na captura e utilização de CO<sub>2</sub>. As patentes oferecem uma visão sobre as aplicações práticas e os mercados potenciais para essas tecnologias, enquanto os artigos científicos destacam os avanços teóricos e experimentais que sustentam essas inovações. Este alinhamento entre pesquisa e aplicação prática é crucial para acelerar a transição para uma economia de baixo carbono, mostrando que as iniciativas acadêmicas e industriais estão trabalhando em conjunto para enfrentar os desafios climáticos globais.

## 4.3 BRASIL: CENÁRIO ATUAL

### 4.3.1 Marco Regulatório de CCUS

No contexto brasileiro, a regulamentação da captura, utilização e armazenamento de carbono (do inglês CCUS) está sendo abordada por meio de importantes projetos de lei (PL) que tramitam atualmente no Congresso Nacional, cada um com suas próprias abordagens e abrangências. Esses projetos visam a estabelecer um marco regulatório que promova a transição energética e a sustentabilidade ambiental no país.

Até o momento da redação deste relatório foram apresentados três projetos de lei no Brasil: PL 1.425/2022<sup>136</sup>, PL 4.196/2023<sup>137</sup> e PL 4.516/2023<sup>138</sup>, cada um propondo um marco legal distinto para CCUS. Os PLs 4196/2023 e 4516/2023 são bastante similares entre si, contudo, apresentam várias distinções em relação ao PL 1425/2022. Os três PLs são apresentados e discutidos a seguir.

136 BRASIL. **Projeto de Lei nº 1.425/2022**. Disciplina a exploração da atividade de armazenamento permanente de dióxido de carbono de interesse público, em reservatórios geológicos ou temporários, e seu posterior reaproveitamento. Disponível em: <https://www.congressonacional.leg.br/materias/materias-bicamerais/-/ver/pl-1425-2022>. Acesso em: 08 abr. 2024.

137 BRASIL. **Projeto de Lei nº 4.196/2023**. Cria a política decenal de descarbonização da matriz energética dos equipamentos e motores do Ciclo Diesel; dispõe sobre o Sistema de Informação da Qualidade do Diesel B ao consumidor final; dispõe sobre o Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV), o Programa Nacional de Diesel Verde (PNDV), o marco legal da Captura e Estocagem de Dióxido de Carbono e dá outras providências. Disponível em: <https://www.congressonacional.leg.br/materias/materias-bicamerais/-/ver/pl-4196-2023>. Acesso em: 08 de abr. 2024.

138 BRASIL. **Projeto de Lei nº 4.516/2023**. Dispõe sobre a promoção da mobilidade sustentável de baixo carbono, o Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação, o Programa Nacional de Diesel Verde e o marco legal da captura e da estocagem geológica de dióxido de carbono. Disponível em: <https://www.congressonacional.leg.br/materias/materias-bicamerais/-/ver/pl-4516-2023>. Acesso em: 08 abr. 2024.

#### 4.3.1.1 Projeto de Lei nº 1.425/2022

Apresentado pelo senador Jean-Paul Prates, visa a estabelecer um marco regulatório para CCUS que discipline a exploração da atividade de armazenamento de dióxido de carbono, seja em reservatórios geológicos ou temporários. A proposta também contempla o subsequente reaproveitamento do CO<sub>2</sub> capturado, garantindo que ele possa ser utilizado de maneira benéfica e sustentável, por exemplo, em processos industriais ou na geração de combustíveis sintéticos. Este projeto é um passo significativo para alinhar o país com as práticas internacionais de mitigação das mudanças climáticas, promovendo a captura e utilização eficiente de CO<sub>2</sub> produzido por diversas atividades industriais e energéticas. As diretrizes específicas incluem:

- a) segurança e eficiência: o projeto estabelece normas para assegurar que o armazenamento de CO<sub>2</sub> seja feito de maneira segura, prevenindo vazamentos e minimizando impactos ambientais;
- b) reaproveitamento do CO<sub>2</sub>: incentiva a utilização do CO<sub>2</sub> capturado em processos industriais, como a produção de combustíveis sintéticos, promovendo a economia circular;
- c) regulamentação clara: fornece diretrizes objetivas sobre os procedimentos e requisitos para empresas que desejam participar de atividades de CCUS, criando um ambiente regulatório estável e previsível.

Uma parte crucial do projeto aborda o armazenamento permanente de CO<sub>2</sub>, que envolve a injeção do dióxido de carbono em formações geológicas profundas, localizadas em bacias sedimentares do território nacional, como aquíferos salinos ou reservatórios esgotados de petróleo e gás. Este método é considerado seguro e eficaz para o sequestro de carbono a longo prazo, ajudando a evitar sua liberação na atmosfera. Por outro lado, o armazenamento não permanente de CO<sub>2</sub>, destinado à comercialização e reuso, será realizado em reservatórios superficiais que atendam a especificações mínimas para garantir a segurança contra vazamentos, conforme regulamentação técnica e licenciamento ambiental.

O projeto também promove o reaproveitamento do CO<sub>2</sub> capturado em diversas aplicações industriais. Exemplos incluem a fabricação de materiais de construção, a produção de combustíveis sintéticos e, a utilização em processos químicos, como a síntese de metanol. Esta abordagem não só reduz as emissões de carbono como também pode criar novas oportunidades econômicas e empregos.

Por fim, para assegurar o sucesso do CCUS, o PL 1.425/2022 propõe a criação de incentivos financeiros e políticas públicas específicas. Estes podem incluir créditos fiscais, subsídios e financiamentos destinados a empresas que investem em tecnologias de captura e armazenamento de carbono. Além disso, o projeto prevê a integração de CCUS nas políticas nacionais de mudança climática e energia.

#### Impacto esperado:

- a) redução das emissões de CO<sub>2</sub>: com a implementação bem-sucedida das diretrizes propostas pelo PL 1.425/2022 espera-se atingir uma significativa redução das emissões de CO<sub>2</sub> no país, alinhando-se com os compromissos internacionais estabelecidos no Acordo de Paris;
- b) desenvolvimento tecnológico: a regulamentação clara e os incentivos previstos no projeto de lei podem estimular a inovação e o desenvolvimento de novas tecnologias de captura e utilização de carbono. Isso pode posicionar o Brasil como um líder na tecnologia de CCUS, com potencial para exportar conhecimento e serviços nessa área;
- c) benefícios econômicos: além dos benefícios ambientais, o projeto de lei tem o potencial de gerar benefícios econômicos significativos. A criação de uma indústria de CCUS pode abrir novas oportunidades de emprego, atrair investimentos e fomentar o desenvolvimento de novas cadeias produtivas, especialmente em setores industriais e energéticos.

#### 4.3.1.2 Projeto de Lei nº 4.196/2023

Proposto pelo deputado Alceu Moreira, este projeto de lei é mais abrangente, pois aborda não apenas o CCUS, mas também a descarbonização da matriz energética dos equipamentos e motores do Ciclo Diesel. Ele propõe uma política decenal que estabelece metas e incentivos para a redução das emissões de carbono nesse setor. Adicionalmente, o projeto institui o Sistema de Informação da Qualidade do Diesel B para os consumidores finais e cria programas nacionais de combustível sustentável de aviação (ProBioQAV) e de diesel verde (PNDV). O marco legal para a captura e estocagem de dióxido de carbono é uma parte importante dessa proposta, destacando a necessidade de integrar tecnologias de CCUS na estratégia nacional de descarbonização. Dentre os objetivos específicos do projeto destaca-se:

- a) redução de emissões: reduzir significativamente as emissões de CO<sub>2</sub> provenientes do uso de motores e equipamentos do Ciclo Diesel;
- b) qualidade do combustível: melhorar a qualidade do diesel disponibilizado no mercado, assegurando que os consumidores recebam produtos que atendam a padrões ambientais mais rigorosos;
- c) promoção de combustíveis sustentáveis: incentivar a produção e o uso de combustíveis sustentáveis de aviação e diesel verde;
- d) estabelecimento de normas para CCUS: regulamentar a captura e armazenamento de CO<sub>2</sub>, promovendo o desenvolvimento dessas tecnologias no Brasil.

Um elemento-chave do projeto é a criação de uma Política Decenal de Descarbonização de dez anos para motores e equipamentos do Ciclo Diesel. Essa política estabelece metas e prazos para a redução gradual das emissões de CO<sub>2</sub>, incentivando a adoção de tecnologias mais limpas e eficientes. Os principais componentes dessa política incluem: o estabelecimento de limites de emissões progressivamente mais rígidos para motores e equipamentos, subsídios e incentivos fiscais para empresas que investem em tecnologias de descarbonização e operacionalização de sistemas de monitoramento para assegurar o cumprimento das metas e a transparência na divulgação dos resultados.

Importante ressaltar que uma inovação importante deste projeto é a criação do Sistema de Informação da Qualidade do Diesel B. Este sistema visa a fornecer aos consumidores informações claras e acessíveis sobre a qualidade do diesel disponível no mercado. As medidas previstas incluem a exigência de rotulagem detalhada sobre a composição e qualidade do diesel, implementação de um sistema de certificação de qualidade para assegurar que o diesel vendido atende aos padrões ambientais e de qualidade estabelecidos.

Além disso, o PL nº 4.196/2023 institui dois programas nacionais importantes:

- a) Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV): promove o desenvolvimento e uso de biocombustíveis na aviação, reduzindo a pegada de carbono do setor aéreo;
- b) Programa Nacional de Diesel Verde (PNDV): incentiva a produção e utilização de diesel verde, uma alternativa mais sustentável ao diesel tradicional.

Por fim, o projeto também estabelece um marco legal específico para a captura e armazenamento de CO<sub>2</sub>. As metas principais incluem o estabelecimento de normas e procedimentos para a captura, transporte e armazenamento seguro de CO<sub>2</sub>. Além disso, este PL considera incentivos para pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias de CCUS e integração com políticas ambientais para assegurar que essas atividades contribuam para as metas climáticas do país.

#### Impacto esperado:

- a) descarbonização do setor de transporte: a política decenal de descarbonização visa reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> do setor de transporte, especialmente dos motores e equipamentos do Ciclo Diesel, contribuindo significativamente para as metas climáticas do país;
- b) melhoria da qualidade do diesel: a criação do Sistema de Informação da Qualidade do Diesel B garante que os consumidores tenham acesso a combustíveis de alta qualidade, que atendem a padrões ambientais rigorosos, promovendo a saúde pública e a proteção ambiental;

- c) desenvolvimento de combustíveis sustentáveis: os programas nacionais de combustível sustentável de aviação e diesel verde incentivarão a inovação e o desenvolvimento de alternativas mais limpas aos combustíveis fósseis tradicionais, reduzindo a dependência do petróleo e promovendo a sustentabilidade;
- d) avanço na tecnologia de CCUS: os incentivos previstos para CCUS neste PL podem posicionar o Brasil como um líder na tecnologia de captura e armazenamento de carbono, contribuindo para a redução global de emissões de CO<sub>2</sub>.

#### 4.3.1.3 Projeto de Lei nº 4.516/2023

O Projeto proposto pelo Poder Executivo Federal e também conhecido como “PL Combustível do Futuro”, representa uma iniciativa mais abrangente que visa a promover a mobilidade sustentável de baixo carbono no Brasil. Este projeto de lei é uma parte crucial dos esforços do país para cumprir suas metas climáticas e avançar na transição para uma economia de baixo carbono, integrando tecnologias de Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS) com programas de combustíveis sustentáveis.

O PL 4516/2023 aborda os seguintes objetivos:

- a) promoção da mobilidade sustentável: incentivar o uso de combustíveis e tecnologias de transporte que reduzam as emissões de GEE;
- b) desenvolvimento de combustíveis sustentáveis: estabelecer programas nacionais para o desenvolvimento e uso de combustíveis sustentáveis, como biocombustíveis de aviação e diesel verde;
- c) regulamentação do CCUS: estabelecer um marco legal específico para a captura e armazenamento geológico de dióxido de carbono, promovendo a adoção dessas tecnologias no Brasil.

Nesse contexto, este projeto de lei estabelece diversas iniciativas para promover a mobilidade sustentável, como: oferecer incentivos fiscais e financeiros para a aquisição e uso de veículos elétricos, híbridos e outros de baixo carbono. Adicionalmente, dispõe o desenvolvimento de uma infraestrutura robusta para a recarga de veículos elétricos, incluindo pontos de recarga rápida em áreas urbanas e rodovias. Por fim, promove a melhoria e a eletrificação do transporte público, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis.

Quanto à elaboração de Programas Nacionais, o projeto contempla a instituição de dois programas:

- a) Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV) para o incentivo da produção e o uso de biocombustíveis na aviação, uma área que tradicionalmente depende de combustíveis fósseis. Para isso, o projeto estabelece subsídios e incentivos

fiscais para produtores de biocombustíveis de aviação, estimula a formação de parcerias com companhias aéreas para o uso e desenvolvimento de biocombustíveis, reduzindo a pegada de carbono do setor. Finalmente, visa a definição de padrões de qualidade para biocombustíveis;

- b) Programa Nacional de Diesel Verde (PNDV) com objetivo de promover a produção e uso de diesel verde, uma alternativa mais sustentável ao diesel tradicional. As principais ações incluem: incentivos fiscais e subsídios para a produção de diesel verde e para consumidores que optam por este combustível. O apoio à pesquisa e desenvolvimento de tecnologias de produção de diesel verde, também é contemplado neste programa; além da implementação de um sistema de certificação para garantir a qualidade e sustentabilidade do diesel verde.

O PL 4.516/2023 propõe um marco regulatório específico para a captura e armazenamento geológico de dióxido de carbono, estabelecendo normas claras para a captura, transporte e armazenamento seguro de CO<sub>2</sub>, incentivos à pesquisa e integração com Políticas Nacionais.

Impacto esperado:

- a) redução das emissões de CO<sub>2</sub>: a promoção da mobilidade sustentável e o desenvolvimento de combustíveis sustentáveis esperam reduzir significativamente as emissões de CO<sub>2</sub> no setor de transporte. A regulamentação do CCUS contribuirá para a captura e armazenamento seguro de CO<sub>2</sub>, mitigando o impacto das emissões industriais;
- b) inovação e desenvolvimento tecnológico: o projeto incentivará a inovação e o desenvolvimento tecnológico, posicionando o Brasil como líder na produção de combustíveis sustentáveis e na implementação de tecnologias de CCUS;
- c) benefícios econômicos e ambientais: a transição para combustíveis sustentáveis e tecnologias de baixo carbono não só beneficia o meio ambiente, mas também pode fortalecer a economia brasileira. A criação de novos setores industriais e a redução da dependência de combustíveis fósseis promoverão uma economia mais resiliente e sustentável.

O Projeto de Lei nº 4.516/2023, “PL Combustível do Futuro”, representa um avanço significativo nos esforços do Brasil para promover a mobilidade sustentável e reduzir as emissões de CO<sub>2</sub>. Ao integrar a promoção de combustíveis sustentáveis com a regulamentação do CCUS, o projeto busca criar um marco regulatório robusto e incentivar o desenvolvimento tecnológico necessário para uma economia de baixo carbono. A aprovação e implementação deste projeto de lei serão cruciais para que o Brasil alcance suas metas climáticas e se posicione como um líder global na transição para uma economia sustentável.

Importante mencionar que em 13/03/2024 foi apresentado, pelo deputado Arnaldo Jardim, na condição de relator do PL 580/2020, um substitutivo ao PL 4.516/2023 “Combustível do Futuro”, que combina dispositivos dos demais PLs.

#### 4.3.1.4 Desafios e considerações dos PLs

Embora os Projetos de Lei 1.425/2022, PL 4.196/2023 e PL 4.516/2023 sejam ambiciosos além de abrangentes e representem um avanço significativo, sua implementação enfrenta vários desafios e considerações, entre elas:

- a) custo de implementação das tecnologias de CCUS: as tecnologias de captura e armazenamento de carbono são atualmente custosas, e a criação de uma infraestrutura adequada requer investimentos substanciais. A transição para uma mobilidade sustentável, tecnologias mais limpas e a implementação de CCUS exigirão investimentos significativos em infraestrutura e tecnologia, tanto do setor público quanto privado;
- b) regulamentação e fiscalização: a efetiva regulamentação e fiscalização das atividades de CCUS exigirão a criação de novos órgãos reguladores ou a expansão das capacidades dos existentes, como a ANP;
- c) adaptação do setor: o setor de transporte e os produtores de combustíveis precisarão se adaptar às novas regulamentações e tecnologias, o que pode requerer tempo e recursos;
- d) cooperação e coordenação intersetorial: a efetiva implementação das políticas propostas dependerá de uma estreita cooperação e coordenação eficaz entre diferentes setores e níveis de governo;
- e) aceitação pública: a conscientização e aceitação pública das tecnologias de CCUS são fundamentais. Será necessário, por exemplo, promover campanhas educativas para informar a população sobre os benefícios e segurança dessas tecnologias.

#### 4.3.2 Projetos CCUS em andamento

A captura, utilização e armazenamento de carbono (do inglês CCUS) é uma área de pesquisa e inovação que vem ganhando destaque no Brasil, à medida que o país busca alinhar-se com as metas globais de redução de emissões de carbono e a transição para uma economia de baixo carbono. Diversas instituições de pesquisa, empresas e iniciativas governamentais estão atualmente ativamente envolvidas no desenvolvimento de tecnologias e processos para capturar, reutilizar e armazenar dióxido de carbono.

A seguir são apresentados alguns dos principais projetos e iniciativas em andamento no país.

##### 4.3.2.1 Petrobras

A Petrobras, maior empresa de energia do Brasil, está na vanguarda dos projetos de CCUS no país. A empresa tem investido significativamente em pesquisa e desenvolvimento para explorar e implementar tecnologias de captura e armazenamento de carbono. Entre os projetos mais notáveis estão:

- a) iniciativa CCS (Carbon Capture and Storage): a Petrobras está desenvolvendo tecnologias para a captura de CO<sub>2</sub> em suas operações de exploração e produção de petróleo e gás. A empresa está focada no armazenamento geológico do CO<sub>2</sub> em reservatórios de petróleo e gás esgotados, bem como em aquíferos salinos. De acordo com a Petrobras, a primeira implementação de um projeto de captura de carbono pela empresa ocorreu em 2008. Até 2022, mais de 40,8 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> foram injetadas nos reservatórios, e a empresa pretende dobrar esse valor acumulado até 2025;
- b) projeto-piloto São Tomé/Cabiúnas: o projeto integra tecnologias de captura, utilização e armazenamento de carbono, visando reduzir significativamente o impacto ambiental das operações petrolíferas. O objetivo é capturar o CO<sub>2</sub> emitido na atmosfera, tratá-lo e transportá-lo por um duto até Barra do Furado, localizada cerca de 70 km de distância de Cabiúnas, para então ser injetado em um poço terrestre no reservatório salino de São Tomé. Para este piloto, está prevista a captura e injeção de aproximadamente 100 mil toneladas de CO<sub>2</sub> por ano, um volume considerado pequeno em comparação com a demanda e a capacidade estimada do reservatório investigado. O projeto conceitual está em desenvolvimento desde o início de 2023. Em 2024, a Petrobras solicitou à ANP o reconhecimento como projeto de PD&I e ainda está sujeito à aprovação interna devido aos altos investimentos envolvidos. Se todas as aprovações forem obtidas, está previsto realizar o comissionamento e montagem das estruturas até o terceiro trimestre de 2027, seguido pelo início das operações. Embora promissor, o Projeto São Tomé/Cabiúnas CCUS enfrenta desafios, como custos operacionais e tecnológicos, bem como questões regulatórias e de aceitação pública;
- c) projeto de EOR (Enhanced Oil Recovery): este projeto visa à utilização do CO<sub>2</sub> capturado para melhorar a recuperação de petróleo em campos maduros, aumentando a eficiência da produção enquanto sequestra carbono no subsolo. O uso de CO<sub>2</sub> no EOR, já consolidado na indústria petrolífera, proporciona uma compreensão aprofundada da natureza e dos mecanismos que garantem sua permanência efetiva e segura em condições de armazenamento. Sendo uma atividade que aumenta a produção e, conseqüentemente, a receita dos campos de petróleo, o EOR possui uma economicidade favorável intrínseca, eliminando a necessidade de incentivos para sua viabilização.

A Petrobras demonstra liderança e compromisso com a transição para uma economia de baixo carbono, estabelecendo novos padrões de excelência ambiental no setor de energia. A empresa continua a investir em pesquisa e desenvolvimento para superar esses desafios e maximizar os benefícios do CCUS em suas operações.

#### 4.3.2.2 FS Agrisolutions

O projeto da FS Agrisolutions, uma das maiores produtoras de etanol de milho do Brasil, representa uma iniciativa inovadora no setor de biocombustíveis. A rota BECCS (Bioenergy with Carbon Capture and Storage) combina a produção de biocombustíveis a partir de biomassa com a captura e armazenamento de carbono (CCS), visando a reduzir as emissões de carbono na atmosfera.

O projeto foi dimensionado para capturar todo o CO<sub>2</sub> produzido durante a etapa de fermentação de milho na planta de Lucas de Rio Verde em Mato Grosso. A primeira fase do projeto teve início em setembro de 2020, com uma avaliação do potencial geológico da Bacia dos Parecis, Alto Xingu, com base em dados preexistentes e informações disponibilizadas pela ANP, para injeção do CO<sub>2</sub> proveniente das dornas de fermentação nos reservatórios. Para março de 2025 é prevista uma injeção diária de 1.160 t/dia de CO<sub>2</sub><sup>139</sup>. Com a implementação da rota BECCS, a FS tem potencial para se tornar uma das poucas empresas no mundo e a primeira dentro do escopo da Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) a alcançar uma pegada de carbono negativa. Entretanto, a inserção de atividades de CCS no Renovabio precisará ser regulamentada pela ANP.

#### 4.3.2.3 Institutos Nacionais de Ciência & Tecnologia (ICT)

Diversas universidades brasileiras e ICTs estão envolvidas em pesquisas relacionadas ao CCUS, porém em baixo grau de maturidade tecnológica, gerando provas e conceito. Algumas das iniciativas incluem:

- a) Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ): o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da UFRJ está conduzindo pesquisas sobre tecnologias de captura de CO<sub>2</sub> e seu armazenamento em formações geológicas offshore;
- b) Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP): pesquisadores da UNICAMP estão trabalhando em processos de captura e utilização de CO<sub>2</sub> em diversas indústrias, incluindo a produção de cimento e siderurgia;

c) Instituto SENAI de Inovação Biomassa (ISI Biomassa): importante mencionar que o financiamento e subsídios para esses desenvolvimentos no ISI Biomassa, são provenientes de agências como FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos), BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social), ANP (Agência Nacional do petróleo) e EMBRAP II (Empresa Brasileira para a Pesquisa e Inovação Industrial). Fundado em 2013, o ISI Biomassa se destacou como um centro de excelência em pesquisa aplicada em Três Lagoas/MS. Reconhecido por suas substanciais contribuições ao desenvolvimento de novos produtos e processos inovadores na transformação de biomassa, o ISI Biomassa construiu uma forte reputação por meio da execução de mais de 80 projetos em diversos setores industriais. Esses projetos estão alinhados com diferentes áreas de foco principal, como Bioeconomia Circular, Bioprocessos e Biotecnologia, Energia e Sustentabilidade, e Tecnologias de Descarbonização. Entre seus notáveis clientes e parceiros estão empresas de renome como Suzano, Galp e Exxon Mobil, o que sublinha a capacidade do ISI Biomassa de atender às demandas específicas da indústria de maneira rápida e eficiente. As colaborações com produtores de matérias-primas renováveis têm desempenhado um papel crucial na promoção de avanços tecnológicos voltados para a caracterização e transformação de biomassas sólidas, líquidas e gasosas, bem como de gases de efeito estufa (GEE), com um forte foco na descarbonização e na facilitação da transição energética da indústria brasileira. Endossado pela EMBRAP II em Tecnologias de CCUS, o ISI Biomassa mantém um compromisso inabalável com soluções inovadoras e sustentáveis. Projetos como 'DeCarbon' e 'TUPÃ' exemplificam esse compromisso. O projeto 'DeCarbon' busca desenvolver uma tecnologia sustentável, econômica e altamente eficiente para a captura de CO<sub>2</sub> emitido pela indústria siderúrgica, enquanto o 'TUPÃ' se concentra no avanço de tecnologias de conversão catalítica e eletroquímica para transformar as emissões de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> do setor de óleo e gás em combustíveis limpos. O ISI Biomassa possui instalações avançadas, como o Laboratório de Tecnologias de Descarbonização, focado na conversão de gases para a produção de hidrogênio renovável e hidrocarbonetos, e o sistema de tecnologia SOFC/SOEC para testes de células unitárias e stacks. Esses recursos destacam a dedicação do ISI Biomassa à pesquisa pioneira e à inovação na transformação de biomassa, captura e utilização do CO<sub>2</sub>.

Os projetos de pesquisa e inovação em CCUS no Brasil estão em rápida expansão, refletindo o compromisso do país com a redução das emissões de carbono e a transição para uma economia sustentável. A combinação de iniciativas de empresas como Petrobras e FS Agrisolutions, centros de pesquisa de renome e o apoio governamental cria um ambiente propício para o avanço das tecnologias de CCUS. Estes esforços são essenciais para que o Brasil não só cumpra suas metas climáticas, mas também se posicione como um líder global na adoção de tecnologias de captura, utilização e armazenamento de carbono.

<sup>139</sup> FS. **Agenda do carbono**. 2024. Disponível em: <https://www.fs.agr.br/nosso-negocio/carbono/>. Acesso em: 09 maio 2024.

## 5 ETAPA PÓS-PROSPECTIVA

Nesta etapa examinaremos o roadmap tecnológico da “Captura e utilização de CO<sub>2</sub> como matéria-prima para geração de combustíveis”, derivado das taxonomias e das informações extraídas dos documentos de artigos e patentes concedidas e depositadas.

### 5.1 ROADMAP TECNOLÓGICO

Considerando as taxonomias e os domínios identificados tanto nos artigos quanto nas patentes pesquisadas, obtidas pelas plataformas de busca Web of Science para os artigos e Questel Orbit para as patentes, realizamos uma reestruturação para acomodar todos os documentos filtrados. Como resultado obtivemos uma nova classificação que engloba as taxonomias e os domínios identificados, conforme apresentado na tabela a seguir:

**Tabela 7 -** Reclassificação de taxonomias e domínios.

Tecnologias	Tecnologias específicas envolvidas no estudo de captura, conversão e uso de CO <sub>2</sub>	Fotoprodutividade
		Bioengenharia
		Sustentabilidade/ambiental
Processos	Operações necessárias para os processos de captura, conversão e uso de CO <sub>2</sub>	Equipamentos/sistemas/reatores
		Materiais/catalisadores
		Biotecnologia
		Eletroquímica
		Termodinâmica/otimização
Aplicação	Aplicação final de tecnologias e métodos para captura, conversão e uso do CO <sub>2</sub>	Agricultura
		Combustíveis/biocombustíveis
		Meio ambiente

Fonte: Elaboração própria (2024).

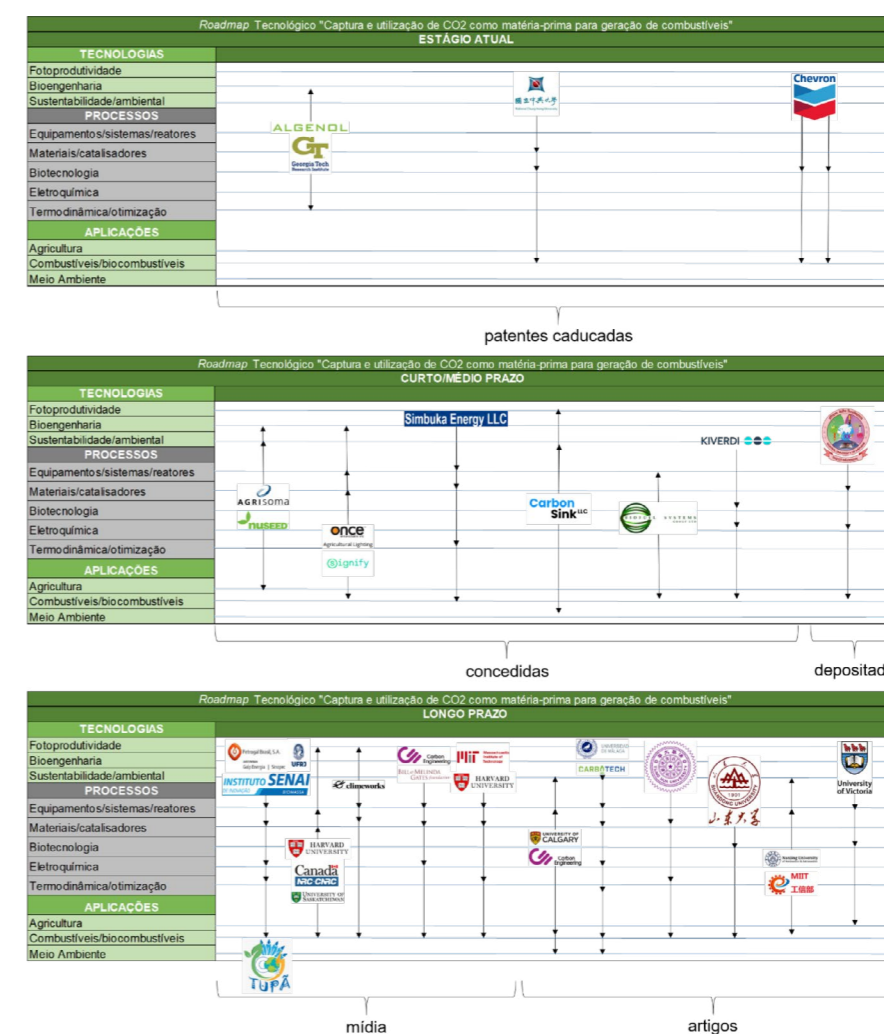
O quadro apresenta uma discussão sobre as diferentes categorias de tecnologias, processos e aplicações relacionadas ao estudo de captura, conversão e uso de CO<sub>2</sub>. Aqui estão algumas considerações sobre cada categoria:

- Tecnologias:
  - fotoprodutividade: envolve o uso de tecnologias fotossintéticas para aumentar a produtividade de biomassa, o que pode contribuir para a captura e conversão de CO<sub>2</sub> para combustíveis;
  - bioengenharia: refere-se à aplicação de técnicas biológicas para projetar e construir sistemas que ajudam na captura e conversão de CO<sub>2</sub> para combustíveis;
  - sustentabilidade/ambiental: integração de tecnologias de práticas sustentáveis na captura e utilização de CO<sub>2</sub>, abordando os impactos ambientais e socioeconômicos das tecnologias.
- Processos:
  - equipamentos/sistemas/reactores: diferentes dispositivos e sistemas utilizados nos processos de captura e conversão de CO<sub>2</sub> para combustíveis;
  - materiais/catalisadores: materiais e catalisadores específicos empregados para facilitar as reações de captura e de conversão de CO<sub>2</sub> para combustíveis;
  - biotecnologia: técnicas biológicas e enzimáticas para aprimorar os processos de captura e conversão de CO<sub>2</sub> para combustíveis;
  - eletroquímica: processos que utilizam reações eletroquímicas para capturar e converter CO<sub>2</sub> para combustíveis;
  - termodinâmica/otimização: aplicação de princípios termodinâmicos e técnicas de otimização para melhorar a eficiência dos processos de captura e conversão de CO<sub>2</sub> para combustíveis.
- Aplicação:
  - agricultura: práticas agrícolas para maximização do sequestro de carbono, produtividade melhorada para a conversão do material biológico em combustível;
  - combustíveis/biocombustíveis: uso de CO<sub>2</sub> capturado na produção de combustíveis e biocombustíveis, contribuindo para a redução da dependência de combustíveis fósseis;
  - meio ambiente: aplicação de tecnologias de captura e conversão de CO<sub>2</sub> para mitigar os impactos ambientais e promover a sustentabilidade do meio ambiente.

Essas categorias abrangem uma variedade de aspectos relacionados ao estudo e aplicação de tecnologias de captura, conversão e uso de CO<sub>2</sub>, fornecendo uma visão abrangente das diferentes áreas de interesse e foco nesse campo de pesquisa e desenvolvimento.

A **Figura 39** mostra os mapas tecnológicos completos, e nos próximos tópicos fazemos a discussão dos estágios separadamente.

**Figura 39 - Mapas tecnológicos de todos os estágios.**



Fonte: Elaboração própria (2024).

### 5.1.1 Estágio atual

O Estágio Atual destaca os players que já estão envolvidos no desenvolvimento de iniciativas ou práticas relacionadas à “Captura e utilização de CO<sub>2</sub> como matéria-prima para geração de combustíveis”. Esses atores foram identificados dentre as patentes caducadas, durante a etapa prospectiva da análise.

Considerando a definição de patentes caducadas e “mortas” (*lapsed, dead*), incluímos essas patentes na fase do estágio atual do mapa tecnológico. Essas patentes, embora anteriormente concedidas, não foram mantidas ativas devido ao não pagamento das taxas de manutenção ou ao término de seu período de validade. Como resultado, as tecnologias descritas nelas estão disponíveis para utilização geral, permitindo que qualquer pessoa as utilize sem infringir direitos de propriedade intelectual. Isso torna essas tecnologias acessíveis e prontas para aplicação imediata, proporcionando uma oportunidade para inovação e desenvolvimento sem restrições legais.

No estágio mais avançado da implementação de tecnologias de CCUS, observamos predominantemente projetos focados na captura e armazenamento do CO<sub>2</sub> (CCS)<sup>140 141</sup>. Embora o conceito de utilização do CO<sub>2</sub> capturado para a produção de combustível tenha sido discutido como uma potencial solução para reduzir as emissões de carbono, sua implementação ainda está aquêm e incipiente no momento. Isso se deve a uma série de desafios técnicos, econômicos e regulatórios que precisam ser superados para viabilizar essa abordagem em larga escala. Um dos principais obstáculos é o desenvolvimento de tecnologias eficientes e econômicas para transformar o CO<sub>2</sub> capturado em combustíveis utilizáveis em uma escala comercialmente viável. Além disso, questões relacionadas à infraestrutura de transporte, armazenamento e distribuição desses combustíveis também precisam ser abordadas. Embora a utilização do CO<sub>2</sub> capturado para a produção de combustível possa oferecer benefícios significativos em termos de redução das emissões de carbono e aproveitamento de recursos, sua implementação requer um esforço conjunto de governos, indústrias e instituições de pesquisa para superar os desafios existentes e impulsionar a inovação nesse campo.

Sendo assim, na etapa prospectiva não encontramos nenhuma tecnologia sendo utilizada ou comercializada que envolva tanto a captura de CO<sub>2</sub> quanto sua utilização para a produção de combustíveis, e consideramos somente as patentes caducadas.

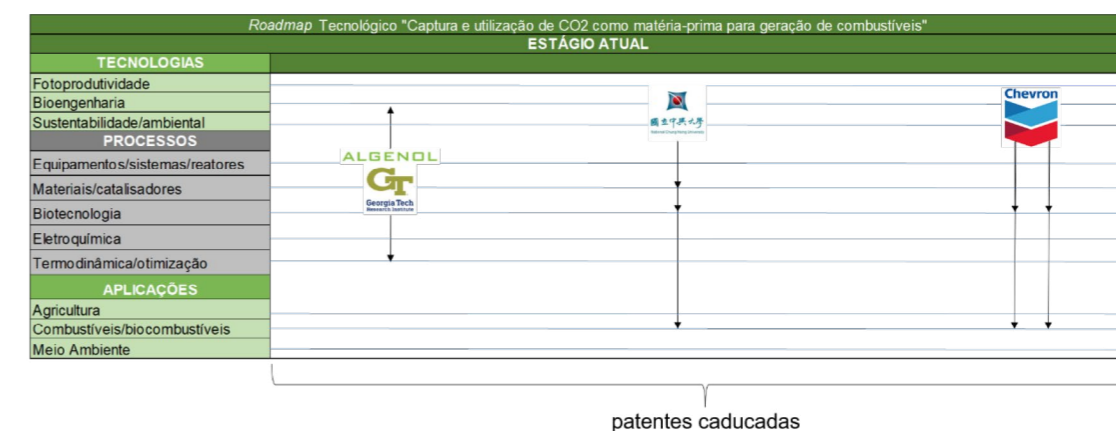
As patentes caducadas são tecnologias que ainda possuem valor significativo, pois podem ser utilizadas sem a necessidade de licenciamento ou pagamento de royalties, oferecendo

140 INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA. **Bioenergy - net zero emissions guide**. 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/bioenergy-2>. Acesso em: 10 maio 2024.

141 GOV UK. **New vision to create competitive carbon capture market follows unprecedented £20 billion investment**. 2023. Disponível em: <https://www.gov.uk/government/news/new-vision-to-create-competitive-carbon-capture-market-follows-unprecedented-20-billion-investment>. Acesso em: 26 abr. 2024.

oportunidades para novas aplicações e desenvolvimentos. Assim, a **Figura 40** oferece um recorte deste estágio, exibindo alguns dos players cujas ações estão alinhadas com o escopo do estudo e que podem ser implementadas e/ou disponíveis atualmente.

**Figura 40 - Mapa tecnológico do estágio atual (patentes caducadas).**



Fonte: Elaboração própria (2024).

A patente (US9101093), intitulada “Water/carbonate stripping for CO<sub>2</sub> capture adsorber regeneration and CO<sub>2</sub> delivery to photoautotrophs”, foi desenvolvida pela Algenol Biotech<sup>142</sup> em colaboração com o Georgia Tech Research Institute (GTRI)<sup>143</sup>. Algenol Biotech é uma empresa conhecida por suas inovações na produção de biocombustíveis através de algas. Sua tecnologia foca em sistemas de baixo consumo energético para regeneração de adsorventes de CO<sub>2</sub>, facilitando a entrega eficiente de CO<sub>2</sub> a fotoautótrofos para a produção de biocombustíveis e outros produtos comerciais. O GTRI, um instituto de pesquisa respeitado, contribui com seu conhecimento em tecnologias de membranas e processos de captura de CO<sub>2</sub>, proporcionando uma sinergia de pesquisa aplicada e inovação tecnológica.

A patente (TW201511816), “A low-energy consumption system for CO<sub>2</sub> adsorption, concentration and energy conversion”, foi depositada pela National Chung Hsing University. Esta universidade taiwanesa é reconhecida por sua pesquisa avançada em tecnologias ambientais e energéticas. A invenção descreve um sistema de baixo consumo energético para a adsorção e concentração de CO<sub>2</sub>, bem como sua conversão em bioenergia. Utilizando processos de adsorção e desorção com reciclagem de calor, o sistema é projetado para capturar CO<sub>2</sub> de forma eficiente e utilizá-lo como fonte de carbono para a produção de biodiesel a partir de algas. Esta tecnologia busca reduzir os custos e o consumo de energia na captura de CO<sub>2</sub>, contribuindo para soluções mais sustentáveis na gestão de emissões.

142 ALGENOL. **Algae product development and manufacturing**. 2024. Disponível em: <https://www.algenol.com/>. Acesso em: 02 maio 2024.

143 GEORGIA TECH RESEARCH INSTITUTE (GTRI). **GTRI**. 2024. Disponível em: <https://www.gtri.gatech.edu/>. Acesso em: 10 maio 2024.

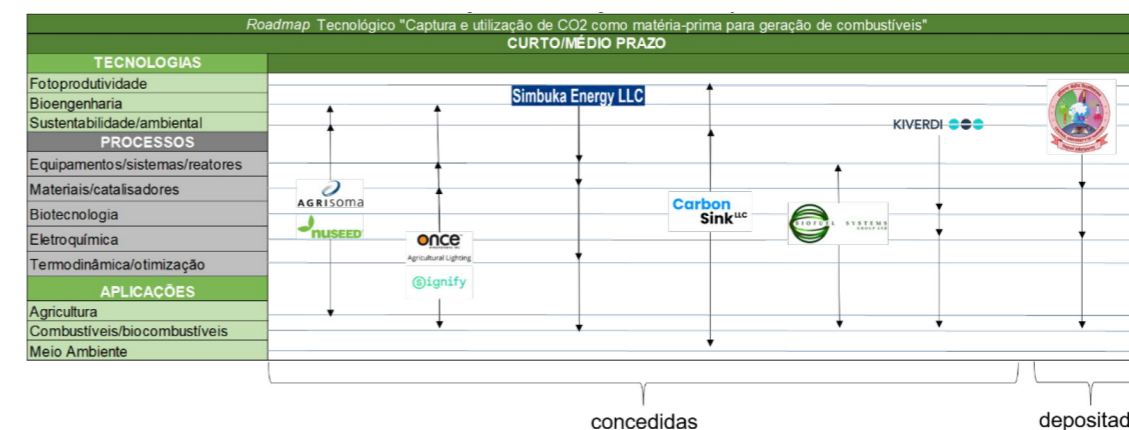
As patentes (US8076122) e (US8076121), ambas relacionadas à integração da conversão de ativos hidrocarbonáceos com a produção de fotobiocombustíveis, foram desenvolvidas pela Chevron. A Chevron é uma das maiores empresas de energia do mundo, com um foco significativo em pesquisa e desenvolvimento para melhorar a eficiência e a sustentabilidade de suas operações. Essas patentes detalham processos que capturam CO<sub>2</sub> produzido na conversão de hidrocarbonetos e utilizam esse CO<sub>2</sub> em processos de fotossíntese para cultivar microrganismos ou espécies de diatomáceas, que podem ser convertidos em biocombustíveis. A utilização de torres de absorção para a captura e subsequente dessorção de CO<sub>2</sub> é uma das inovações descritas. A Chevron, ao desenvolver essas tecnologias, visava a integrar suas operações tradicionais com métodos mais sustentáveis de produção de energia, demonstrando um compromisso com a redução das emissões de CO<sub>2</sub> e a promoção de energias renováveis.

Como visto, o estágio atual das tecnologias de captura e utilização de CO<sub>2</sub> como matéria-prima para geração de combustíveis envolve predominantemente a análise de patentes caducas e mortas, que representam tecnologias disponíveis para uso sem restrições de propriedade intelectual. Este cenário evidencia a ausência de tecnologias comercializadas que integrem a captura de CO<sub>2</sub> e sua utilização para a produção de combustíveis, refletindo os desafios técnicos, econômicos e regulatórios ainda não superados. Contudo, essas patentes caducas oferecem oportunidades para inovação, permitindo que empresas e instituições utilizem essas tecnologias para desenvolver novas aplicações sem necessidade de licenciamento. A análise inclui players como Algenol Biotech, Georgia Tech Research Institute, National Chung Hsing University e Chevron, que têm investido em sistemas de baixo consumo energético e processos integrados para captura e utilização de CO<sub>2</sub>.

### 5.1.2 Curto e médio prazo

O estágio de curto prazo abrange os players que possuem patentes concedidas, enquanto o estágio de médio prazo se concentra nos players com patentes depositadas em análise, relacionadas ao tema do nosso mapa tecnológico. Neste estudo, criamos um único mapa que apresenta as patentes filtradas em nossa busca, incluindo tanto as patentes depositadas quanto as concedidas. Aqui, emitimos do mapa os documentos reivindicados pelos próprios inventores, classificados como “pessoa física”, dessa forma, montamos o mapa tecnológico com as patentes concedidas/depositadas com signatários sendo companhias, veja na **Figura 41**.

**Figura 41** - Mapa tecnológico do estágio curto/médio prazo (patentes concedidas e depositadas pendentes).



Fonte: Elaboração própria (2024).

A patente concedida (EP3681266) intitulada “Methods of agricultural production of brassica carinata oilseed crop” descreve práticas agrícolas que maximizam o sequestro de carbono, aumentam a produtividade para a conversão do material biológico em combustível, promovem a agricultura sustentável e reduzem as emissões de gases de efeito estufa. Este método inclui o plantio rotacional de Brassica carinata, práticas de manejo de terras para reduzir o uso de combustíveis fósseis e a devolução de grande parte do material vegetal ao solo para captura de carbono. As empresas Agrisoma Biosciences e Nuseed Global Innovation<sup>144</sup> estão por trás desta patente, focando em soluções agrícolas sustentáveis e inovadoras.

A patente concedida (US8863435) “Architecture for symbiotic livestock and biofuel production” cobre métodos e dispositivos para a localização de uma instalação de produção de algas próxima a uma instalação de produção de gado. Essa proximidade permite que os subprodutos de ambas as instalações promovam a produtividade. A instalação de algas inclui um biorreator que se comunica com a atmosfera da instalação de aves, utilizando o nitrogênio para promover o crescimento das algas. As empresas Once<sup>145</sup> e Signify<sup>146</sup> estão envolvidas nesta patente, desenvolvendo tecnologias integradas que promovem a sustentabilidade na agricultura e na produção de biocombustíveis.

A patente concedida (US10577248) “Methods and systems for large scale carbon dioxide utilization from Lake Kivu via a CO<sub>2</sub> industrial utilization hub integrated with electric power production and optional cryo-energy storage” abrange métodos e sistemas para a utilização em larga escala de CO<sub>2</sub> do Lago Kivu. O sistema otimiza a extração de metano e CO<sub>2</sub>, permitindo a produção de energia com maior eficiência e industrialização em larga

144 NUSEED GLOBAL INNOVATION. **We're unlocking plant potential**. 2024. Disponível em: <https://nuseed.com/>. Acesso em: 03 maio 2024.

145 BLOOMBERG. **Once Innovations Inc**. 2024. Disponível em: <https://www.bloomberg.com/profile/company/0885879D:US>. Acesso em: 04 maio 2024.

146 SIGNIFY. **Signify**. 2024. Disponível em: <https://www.signify.com/global>. Acesso em: 03 maio 2024.

escala. Este processo utiliza CO<sub>2</sub> em diversos produtos, como biocombustíveis, bioplásticos e materiais de construção. A empresa Simbuka Energy<sup>147</sup> está por trás desta patente, focada em soluções inovadoras para captura e utilização de CO<sub>2</sub>.

A patente concedida (EP3349563) “Devices, systems and methods for enhanced biomass growth in greenhouses” descreve dispositivos, sistemas e métodos para usar biomassa fotossintética na purificação da água, redução da poluição do ar interno, remoção de gases de efeito estufa e produção de biocombustíveis, alimentos e fertilizantes. A Carbon Sink<sup>148</sup> é a empresa responsável por esta patente, dedicando-se a soluções eficientes para o crescimento da biomassa e a captura de CO<sub>2</sub>.

A patente concedida (EP2586870) “Process for producing a biocrude from microalgae” refere-se a um processo industrial contínuo para a obtenção de biocombustível a partir de microalgas e gases de efeito estufa, como o CO<sub>2</sub>. Este processo permite capturar e converter CO<sub>2</sub> de forma eficiente, resultando em um balanço negativo de carbono, o que é benéfico e sustentável para o meio ambiente. Bio Fuel Systems<sup>149</sup> é a empresa que desenvolveu esta patente, especializada na produção de biocombustíveis a partir de microalgas.

Por fim, a patente concedida (EP2521790) “Biological and chemical process utilizing chemoautotrophic microorganisms for the chemosynthetic fixation of carbon dioxide and/or other inorganic carbon sources into organic compounds, and the generation of additional useful products” apresenta um processo biológico e químico multietapa para a captura e conversão de CO<sub>2</sub> em compostos orgânicos, incluindo biocombustíveis. Este processo utiliza microrganismos quimioautotróficos para fixar o carbono inorgânico através da quimiossíntese, com etapas adicionais para recuperação de produtos químicos úteis. A empresa Kiverdi<sup>150</sup> está por trás desta patente, focada em soluções biotecnológicas e químicas inovadoras para a captura e conversão de CO<sub>2</sub>.

Já a patente pendente (IN202311064382), desenvolvida pela Central University of Haryana, apresenta um processo inovador para captura de CO<sub>2</sub>, sua redução eletrocatalítica e conversão em biocombustível para mistura com gasolina. A técnica visa a oferecer uma alternativa econômica e ambientalmente sustentável ao petróleo tradicional. Utilizando um eletrólito regenerativo de KOH e catalisadores de CuO, o CO<sub>2</sub> é transformado em bioetanol. O bioetanol resultante é separado, purificado e armazenado, pronto para ser integrado à gasolina. Este método promete reduzir significativamente a pegada de carbono, impulsionando a sustentabilidade na indústria automotiva.

147 SIMBUKA ENERGY. **Simbuka energy**. 2024. Disponível em: <http://simbukaenergy.com/site/Home.html>. Acesso em: 03 maio 2024.  
148 CARBON SINK. **Solutions for hard-to-decarbonize industries**. 2024. Disponível em: <https://carbonsinkllc.com/>. Acesso em: 03 maio 2024.  
149 BIOFUEL SYSTEMS. **Biofuel systems**. 2024. Disponível em: <https://www.biofuelsystems.com/>. Acesso em: 02 maio 2024.  
150 KIVERDI. **We are remaking how things are made with carbon transformation**. 2024. Disponível em: <https://www.kiverdi.com/>. Acesso em: 05 maio 2024.

No estágio de curto e médio prazo, o foco está em players que possuem patentes concedidas ou patentes depositadas em análise, relacionadas ao uso de CO<sub>2</sub> como matéria-prima para combustíveis. Este panorama inclui tecnologias inovadoras de empresas como Agrisoma Biosciences, Nuseed Global Innovation, Once, Signify, Simbuka Energy, Carbon Sink, Bio Fuel Systems e Kiverdi. Essas patentes abrangem desde métodos agrícolas para sequestro de carbono até sistemas integrados de produção de biocombustíveis e purificação do ar. A Central University of Haryana também desenvolveu uma patente pendente que envolve a conversão eletrocatalítica de CO<sub>2</sub> em bioetanol. Essas tecnologias, ainda em desenvolvimento ou aguardando aprovação, representam avanços promissores no campo da captura e utilização de CO<sub>2</sub>, destacando um futuro de inovação sustentável.

### 5.1.3 Longo prazo

No cenário de longo prazo, são identificados os atores que contribuem com estudos acadêmicos relacionados à “Captura e utilização de CO<sub>2</sub> como matéria-prima para geração de combustíveis”. Esses trabalhos abrangem predominantemente testes, pesquisas experimentais e estudos científicos. A **Figura 42** oferece um panorama detalhado deste estágio temporal, destacando os players que se enquadram no escopo da análise.

**Figura 42 - Mapa tecnológico do estágio de longo prazo (estudos científicos e pesquisas em andamento).**



Fonte: Elaboração própria (2024).

O projeto Tupã<sup>151</sup> busca converter gases de efeito estufa, como CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>, em combustíveis e produtos químicos renováveis de forma sustentável e econômica, utilizando um eletrolisador integrado a um reator de microcanais com energia renovável (biomassa, solar e eólica). Essa tecnologia pode ser aplicada nas indústrias de petróleo, gás e combustíveis, reduzindo emissões e gerando produtos sustentáveis. A parceria inclui ANP, EMBRAPII e GALP/Petrogal, que investe na tecnologia para reduzir emissões e gerar novos produtos. O Instituto SENAI de Inovação em Biomassa (ISI Biomassa) implementa e otimiza a conversão de gases em syngas, enquanto o LIPCAT da UFRJ transforma o syngas em combustíveis e produtos químicos renováveis.

O projeto tem como metas transformar gases em produtos úteis de forma eficiente, usando energias renováveis e criando uma plataforma para combustíveis renováveis. As inovações incluem uma célula eletrolisadora e um reator de microcanais para o processo de Fischer-Tropsch. A Embrapii facilita a colaboração entre universidades e empresas, garantindo a concretização das inovações.

O projeto Tupã contribuirá para a sustentabilidade ao reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>, alinhando-se com metas globais de redução de gases de efeito estufa. Ele utiliza energia renovável, diminuindo a dependência de combustíveis fósseis, e transforma gases poluentes em recursos valiosos. Além disso, produz combustíveis e produtos químicos renováveis, aliviando a pressão sobre recursos não renováveis. A colaboração com a indústria promove a sustentabilidade nos setores de petróleo e gás, contribuindo para o programa RenovaBio e os princípios ESG, melhorando a sustentabilidade dos combustíveis e avançando em direção a um futuro mais verde.

O projeto de Haotian Wang<sup>152</sup> e sua equipe no Rowland Institute em Harvard visa também a transformar CO<sub>2</sub> em combustíveis por processo que simula a fotossíntese, tornando-o mais barato, eficiente, durável e escalonável. O objetivo é tornar esta tecnologia economicamente viável para uma ampla adoção, possibilitando um impacto ambiental significativo. A tecnologia é especialmente promissora para instalações de alta emissão, como termelétricas a carvão.

O sistema utiliza catalisadores de níquel para converter CO<sub>2</sub> em CO para geração de combustíveis. A versão mais recente é uma melhoria significativa em relação à anterior, pois agora utiliza vapor de água em alta concentração de CO<sub>2</sub>, tornando o processo mais eficiente. Esta atualização resolve o problema de dissolução ineficiente do CO<sub>2</sub> em água que a versão anterior enfrentava. A substituição do grafeno por carvão torna o sistema mais acessível e escalável economicamente.

151 FIEMS. **Projeto TUPÃ**. 2024. Disponível em: <https://www.fiems.com.br/noticias/parceria-entre-isi-biomassa-e-ufrj-busca-converter-gases-do-efeito-estufa-utilizando-energias-renovaveis/39092>. Acesso em: 05 maio 2024.

152 EPOCA. **Transformar CO<sub>2</sub> em combustível? Isso mesmo!** <https://epocanegocios.globo.com/Caminhos-para-o-futuro/Energia/noticia/2019/01/transformar-co2-em-combustivel-isso-mesmo.html>. Acesso em: 26 abr. 2024.

Apesar desses avanços, o sistema ainda precisa superar desafios, como garantir sua estabilidade para funcionar por milhares de horas de forma contínua. A equipe também está investigando outras possíveis utilizações do CO<sub>2</sub> além do CO, como a conversão direta para combustíveis, o que poderia ampliar ainda mais o impacto ambiental positivo da tecnologia.

O estudo é apoiado por diversas instituições, incluindo o Rowland Fellows Program, National Research Council Canada, e a University of Saskatchewan, refletindo um esforço colaborativo internacional para enfrentar os desafios climáticos. O desenvolvimento de tecnologias como esta não só ajuda a reduzir a quantidade de CO<sub>2</sub> na atmosfera, como também oferece novas oportunidades para a produção sustentável de combustíveis, alinhando-se com as estratégias globais de mitigação das mudanças climáticas.

A Climeworks, uma empresa suíça, desenvolveu uma tecnologia inovadora para capturar CO<sub>2</sub> diretamente da atmosfera e transformá-lo em um gás com valor econômico<sup>153</sup>. Essa iniciativa visa tornar a absorção de CO<sub>2</sub> comercialmente viável, algo essencial na luta contra o aquecimento global.

Localizada no teto de um centro de reciclagem em Hinwil, perto de Zurique, a instalação usa 18 ventiladores para sugar o ar e filtros químicos para absorver o CO<sub>2</sub>. Quando saturados, os filtros são aquecidos a 100 °C, liberando CO<sub>2</sub> puro. Atualmente, a Climeworks captura até 900 toneladas de CO<sub>2</sub> por ano, que é vendido por cerca de C\$ 600 a tonelada para estufas, onde é usado para promover o crescimento das plantas.

A empresa acredita que pode reduzir o custo para C\$ 100 por tonelada com a produção em massa de seus componentes. O CO<sub>2</sub> capturado tem vários usos potenciais, incluindo a produção de alimentos para peixes, cimento, bancos de carro, pasta de dente e, mais ambiciosamente, combustível sintético. A Climeworks já forneceu CO<sub>2</sub> para a Audi<sup>154</sup>, que o usou em testes para desenvolver um combustível chamado “e-diesel”.

Apesar das promessas, a tecnologia enfrenta críticas. Ambientalistas argumentam que a verdadeira solução está em mudar os padrões de consumo e produção, enquanto alguns temem que a tecnologia possa desincentivar políticas de redução de emissões e o uso de energia renovável. A Climeworks, porém, defende que, dado o estágio avançado do problema climático, a remoção de CO<sub>2</sub> da atmosfera é crucial e deve ser implementada em larga escala o mais rápido possível.

153 BBC Brasil. **A inovadora máquina que absorve CO<sub>2</sub> da atmosfera e o transforma em um gás com valor econômico**. 2024. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/geral-42024360>. Acesso em: 08 maio 2024.

154 AUDI. **Audi**. 2024. Disponível em: <https://www.audi.com/en.html>. Acesso em: 07 maio 2024.

A Carbon Engineering<sup>155</sup>, uma empresa canadense, desenvolveu uma tecnologia inovadora capaz de capturar CO<sub>2</sub> da atmosfera e transformá-lo em combustível. Este processo, que custa cerca de C\$ 100 por tonelada de CO<sub>2</sub> capturada, é mais barato que tecnologias similares, como a da empresa suíça Climeworks<sup>156</sup>, cujo custo inicial era de C\$ 600 por tonelada.

A tecnologia da Carbon Engineering, financiada por Bill Gates<sup>157</sup>, envolve a captura direta do ar (DAC) e a conversão do CO<sub>2</sub> em combustíveis líquidos sintéticos. A empresa opera uma fábrica em Squamish - BC, que captura cerca de uma tonelada de CO<sub>2</sub> por dia e o combina com H<sub>2</sub> obtido de água através de energia limpa, gerando aproximadamente um barril de combustível por dia. O objetivo a longo prazo é aumentar a produção para 2 mil barris diários.

Entretanto, a ampliação das operações enfrenta desafios, principalmente devido à falta de incentivos e subsídios governamentais. Isso é um obstáculo significativo, pois as soluções técnicas para mitigar as mudanças climáticas estão disponíveis, mas a implementação em larga escala depende de políticas e financiamentos adequados.

A Carbon Engineering acredita que sua abordagem pode fornecer uma solução viável para reduzir o CO<sub>2</sub> na atmosfera e oferecer alternativas sustentáveis para setores de transporte que não podem usar energia elétrica como combustível.

Os pesquisadores do MIT e de Harvard deram um grande passo em direção a uma solução viável para o problema do CO<sub>2</sub> na atmosfera, convertendo-o em um combustível sólido chamado formiato. Este processo não apenas reduz as emissões de CO<sub>2</sub> como cria uma fonte renovável de energia. A eficiência deste novo método, superior a 90%, representa um avanço significativo em relação às tentativas anteriores de conversão de CO<sub>2</sub> em combustível.

A abordagem inovadora desses cientistas resolve vários problemas encontrados em métodos anteriores. Em particular, elimina a necessidade de etapas de aquecimento ineficientes, enquanto produz um combustível não tóxico e estável. Isso não só facilita o armazenamento e o transporte como amplia suas possíveis aplicações, desde agentes de degelo até combustível para células de combustível e geração de eletricidade.

Além disso, a estabilidade a longo prazo deste combustível sólido é uma grande vantagem em comparação com outras formas de armazenamento de energia, como o H<sub>2</sub> puro, que tende a perder gás ao longo do tempo. Os testes bem-sucedidos em laboratório são um indicador promissor do potencial dessa tecnologia, sugerindo que ela pode ser implementada em grande escala para atender às necessidades de calor e eletricidade em diversos setores, desde residencial até industrial.

155 MEDEIROS, V. **Esta tecnologia promete transformar ar em combustível pronto para uso comercial**. 2023. Disponível em: <https://clickpetroleogas.com.br/empresa-do-canada-desenvolve-tecnologia-capaz-de-sugar-gas-carbonico-da-atmosfera-e-transformar-em-combustivel/>. Acesso em: 02 maio 2024.

156 CLIMEWORKS. **Remove to zero**. 2024. Disponível em: <https://climeworks.com/>. Acesso em: 04 maio 2024.

157 BILL E MELINDA FOUNDATION. **Gates foundation**. 2024. Disponível em: <https://www.gatesfoundation.org/>. Acesso em: 02 maio 2024.

No entanto, apesar desses avanços, resta a questão crucial de como escalar esse processo para atender à demanda em larga escala. Os pesquisadores estão explorando maneiras de aplicar essa tecnologia em diferentes contextos, desde residências individuais até redes de energia. Esta transição energética é essencial na luta contra as mudanças climáticas e este avanço na conversão de CO<sub>2</sub> em combustível não poluente pode desempenhar um papel crucial nesse esforço.

Durante a etapa prospectiva, o processo de busca por artigos resultou em uma vasta quantidade de documentos. Para otimizar a seleção dos materiais mais relevantes, foram escolhidos alguns artigos mais relevantes e recentes tanto do cenário D quanto do cenário E. Essa seleção foi feita com o propósito de utilizá-los na elaboração do mapa tecnológico para o estágio de longo prazo.

O artigo “A life cycle assessment of greenhouse gas emissions from direct air capture and Fischer-Tropsch fuel production” explora a viabilidade do processo de captura direta de CO<sub>2</sub> (DAC) em conjunto com a síntese de combustível pela reação de Fischer-Tropsch para produção de combustível de transporte. O estudo realiza uma avaliação do ciclo de vida (ACV) das emissões de GEEs de um sistema DAC em conjunto com a síntese de Fischer-Tropsch para produção de combustível de transporte, especificamente diesel. Este é o primeiro estudo de ACV de um processo DAC-para-combustível com base em dados de uma planta piloto de DAC em operação.

Os resultados indicam que a intensidade de carbono desse processo é extremamente sensível ao fator de emissões de eletricidade utilizado, destacando a importância de fontes de eletricidade de baixo carbono para tornar esse caminho vantajoso em termos climáticos em relação ao diesel convencional. O estudo também ressalta a necessidade de localizar as instalações de síntese de combustível em regiões com fatores de emissões da rede elétrica muito baixos ou, preferencialmente, colocalizadas com novas instalações de eletricidade renovável.

Ao explorar diferentes cenários e fatores que influenciam as emissões ao longo do ciclo de vida, o artigo fornece insights valiosos para o desenvolvimento e implementação de tecnologias de captura e utilização de CO<sub>2</sub>. Além disso, destaca a importância de políticas e incentivos adequados para promover a produção de combustíveis sintéticos de baixo carbono como parte da transição energética global.

O estudo foi conduzido em parceria entre a University of Calgary, e a Carbon Engineering. Esta colaboração entre uma instituição acadêmica e uma empresa especializada em tecnologias de captura de carbono ressalta a importância da colaboração entre o setor acadêmico e o setor privado na pesquisa e desenvolvimento de soluções para os desafios relacionados às mudanças climáticas e à transição para uma economia de baixo carbono. A combinação de experiência acadêmica e conhecimento prático da indústria contribui para a robustez e relevância dos resultados do estudo.

O artigo de revisão “Technical analysis of CO<sub>2</sub> capture pathways and technologies” oferece uma análise técnica detalhada das diversas vias e tecnologias de captura de CO<sub>2</sub>, incluindo uma análise tecnoeconômica e uma comparação entre essas tecnologias com base na aplicação final do CO<sub>2</sub> capturado.

Os custos atuais da captura de CO<sub>2</sub> variam entre US\$ 60 e 110 por tonelada, com previsão de redução pela metade até 2030. O estudo fornece informações técnicas para selecionar a tecnologia mais apropriada para processos específicos e diferentes vias de captura de carbono, como pré-combustão, pós-combustão e captura direta de ar.

Para atingir as metas do Acordo de Paris, as tecnologias de CCS (Captura e Armazenamento de Carbono) devem reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> para alcançar emissões líquidas zero até 2050. A combinação de CCS e tecnologias de utilização de carbono (CCU) desempenhará um papel fundamental nesse processo.

Embora algumas tecnologias de CCS, como EOR (Recuperação Melhorada de Petróleo) e EGR (Reciclagem de Gás de Exaustão), não sejam compatíveis com as metas do Acordo de Paris, várias tecnologias de CCU oferecem alternativas promissoras para a produção de combustíveis e produtos. O estudo destaca a necessidade de pesquisas futuras para incluir produtos de CCU e reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> em outros setores.

O sistema energético futuro deve integrar tecnologias de captura de CO<sub>2</sub> para reduzir as emissões de gases de efeito estufa, garantindo o fornecimento de energia e a integração adequada entre os setores de calor, eletricidade e transporte. Pesquisas adicionais devem se concentrar no desenvolvimento de materiais e tecnologias mais eficientes e econômicas para a captura de CO<sub>2</sub>.

Este trabalho faz parte de um projeto de pesquisa mais amplo destinado a descrever e implementar tecnologias de CCU em vez de CCS. Isso possibilitará a produção de materiais à base de CO<sub>2</sub> e combustíveis alternativos, como biometano, metanol ou éter dimetílico, para integrar o futuro sistema energético. O estudo foi conduzido em parceria entre a University of Málaga e a Carbotech Gas System GmbH, destacando a colaboração entre a academia e a indústria na pesquisa e desenvolvimento de tecnologias de captura de CO<sub>2</sub>. A Universidade de Málaga, como instituição acadêmica, contribui com sua experiência em pesquisa científica e tecnológica, enquanto a Carbotech Gas System GmbH traz sua expertise como uma empresa especializada em sistemas de gás.

O estudo “Calcium looping of CO<sub>2</sub> capture coupled to syngas production using Ni-CaO-based dual functional material”, realizado pela National Tsing Hua University de Taiwan, investigou a viabilidade e o desempenho do processo de looping de cálcio (CaL) combinado com a reforma a seco de metano (DRM) para captura e utilização de CO<sub>2</sub>. Essa abordagem envolve a carbonatação do CaO pelo CO<sub>2</sub>, seguida da regeneração do CaO pela conversão do CO<sub>2</sub> capturado em produtos úteis, como o gás de síntese (syngas), que é uma matéria-prima valiosa para a produção de produtos químicos e combustíveis.

Para isso, foi desenvolvido um material dual funcional (DFM) composto por CaO (adsorvente de CO<sub>2</sub>), Ni (catalisador de DRM) e CeO<sub>2</sub> (promotor para DRM). Esse material demonstrou alto desempenho em ciclos de CaL-DRM, com eficiência elevada na captura de CO<sub>2</sub>, produção de H<sub>2</sub> e CO, estabilidade adequada e temperaturas moderadas necessárias para as reações.

As técnicas de CCU atuais frequentemente requerem condições severas, como alta temperatura ou pressão, ou purificação complexa para obter produtos puros. O estudo “Ambient CO<sub>2</sub> capture and conversion into liquid fuel and fertilizer catalyzed by a PdAu nano-alloy”, realizado pela Shandong University da China, apresenta uma rota de CCU que captura e converte CO<sub>2</sub> em combustível líquido (HCOOH) e fertilizante (NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>) em condições ambientes. Especificamente, uma solução aquosa de (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> captura CO<sub>2</sub> como NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub>, que é hidrogenado em HCOONH<sub>4</sub> por uma nano-liga de PdAu. Esta rota alcança uma capacidade de captura de CO<sub>2</sub> de 0,56 mmol/g e uma conversão de 32,6% em condições ambientais. Em seguida, a solução é fosforilada e destilada, resultando em uma solução de HCOOH e um sólido de NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> a 373K. Caracterizações do catalisador revelam que o efeito de liga PdAu e a presença de um grupo amina próximo ao catalisador enriquecem a adsorção de HCO<sub>3</sub> e, assim, aumentam a atividade do catalisador. Este trabalho oferece uma estratégia simples e eficaz para a conversão de CO<sub>2</sub> em produtos químicos de alto valor agregado e combustíveis.

Inspirados pelo ciclo do carbono na natureza, no artigo “Air to fuel: direct capture of CO<sub>2</sub> from air and in-situ solar-driven conversion into syngas via Ni<sub>x</sub>/NaA nanomaterials”, um novo catalisador-adsorvente de função dupla para enfrentar simultaneamente problemas energéticos e ambientais por meio da captura direta de CO<sub>2</sub> do ar e conversão solar in situ em combustíveis limpos. Economicamente e operacionalmente vantajosa, a reação acoplada planejada pode ser realizada em um único reator, sem a necessidade de um dispositivo de captura adicional.

O excelente desempenho na captura e conversão de CO<sub>2</sub> em uma etapa integrada é demonstrado pela capacidade de captura de CO<sub>2</sub> de até 0,38 mmol/g para adsorção de 500 ppm de CO<sub>2</sub> a 25 °C e a taxa de conversão de CO<sub>2</sub> de até 95%. Importante, o catalisador-adsorvente é constituído por um catalisador de níquel (Ni) de metal não precioso e um adsorvente de CO<sub>2</sub> comercialmente disponível e barato, a zeólita NaA. Além disso, este material funcional dual também apresenta um desempenho de estabilidade excepcional. Este trabalho oferece uma nova via de captura de CO<sub>2</sub> do ar à temperatura ambiente e conversão por CH<sub>4</sub> em combustível, contribuindo para a nova era de neutralidade de carbono.

Esse estudo foi realizado em parceria pela Nanjing University of Aeronautics and Astronautics e pelo Ministry of Industry and Information Technology da China, destacando a colaboração estratégica entre academia e governo para enfrentar desafios globais como a mudança climática.

O artigo “CO<sub>2</sub>-based alternative fuel production to support development of CO<sub>2</sub> capture, utilization and storage”, da University of Victoria (Canadá) propõe a comparação de sistemas

de combustíveis alternativos à base de CO<sub>2</sub>, especificamente metanol, éter dimetílico (DME) e metano, no contexto dos esforços de CCUS. A utilização de combustíveis químicos oferece uma abordagem para armazenar e transportar eletricidade renovável em longas distâncias e por longos períodos. O desenvolvimento de sistemas de CCUS a longo prazo pode se beneficiar da produção de combustíveis baseados em carbono a curto prazo, empregando CO<sub>2</sub> capturado como precursor junto com H<sub>2</sub> eletrolítico. A eletricidade renovável excedente ou localizada junto com os desenvolvimentos de CCUS pode fornecer combustíveis sintéticos para permitir o armazenamento de longa duração e o transporte de eletricidade renovável a longas distâncias.

O estudo destaca o potencial dos combustíveis sintéticos neutros em carbono para melhorar a eficiência dos sistemas de energia e exergia. A análise exérgica indica possibilidades de melhorias nos processos de síntese de combustíveis, combustão e outros subsistemas. Metanol mostrou-se promissor devido aos menores custos e maior eficiência de conversão química (H<sub>2</sub>-para-combustível), enquanto o metano apresentou maior eficiência de conversão de H<sub>2</sub>-para-energia.

Utilizando Aspen Plus V11 para simulação de processos e Aspen Process Economic Analyzer V11 para avaliação econômica, o estudo fornece uma análise detalhada do desempenho dos sistemas de combustíveis sintéticos neutros em carbono. A análise de sensibilidade cobre opções de escalonamento que podem ajudar na implementação desses sistemas.

O estudo propõe o metanol como uma via promissora para a utilização e remoção de CO<sub>2</sub>, considerando os desafios globais de aquecimento climático. Sugere-se que trabalhos futuros possam focar em melhorias nos processos guiadas pelos cálculos de eficiência exérgica e explorar oportunidades para aprimoramentos de componentes. Combinar a análise técnica com o desenvolvimento de casos de negócios será crucial para determinar uma estratégia viável para a produção de combustíveis sintéticos, auxiliando na implementação geral de CCU.

Diversos projetos e estudos científicos destacam-se em níveis de maturidade mais baixa, como o projeto Tupã no Brasil, que converte gases de efeito estufa em combustíveis renováveis usando energias renováveis. Iniciativas em Harvard e na Suíça também mostram avanços na transformação de CO<sub>2</sub> em combustíveis, combinando eficiência e viabilidade econômica. Colaborações entre universidades e empresas, como as da University of Calgary e a Carbon Engineering, sublinham a importância de fontes de eletricidade de baixo carbono. Tecnologias emergentes de captura e conversão de CO<sub>2</sub> em condições ambientais, desenvolvidas por universidades como a National Tsing Hua e Shandong, oferecem rotas econômicas para a produção de combustíveis e produtos químicos. Esses avanços, apoiados por estudos teóricos de avaliação do ciclo de vida e análises exérgicas, indicam um caminho promissor para a mitigação das mudanças climáticas e a transição para uma economia de baixo carbono.

#### 5.1.4 Panorama geral da análise do mapa tecnológico

Ao comparar os diferentes estágios de desenvolvimento de tecnologias de captura e utilização de CO<sub>2</sub> como matéria-prima para geração de combustíveis, observamos uma diferença significativa desde a fase de longo prazo até o estágio atual, com variação na quantidade de trabalhos encontrados em cada fase.

No estágio atual, a quantidade de trabalhos encontrados é escassa. Esse estágio, neste relatório, é caracterizado principalmente por patentes caducas e poucas iniciativas documentadas, indicando que as tecnologias ainda não atingiram um nível de maturidade suficiente para a implementação em larga escala. As iniciativas existentes enfrentam desafios significativos de viabilidade técnica e econômica. O foco principal está na superação desses obstáculos para permitir uma transição mais suave para as fases seguintes de desenvolvimento.

No estágio intermediário (curto/médio prazo), o número de trabalhos já se mostra mais representativo, refletindo um aumento significativo em relação ao estágio atual. Aqui, as tecnologias começam a ser otimizadas e testadas em plantas-piloto e patenteadas. A colaboração entre universidades, empresas e instituições governamentais torna-se mais frequente, visando a melhoria da eficiência dos processos e a redução dos custos operacionais. Esse estágio é crucial para validar a viabilidade das tecnologias em um ambiente controlado antes de sua total comercialização.

No estágio de longo prazo, encontramos a maior quantidade de trabalhos, incluindo artigos científicos e notícias na mídia. Este estágio é dominado por pesquisas teóricas e experimentais fundamentais, com foco em entender os mecanismos básicos de captura de CO<sub>2</sub> e explorar diversas metodologias para sua conversão em combustíveis. As tecnologias são testadas em escala laboratorial e há um forte investimento em PD&I. As colaborações são predominantemente acadêmicas, mas começam a incluir parcerias iniciais com a indústria. O volume significativo de trabalhos indica um interesse crescente e uma base sólida de conhecimento que apoia o desenvolvimento futuro das tecnologias.

Percebe-se que a transição para a implementação em larga escala ainda enfrenta desafios significativos que precisam ser superados através de colaboração contínua e investimentos em pesquisa e desenvolvimento.

Observamos em nossa busca que, no estágio mais avançado da implementação de tecnologias de captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS), predominam projetos focados na captura e armazenamento de CO<sub>2</sub> (CCS). Embora a utilização de CO<sub>2</sub> capturado para a produção de combustíveis seja uma solução potencial para reduzir emissões de carbono, sua implementação ainda é incipiente. Desafios técnicos, econômicos e regulatórios dificultam a viabilização dessa abordagem em larga escala. O desenvolvimento de tecnologias eficientes e econômicas para transformar CO<sub>2</sub> em combustíveis utilizáveis em escala comercial é um

dos principais obstáculos. Além disso, questões relacionadas à infraestrutura de transporte, armazenamento e distribuição desses combustíveis precisam ser resolvidas. Apesar dos benefícios potenciais em termos de redução de emissões e aproveitamento de recursos, a implementação dessa tecnologia requer esforços conjuntos de governos, indústrias e instituições de pesquisa para superar os desafios e promover a inovação no campo.

O relatório “Perspectiva Global de Energia 2023: Perspectivas de CCUS” destaca o papel vital das tecnologias de captura e utilização de carbono (CCU) na transição energética. Embora o CCU seja reconhecido como uma tecnologia promissora para reduzir as emissões de carbono em setores difíceis de descarbonizar, como a indústria pesada, o estudo destaca desafios significativos que precisam ser superados para alcançar seu pleno potencial.

Uma das principais questões destacadas é a necessidade urgente de aumentar drasticamente a capacidade de CCU para atender às metas de neutralidade de carbono anunciadas. O relatório aponta que, para atender a essas metas, a capacidade global de CCU precisaria crescer mais de 100 vezes até 2050, representando um desafio significativo em termos de investimento, infraestrutura e regulamentação.

Embora haja um aumento recente na atividade do mercado de CCUS, com um número crescente de projetos sendo desenvolvidos em todo o mundo, o ritmo desse crescimento ainda está aquém do necessário para atender à demanda futura. O relatório destaca a necessidade premente de um maior investimento e colaboração entre governos, indústrias e instituições financeiras para acelerar o desenvolvimento e a implantação de projetos de CCU em escala global.

Além disso, o relatório ressalta a importância da diversificação das fontes de financiamento para viabilizar os projetos de CCU, especialmente em setores onde os custos de captura de carbono podem ser elevados. Estratégias inovadoras, como a monetização do CO<sub>2</sub> capturado por meio de sua utilização em processos industriais ou sua venda como produto, podem desempenhar um papel crucial na viabilização econômica desses projetos.

Enquanto o CCU oferece um potencial significativo para reduzir as emissões de carbono e facilitar a transição para uma economia de baixo carbono, sua implementação bem-sucedida requer um compromisso coletivo e coordenado para superar os desafios técnicos, financeiros e regulatórios associados. A colaboração global e o aumento dos investimentos são essenciais para desbloquear o verdadeiro potencial do CCU e acelerar a transição para um futuro sustentável e livre de carbono de forma urgente.

## 6 ETAPA PÓS-ROADMAP TECNOLÓGICO

Aqui, propomos a análise de dados relevantes que englobam a interação entre mercado, produto e tecnologia, visando identificar conexões significativas entre os atores e seus respectivos mercados, alinhando suas estratégias, comportamento e desempenho com os resultados obtidos no roadmap tecnológico.

O objetivo desta etapa é mapear as semelhanças entre as atividades dos diferentes atores e de seus concorrentes em termos de PD&I, bem como as interações entre os competidores e os mercados em que atuam, levando em consideração as taxonomias relevantes envolvidas.

### 6.1 ANÁLISE VERTICAL

Neste item, o comportamento dos *players* será avaliado nos diferentes estágios temporais: estágio atual, curto e médio prazo, e longo prazo. A análise será baseada em sua tendência em relação às colaborações entre *players*, que formam os *clusters* de parcerias.

#### 6.1.1 Estágio atual

As patentes caducas (**Figura 40**) evidenciam a importância das parcerias entre empresas e instituições de pesquisa no desenvolvimento de tecnologias inovadoras, mesmo que essas tecnologias não estejam mais protegidas para uso exclusivo dos parceiros.

A patente (US9101093) foi fruto de uma colaboração entre Algenol Biotech e o Georgia Tech Research Institute (GTRI). Algenol Biotech é uma empresa focada em biotecnologia, especialmente na produção de bioetanol a partir de algas. O GTRI, por sua vez, é um instituto de pesquisa de renome associado ao Georgia Institute of Technology, conhecido por suas contribuições à ciência e engenharia. Essa parceria combinou a expertise biotecnológica da Algenol com as capacidades de pesquisa aplicada do GTRI, resultando em avanços significativos na captura e utilização de CO<sub>2</sub>.

Os clusters de parcerias no estágio atual destacam a relevância das colaborações estratégicas entre empresas e institutos de pesquisa. Essas alianças não apenas fomentam a inovação, mas também contribuem para o desenvolvimento contínuo e a aplicação prática de tecnologias de captura e utilização de CO<sub>2</sub>.

### 6.1.2 Curto e médio prazo

Analisando a **Figura 41**, podemos fazer as análises de *clusters* de parcerias das patentes concedidas e depositadas.

A patente concedida (EP3681266), intitulada “Methods of agricultural production of brassica carinata oilseed crop”, representa uma colaboração entre Agrisoma Biosciences e Nuseed Global Innovation. Agrisoma Biosciences é conhecida por seu foco em tecnologias agrícolas inovadoras, especialmente na produção de biocombustíveis sustentáveis. A Nuseed Global Innovation, parte da Nuseed, concentra-se no desenvolvimento de soluções agrícolas avançadas que promovem a sustentabilidade e a eficiência. Esta parceria une a expertise da Agrisoma em biotecnologia agrícola com a experiência da Nuseed em inovação agrônômica, resultando em práticas agrícolas que maximizam o sequestro de carbono, aumentam a produtividade e reduzem as emissões de gases de efeito estufa, beneficiando tanto o meio ambiente quanto o setor agrícola.

A patente concedida (US8863435), “Architecture for symbiotic livestock and biofuel production”, destaca a colaboração entre Once e Signify. Once é uma empresa que se especializa em soluções de iluminação para a agricultura, desenvolvendo tecnologias que melhoram a eficiência e a produtividade nas fazendas. Signify, anteriormente conhecida como Philips Lighting, é líder global em iluminação e soluções de iluminação conectada, fornecendo tecnologias avançadas para diversas aplicações, incluindo a agricultura. Juntas, Once e Signify desenvolveram métodos e dispositivos que integraram a produção de algas e a criação de gado, promovendo a sustentabilidade ao utilizar os subprodutos de ambas as instalações para melhorar a produtividade e a eficiência na produção de biocombustíveis e alimentos.

Os clusters de parcerias no estágio de curto/médio prazo destacam as colaborações entre empresas e instituições de pesquisa também. Ao unir expertise técnica com conhecimento científico, essas colaborações têm o potencial de acelerar o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis que contribuam para a mitigação das mudanças climáticas e para a construção de um futuro mais verde e resiliente.

### 6.1.3 Longo prazo

Ao analisar os clusters de parcerias que apareceram no mapa do estágio a longo prazo, observamos uma rede robusta e diversificada de colaboração entre instituições acadêmicas e organizações governamentais e industriais de renome mundial.

A parceria no projeto Tupã é composta por importantes entidades e empresas. A Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), a Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial (EMBRAPII) e a GALP/Petrogal estão investindo nesta tecnologia com o objetivo de reduzir as emissões e criar novos produtos sustentáveis. O Instituto SENAI

de Inovação em Biomassa (ISI Biomassa) está encarregado de implementar e otimizar a conversão de gases em syngas, enquanto o Laboratório de Processos Catalíticos (LIPCAT) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) transforma o syngas em combustíveis renováveis. Essa colaboração multifacetada destaca-se por reunir instituições de pesquisa, agências reguladoras e empresas industriais, criando um ecossistema de inovação que promove a sustentabilidade e a eficiência energética.

A Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis do Brasil (ANP) é a agência reguladora oficial do Brasil para o setor de petróleo, gás natural e biocombustíveis. Criada em 1997, a ANP é responsável pela implementação da política nacional de petróleo e gás, regulando, contratando e fiscalizando as atividades do setor, desde a exploração até a distribuição. A ANP também promove a segurança operacional e a proteção ambiental, além de fomentar a pesquisa e a inovação tecnológica no setor.

A EMBRAPII foi estabelecida em 2013 com o objetivo de apoiar e fomentar a inovação na indústria brasileira. A organização trabalha em parceria com centros de pesquisa e empresas para financiar projetos inovadores que aumentem a competitividade da indústria nacional. A EMBRAPII atua em diversas áreas tecnológicas, incluindo biotecnologia, engenharia, materiais avançados e energia, buscando sempre a integração entre o conhecimento científico e as necessidades do mercado.

A GALP é uma empresa multinacional de energia com sede em Portugal, que opera nos setores de exploração, produção, refino e distribuição de petróleo e gás, além de investir em energias renováveis. A GALP, através da sua subsidiária Petrogal, tem uma forte presença no Brasil, participando de projetos de exploração e produção de petróleo e gás. A empresa está comprometida com a transição energética e a redução das emissões de carbono, investindo em tecnologias inovadoras para tornar a sua operação mais sustentável.

O ISI Biomassa, parte da rede SENAI de Inovação, é um centro de referência em pesquisa e desenvolvimento focado na valorização da biomassa. Fundado em 2014, o instituto trabalha com empresas e instituições de pesquisa para desenvolver tecnologias e processos que transformem a biomassa em produtos de alto valor agregado, como biocombustíveis, bioquímicos e materiais avançados. O ISI Biomassa busca promover a sustentabilidade e a competitividade da indústria brasileira através da inovação tecnológica.

O LIPCAT, localizado na UFRJ, é um centro de excelência em pesquisa e desenvolvimento de processos catalíticos. O laboratório foi fundado com a missão de investigar e desenvolver tecnologias catalíticas para aplicações industriais, incluindo a transformação de recursos renováveis e a mitigação de impactos ambientais. A UFRJ, uma das mais renomadas universidades do Brasil, fornece suporte acadêmico e científico para o LIPCAT, permitindo a realização de pesquisas de ponta que contribuem para a inovação e a sustentabilidade no setor energético.

O segundo cluster de parceria que aparece no mapa do estágio a longo prazo é composto por instituições como o Rowland Fellows Program (Harvard), o National Research Council (NRC) of Canada e a University of Saskatchewan, exemplificando como a colaboração internacional pode fomentar o desenvolvimento de tecnologias inovadoras para combater as mudanças climáticas, promovendo um futuro mais sustentável.

O Rowland Fellows Program é uma iniciativa do Rowland Institute, agora parte da Universidade de Harvard, conhecida por apoiar pesquisadores inovadores em ciências e tecnologia, oferecendo financiamento e recursos para projetos de alto impacto. Fundado em 1916, o NRC-Canada é a principal organização de pesquisa e desenvolvimento do governo canadense, trabalhando com a indústria, governo e academia para transformar ideias em soluções tangíveis, promovendo sustentabilidade e competitividade econômica. Fundada em 1907, a University of Saskatchewan é uma instituição de pesquisa intensiva reconhecida por suas contribuições em ciências naturais, engenharia e ciências ambientais, liderando pesquisas sobre mudanças climáticas e tecnologias de captura de carbono.

Fundada em 2009 e sediada em Squamish, British Columbia, a Carbon Engineering, uma empresa canadense, está na vanguarda da inovação com sua tecnologia revolucionária de captura direta do ar (DAC) e conversão de CO<sub>2</sub> em combustíveis sintéticos. Este avanço representa um passo significativo na mitigação das mudanças climáticas e na promoção de uma economia sustentável. A Carbon Engineering tem recebido apoio financeiro de investidores de destaque, incluindo Bill Gates. Este financiamento permite à empresa continuar a desenvolver e escalar suas tecnologias, além de investir em pesquisa e desenvolvimento para melhorar ainda mais a eficiência e a economia do processo. A parceria e a inovação impulsionadas pela Carbon Engineering, com apoio de investidores como Bill Gates, destacam a importância da colaboração e do financiamento na criação de soluções eficazes para os desafios climáticos.

Os pesquisadores do Massachusetts Institute of Technology (MIT) e da Universidade de Harvard uniram forças em uma colaboração inovadora para abordar o problema crescente das emissões de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Esta parceria resultou em um avanço significativo na tecnologia de captura e conversão de CO<sub>2</sub>, transformando-o em um combustível sólido conhecido como formiato.

Renomado por sua excelência em pesquisa e inovação tecnológica, o MIT contribui com sua expertise em engenharia e ciências aplicadas para desenvolver soluções avançadas em captura de carbono. Conhecida por sua liderança em pesquisa científica e inovação, Harvard oferece conhecimento profundo em química e ciência dos materiais, fundamentais para a transformação eficiente de CO<sub>2</sub>.

A colaboração entre MIT e Harvard exemplifica como a sinergia entre diferentes áreas de especialização pode levar a avanços significativos em tecnologia ambiental. Combinando a força do MIT em engenharia e a expertise de Harvard em ciências químicas, os pesquisadores

foram capazes de criar uma solução inovadora que não só captura CO<sub>2</sub>, mas também o converte em um recurso útil.

Outro estudo foi conduzido em parceria entre a University of Calgary e, novamente, a empresa canadense Carbon Engineering. A University of Calgary é reconhecida por sua forte atuação em pesquisa e inovação, especialmente nas áreas de engenharia química e ambiental. A instituição traz para a parceria uma base sólida de conhecimento acadêmico e recursos de pesquisa avançados.

Esta parceria destaca a importância da colaboração intersetorial para abordar problemas complexos como a captura e utilização de CO<sub>2</sub>. Enquanto a University of Calgary aporta seu conhecimento teórico e capacidades de pesquisa, a Carbon Engineering traz seu know-how tecnológico e experiência em implementar soluções no mundo real. Esta combinação é crucial para desenvolver tecnologias eficazes e economicamente viáveis que possam ser rapidamente escaladas para enfrentar os desafios ambientais.

Em estudos iniciais e contínuos, a Carbon Engineering colabora com diversas instituições acadêmicas e industriais para melhorar suas tecnologias e expandir sua aplicação. Esta presença constante em projetos de pesquisa evidencia o compromisso da empresa com a inovação e a busca de soluções para um futuro sustentável.

O estudo conduzido em parceria entre a University of Málaga e a Carbotech Gas System GmbH representa um passo significativo na pesquisa e desenvolvimento de tecnologias de CCU. Este trabalho faz parte de um projeto de pesquisa mais amplo destinado a descrever e implementar tecnologias de Captura e Utilização de Carbono (CCU) em vez de Captura e Armazenamento de Carbono (CCS). O objetivo é permitir a produção de materiais à base de CO<sub>2</sub> e combustíveis alternativos, como biometano, metanol ou éter dimetílico, para integrar o futuro sistema energético.

A University of Málaga (Espanha) é uma instituição acadêmica de prestígio, conhecida por sua forte atuação em pesquisa científica e tecnológica. A universidade contribui para a parceria com sua expertise em pesquisa avançada e desenvolvimento de novas tecnologias. A Carbotech Gas System GmbH é uma empresa alemã especializada em sistemas de gás, trazendo para a parceria sua vasta experiência na indústria de captura e conversão de gases. A Carbotech é reconhecida por suas soluções inovadoras e práticas na área de tecnologia de gases. Esta colaboração entre a University of Málaga e a Carbotech destaca a importância da sinergia entre o setor acadêmico e o setor industrial. A combinação de pesquisa acadêmica detalhada e aplicação prática industrial assegura que as tecnologias desenvolvidas sejam viáveis e eficientes.

No estudo inovador, que foi realizado em parceria entre a Nanjing University of Aeronautics and Astronautics e o Ministry of Industry and Information Technology da China, um novo catalisador-adsorvente de função dupla foi desenvolvido para enfrentar simultaneamente

problemas energéticos e ambientais por meio da captura direta de CO<sub>2</sub> do ar e sua conversão solar in situ em combustíveis limpos.

A renomada instituição acadêmica na China, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics (NUAA), conhecida por suas pesquisas de ponta em engenharia aeronáutica e aeroespacial, bem como em outras áreas de engenharia e tecnologia, contribuiu com seu vasto conhecimento e experiência em pesquisa científica e desenvolvimento tecnológico.

O órgão governamental da China, Ministry of Industry and Information Technology (MIIT), responsável por formular políticas e regulamentos para a promoção do desenvolvimento industrial e tecnológico, apoia iniciativas que visam à inovação e à sustentabilidade, fornecendo suporte estratégico e recursos para projetos de pesquisa que abordam questões ambientais e energéticas.

**Integração de Pesquisa Acadêmica e Apoio Governamental:** a parceria entre a NUAA e o MIIT exemplifica como a colaboração estratégica entre academia e governo pode resultar em avanços significativos na pesquisa e desenvolvimento de tecnologias sustentáveis. A NUAA forneceu a base científica e a expertise técnica, enquanto o MIIT ofereceu suporte regulatório e financeiro.

Os clusters de parcerias no estágio de longo prazo revelam uma rede robusta e diversificada de colaboração entre instituições acadêmicas, organizações governamentais e empresas de renome mundial. Um exemplo notável é o projeto Tupã, que envolve a ANP, a EMBRAPA, a GALP/Petrogal, o ISI Biomassa e o LIPCAT da UFRJ. Além disso, parcerias internacionais como o Rowland Fellows Program (Harvard), o National Research Council of Canada e a University of Saskatchewan exemplificam como a colaboração global pode impulsionar o desenvolvimento de tecnologias inovadoras para combater as mudanças climáticas, promovendo um futuro mais sustentável. Essas parcerias, que combinam a expertise acadêmica, o apoio governamental e o know-how tecnológico das empresas, são essenciais para enfrentar os desafios ambientais e energéticos do século XXI.

#### 6.1.4 Panorama da análise vertical do mapa tecnológico

Ao comparar os clusters de parcerias em todos os estágios, podemos identificar diferenças significativas em termos de composição, foco e abrangência das colaborações.

No estágio atual, onde predominam as patentes caducas, as parcerias refletem uma fase mais madura de desenvolvimento tecnológico. As empresas muitas vezes colaboram com instituições de pesquisa para refinamento ou adaptação de tecnologias existentes. Essas parcerias podem não estar necessariamente focadas em inovações disruptivas, mas sim em melhorias incrementais ou na aplicação prática de conhecimentos estabelecidos.

No estágio de curto/médio prazo, observamos uma transição para parcerias mais específicas e voltadas para soluções inovadoras. As empresas colaboram com instituições de pesquisa para desenvolver novas tecnologias ou aplicar conhecimentos existentes de maneiras inovadoras. As parcerias nesse estágio muitas vezes visam a resolver problemas específicos ou explorar oportunidades de mercado emergentes, como no caso das patentes concedidas relacionadas à produção agrícola de biocombustíveis.

Por fim, no estágio de longo prazo, as parcerias tendem a ser mais abrangentes e colaborativas, envolvendo uma variedade de atores, desde instituições acadêmicas e agências governamentais até empresas multinacionais. Essas parcerias muitas vezes visam a abordar desafios complexos e de longo prazo, como a mitigação das mudanças climáticas, e podem resultar em inovações de alto impacto e soluções sistêmicas, como os projetos Tupã e os estudos internacionais de captura e utilização de carbono.

Os clusters de parcerias refletem diferentes estágios de maturidade e foco no ciclo de desenvolvimento tecnológico, desde melhorias incrementais até inovações disruptivas e soluções abrangentes para desafios globais.

## 6.2 ANÁLISE HORIZONTAL

Neste item realizamos uma análise dos players e seu comportamento em relação às taxonomias/domínios ao longo do tempo, bem como suas estratégias mercadológicas e tecnológicas.

Tecnologias, processos e aplicações são elementos fundamentais no estudo da captura, conversão e utilização do CO<sub>2</sub> pra produção de combustíveis. As tecnologias referem-se às diferentes abordagens específicas empregadas para alcançar esses objetivos, como fotoprodutividade, bioengenharia e sustentabilidade ambiental. Essas tecnologias são projetadas para maximizar a eficiência na captura e conversão do CO<sub>2</sub> em produtos úteis, como biocombustíveis e materiais sustentáveis.

Por sua vez, os processos descrevem as operações necessárias para implementar essas tecnologias, incluindo o uso de equipamentos, sistemas e reatores especializados. Isso abrange desde a seleção de materiais e catalisadores até a otimização termodinâmica dos processos para garantir a eficiência e a viabilidade econômica.

Já as aplicações representam o resultado final desses esforços, em que as tecnologias e processos são aplicados em contextos específicos, como na agricultura para maximizar o sequestro de carbono, na produção de biocombustíveis para reduzir a dependência de combustíveis fósseis ou em iniciativas ambientais para mitigar os impactos do aquecimento global. Essa aplicação prática demonstra o potencial dessas tecnologias e processos para promover a sustentabilidade e enfrentar os desafios relacionados às mudanças climáticas.

Em resumo, a inter-relação entre tecnologias, processos e aplicações é crucial para avançar na utilização eficiente e sustentável do CO<sub>2</sub>.

### 6.2.1 Tecnologias

Observando o número de trabalhos relacionados ao tema de tecnologias em cada estágio do desenvolvimento, podemos destacar algumas tendências importantes.

No estágio atual, que é o estágio mais avançado em termos de maturidade tecnológica, encontramos uma proporção relativamente menor de trabalhos. Isso sugere que, nessa fase, o foco está na implementação e refinamento de tecnologias já existentes, com menos espaço para pesquisas exploratórias ou conceituais. Um exemplo disso é a patente (US9101093) desenvolvida pela Algenol Biotech em colaboração com o Georgia Tech Research Institute (GTRI). A tecnologia descrita nesta patente concentra-se em sistemas de baixo consumo energético para regeneração de adsorventes de CO<sub>2</sub>, facilitando a entrega eficiente de CO<sub>2</sub> a fotoautótrofos para a produção de biocombustíveis e outros produtos comerciais.

Por outro lado, no estágio de curto/médio prazo, que se situa no meio do espectro de maturidade, observamos uma parcela significativa dos trabalhos. Isso indica um interesse crescente em tecnologias que estão se aproximando da aplicação prática, com uma ênfase na otimização e na adaptação para atender às necessidades específicas do mercado e da indústria.

Um exemplo concreto desse estágio é a patente concedida (EP3681266) intitulada “Methods of agricultural production of brassica carinata oilseed crop”. Desenvolvida pelas empresas Agrisoma Biosciences e Nuseed Global Innovation, essa patente descreve práticas agrícolas que maximizam o sequestro de carbono, aumentam a produtividade para a conversão do material biológico em combustível e promovem a agricultura sustentável. Essa tecnologia exemplifica o interesse crescente em soluções práticas e eficazes para enfrentar desafios ambientais, como a redução das emissões de GEEs.

Outro exemplo interessante é a patente concedida (US8863435) intitulada “Architecture for symbiotic livestock and biofuel production”, que cobre métodos e dispositivos para a localização de uma instalação de produção de algas próxima a uma instalação de produção de gado. Desenvolvida pelas empresas Once e Signify, essa patente busca integrar diferentes processos agrícolas para aumentar a produtividade de forma sustentável, promovendo a simbiose entre a produção de alimentos e biocombustíveis.

Além disso, a patente concedida (US10577248) “Methods and systems for large scale carbon dioxide utilization from Lake Kivu via a CO<sub>2</sub> industrial utilization hub integrated with electric power production and optional cryo-energy storage” aborda métodos e sistemas para a utilização em larga escala de CO<sub>2</sub> do Lago Kivu. Desenvolvida pela empresa Simbuka Energy, essa tecnologia reflete o interesse em soluções inovadoras para a captura e utilização de

CO<sub>2</sub>, visando não apenas reduzir as emissões, mas também promover a produção de energia de forma sustentável.

Já no estágio de longo prazo, que representa o estágio inicial com um nível de maturidade mais baixo, encontramos a maioria dos trabalhos. Isso sugere um intenso esforço de pesquisa e desenvolvimento em busca de soluções inovadoras e disruptivas, que podem levar anos ou até décadas para se tornarem comercialmente viáveis. Essas pesquisas exploram novas ideias, conceitos e tecnologias que têm o potencial de moldar o futuro do campo.

Um exemplo notável é o projeto Tupã, que visa a converter GEEs em combustíveis e produtos químicos renováveis de forma sustentável e econômica. Utilizando um eletrolisador integrado a um reator de microcanais e energia renovável, como biomassa, solar e eólica, esse projeto representa uma colaboração entre várias instituições, incluindo ANP, EMBRAPA, GALP/Petrogal, Instituto SENAI de Inovação em Biomassa (ISI Biomassa) e LIPCAT da UFRJ. O objetivo é reduzir emissões e gerar produtos sustentáveis, alinhando-se com metas globais de redução de gases de efeito estufa e promovendo a sustentabilidade nos setores de petróleo e gás.

Outro projeto importante é liderado por Haotian Wang e sua equipe no Rowland Institute em Harvard, que busca transformar CO<sub>2</sub> em combustíveis por meio de um processo que simula a fotossíntese. Essa tecnologia, promissora para instalações de alta emissão, como termelétricas a carvão, utiliza catalisadores de níquel para converter CO<sub>2</sub> em CO para geração de combustíveis, oferecendo uma alternativa mais barata, eficiente e escalonável.

Além disso, empresas como a Climeworks na Suíça e a Carbon Engineering no Canadá desenvolveram tecnologias inovadoras para capturar CO<sub>2</sub> diretamente da atmosfera e transformá-lo em produtos úteis, como combustíveis sintéticos. Essas iniciativas, apesar de enfrentarem críticas, representam esforços significativos na luta contra o aquecimento global e na busca por soluções sustentáveis para reduzir as emissões de carbono.

Estudos científicos e colaborações internacionais também desempenham um papel fundamental no avanço das tecnologias de captura e utilização de CO<sub>2</sub>. Pesquisas realizadas por universidades e instituições, como a University of Calgary, University of Málaga, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics e Shandong University, fornecem insights valiosos sobre a viabilidade técnica e econômica dessas tecnologias, destacando a importância da colaboração entre o setor acadêmico e o setor privado na busca por soluções para os desafios climáticos globais.

Em suma, a distribuição de trabalhos ao longo dos estágios de desenvolvimento reflete uma abordagem progressiva e estratégica na investigação e implementação de tecnologias relacionadas ao tema. Desde o estágio inicial de pesquisa conceitual até a fase avançada de implementação e otimização, há um compromisso contínuo com a busca por soluções cada vez mais eficazes e sustentáveis para os desafios ambientais e energéticos enfrentados pela sociedade.

## 6.2.2 Processos

Ao observar a distribuição dos trabalhos relacionados a processos em diferentes estágios de maturidade tecnológica, podemos destacar nuances que refletem abordagens específicas em cada fase.

No estágio atual, onde a maturidade tecnológica é mais avançada, a predominância de trabalhos sugere um foco em otimização e refinamento de processos já estabelecidos. Aqui, as pesquisas provavelmente se concentram em melhorias incrementais, visando à maximização da eficiência operacional e a redução de custos em processos industriais existentes. Esse estágio evidencia a importância da constante busca por aprimoramentos para manter a competitividade e a sustentabilidade das operações.

A patente US9101093, “Water/carbonate stripping for CO<sub>2</sub> capture adsorber regeneration and CO<sub>2</sub> delivery to photoautotrophs”, desenvolvida pela Algenol Biotech em parceria com o Georgia Tech Research Institute (GTRI), exemplifica essa abordagem. A patente detalha um método eficiente de regeneração de adsorventes de CO<sub>2</sub>, essencial para operações contínuas e econômicas. A regeneração eficaz reduz a necessidade de substituição frequente dos materiais adsorventes, diminuindo custos operacionais. Esse exemplo ilustra a importância de melhorias incrementais na maximização da eficiência operacional e na redução de custos, mantendo a competitividade e sustentabilidade das operações industriais.

Já no estágio de curto/médio prazo, que se encontra em uma posição intermediária de maturidade, observamos um aumento na quantidade de trabalhos. Esse aumento sugere um interesse crescente em processos que estão próximos da implementação prática, indicando um esforço para viabilizar tecnologias em escala comercial. Aqui, as pesquisas podem se concentrar na adaptação de tecnologias existentes para novos contextos industriais ou no desenvolvimento de processos inovadores com potencial comercial iminente, impulsionando a eficiência e a competitividade das indústrias.

Um exemplo relevante é a patente concedida EP3681266, “Methods of agricultural production of brassica carinata oilseed crop”. A metodologia inclui o plantio rotacional de Brassica carinata, práticas de manejo de terras para reduzir o uso de combustíveis fósseis e a devolução de material vegetal ao solo para captura de carbono.

Por fim, no estágio de longo prazo, que representa o início do ciclo de desenvolvimento, encontramos uma quantidade significativa de trabalhos. Isso sugere um foco intenso em pesquisa e desenvolvimento de novas abordagens e tecnologias disruptivas. Nesta fase inicial, as pesquisas podem explorar conceitos radicalmente novos ou tecnologias de ponta em estágios iniciais de desenvolvimento, com o objetivo de resolver desafios complexos e impulsionar a inovação no campo dos processos industriais. Este estágio é fundamental para abrir caminho para soluções revolucionárias e sustentáveis no longo prazo, alimentando o ciclo contínuo de avanço tecnológico e progresso industrial.

A maioria dos trabalhos discutidos se concentra na criação de novos materiais e catalisadores, otimização de processos termodinâmicos e até uso de processos eletroquímicos. A criação de novos materiais e catalisadores é essencial para melhorar a eficiência e a eficácia das reações químicas envolvidas nos processos. Por exemplo, a utilização de catalisadores de níquel em sistemas de conversão de CO<sub>2</sub> em combustíveis é um avanço significativo. Esses catalisadores permitem uma conversão mais eficiente do CO<sub>2</sub>, resolvendo problemas como a dissolução ineficiente do CO<sub>2</sub> em água observada em versões anteriores de tecnologias.

A otimização de processos termodinâmicos também desempenha um papel crucial. Processos como a reação de Fischer-Tropsch, utilizados no projeto Tupã, requerem condições termodinâmicas ideais para maximizar a produção de syngas e outros produtos químicos renováveis a partir de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>. A melhoria desses processos é fundamental para aumentar a viabilidade econômica e a escalabilidade das tecnologias de captura e conversão de CO<sub>2</sub>.

## 6.2.3 Aplicação

No estágio atual, onde a maturidade tecnológica é mais avançada, observamos uma quantidade considerável de trabalhos focados em aplicações práticas e já implementadas. Isso sugere um interesse crescente na adoção e no aprimoramento de tecnologias existentes em contextos reais. Aqui, as pesquisas podem se concentrar em otimizar o desempenho, a eficiência e a sustentabilidade das aplicações em uso, destacando a importância da inovação contínua para atender às demandas do mercado e da sociedade.

No estágio de curto/médio prazo, que representa uma fase intermediária de maturidade, encontramos uma quantidade significativa de trabalhos. Isso indica um foco em aplicações que estão próximas da comercialização ou já em processo de implementação. Nesta fase, as pesquisas podem se concentrar na adaptação e na customização de tecnologias existentes para atender às necessidades específicas de diferentes setores e mercados. Esse estágio destaca a importância da escalabilidade e da viabilidade comercial das aplicações, impulsionando a inovação e a adoção generalizada de soluções tecnológicas.

Por fim, no estágio de longo prazo, que representa o início do ciclo de desenvolvimento, encontramos uma quantidade equivalente de trabalhos. Isso sugere um interesse significativo em explorar novas aplicações e potenciais usos de tecnologias emergentes. Aqui, as pesquisas podem se concentrar em identificar oportunidades de aplicação inovadoras e disruptivas, muitas vezes explorando conceitos revolucionários e não convencionais. Este estágio é crucial para impulsionar a diversificação e a expansão do alcance das aplicações tecnológicas, preparando o terreno para avanços transformacionais e impactantes no longo prazo.

#### 6.2.4 Panorama da análise horizontal do mapa tecnológico

A análise horizontal dos players envolvidos na captura, conversão e utilização do CO<sub>2</sub> para a produção de combustíveis revela um panorama abrangente das tendências e estratégias tecnológicas e mercadológicas ao longo do tempo, destacando três elementos fundamentais: tecnologias, processos e aplicações.

As tecnologias desempenham um papel crucial nesse contexto, abrangendo uma variedade de abordagens, desde fotoprodutividade e bioengenharia até soluções de sustentabilidade ambiental. Observa-se uma distribuição distinta de trabalhos em diferentes estágios de desenvolvimento tecnológico. No estágio atual, há um foco na implementação e refinamento de tecnologias já existentes, visando à maximização da eficiência na captura e conversão do CO<sub>2</sub> em produtos úteis. No estágio de curto/médio prazo, há um interesse crescente em tecnologias que estão se aproximando da aplicação prática, com uma ênfase na otimização e na adaptação para atender às necessidades específicas do mercado e da indústria. Já no estágio de longo prazo há uma intensa pesquisa e desenvolvimento de soluções inovadoras e disruptivas, explorando novas ideias, conceitos e tecnologias que têm o potencial de moldar o futuro do campo.

Quanto aos processos, estes envolvem as operações necessárias para implementar as tecnologias de captura e conversão de CO<sub>2</sub>. No estágio atual, há um foco em otimização e refinamento de processos já estabelecidos, visando maximizar a eficiência operacional e reduzir custos. No estágio de curto/médio prazo, há um esforço para viabilizar tecnologias em escala comercial, com a adaptação de tecnologias existentes para novos contextos industriais ou o desenvolvimento de processos inovadores com potencial comercial iminente. No estágio de longo prazo, há uma pesquisa intensa em novas abordagens e tecnologias disruptivas, incluindo a criação de novos materiais e catalisadores, a otimização de processos termodinâmicos e o uso de processos eletroquímicos.

Por fim, as aplicações representam o resultado final dos esforços tecnológicos e processuais, aplicados em contextos específicos para promover a sustentabilidade e enfrentar os desafios climáticos. No estágio atual, há um foco crescente na adoção e aprimoramento de tecnologias existentes em contextos reais. No estágio de curto/médio prazo, observa-se um foco significativo em aplicações que estão próximas da comercialização, com esforços direcionados à escalabilidade e viabilidade comercial das tecnologias. E no estágio de longo prazo, destaca-se a exploração de novas aplicações e usos potenciais de tecnologias emergentes, com foco em identificar oportunidades inovadoras e disruptivas.

Em conclusão, a análise horizontal reflete uma abordagem progressiva e estratégica na investigação e implementação de tecnologias, processos e aplicações relacionadas à captura e utilização de CO<sub>2</sub>. Essa inter-relação entre tecnologias, processos e aplicações é crucial para promover a sustentabilidade e enfrentar os desafios climáticos globais, refletindo um esforço coletivo de inovação e progresso tecnológico.

## 7 CONCLUSÃO

A análise detalhada realizada sobre as tecnologias de captura e utilização de CO<sub>2</sub> como matéria-prima para a produção de combustíveis revelou insights valiosos sobre o desenvolvimento e a implementação dessas tecnologias em diferentes estágios. Desde uma visão panorâmica dos estágios de maturidade tecnológica até a análise horizontal e análise vertical das parcerias e dos players envolvidos, exploramos os desafios e oportunidades associados a essa importante área de pesquisa e desenvolvimento.

No estágio atual, identificamos uma escassez de trabalhos e um foco predominante em iniciativas que enfrentam desafios significativos de viabilidade técnica e econômica. No entanto, à medida que seguimos para a análise de estágios intermediários e de longo prazo, observamos um aumento no volume e das pesquisas, com uma crescente colaboração entre diferentes atores do setor.

Embora os desafios técnicos, econômicos e regulatórios associados à implementação em larga escala ainda sejam consideráveis, o potencial dessas tecnologias para mitigar as mudanças climáticas e promover uma transição energética sustentável é inegável. Por meio de parcerias estratégicas e investimentos contínuos em pesquisa e desenvolvimento, podemos superar esses desafios e desbloquear o verdadeiro potencial das tecnologias de captura e utilização de CO<sub>2</sub>.

O relatório “Perspectiva Global de Energia 2023: Perspectivas de CCUS” destaca a importância crítica dessas tecnologias na transição energética global e ressalta a necessidade urgente de aumentar drasticamente a capacidade de CCU para atender às metas de neutralidade de carbono estabelecidas para as próximas décadas.

Além disso, a análise horizontal dos players envolvidos revelou uma abordagem progressiva na pesquisa e implementação de tecnologias, processos e aplicações relacionadas à captura e utilização de CO<sub>2</sub>. Desde melhorias incrementais até inovações disruptivas, esses esforços refletem um compromisso coletivo com a inovação e o progresso tecnológico.

Além da análise horizontal dos players envolvidos, a investigação dos clusters de parcerias forneceu insights cruciais sobre a dinâmica colaborativa ao longo dos diferentes estágios de desenvolvimento tecnológico. Desde parcerias focadas em melhorias incrementais até colaborações abrangentes e colaborativas visando a soluções sistêmicas para desafios globais, observamos uma evolução significativa na composição, foco e abrangência das colaborações. Esta análise vertical destacou não apenas a importância da colaboração entre empresas, instituições de pesquisa e governos, mas também a necessidade de adaptabilidade e flexibilidade nas estratégias de colaboração para atender às demandas específicas de cada estágio de desenvolvimento tecnológico.

Esta análise abrangente não apenas fornece uma compreensão aprofundada do estado atual das tecnologias de captura e utilização de CO<sub>2</sub>, mas também destaca a importância da colaboração global e do investimento contínuo na busca por soluções para os desafios climáticos globais. Por meio de uma abordagem progressiva e estratégica, podemos acelerar a transição para um futuro sustentável e livre de carbono, promovendo a inovação e a sustentabilidade em escala global.

**CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA – CNI**

*Antonio Ricardo Alvarez Alban*  
Presidente

**DIRETORIA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL**

*Rafael Esmeraldo Lucchesi Ramacciotti*  
Diretor De Desenvolvimento Industrial

**Observatório Nacional da Indústria**

*Marcio Guerra Amorim*  
Superintendente do Observatório Nacional da Indústria

*Marcello José Pio*  
*Fernanda Fernandes Ministerio*  
*Juliano Antonio Sebben*  
*Suzana Borschiver*  
*Andrezza Lemos da Silva*  
Equipe Técnica

*Vivian Vazquez Thyssen, DSc*  
*Bruno Alarcon Fernandes Previdello, DSc*  
*Desiree Soares da Silva, DSc*  
*Hélio Merá de Assis, MSc*  
*Jéssica Carolina Medina Gallardo, DSc*  
*Jéssica dos Santos Aleixo Espíndola, BSc*  
*Luciano Donizeti Varanda, DSc*  
*Luiza Paula da Conceição Lopes, DSc*  
*Willian Pereira Gomes, DSc*  
Autores

**DIRETORIA DE COMUNICAÇÃO**

*Ana Maria Curado Matta*  
Diretora de Comunicação

**Superintendência de Publicidade e Mídias Sociais**

*Mariana Caetano Flores Pinto*  
Superintendente de Publicidade e Mídias Sociais

*XXXXXXXXXXXXXXXXXX*  
Produção Editorial

**DIRETORIA CORPORATIVA**

*Cid Carvalho Vianna*  
Diretor Corporativo

**Superintendência de Desenvolvimento Humano**

*Renato Paiva*  
Superintendente de Desenvolvimento Humano

**Gerência de Educação Corporativa**

*Priscila Lopes Cavichioli*  
Gerente de Educação Corporativa

*Alberto Nemoto Yamaguti*  
Normalização

---

*XXXXXXXXXXXXXX*  
Consultor

*XXXXX*  
Revisão Gramatical

*Alessandro Mendes*  
Projeto Gráfico e Diagramação



[www.cni.com.br](http://www.cni.com.br)

[/cniBrasil](https://www.facebook.com/cniBrasil)

[@cniBr](https://www.instagram.com/cniBr)

[/cniweb](https://www.youtube.com/c/cniweb)

[/company/cni-brasil](https://www.linkedin.com/company/cni-brasil)

