

WAGNER VASCONCELOS VERÍSSIMO

**PERSPECTIVAS, DESAFIOS E BARREIRAS PARA A BIOENERGIA COM CAPTURA
E ARMAZENAMENTO DE CARBONO (BECCS) NA INDÚSTRIA DE CELULOSE**

SÃO PAULO

2024

WAGNER VASCONCELOS VERÍSSIMO

**PERSPECTIVAS, DESAFIOS E BARREIRAS PARA A BIOENERGIA COM CAPTURA
E ARMAZENAMENTO DE CARBONO (BECCS) NA INDÚSTRIA DE CELULOSE**

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada em Engenharia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título Especialista em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.

Área de Concentração: Aspectos Técnicos, Econômicos, Regulatórios, Ambientais e Sociais em Temas de Bioenergia, Biomassa e Biogás.

Orientador: Profa. Dra. Vanessa Pecora Garcilasso

SÃO PAULO

2024

AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento desta monografia foi um desafio que somente foi possível com o apoio inestimável e a dedicação de pessoas essenciais ao longo desta jornada.

Primeiramente, agradeço à minha orientadora, cuja paciência e supervisão foram fundamentais em cada etapa deste trabalho. Seu comprometimento, orientação, revisões e *insights* foram essenciais para que eu pudesse alcançar um novo patamar de conhecimento e aprendizado em minha carreira.

Aos sócios que lideram a empresa onde trabalho, expresso minha profunda gratidão pela confiança e pela oportunidade de liderar a área de celulose e papel da nossa firma.

Aos meus colegas de trabalho, sou grato pela paciência e compreensão durante este período. A flexibilidade e o apoio de cada um foram fundamentais para que eu pudesse conciliar minhas responsabilidades profissionais com a dedicação a este projeto.

A minha amada namorada, agradeço imensamente por seu companheirismo, por cada palavra de incentivo e por sempre estar ao meu lado, me fortalecendo e incentivando a seguir em frente. Sua presença tornou o caminho menos árduo e muito mais significativo.

Agradeço também a todos os pesquisadores e estudiosos que, com seu trabalho dedicado, contribuem para o avanço do BECCS (*Bioenergy with Carbon Capture and Storage*) em setores industriais. O compromisso deles em desenvolver tecnologias para a captura e armazenamento de carbono tem um papel fundamental na mitigação dos impactos das mudanças climáticas.

Por fim, dedico este trabalho à minha família, meus pais e irmãos, que sempre acreditaram em mim e me proporcionaram todo o suporte necessário. Agradeço por cada incentivo, cada gesto de apoio e cada valor que me transmitiram ao longo da minha vida.

A todos vocês, meu mais sincero obrigado.

RESUMO

VERÍSSIMO, W. V. **Perspectivas, desafios e barreiras para a Bioenergia com Captura e Armazenamento de Carbono (BECCS) na indústria de celulose.** 2024. 129 f. Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética) - Curso de Programa de Educação Continuada em Engenharia da Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

A crescente demanda por soluções sustentáveis e a pressão por metas de redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE) colocam a indústria de celulose em uma posição estratégica para o uso de tecnologias emergentes como a Bioenergia com Captura e Armazenamento de Carbono (BECCS). Este estudo conceitual e exploratório investiga as perspectivas, desafios e barreiras para a adoção de BECCS no setor de celulose, visando contribuir para a mitigação climática e alinhamento com os compromissos ambientais globais. A pesquisa analisa o papel das árvores cultivadas, a estrutura econômica e o processo produtivo do setor, destacando o ciclo de vida do CO₂ e o potencial de BECCS para alcançar emissões líquidas negativas. Através de uma revisão das tecnologias de captura, transporte e armazenamento de CO₂, bem como dos aspectos regulatórios e financeiros, o estudo identifica as principais limitações e oportunidades para a implementação de BECCS na indústria de celulose no Brasil. Além disso, o trabalho explora a maturidade da tecnologia em âmbito global, com foco em estudos de caso, como o projeto *Rocky Mountain Carbon*, e propõe uma análise das políticas e incentivos necessários para criar um ambiente favorável à adoção dessa tecnologia no setor. A monografia conclui com uma discussão sobre as implicações para a indústria de celulose no Brasil e o potencial de BECCS para contribuir significativamente para as metas climáticas internacionais.

Palavras-chave: BECCS, captura e armazenamento de carbono, celulose, bioenergia, emissões, eucalipto, baixo carbono.

ABSTRACT

VERÍSSIMO, W. V. **Perspectives, Challenges, and Barriers for Bioenergy with Carbon Capture and Storage (BECCS) in the Pulp Industry**. 2024. 129 f. Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética) - Curso de Programa de Educação Continuada em Engenharia da Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

The growing demand for sustainable solutions and the pressure to meet greenhouse gas (GHG) emission reduction targets place the pulp industry in a strategic position to adopt emerging technologies, such as Bioenergy with Carbon Capture and Storage (BECCS). This conceptual and exploratory study investigates the perspectives, challenges, and barriers to adopting BECCS in the pulp sector, aiming to contribute to climate mitigation and alignment with global environmental commitments. The research analyzes the role of cultivated trees, the economic structure, and the production process in the sector, highlighting the CO₂ life cycle and the potential of BECCS to achieve net-negative emissions. Through a review of CO₂ capture, transport, and storage technologies, as well as regulatory and financial aspects, the study identifies key limitations and opportunities for implementing BECCS in Brazil. Additionally, the work explores the maturity of the technology on a global scale, focusing on case studies like the Rocky Mountain Carbon project, and offers an analysis of the policies and incentives needed to foster a supportive environment for adopting this technology in the sector. The monograph concludes with a discussion of the implications for Brazil's pulp industry and BECCS's potential to significantly contribute to international climate goals.

Keywords: BECCS, carbon capture and storage, pulp, bioenergy, emissions, eucalyptus, low carbon.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Planta industrial de celulose localizada na cidade de Lençóis Paulista.....	17
Figura 2.2 - área plantada no Brasil por espécie (2015 – 2023) [Milhões de hectares].....	18
Figura 2.3 – Peso da cadeia produtiva florestal no PIB do Brasil nos últimos 10 anos [%]	20
Figura 2.4 – Destino da produção de celulose no Brasil, 2014-2023 [Milhões de toneladas]	21
Figura 2.5 – Produção e consumo de celulose no Brasil, 2014-2023 [Milhões de toneladas]	22
Figura 2.6 – Principais países produtores de celulose em 2023 [Milhões de toneladas]	22
Figura 2.7 – Produção de celulose no Brasil por tipo, 2021-2023 [Milhões de toneladas].....	23
Figura 2.8 – Principais destinos das exportações de celulose brasileira em 2023 [%].....	24
Figura 2.9 – Comparativo da produtividade florestal de eucalipto, 2022-2023 [m ³ /ha/ano].....	25
Figura 2.10 – Preços de celulose na Europa [US\$/tonelada]	26
Figura 2.11 – Preços de celulose na China [US\$/tonelada].....	27
Figura 2.12 – Estrutura hierárquica e composições da madeira	28
Figura 2.13 – Etapas do processo kraft de fabricação de celulose.....	31
Figura 2.14 – Esquema da linha de fibras e linha de recuperação no processo Kraft.....	33
Figura 2.15 – Consumo final energético por fonte na indústria de papel e celulose	35
Figura 2.16 – Diagrama esquemático dos ciclos de dióxido de carbono em diferentes rotas de utilização de bioenergia.....	39
Figura 2.17 – Componentes da Bioenergia com Captura e Armazenamento de Carbono	40
Figura 2.18 – Esquema de produção de BECCS.....	41
Figura 2.19 – Instalações comerciais de CCS por número e capacidade total de captura.....	43
Figura 2.20 – Sistemas de captura de CO ₂	44
Figura 2.21 – Esquema de captura de CO ₂ pós-combustão.....	46
Figura 2.22 – Esquema de captura de CO ₂ pré-combustão.....	48
Figura 2.23 – Esquema de captura por combustão com oxcombustível.....	50
Figura 2.24 – Principais Técnicas de Separação de CO ₂	52
Figura 2.25 – Diagrama de Blocos do Transporte de CO ₂ (duto versus marítimo)	53
Figura 2.26 – Análise comparativa dos custos de transporte por navio e por duto em função da distância até o ponto de injeção [euros por tonelada de CO ₂].....	56
Figura 2.27 – Características físicas para armazenamento geológico de CO ₂ (porosidade, permeabilidade e barreira de confinamento)	57
Figura 2.28 – Variação da densidade do CO ₂ a partir do ponto de injeção.....	58
Figura 2.29 – Contribuição dos Mecanismos de Aprisionamento de CO ₂ ao Longo do Tempo...59	
Figura 2.30 – Mecanismos de armazenamento geológico de CO ₂	61
Figura 2.31 – Características de diferentes complexos de armazenamento de carbono.....	64
Figura 2.32 – Mecanismos de armazenamento geológico de CO ₂	65
Figura 2.33 – Estratégias de Armazenamento Oceânico de CO ₂	66
Figura 2.34 – Processo de carbonatação mineral de rochas de silicato ou resíduos industriais	67
Figura 2.35 – Resumo dos recursos de armazenamento de CO ₂ em julho de 2024	68
Figura 2.36 – Mapa com estimativas de armazenamento de CO ₂ (formações salinas profundas, campos de petróleo e gás esgotados e EOR)	69
Figura 2.37 – Rotas e aplicações para a utilização e reciclagem do CO ₂	71
Figura 3.1 – Mapa de Prospectividade para CCS no Brasil	83

Figura 3.2 – Mapa Dutoviário 2010-2022 do Brasil.....	85
Figura 3.3 – Principais fluxos para remoção de CO ₂ em uma fábrica de celulose kraft	87
Figura 3.4 – Cronograma de alto nível de um projeto CCS.....	95
Figura 3.5 – Prazo entre anúncio do projeto e sua entrada em operação	96
Figura 3.6 – Fatores determinantes para aceitação pública	105
Figura 3.7 – Foto área da planta de celulose da West Fraser em Hinton, Canadá.....	107
Figura 3.8 – Cronograma do Rocky Mountain Carbon Project	108
Figura 3.9 – Lançamento do Projeto com os Ministros de ambos os Países.....	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 – Comparação de composição e propriedades entre fibras.....	29
Tabela 2-2 – Classificação dos processos de polpação	30
Tabela 3-1 – Nível de prospectividade geológica das plantas de celulose do Brasil	84
Tabela 3-2 – Custo do CCS aplicado a diferentes setores.....	98

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMP	2-amino-2-metil-1-propanol
BECCS	Bioenergy with Carbon Capture and Storage
BECCU	Biomass with Carbon Capture and Utilization
BC	Biomass Conversion
CAGR	Compound Annual Growth Rate
CBM	Coal-bed Methane
CCS	Carbon Capture and Storage
CCU	Carbon Capture and Utilisation
DSF	Deep Saline Formations
EGR	Enhanced Gas Recovery
ECBM	Enhanced Coal-bed Methane Recovery
EOR	Enhanced Oil Recovery
GEE	Gases de Efeito Estufa
GNL	Gás Natural Liquefeito
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
IBÁ	Indústria Brasileira de Árvores
IGCC	Integrated Gasification Combined Cycle
IEA	International Energy Agency
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
MEA	Monoetanolamina
PIB	Produto Interno Bruto
PtG	Power-to-Gas
PtL	Power-to-Liquid
PtX	Power-to-X
SEEG	Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa
WGSR	Water Gas Shift Reaction

LISTA DE SÍMBOLOS

CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
CO _{2eq}	Dióxido de Carbono Equivalente
H ₂	Hidrogênio
H ₂ O	Água
HCl	Ácido Clorídrico
HF	Fluoreto de Hidrogênio
CaO	Óxido de Cálcio (Cal)
CaCO ₃	Carbonato de Cálcio
NaOH	Hidróxido de Sódio
Na ₂ S	Sulfeto de Sódio
NO _x	Óxidos de Nitrogênio
SO ₂	Dióxido de Enxofre
SO _x	Óxidos de Enxofre
CH ₄	Metano
N ₂ O	Óxido Nitroso
m ³	Metro Cúbico
Mt	Milhões de Toneladas
Mpa	Megapascal
€/ton	Euros por Tonelada
kJ/mol-1	Quilojoule por Mol

Sumário

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 Objetivo	12
1.2 Motivação	13
1.3 Justificativa	13
1.4 Estrutura do Trabalho	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 Indústria Brasileira de Celulose	16
2.1.1 Árvores Cultivadas e seus Produtos	17
2.1.2 Aspectos Econômicos e Produção Industrial do Setor	19
2.1.3 Processo de Produção de Celulose	28
2.1.4 Consumo de Energia e Emissões de Gases de Efeito Estufa	34
2.2 Bioenergia com Captura e Armazenamento de Carbono (BECCS)	37
2.2.1 Definição de BECCS e sua Relevância no Contexto Global	38
2.2.2 Captura de CO₂	44
2.2.3 Transporte de CO₂	53
2.2.4 Armazenamento de CO₂	56
2.2.5 Utilização do CO₂ Capturado	70
3. ESTUDO CONCEITUAL E EXPLORATÓRIO DO BECCS NA INDÚSTRIA DE CELULOSE BRASILEIRA	73
3.1 Regulação e Políticas Nacionais	73
3.2 Capacidade de Armazenamento e Infraestrutura de Transporte	81
3.3 Aspectos Técnicos e de Implantação	86
3.4 Mecanismos de Apoio, Incentivos e Subsídios	97
3.5 Aceitação Social e Percepção Pública	102
3.6 Caso Rocky Mountain Carbon Project	106
3.7 Caso PT Tanjungenim Lestari Pulp and Paper Project	108
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	111
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	117
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	119
7. ANEXOS	129

1. INTRODUÇÃO

A crescente preocupação global com as mudanças climáticas e a necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) colocam a indústria de celulose diante de um desafio estratégico: alinhar suas operações aos compromissos internacionais de sustentabilidade. Dentre as tecnologias emergentes, a Bioenergia com Captura e Armazenamento de Carbono (BECCS) surge como uma alternativa promissora para capturar CO₂ enquanto gera energia a partir de biomassa, contribuindo diretamente para a mitigação das emissões do setor. Este estudo contextualiza a importância e os potenciais impactos das tecnologias BECCS na indústria de celulose brasileira, examinando sua viabilidade técnica-econômica, maturidade de tecnologias, perspectivas de financiamento e barreiras para aceitação no mercado.

1.1 Objetivo

O objetivo geral deste estudo é explorar, de forma conceitual e qualitativa, as tecnologias de Bioenergia com Captura e Armazenamento de Carbono (em inglês, BECCS ou *Bioenergy with Carbon Capture and Storage*) e avaliar seu potencial de aplicação na indústria de celulose brasileira. Especificamente, este trabalho busca:

- Compreender o funcionamento e os fundamentos técnicos de cada etapa das tecnologias BECCS;
- Analisar o nível de maturidade da aplicação de BECCS em escala global, avaliando estudos de caso e projetos-piloto internacionais;
- Investigar a visão atual do setor de celulose sobre BECCS, incluindo o interesse, os obstáculos e a percepção da indústria quanto a essas tecnologias;
- Examinar a percepção pública e os aspectos sociais que podem influenciar a aceitação e o desenvolvimento de BECCS no setor de celulose;

- Identificar as barreiras técnicas, econômicas e de financiamento enfrentadas pela indústria de celulose para viabilizar a implementação de BECCS.

Este estudo pretende contribuir para uma maior compreensão e divulgação do potencial das tecnologias BECCS no setor, visando apoiar futuras tomadas de decisão e estratégias de mitigação de emissões de carbono.

1.2 Motivação

A motivação para a realização deste trabalho é dupla. Em primeiro lugar, como profissional do setor de celulose e papel, acredito ser essencial explorar caminhos pelos quais a indústria pode contribuir significativamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) em suas operações. Essa necessidade se torna ainda mais premente diante dos acordos internacionais de redução de emissões assinados pelo governo brasileiro e dos compromissos de sustentabilidade firmados pela própria indústria.

Em segundo lugar, tenho uma motivação pessoal em fomentar tecnologias e soluções inovadoras que possam colaborar para a mitigação dos impactos das mudanças climáticas. Esse estudo pretende avançar no conhecimento sobre tecnologias BECCS e abrir espaço para discussões e incentivos em torno de suas aplicações no setor de celulose nacional.

1.3 Justificativa

Este trabalho se justifica pela relevância emergente das tecnologias BECCS como uma solução promissora, mas ainda incipiente, no cumprimento das metas do Acordo de Paris, principalmente removendo grandes quantidades de dióxido de carbono da atmosfera, efetivamente controlando o aumento da temperatura global.

Além disso, atualmente, apenas dois projetos envolvendo BECCS no setor de celulose estão em estudo ou implantação, e no Brasil, ainda não existem iniciativas concretas dos principais players do setor para investir nessa tecnologia.

Por tanto, dada a importância de se promover práticas de redução de GEE na indústria de celulose, este estudo visa despertar a atenção dos executivos do setor para o potencial de BECCS, ressaltando a necessidade de se criar um ambiente propício para investimentos, desenvolvimento e adoção dessas tecnologias no Brasil.

1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está organizado em cinco capítulos, conforme descrito a seguir:

- **Capítulo 1 - Introdução:** Apresenta os objetivos, a motivação e a justificativa do estudo, bem como a estrutura do trabalho, oferecendo uma visão geral dos tópicos abordados.
- **Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica:** Explora o panorama da indústria brasileira de celulose, abordando aspectos como árvores cultivadas, performance econômica, o processo de produção de celulose e o consumo de energia e emissões de gases de efeito estufa. Em seguida, introduz o conceito de Bioenergia com Captura e Armazenamento de Carbono (BECCS), detalhando as tecnologias de captura, transporte, armazenamento e uso de CO₂.
- **Capítulo 3 - Estudo Conceitual e Exploratório:** Realiza uma análise das perspectivas e barreiras para a implementação de BECCS no setor de celulose, com foco em regulação e políticas nacionais, capacidade de armazenamento e infraestrutura, aspectos técnicos e de implantação, além de incentivos e subsídios. Também discute a aceitação social e a percepção pública, finalizando com estudos de caso de projetos relevantes, como o Rocky Mountain Carbon Project e o projeto da Tanjung Enim Lestari Pulp and Paper.

- **Capítulo 4 - Resultados e Discussão:** Apresenta e discute os resultados da pesquisa, oferecendo uma análise crítica sobre os principais *findings* relacionais à viabilidade técnica-econômica da tecnologia BECCS no setor de celulose brasileiro.
- **Capítulo 5 - Considerações Finais:** Conclui o estudo com um resumo dos principais pontos abordados e sugere direções para pesquisas futuras e possíveis estratégias para a implementação de BECCS no setor de celulose.

Este formato oferece uma abordagem estruturada para entender as possibilidades e os desafios da bioenergia com captura e armazenamento de carbono na indústria de celulose nacional, proporcionando uma análise ampla e aprofundada do tema.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Indústria Brasileira de Celulose

A indústria de celulose no Brasil desempenha um papel estratégico tanto no mercado interno quanto no global, sendo o país um dos principais produtores e exportadores desse insumo. A celulose brasileira é altamente competitiva devido à abundância de matéria-prima, especialmente o eucalipto, e à eficiência das fábricas nacionais. Ademais, este setor é um dos maiores consumidores de energia no Brasil, o que traz desafios relacionados à sustentabilidade e às emissões de gases de efeito estufa.

Nas subseções a seguir, serão abordados aspectos econômicos e produtivos, o processo de produção da celulose, o consumo de energia e as emissões associadas à atividade industrial, além das políticas públicas e iniciativas de sustentabilidade que têm moldado o setor nos últimos anos. A revisão desses tópicos é essencial para compreender os desafios e as oportunidades que o Brasil enfrenta para manter sua posição de liderança no mercado global de celulose, ao mesmo tempo em que adota práticas mais sustentáveis e alinhadas com as metas climáticas.

Grandes plantas industriais de celulose, como a localizada na cidade de Lençóis Paulista, Estado de São Paulo, e apresentada na Figura 2.1, serão o foco central deste estudo, especialmente no contexto da aplicação de tecnologias BECCS (Bioenergia com Captura e Armazenamento de Carbono). A análise dessas instalações permite explorar como o setor de celulose nacional pode contribuir para a redução de emissões de dióxido de carbono, alinhando sua liderança global com práticas que visam mitigar os impactos ambientais e promover a sustentabilidade. Essas plantas, com suas operações complexas e integradas, representam um cenário ideal para investigar o potencial do BECCS na mitigação das emissões de CO₂ em larga escala.

Figura 2.1 – Planta industrial de celulose localizada na cidade de Lençóis Paulista



Fonte: Andritz Pulp & Paper (2022).

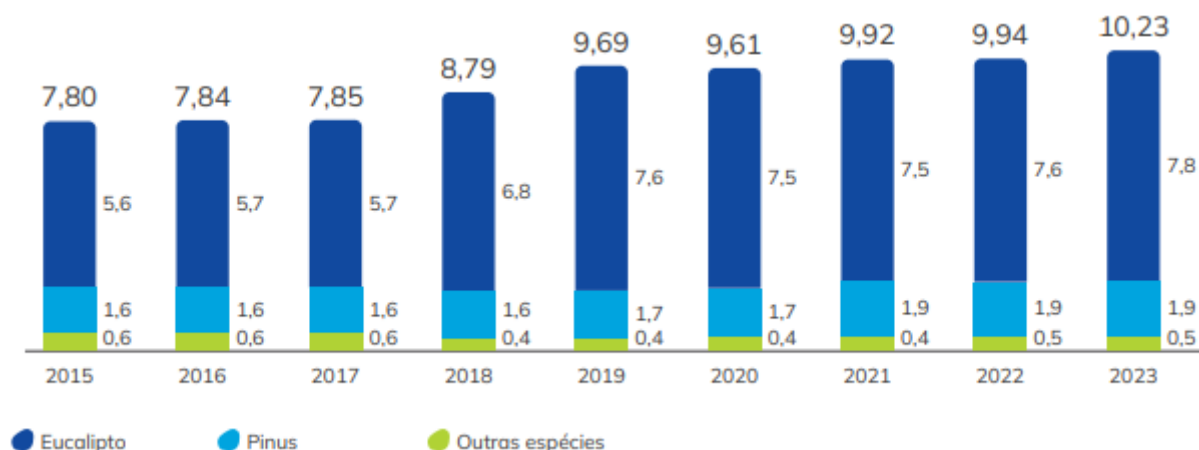
2.1.1 Árvores Cultivadas e seus Produtos

A indústria de árvores cultivadas no Brasil representa uma das principais engrenagens da economia nacional e global. No contexto do setor florestal brasileiro, o termo "árvores cultivadas" refere-se a plantações planejadas e manejadas de forma sustentável para fins industriais e que ocupam áreas previamente degradadas ou de baixa produtividade.

Essas árvores, especialmente eucalipto (*eucalyptus spp.*) e pinus (*pinus spp.*), são plantadas, colhidas e replantadas em ciclos contínuos, maximizando o aproveitamento econômico e ambiental. Através de técnicas avançadas de manejo, essa indústria gera produtos como celulose, papel, painéis de madeira, pisos laminados, bioprodutos e até bioenergia, desempenhando um papel fundamental na descarbonização da economia e no crescimento sustentável.

A base produtiva da indústria de árvores cultivadas no Brasil se destaca pela eficiência no cultivo e manejo de eucalipto e pinus. Com mais de 10,2 milhões de hectares de árvores cultivadas em 2023 e 1,8 milhão de árvores plantadas por dia em áreas previamente degradadas, essa indústria vem se expandindo continuamente, especialmente em estados como Mato Grosso do Sul, Minas Gerais e Paraná, com forte concentração de áreas plantadas nessas regiões. O eucalipto é a espécie predominante, ocupando 7,8 milhões de hectares, o que representa 76% da área total plantada. O pinus, por sua vez, cobre 1,9 milhão de hectares, enquanto outras espécies como teca e acácia ocupam o restante da área (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES, 2024). Essas informações podem ser mais bem observadas na Figura 2.2.

FIGURA 2.2 - ÁREA PLANTADA NO BRASIL POR ESPÉCIE (2015 – 2023) [MILHÕES DE HECTARES]



Fonte: Indústria Brasileira de Árvores (2024).

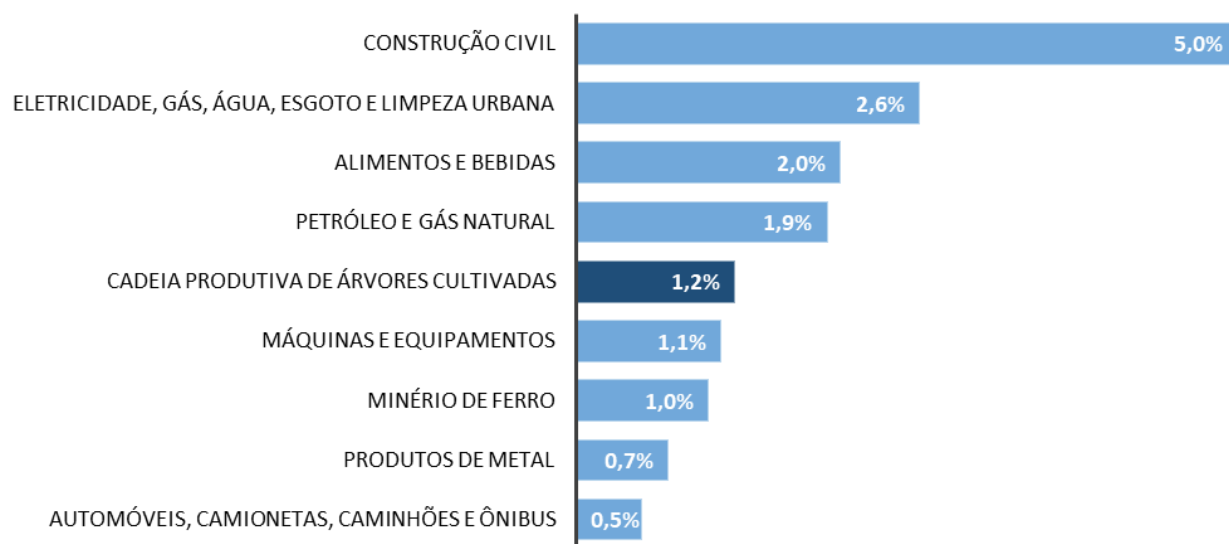
Conforme observado na Figura 2.2, a área plantada no Brasil cresceu aproximadamente 31% entre 2015 e 2023, passando de 7,8 milhões para 10,23 milhões de hectares. O eucalipto representa a maior parte da área plantada e teve um crescimento de cerca de 39% no período analisado, consolidando sua posição predominante no setor florestal brasileiro.

A cadeia produtiva do setor é diversificada e inclui a produção de celulose, utilizada principalmente na fabricação de papel, embalagens e produtos de higiene; papel, tanto para uso industrial quanto para consumo doméstico; painéis de madeira e pisos laminados, essenciais para a construção civil; carvão vegetal, utilizado em processos industriais; e bioprodutos derivados da madeira, que estão cada vez mais presentes em setores como a indústria química, têxtil e cosmética. Além disso, o setor também gera bioenergia, proveniente da queima do licor preto, subproduto do cozimento da madeira na produção de celulose, da queima da biomassa da madeira (cascas e cavacos) e da biodigestão do lodo biológico proveniente das estações de tratamento de efluentes.

2.1.2 Aspectos Econômicos e Produção Industrial do Setor

O setor de árvores cultivadas brasileiro se destaca tanto no cenário econômico quanto industrial, impulsionado por uma estratégia que alia eficiência produtiva, inovação tecnológica e sustentabilidade. Em 2023, o valor bruto da produção do setor atingiu R\$ 202,6 bilhões, o que representa um crescimento anual composto (CAGR: *Compound Annual Growth Rate*) de 3,2% nos últimos dez anos. Esse desempenho coloca o setor de árvores cultivadas como um dos principais componentes do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro, representando 1,2% do total nacional, 4,2% do PIB agropecuário e 4,0% do PIB da indústria de transformação (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES, 2024). A Figura 2.3, abaixo, compara o PIB da cadeia produtiva de árvores cultivadas com outros segmentos da economia brasileira.

FIGURA 2.3 – PESO DA CADEIA PRODUTIVA FLORESTAL NO PIB DO BRASIL NOS ÚLTIMOS 10 ANOS [%]



Fonte: Indústria Brasileira de Árvores (2024).

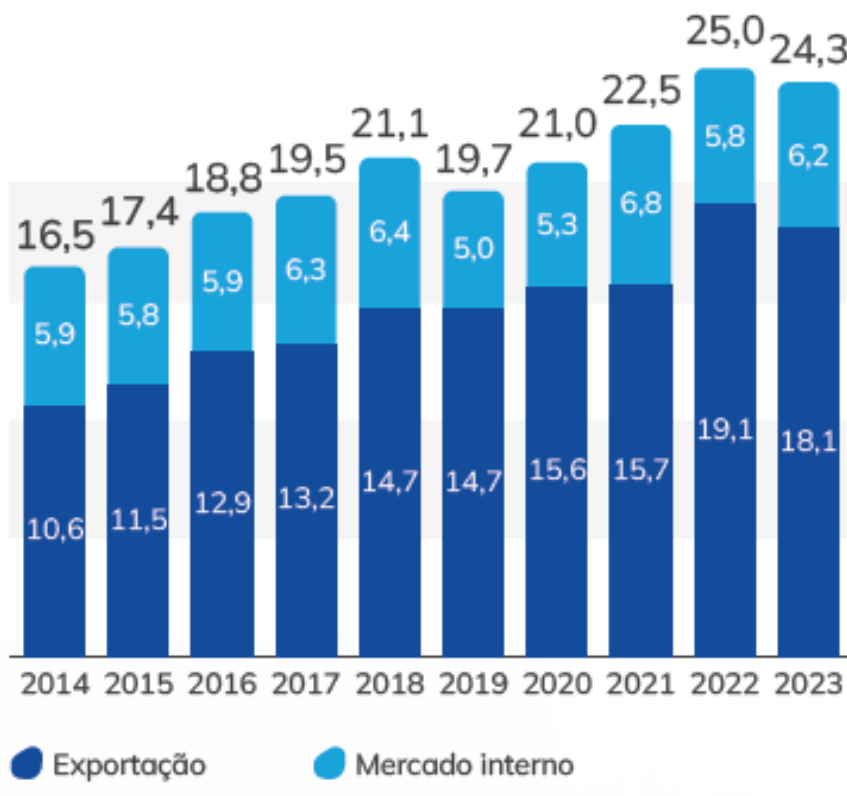
Consoante verifica-se pela Figura 2.3, a cadeia produtiva de árvores cultivadas apresenta posição de destaque no PIB nacional nos últimos 10 (dez) anos, ficando a frente de setores tradicionais como máquinas e equipamentos, minério de ferro, produtos de metal e veículos de transporte terrestre.

Neste mesmo período de análise, a produção de celulose no Brasil teve uma trajetória de crescimento contínuo, consolidando o país como um dos maiores players globais do setor. Em 2023, a produção brasileira de celulose alcançou 24,3 milhões de toneladas (contemplando 21,3 milhões de toneladas de fibra curta), o que representa um CAGR de 4,4% nos últimos dez anos. Este volume de produção colocou o Brasil como o segundo maior produtor mundial de celulose, atrás apenas dos Estados Unidos, que produziram cerca de 25,5 milhões de toneladas no mesmo ano (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES, 2024).

A Figura 2.4 e a Figura 2.5 apresentam, respectivamente, o destino da produção nacional de celulose (mercado interno vs. Exportação) e o histórico de produção e consumo de celulose, ambas entre os anos de 2013 e 2024, ao passo que a Figura 2.6 e a Figura 2.7 evidenciam, de maneira correspondente, os principais países produtores

de celulose em 2023 e o volume de produção de celulose no Brasil, por tipo, entre os anos de 2021 e 2023.

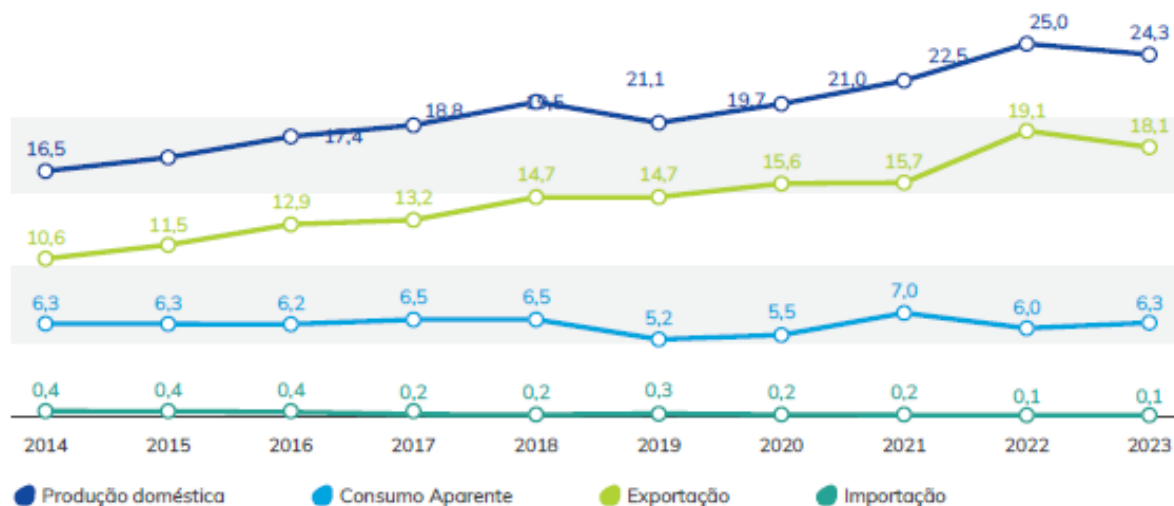
Figura 2.4 – Destino da produção de celulose no Brasil, 2014-2023 [Milhões de toneladas]



Fonte: Indústria Brasileira de Árvores (2024).

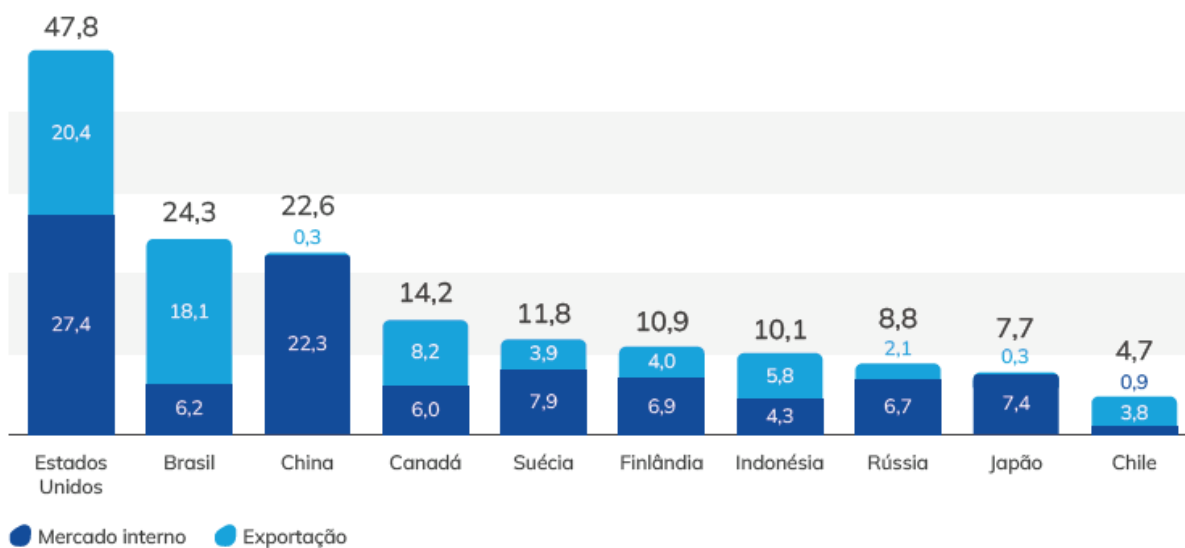
A Figura 2.4 mostra o aumento constante da produção de celulose no Brasil entre 2014 e 2023, com um crescimento tanto nas exportações quanto no mercado interno. A exportação permanece como o principal destino da celulose nacional, representando uma parcela significativa da produção total e indicando a relevância do Brasil como fornecedor global. Com relação ao mercado interno, este tem demonstrado variações menores, mas com uma leve tendência de crescimento ao longo dos anos, refletindo o fortalecimento gradual da demanda nacional.

Figura 2.5 – Produção e consumo de celulose no Brasil, 2014-2023 [Milhões de toneladas]



Fonte: Indústria Brasileira de Árvores (2024).

Figura 2.6 – Principais países produtores de celulose em 2023 [Milhões de toneladas]

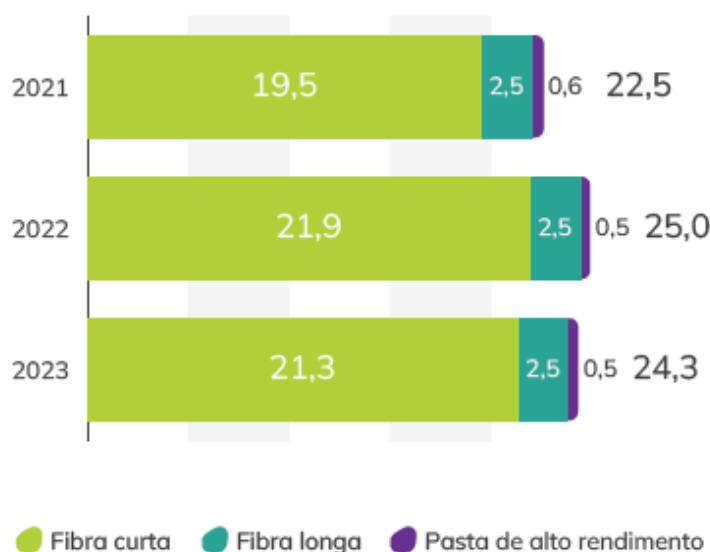


Fonte: Indústria Brasileira de Árvores (2024).

A Figura 2.5 apresenta a evolução da produção e do consumo de celulose no Brasil entre 2014 e 2023, destacando um crescimento contínuo da produção doméstica, que

supera amplamente o consumo aparente. A maior parte dessa produção é destinada à exportação, enquanto as importações se mantêm baixas e estáveis, reforçando o papel do Brasil como exportador de celulose. Já a Figura 2.6 compara os principais países produtores de celulose em 2023, evidenciando que o Brasil ocupa a segunda posição, atrás apenas dos Estados Unidos. Enquanto os EUA têm uma forte demanda interna, o Brasil e outros países, como o Canadá e a Suécia, destinam uma grande parcela de sua produção ao mercado externo, confirmando suas posições como grandes exportadores globais.

Figura 2.7 – Produção de celulose no Brasil por tipo, 2021-2023 [Milhões de toneladas]



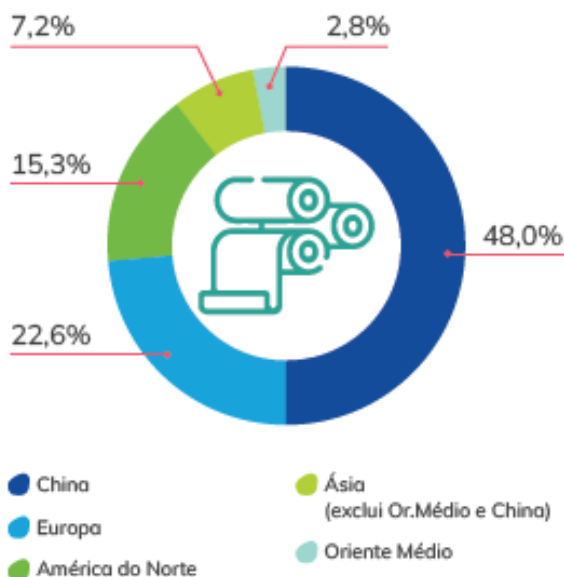
Fonte: Indústria Brasileira de Árvores (2024).

Ato contínuo, a Figura 2.7 mostra a produção de celulose no Brasil, segmentada por tipo, entre 2021 e 2023. A celulose de fibra curta domina a produção, representando a maior parcela, com leve crescimento ao longo dos anos. A produção de fibra longa e de pasta de alto rendimento mantém-se estável, com volumes bem menores em comparação à fibra curta, refletindo a predominância do uso da fibra curta no setor

brasileiro devido à sua alta demanda para determinados produtos, como papéis de uso cotidiano e embalagens.

Conforme ilustrado pelas figuras 2.4, 2.5 e 2.6, em termos de exportações, o Brasil destinou aproximadamente 18,1 milhões de toneladas de sua produção de celulose para mercados internacionais em 2023, representando cerca de 74,5% do total produzido. Os principais destinos foram a China, que recebeu 48% das exportações, e a Europa, com 22,6%, consoante ilustrado na Figura 2.8 a seguir. Esses mercados são impulsionados pela demanda por produtos sustentáveis, como embalagens biodegradáveis e papel tissue, que utilizam celulose de fibra curta como matéria-prima essencial.

Figura 2.8 – Principais destinos das exportações de celulose brasileira em 2023 [%]

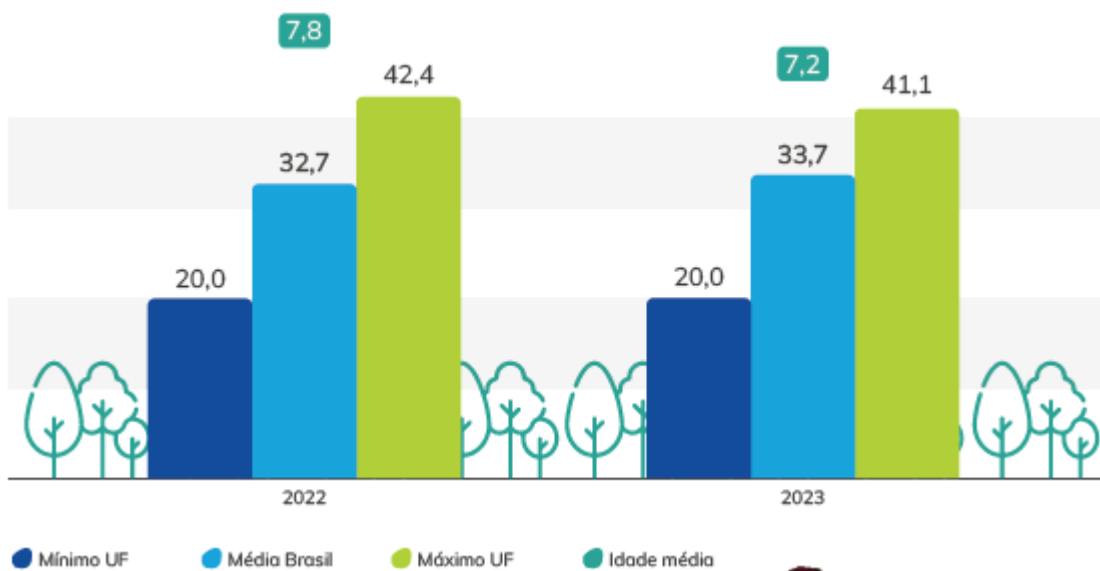


Fonte: Indústria Brasileira de Árvores (2024).

A competitividade do setor de celulose no Brasil é amplamente reconhecida, sendo impulsionada por uma série de fatores que asseguram sua posição de destaque no mercado global. Um dos principais diferenciais é o ciclo curto de cultivo do eucalipto, que no Brasil dura em média 7 (sete) anos, enquanto em países como Suécia e Canadá, os ciclos florestais podem ultrapassar 20 (vinte) anos, resultando em ciclos de produção

mais longos e custos operacionais mais elevados. Essa diferença no ciclo de produção permite ao Brasil uma maior rotatividade de áreas plantadas e uma produtividade florestal de aproximadamente 33,7 m³/ha/ano, uma das mais altas do mundo.

Figura 2.9 – Comparativo da produtividade florestal de eucalipto, 2022-2023 [m³/ha/ano]



Fonte: Indústria Brasileira de Árvores (2024).

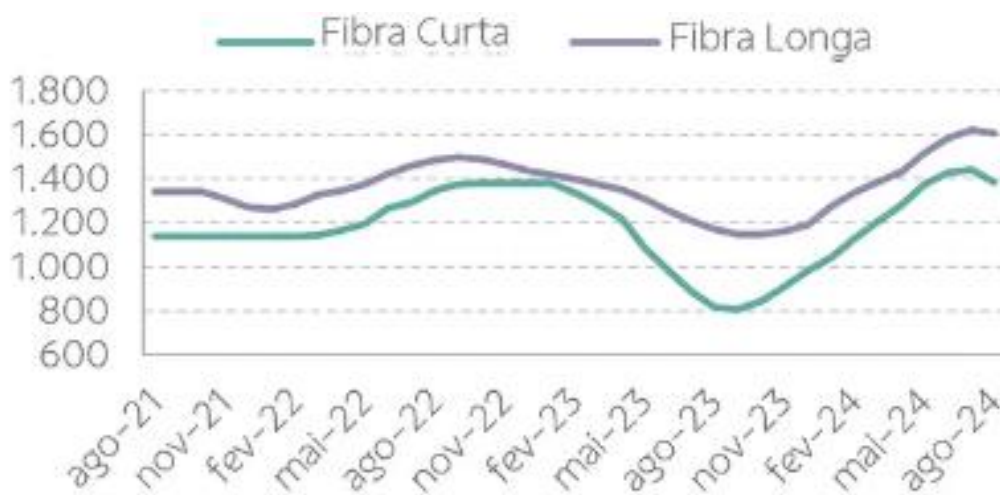
A Figura 2.9 compara a produtividade florestal de eucalipto no Brasil entre 2022 e 2023, mostrando uma leve queda no valor médio nacional, de 42,4 m³/ha/ano em 2022 para 41,1 m³/ha/ano em 2023. Os valores mínimo e máximo permanecem estáveis, indicando variação limitada entre os extremos de produtividade. Já o ciclo de corte, diminuiu de 7,8 anos para 7,2 anos entre 2022 e 2023, indicando um aumento na eficiência do cultivo de eucalipto.

Com base na comparação entre o custo de produção da celulose no Brasil e os preços globais de venda, o Brasil apresenta uma vantagem competitiva significativa sobre outros grandes produtores de celulose, como Canadá e países europeus. O custo de produção no Brasil, variando entre US\$ 200 e US\$ 300 por tonelada, é inferior ao custo no Canadá (acima de US\$ 500 por tonelada), o que se deve em grande parte ao ciclo

curto de crescimento do eucalipto, que permite maior rotatividade e produtividade florestal por hectare.

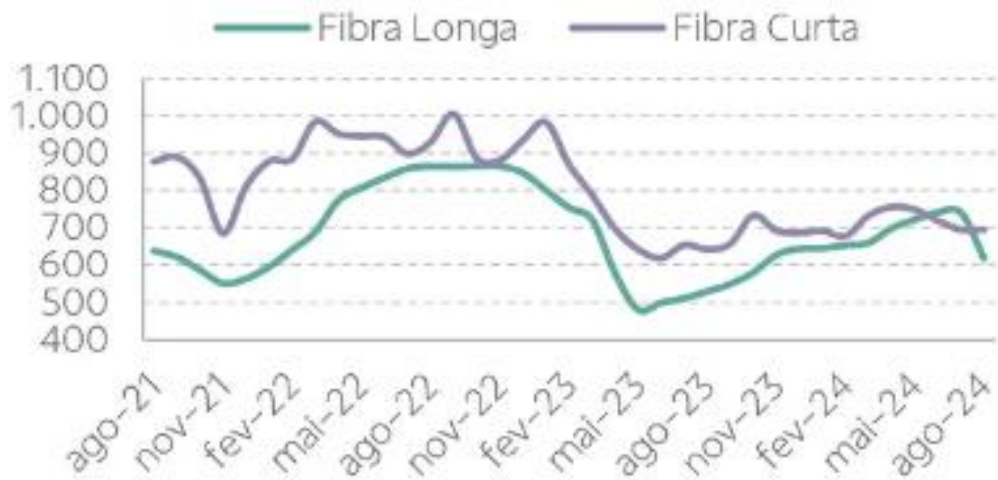
Ao comparar esses custos com os preços de venda de celulose no mercado internacional, como os US\$ 619 por tonelada de fibra curta na China e os US\$ 1.384 por tonelada na Europa em agosto de 2024, verifica-se que o Brasil consegue capturar uma margem considerável mesmo em períodos de baixa demanda ou excesso de oferta global (INVESTALK, 2024). Essa margem de competitividade garante que os produtores brasileiros possam se manter resilientes em face de variações de mercado, enquanto países com custos de produção mais elevados, como o Canadá e os produtores europeus, enfrentam mais dificuldades para ajustar suas operações às flutuações globais de demanda e preço. As Figura 2.10 2.11 trazem o histórico de preços de venda para celulose fibra curta e fibra longa na Europa e na China entre agosto de 2021 e agosto de 2024.

Figura 2.10 – Preços de celulose na Europa [US\$/tonelada]



Fonte: InvesTalk, 2024.

Figura 2.11 – Preços de celulose na China [US\$/tonelada]



Fonte: InvesTalk, 2024.

Além disso, a demanda global por celulose está projetada para crescer a uma taxa composta anual (CAGR) de aproximadamente 2,06% até 2028, com o volume de demanda subindo de 66,02 milhões de toneladas em 2022 para cerca de 73,84 milhões de toneladas até 2028. Essa expansão está fortemente associada ao aumento da demanda por materiais de embalagens sustentáveis como substitutos para o plástico (insumos e materiais renováveis), expansão no uso de papéis para fins sanitários, fraldas e absorventes em países emergentes (crescimento populacional e urbanização), crescente demanda por celulose especial nas indústrias têxtil e farmacêutica (novos usos para a celulose) e a ampliação do consumo chinês (maior importador mundial desse produto) (FASTMARKETS, 2023; RESEARCH AND MARKETS, 2024).

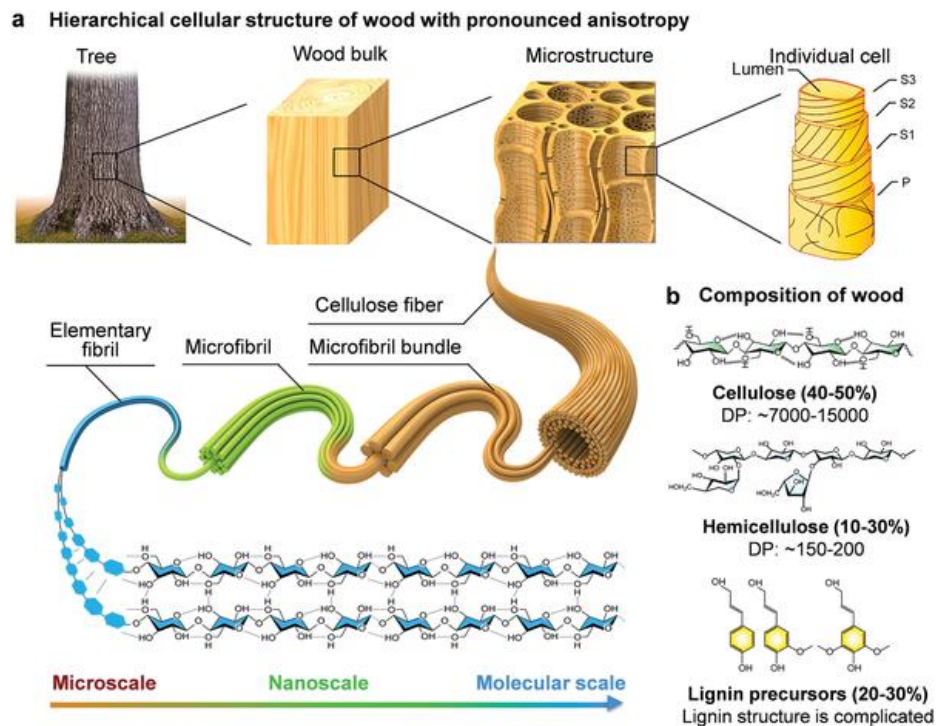
O Brasil, sendo um dos maiores produtores globais de celulose, está em uma posição privilegiada para se beneficiar desse aumento na demanda. Os investimentos projetados para o setor de celulose, estimados em R\$ 105 bilhões até 2028, são essenciais para expandir a capacidade produtiva e modernizar a infraestrutura industrial. Esses recursos estão focados na construção de novas plantas, ampliação de unidades existentes e incorporação de tecnologias que aumentam a eficiência e reduzem os custos operacionais (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES, 2024).

2.1.3 Processo de Produção de Celulose

A celulose, ou pasta celulósica, é o principal componente estrutural das plantas e um dos polímeros mais abundantes da Terra. Trata-se de um polissacarídeo composto por unidades de glicose que se organizam em longas cadeias lineares, formando fibras que conferem resistência às plantas.

Quimicamente, a celulose é constituída por moléculas de glicose unidas por ligações β -1,4-glicosídicas, o que lhe confere sua estrutura fibrosa e cristalina. Além da celulose, a composição da madeira, que é a principal matéria-prima para a produção de celulose, inclui hemiceluloses, lignina e extrativos. A Figura 2.12 mostra a estrutura hierárquica e composições da madeira.

Figura 2.12 – Estrutura hierárquica e composições da madeira



Fonte: Chen e Hu (2020).

A celulose extraída da madeira, também chamada de pasta, é comumente classificada com base em três critérios principais:

- a) tipo de fibra (curta ou longa);
- b) processo de fabricação (químico, semiquímico ou mecânico);
- c) destinação final (para o mercado ou integrada).

As fibras curtas provêm das angiospermas, popularmente conhecidas como folhosas ou *hardwoods* (como o eucalipto, acácia e bétula), enquanto as fibras longas são originadas das gimnospermas, também chamadas de coníferas ou *softwoods* (como o pinus, abeto e araucária). Cada tipo de fibra oferece características distintas que influenciam o desempenho do produto, conforme pode ser verificado pela Tabela 2-1 abaixo.

TABELA 2-1 – COMPARAÇÃO DE COMPOSIÇÃO E PROPRIEDADES ENTRE FIBRAS

-	Constituinte/Parâmetro	Coníferas (fibra longa)	Folhosas (fibra curta)
Composição	Celulose	40-44	43-47
	Hemiceluloses	25-29	25-35
	Lignina	26-30	16-24
	Extrativos	2-8	1-5
Propriedade	Tempo de refinação	Longo	Curto
	Resistência mecânica	Alta	Baixa
	Maciez	Baixa	Alta
	Volume específico	Baixo	Alto
	Formação	Má	Boa
	Absorção	Razoável	Boa
	Alvura	Alta	Alta
	Opacidade	Baixa	Alta

Fonte: CAMPOS, 2022.

Conforme Tabela 2-1, as fibras de coníferas apresentam maior teor de lignina e extrativos, maior resistência mecânica e tempo de refinação mais longo, sendo ideais para aplicações que exigem resistência. Em contraste, as fibras de folhosas têm menor teor de lignina e extrativos, boa formação e absorção, e opacidade e alvura elevadas, tornando-as mais adequadas para produtos que requerem suavidade e qualidade de impressão, como papéis de uso doméstico e de escritório.

De modo geral, a celulose de fibras longas proporciona maior resistência mecânica, sendo usadas principalmente na fabricação de papéis que necessitam de maior durabilidade, como papel para embalagens, papel cartão (especialmente nas camadas internas) e papel jornal, enquanto a celulose de fibra curta é utilizada principalmente na produção de papéis que exigem maciez, opacidade e absorção, como papéis de imprimir e escrever, papéis sanitários (papel higiênico, toalhas de papel e guardanapos), além de papéis especiais que requerem alta opacidade e boa formação de folha.

Para separar as fibras, que estão unidas por forças intermoleculares coesivas, é preciso aplicar uma determinada quantidade de energia. As propriedades, características e usos da polpa obtida dependem da energia despendida neste processo. Assim, o processo de polpação pode ser descrito como a separação das fibras da madeira utilizando energia de origem química e/ou mecânica. A produção industrial de polpas de celulose envolve essencialmente dois grandes tipos de processos: alto rendimento ou químico, conforme esquematizado na Tabela 2-2 abaixo.

TABELA 2-2 – CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE POLPAÇÃO

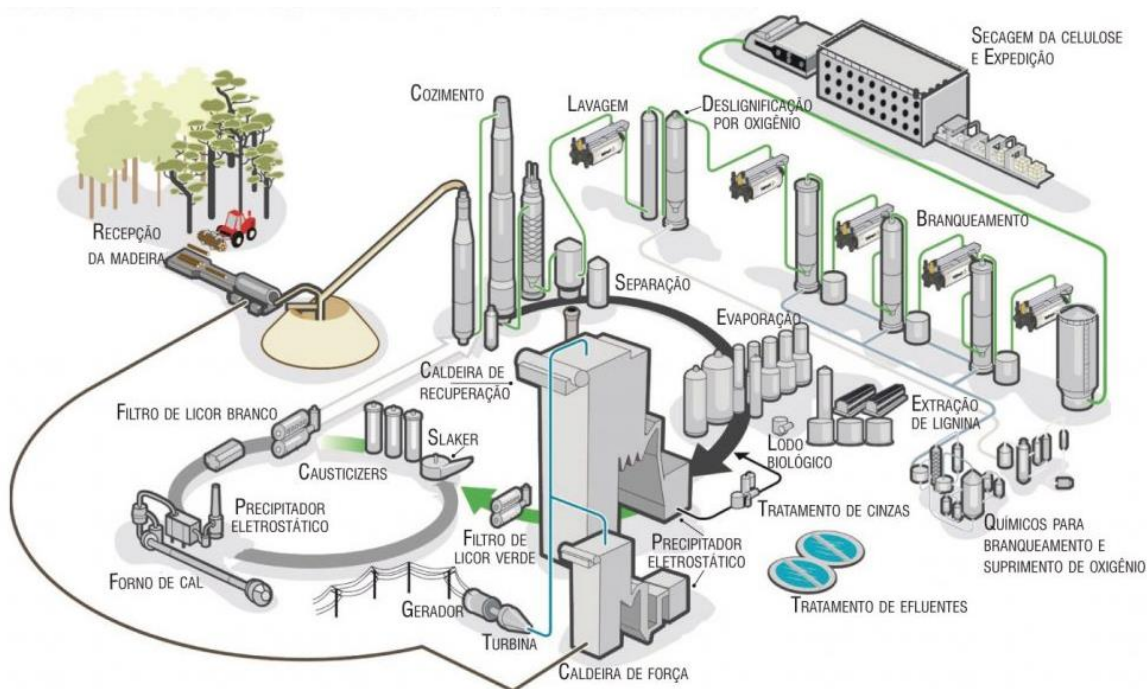
Processos de alto rendimento	Mecânico	
	Termomecânico	
	Quimitemecânico	
	Semi-químico	Sulfito neutro
		Soda a frio
		Soda a quente

Processos químicos	Alcalinos	Soda
		Kraft
		Sulfito alcalino
		Sulfito neutro
	Ácidos	Sulfito ácido

Fonte: CAMPOS, 2022.

O processo Kraft é amplamente preferido devido à sua eficiência, economia de escala e capacidade de recuperação de subprodutos químicos e energéticos, o que o torna mais sustentável em termos econômicos e ambientais. No Brasil, que segue uma tendência mundial, cerca de 90% da produção de polpa química é feita pelo processo “Kraft”. O esquema simplificado do processo Kraft é mostrado na Figura 2.13 abaixo.

Figura 2.13 – Etapas do processo kraft de fabricação de celulose



Fonte: Revista Química e Derivados (2020).

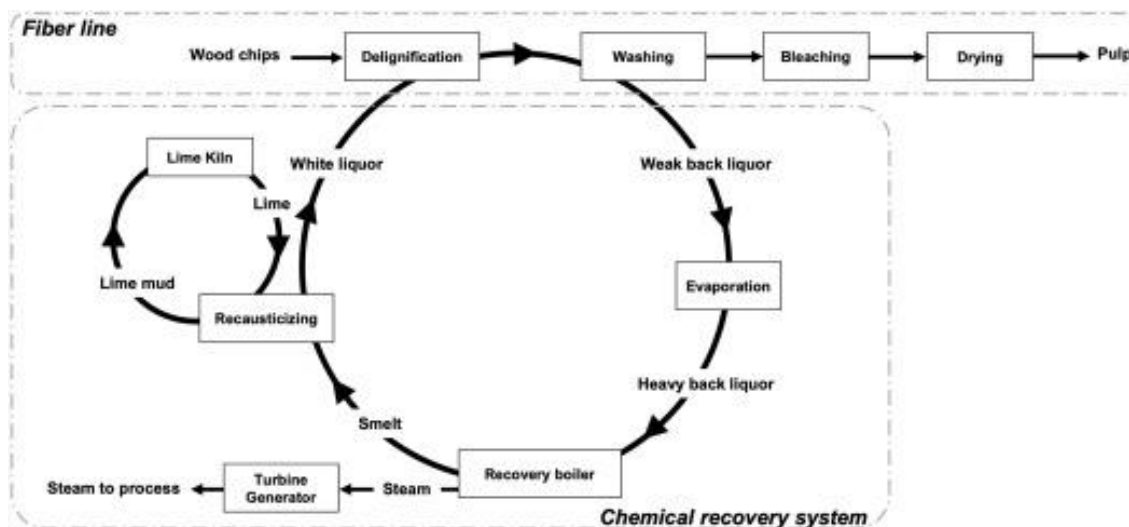
O processo Kraft de produção de celulose pode ser organizado em duas linhas principais: a primeira, conhecida como linha de fibras, envolve a preparação da polpa, que abrange as etapas de cozimento, lavagem e branqueamento das fibras de celulose. A segunda, chamada de linha de recuperação, é responsável pela regeneração dos produtos químicos utilizados no cozimento, permitindo sua reutilização no ciclo produtivo.

A linha de fibras no processo Kraft é responsável por transformar a madeira em polpa de celulose. Esse processo começa com a preparação da madeira, que inclui operações como o corte, a descascagem e a picagem em cavacos. Os cavacos são transportados para o digestor, onde ocorre o cozimento. Durante essa etapa, os cavacos são tratados com o chamado licor branco, composto principalmente por hidróxido de sódio (NaOH) e sulfeto de sódio (Na₂S). Esse tratamento químico tem a função de separar as fibras de celulose da lignina, que é a substância responsável por unir as fibras na madeira.

No digestor, a madeira é submetida a alta temperatura e pressão, o que facilita a dissolução da lignina, resultando em uma massa fibrosa conhecida como polpa marrom. Após o cozimento, a polpa é lavada em múltiplas etapas para remover os resíduos de lignina e outros compostos. O próximo passo é o branqueamento, em que a polpa é tratada com agentes químicos para aumentar a sua alvura e remover impurezas restantes. Dependendo do tipo de celulose desejado, essa etapa pode ser mais ou menos intensa, resultando em uma polpa com características específicas para diferentes aplicações, como fabricação de papel para impressão ou embalagens.

A linha de fibras é fundamental para determinar a qualidade final da celulose produzida, já que as condições de cozimento, lavagem e branqueamento influenciam diretamente na resistência e nas propriedades do produto. Além disso, melhorias tecnológicas nesse setor têm permitido reduzir o consumo de energia e água, tornando o processo mais sustentável. A eficiência da linha de fibras é essencial para a competitividade da indústria de celulose, tanto em termos de produtividade quanto de qualidade final. A Figura 2.14 abaixo ilustra as linhas de fibra e de recuperação no processo Kraft, destacando as principais etapas do processo químico envolvidas.

Figura 2.14 – Esquema da linha de fibras e linha de recuperação no processo Kraft



Fonte: Klemeš (2022).

A linha de recuperação no processo Kraft desempenha um papel crucial na sustentabilidade econômica e ambiental da produção de celulose. Durante o cozimento da madeira no digester, a reação entre os cavacos e o licor branco produz a polpa marrom e um subproduto conhecido como licor preto. Esse licor preto contém resíduos de lignina e os compostos químicos utilizados no processo, como hidróxido de sódio e sulfeto de sódio. A função principal da linha de recuperação é a reciclagem desses produtos químicos, minimizando o desperdício e reduzindo o custo de operação.

O processo de recuperação começa com a evaporação do licor preto, que é concentrado até atingir uma consistência adequada para ser queimado na caldeira de recuperação. Durante a combustão do licor preto, o calor gerado é utilizado para produzir vapor e, em algumas plantas, também energia elétrica, o que contribui para a autossuficiência energética da unidade produtiva. Essa queima também permite a recuperação dos produtos químicos sob a forma de um material denominado licor verde.

O licor verde é tratado no setor de caustificação, onde é regenerado em licor branco através da adição de cal (CaO), permitindo que os compostos alcalinos sejam novamente usados no processo de cozimento. Esse ciclo fechado é uma das

características mais importantes do processo Kraft, pois reduz significativamente o impacto ambiental da produção de celulose, além de contribuir para a economia circular dentro da planta industrial. A regeneração dos reagentes químicos também é fundamental para a viabilidade econômica do processo, uma vez que minimiza a necessidade de insumos externos, como o hidróxido de sódio, e maximiza o aproveitamento dos recursos disponíveis.

Além de permitir a recuperação dos produtos químicos, a linha de recuperação desempenha um papel importante na geração de energia. O calor produzido pela queima do licor preto é convertido em vapor, que pode ser usado em diversas etapas do processo ou transformado em eletricidade, garantindo uma operação mais eficiente e sustentável. Em muitas fábricas, a autossuficiência energética é alcançada graças à linha de recuperação, o que diminui a dependência de fontes externas de energia.

Com a constante evolução tecnológica, as unidades de recuperação têm se tornado cada vez mais eficientes, aumentando a taxa de regeneração dos produtos químicos e reduzindo o consumo de recursos naturais. Isso faz da linha de recuperação um pilar central da sustentabilidade ambiental e econômica do processo Kraft, essencial para manter a competitividade e a conformidade ambiental das plantas de celulose.

2.1.4 Consumo de Energia e Emissões de Gases de Efeito Estufa

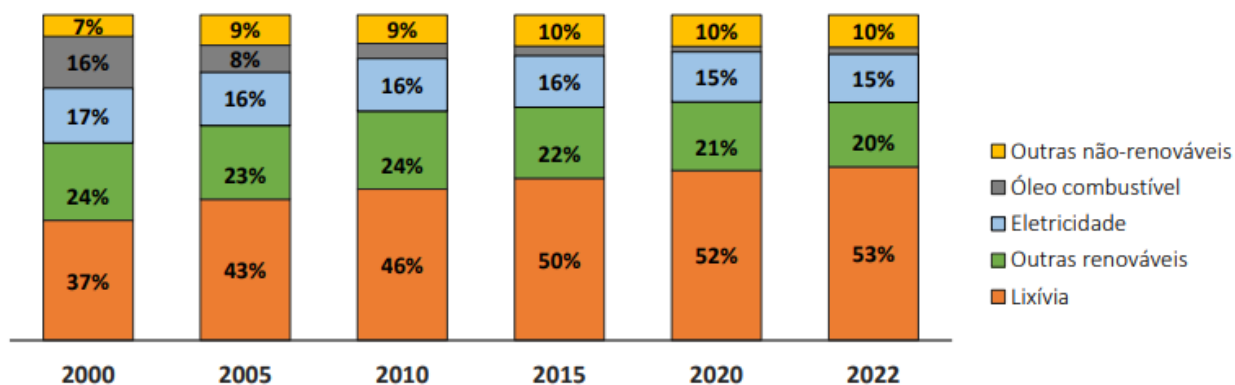
A indústria de celulose e papel no Brasil apresenta uma das maiores eficiências energéticas entre os setores industriais, com um consumo final total de aproximadamente 14,4 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep) em 2023, segundo o Balanço Energético Nacional 2024, o que representa 15,6% do consumo do setor industrial e 5% do consumo total do Brasil.

A matriz energética deste setor no Brasil se caracteriza por um elevado uso de fontes renováveis, atingindo aproximadamente 88%. As plantas industriais de celulose aproveitam subprodutos do processo de produção, como o licor negro (lixívia) e resíduos de madeira, para gerar energia por meio da cogeração. O uso do gás natural, que foi

introduzido na década de 1980, manteve-se estável em cerca de 7% desde os anos 2000, sendo empregado principalmente em caldeiras. Por outro lado, a participação do óleo combustível, que representava 16% em 2000, caiu para apenas 2%, sendo utilizado principalmente no início de operação de caldeiras e em fornos de cal, além de algumas caldeiras específicas a óleo combustível, presentes em poucas plantas industriais (EPE, 2023).

A Figura 2.15 mostra a evolução do consumo final energético por fonte na indústria de papel e celulose entre 2000 e 2022. Nota-se um aumento significativo no uso de lixívia (também chamada de licor negro), que passa de 37% em 2000 para 53% em 2022, indicando uma crescente preferência por fontes renováveis internas ao processo. Em contraste, observa-se uma queda no uso de eletricidade e de óleo combustível, refletindo uma tendência do setor em direção à autossuficiência e à sustentabilidade energética.

Figura 2.15 – Consumo final energético por fonte na indústria de papel e celulose



Fonte: EPE (2023).

Em 2022, as emissões totais de GEE do Brasil foram estimadas em 2,33 bilhões de toneladas de CO_{2eq}, com uma redução de 8% em relação ao ano anterior devido, principalmente, à diminuição no desmatamento da Amazônia. Dentro desse total, o setor de processos industriais foi responsável por aproximadamente 3% das emissões, o que equivale a cerca de 90,78 MtCO_{2eq}. No setor de celulose e papel, estima-se que ele

represente cerca de 6% das emissões industriais, com aproximadamente 5,15 MtCO_{2eq}, segundo dados do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG) (OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2024).

No processo de produção de celulose pelo método Kraft, as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) estão concentradas em diferentes etapas operacionais críticas. A caldeira de recuperação química, utilizada para a regeneração de produtos químicos como o licor negro, gera emissões predominantemente de dióxido de carbono (CO₂). Esse gás é liberado durante a combustão da matéria orgânica residual, que ocorre em altas temperaturas, promovendo a recuperação dos químicos necessários ao ciclo. Adicionalmente, há emissão de óxidos de enxofre (SO_x) e nitrogênio (NO_x), resultantes da oxidação de compostos presentes nos resíduos queimados.

A caldeira de biomassa, comum em plantas que utilizam madeira e resíduos vegetais como fonte de energia, também emite CO₂. Apesar de ser considerada uma fonte de energia renovável, o carbono liberado durante a combustão equivale ao carbono absorvido pela biomassa durante seu crescimento. Dependendo das características do combustível utilizado, como o teor de umidade e a composição, há também a liberação de NO_x e material particulado.

O forno de cal, responsável pela calcinação do calcário (CaCO₃) para produzir cal (CaO), é outra importante fonte de CO₂ no processo. A reação de decomposição térmica do carbonato de cálcio libera grandes quantidades de CO₂, essencial para o funcionamento do ciclo de recuperação. Adicionalmente, como na caldeira de recuperação química, pode haver emissão de NO_x devido às altas temperaturas.

No tratamento de efluentes, ocorre a decomposição biológica de materiais orgânicos nos tanques de tratamento, resultando na emissão de metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O). Esses gases são particularmente relevantes por seu alto potencial de aquecimento global, sendo que o metano é um subproduto da degradação anaeróbica de matéria orgânica, enquanto o óxido nitroso é formado em processos de nitrificação e desnitrificação, no entanto, essas emissões têm menor relevância comparadas aos processos de combustão.

Quanto aos limites para as emissões de metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O), esses gases são regulados por normas ambientais em várias jurisdições devido ao seu alto potencial de aquecimento global. No Brasil, por exemplo, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) estabelece padrões de emissão, e regulações similares existem em outros países, visando reduzir o impacto ambiental das indústrias de celulose e papel.

A *International Energy Agency* (IEA) estima que cerca de 2,5 toneladas de CO₂ (principalmente biogênico) são geradas por tonelada seca de celulose. A combustão do licor negro na caldeira de recuperação cria a maioria das emissões de CO₂, cerca de 74%. Já a caldeira de combustível é responsável por 14% e a calcinação no forno de cal representa 12% (RIO et al., 2024).

2.2 Bioenergia com Captura e Armazenamento de Carbono (BECCS)

A Bioenergia com Captura e Armazenamento de Carbono (BECCS - *Bioenergy with Carbon Capture and Storage*) é uma tecnologia emergente no cenário global como uma das principais estratégias para alcançar emissões líquidas negativas. Essa abordagem combina a produção de bioenergia a partir de biomassa com a captura e armazenamento do dióxido de carbono (CO₂) emitido durante o processo. BECCS se destaca por sua capacidade de remover CO₂ da atmosfera, contribuindo para mitigar os efeitos das mudanças climáticas, ao mesmo tempo em que gera energia renovável. No contexto global, a adoção de BECCS é vista como essencial para cumprir as metas do Acordo de Paris e limitar o aquecimento global a 1,5°C.

Nesta seção, serão abordadas as principais rotas e tecnologias de captura de CO₂, bem como os desafios e oportunidades associados ao transporte, armazenamento e utilização do dióxido de carbono capturado. A discussão se estenderá desde as tecnologias de captura até os métodos de armazenamento e possíveis usos do CO₂, fornecendo uma visão abrangente das etapas necessárias para a implantação eficaz de BECCS na indústria de celulose.

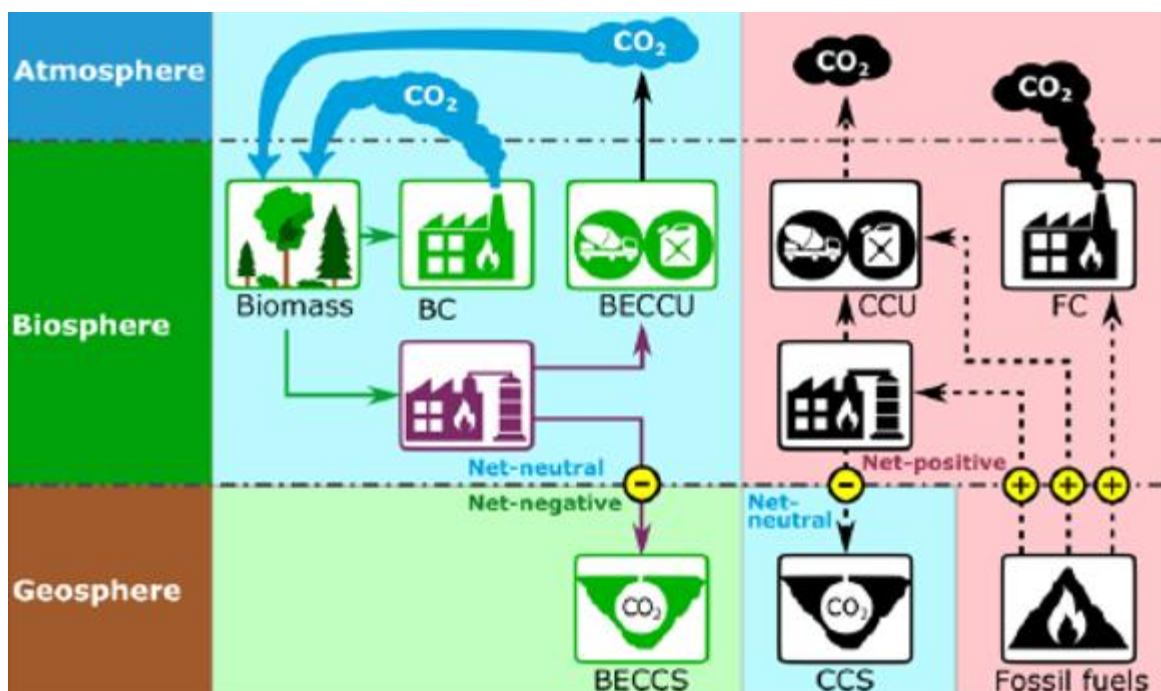
2.2.1 Definição de BECCS e sua Relevância no Contexto Global

A Bioenergia com Captura e Armazenamento de Carbono, ou BECCS (*Bioenergy with carbon capture and storage*), é uma tecnologia que combina a produção de bioenergia com a captura e o armazenamento de dióxido de carbono (CO₂), permitindo a remoção de CO₂ da atmosfera. Em outras palavras, BECCS envolve capturar e armazenar permanentemente CO₂ de processos em que a biomassa é convertida em combustíveis ou queimada diretamente para gerar energia. Como as plantas absorvem CO₂ à medida que crescem, essa é uma maneira de capturar CO₂ através de uma fonte biogênica e armazená-lo permanentemente (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2024).

A tecnologia BECCS pode ser definida, ainda, como uma família de soluções que combinam tecnologias bioenergéticas existentes — que produzem eletricidade, calor e combustíveis a partir de plantas e outras biomassas regeneráveis — com captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS). Essa combinação aproveita a capacidade natural das plantas de absorver dióxido de carbono CO₂ e aplica soluções de CCUS para evitar que esse carbono retorne ao meio ambiente. O resultado pode fornecer tanto uma fonte de energia limpa quanto uma forma de remover o CO₂ já presente na atmosfera, potencialmente resultando em emissões líquidas negativas de CO₂ (EFI FOUNDATION, 2023).

O diagrama da Figura 2.16, abaixo, mostra diferentes rotas de utilização de bioenergia e seus impactos no ciclo do dióxido de carbono (CO₂). A rota BECCS é destacada como *net-negative*, removendo mais CO₂ da atmosfera do que emite, enquanto tecnologias como BECCU, CCS e CCU variam entre *net-neutral* (emite uma quantidade de CO₂ equivalente ao que é capturado) e *net-positive* (emite mais CO₂ do que captura). Assim, a imagem enfatiza o potencial da bioenergia para mitigar emissões em comparação aos combustíveis fósseis.

Figura 2.16 – Diagrama esquemático dos ciclos de dióxido de carbono em diferentes rotas¹ de utilização de bioenergia



Fonte: IEA BIOENERGY: TASK 40, 2020.

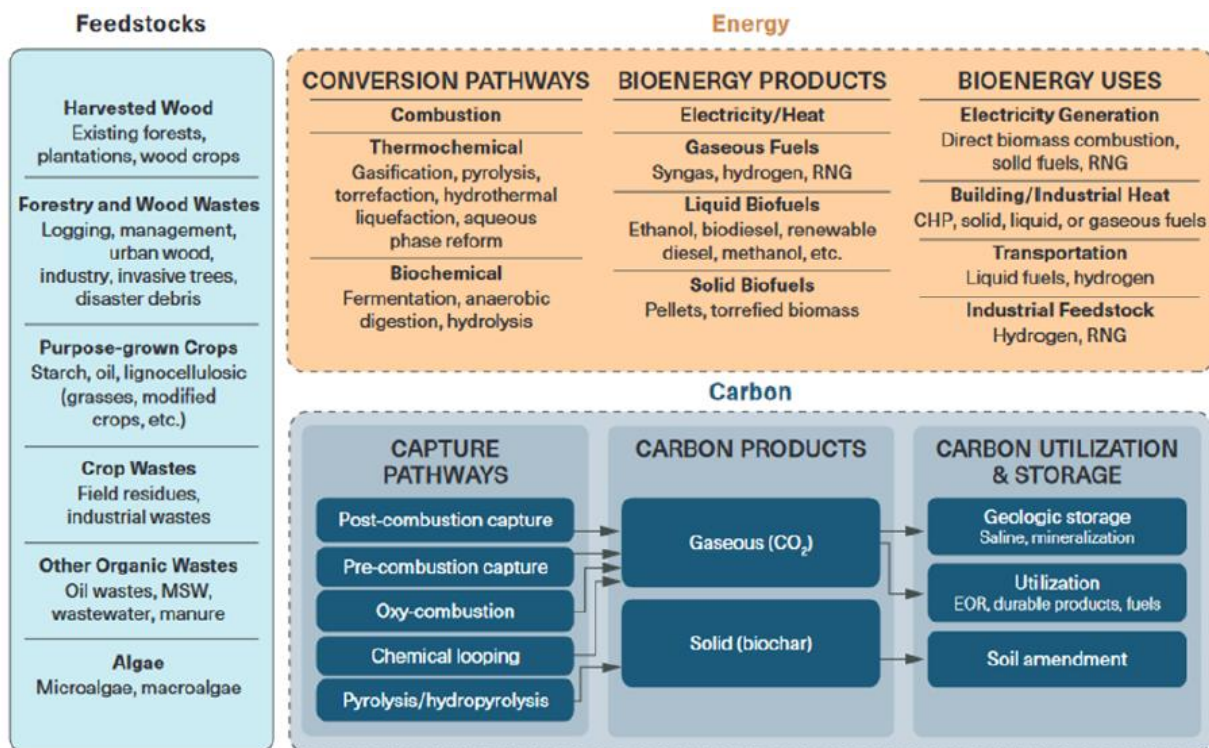
A conversão sustentável de biomassa (*BC - Biomass Conversion*) e a biomassa com captura e utilização de carbono (*BECCU - Biomass with Carbon Capture and Utilization*) podem ser consideradas próximas da neutralidade de carbono. A conversão de biomassa com captura e armazenamento de carbono (*BECCS - Biomass with Carbon Capture and Storage*) pode levar a emissões negativas (IEA BIOENERGY: TASK 40, 2020).

O arranjo das tecnologias BECCS são, notadamente, mais complexos do que outras soluções, uma vez que o fornecimento de biomassa como matéria-prima envolve diferentes usos de terras e recursos (agricultura, silvicultura e manejo de gado), com

¹ Siglas utilizadas na figura: *BC (Biomass Conversion)*: Conversão de Biomassa; *BECCU (Biomass with Carbon Capture and Utilization)*: Biomassa com Captura e Utilização de Carbono; *CCU (Carbon Capture and Utilization)*: Captura e Utilização de Carbono; *FC (Fossil Fuels Conversion)*: Conversão de Combustíveis Fósseis; *BECCS (Biomass with Carbon Capture and Storage)*: Biomassa com Captura e Armazenamento de Carbono; *CCS (Carbon Capture and Storage)*: Captura e Armazenamento de Carbono.

múltiplos processos de conversão e diversos produtos energéticos (por exemplo: combustíveis sólidos, líquidos e gasosos), conforme ilustrado na Figura 2.17.

Figura 2.17 – Componentes da Bioenergia com Captura e Armazenamento de Carbono

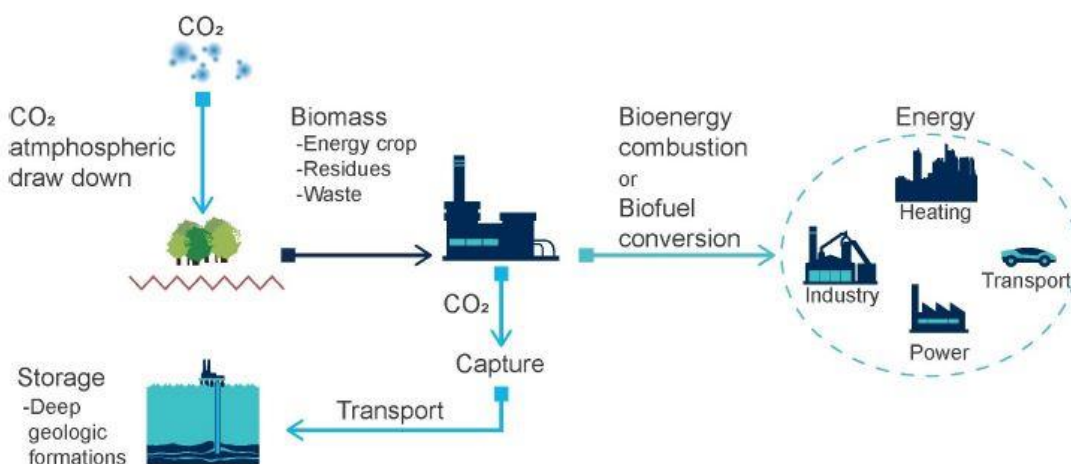


Fonte: EFI FOUNDATION, 2023.

Os processos macro do BECCS envolvem três etapas principais: captura, transporte e armazenamento do CO₂. Inicialmente, o dióxido de carbono é capturado durante a combustão da biomassa para gerar energia ou durante a conversão da biomassa em biocombustíveis. O CO₂ biogênico capturado é, então, comprimido e transportado para locais de armazenamento geológico seguro, como aquíferos salinos profundos ou reservatórios de petróleo e gás esgotados, onde pode ser armazenado por centenas ou até milhares de anos. Em alguns casos, o dióxido de carbono capturado pode ser reutilizado em processos industriais (BECCU), embora essa aplicação tenha um impacto menor na redução de emissões globais, uma vez que o CO₂ é frequentemente

liberado de volta à atmosfera após seu uso. Uma visão ampla dos processos aqui descritos é apresentada na Figura 2.18.

Figura 2.18 – Esquema de produção de BECCS



Fonte: GLOBAL CCS INSTITUTE, 2024.

A importância da tecnologia BECCS na remoção de gases de efeito estufa (GEE) reside em sua capacidade de gerar emissões negativas, o que é crucial para compensar emissões residuais de setores difíceis de descarbonizar, processamento de gás, produtos químicos, fertilizantes, cimento, ferro e aço (GLOBAL CCS INSTITUTE, 2024). Com base em modelos climáticos, como os utilizados pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), o BECCS é apontado como uma solução essencial para manter o aquecimento global abaixo de 2°C ou, idealmente, de 1,5°C, conforme estabelecido no Acordo de Paris.

Globalmente, a implementação de tecnologias BECCS ainda está em fase inicial, com projetos-piloto e instalações de demonstração em operação. Em 2024 houve um crescimento significativo no desenvolvimento de instalações de CCS (*Carbon Capture and Storage*). De acordo com o relatório *Global Status of CCS 2024*, um total de 50 (cinquenta) instalações estão em operação (03 das quais são projetos dedicados de

transporte e/ou armazenamento) e 44 estão em construção (7 delas são de transporte e/ou armazenamento). Em julho de 2024, o pipeline incluía 628 projetos, um aumento de 60% em relação ao ano anterior.

Tanto em contagem de instalações quanto em capacidade, o pipeline de projetos de CCS atingiu níveis recordes. A capacidade de captura tem visto um forte crescimento desde 2017, com uma taxa composta anual de 32%. A Figura 2.19 mostra o crescimento no número e na capacidade total de projetos de CCS desde o relatório *Global Status of CCS 2023*.

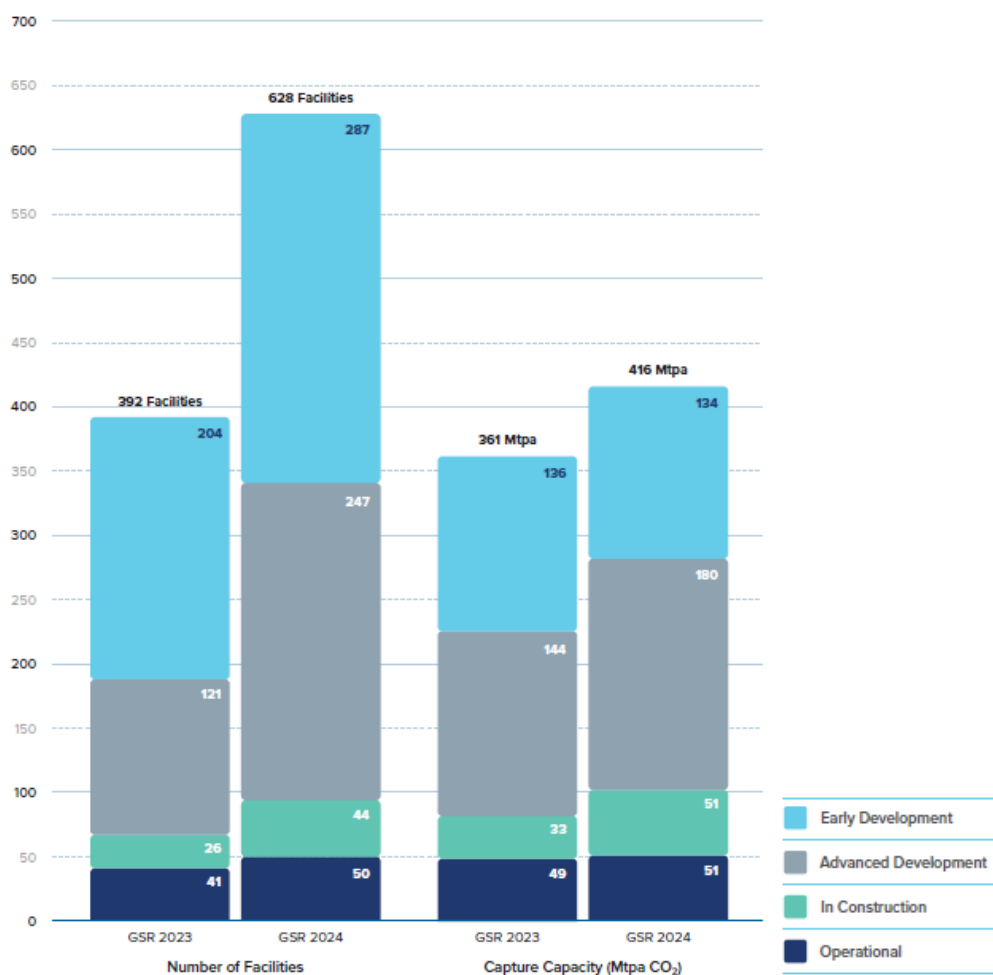
De acordo com o relatório *Global Status of CCS 2024*, os maiores projetos de CCS (Captura e Armazenamento de Carbono) que estão em operação atualmente são:

1. Petrobras Santos Basin Pre-Salt Oil Field, Brasil – com uma capacidade de captura de 10,6 Mtpa de CO₂, usado para recuperação aprimorada de óleo.
2. ExxonMobil Shute Creek Gas, Estados Unidos – com uma capacidade de 7 Mtpa de CO₂, usado para recuperação aprimorada de óleo.
3. Longfellow WTO Century Plant, Estados Unidos – com uma capacidade de 5 Mtpa de CO₂, usado para recuperação aprimorada de óleo.
4. Chevron Gorgon, Austrália – com uma capacidade de 4 Mtpa de CO₂, armazenado em formações salinas profundas.
5. Great Plains Synfuels Plant and Weyburn-Midale, Estados Unidos – com uma capacidade de 3 Mtpa de CO₂, usado para recuperação aprimorada de óleo.

O relatório supracitado também lista diversos projetos de CCS, porém não classifica com clareza o número total de instalações com tecnologia BECCS. Entretanto, com base na lista de instalações anexada ao relatório, é possível identificar que há um total de 100 (cem) projetos associados às indústrias de Bioenergia, Etanol e Celulose e Papel, sendo potencialmente projetos da categoria BECCS. Desse montante de projetos, 05 (cinco) estão operacionais, 03 (três) estão em construção, 54 (cinquenta e quatro) estão em desenvolvimento avançado e 38 (trinta e oito) estão em desenvolvimento inicial.

O único projeto do setor de Celulose & Papel cadastrado pelo *Global CCS Institute* é o *Hinton Bioenergy Carbon Capture and Sequestration (BECCS)*, localizado no Canadá e com capacidade de captura de 1.3 Mtpa CO₂ (projeto em fase de desenvolvimento avançado).

Figura 2.19 – Instalações comerciais² de CCS por número e capacidade total de captura



Fonte: GLOBAL CCS INSTITUTE, 2024.

² **Desenvolvimento Inicial (Early Development):** a instalação está concluindo ou já concluiu um estudo de pré-viabilidade ou viabilidade. **Desenvolvimento Avançado (Advanced Development):** a instalação está concluindo ou já concluiu o projeto de engenharia de front-end (FEED). Para os locais de armazenamento, o proponente está concluindo ou já submeteu um plano de desenvolvimento do campo ou equivalente aos reguladores. **Em Construção (In Construction):** Uma decisão final de investimento (FID) positiva foi alcançada. **Operacional (Operational):** o CO₂ está sendo capturado, transportado e armazenado ativamente.

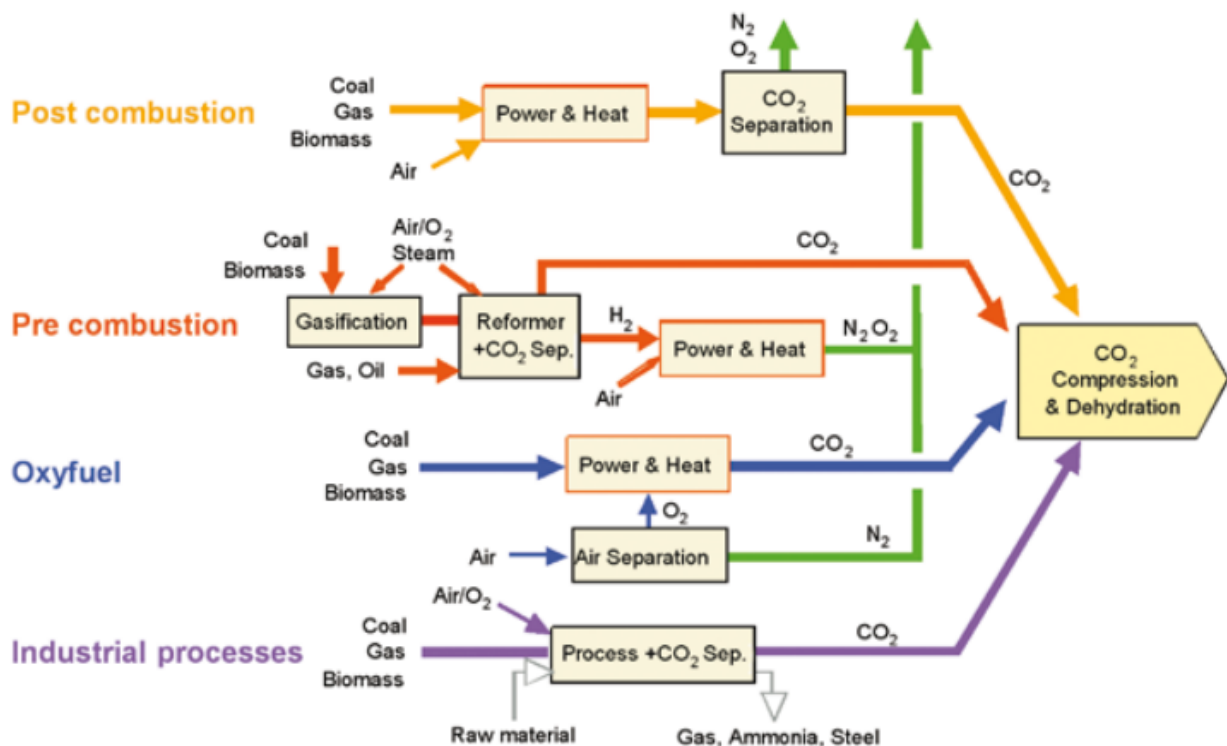
2.2.2 Captura de CO₂

Existem quatro sistemas básicos para captura de CO₂ a partir do uso de combustíveis fósseis e/ou biomassa:

- Captura de fluxos de processos industriais;
- Captura pós-combustão;
- Captura por combustão com oxcombustível;
- Captura pré-combustão.

Esses sistemas são mostrados de forma simplificada na Figura 2.20.

Figura 2.20 – Sistemas de captura de CO₂



Fonte: INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2024.

A captura pós-combustão é uma das principais tecnologias utilizadas para separar o dióxido de carbono (CO_2) dos gases emitidos durante a queima de combustíveis fósseis ou biomassa. Esse processo é especialmente relevante em usinas de energia, fornos de cimento, siderúrgicas e outras indústrias de grande escala, onde a combustão de combustíveis ocorre com a utilização de ar. Atualmente, essas fontes estacionárias respondem pela maior parte das emissões antropogênicas de CO_2 . A tecnologia de captura pós-combustão se destaca pela capacidade de adaptação a plantas já existentes, permitindo a separação do CO_2 dos gases de combustão antes de serem liberados na atmosfera, e encaminhando o CO_2 para armazenamento adequado.

Os gases de combustão, conhecidos como gases de escape, apresentam, geralmente, baixos níveis de pressão e grandes volumes de nitrogênio devido à presença de ar no processo de combustão. A concentração de CO_2 nos gases de escape pode variar consideravelmente com o tipo de combustível utilizado. Em plantas de ciclo combinado a gás natural, a concentração de CO_2 varia entre 3% e 15% em volume, enquanto em plantas de combustão a carvão esse valor tende a ser maior (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2024). Dada a grande quantidade de gases envolvidos, especialmente em plantas de grande porte como as que operam a ciclo combinado, o processo de captura pode se tornar intensivo em energia, o que demanda uma tecnologia eficiente para a separação do CO_2 .

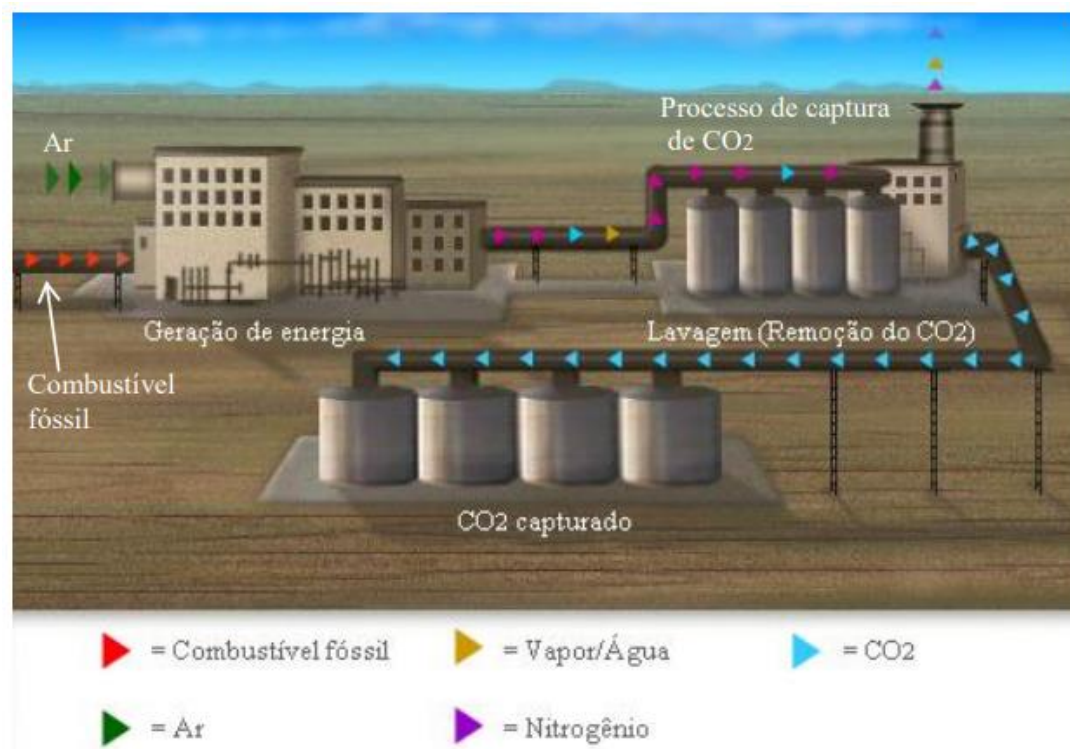
No processo de captura pós-combustão, utiliza-se, normalmente, um solvente químico, como aminas, para capturar o CO_2 presente nos gases de combustão. Esse método já está bem estabelecido comercialmente, com algumas plantas em operação que fornecem bases sólidas para estimativas de custos. No entanto, outras tecnologias estão sendo estudadas, como o uso de solventes sólidos, membranas e técnicas criogênicas, buscando reduzir os custos e aumentar a eficiência energética do processo.

A captura em plantas de combustão a carvão, por exemplo, enfrenta o desafio adicional de lidar não apenas CO_2 , N_2 , O_2 e H_2O , mas também poluentes do ar, como SO_x , NO_x , partículas, HCl , HF , mercúrio, outros metais e outros contaminantes orgânicos e inorgânicos em traços, o que requer operações adicionais para o tratamento dos gases

antes da captura do CO₂ (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2024).

Apesar das dificuldades, a captura de CO₂ em sistemas de combustão é um dos caminhos mais viáveis para reduzir as emissões de GEE em fontes estacionárias de larga escala. A ampla implementação da captura pós-combustão em usinas a carvão e gás natural poderia contribuir significativamente para a mitigação das emissões globais de CO₂. Além disso, as pesquisas em andamento para otimizar a tecnologia e torná-la mais acessível financeiramente são cruciais para a viabilização de sua aplicação em larga escala e para a transição para uma matriz energética mais limpa e sustentável. A Figura 2.21 ilustra o processo de captura de CO₂ pós-combustão.

Figura 2.21 – Esquema de captura de CO₂ pós-combustão



Fonte: HARO, 2009.

Na captura pré-combustão, o CO₂ é separado antes da queima do combustível. O processo envolve a conversão do combustível em um gás de síntese (*syngas*), composto principalmente de monóxido de carbono (CO) e hidrogênio (H₂), por meio de reações com oxigênio ou vapor. O *syngas* é então submetido a uma reação de deslocamento de gás com vapor d'água (*Water Gas Shift Reaction, WGSR*), onde o monóxido de carbono reage com vapor para gerar mais hidrogênio e dióxido de carbono (CO₂). Esse CO₂ é separado do hidrogênio, normalmente por absorção física ou química, e armazenado de forma segura. A vantagem desse método é que o combustível gerado, rico em hidrogênio, pode ser utilizado em uma ampla gama de aplicações, como caldeiras, turbinas a gás e células de combustível.

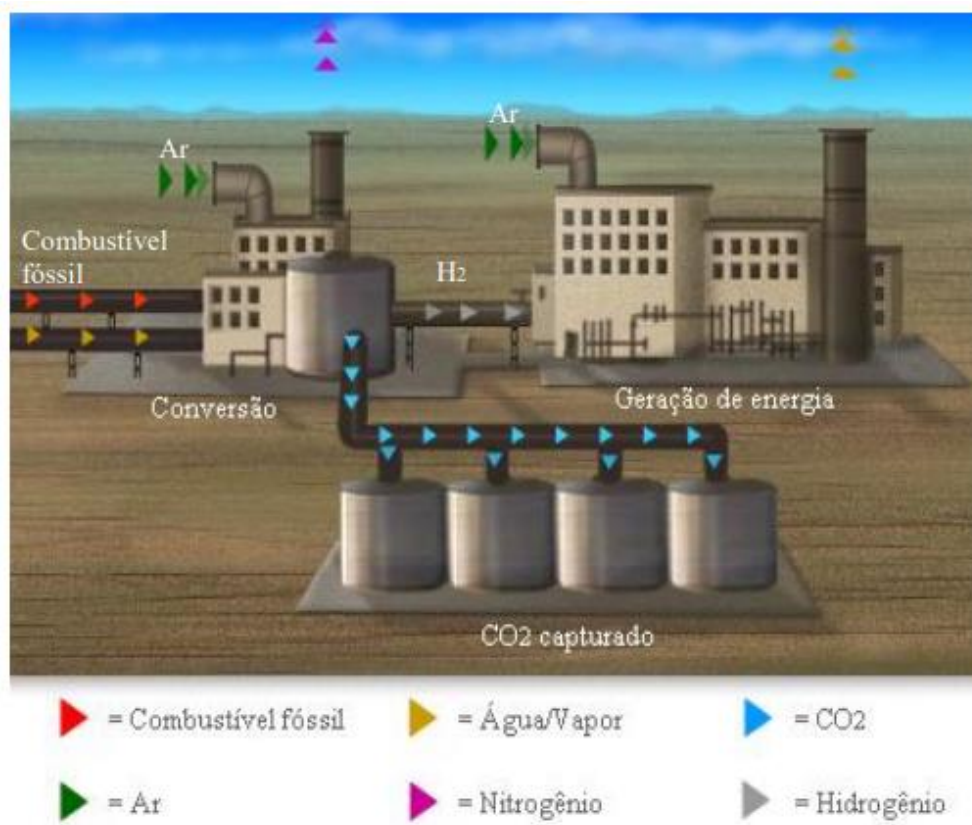
Do ponto de vista das reações químicas envolvidas, a captura pré-combustão é iniciada pela reforma a vapor, representada pela equação: $C_xH_y + xH_2O \leftrightarrow xCO + (x + y/2)H_2$, uma reação endotérmica que gera o *syngas*. Outra rota comum é a oxidação parcial, $C_xH_y + x/2O_2 \leftrightarrow xCO + (y/2)H_2$, uma reação exotérmica que também produz o *syngas*, embora utilizando oxigênio em vez de vapor.

O monóxido de carbono gerado é então convertido em CO₂ pela reação de deslocamento de gás com água: $CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$, que é uma reação exotérmica, liberando -41 kJ/mol⁻¹. Esse CO₂ é então separado e pode ser armazenado, contribuindo para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa.

Uma das principais vantagens do processo de captura pré-combustão é a elevada concentração de CO₂ no *syngas*, que pode variar entre 15% e 60%, o que facilita o processo de separação e reduz os custos relacionados ao uso de solventes e compressão. Além disso, o processo ocorre sob alta pressão, geralmente entre 2 e 7 MPa, o que melhora a eficiência da separação do CO₂. No entanto, a necessidade de sistemas de gaseificação limita a aplicação dessa tecnologia a novas plantas de energia que utilizam esse tipo de processo, uma vez que a implementação em instalações existentes seria economicamente inviável (FIGUEROA et al., 2008) (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2004).

As principais aplicações da captura pré-combustão incluem a produção de hidrogênio com baixo teor de carbono, que pode ser utilizado como combustível em diversas aplicações industriais e de geração de energia, e a redução do teor de carbono em combustíveis fósseis. Essa tecnologia tem grande potencial para ser integrada em plantas de ciclo combinado de gaseificação integrada (IGCC), onde o hidrogênio gerado pode ser usado para produzir energia, enquanto o CO₂ capturado é armazenado, contribuindo para a redução de emissões de CO₂ e a transição para uma economia de baixo carbono. A Figura 2.22 ilustra o processo de captura de CO₂ pré-combustão.

Figura 2.22 – Esquema de captura de CO₂ pré-combustão



Fonte: HARO, 2009.

Outra possibilidade é a captura por combustão com oxigênio, ou oxcombustível (*oxy-fuel*), cujo processo utiliza oxigênio quase puro em vez de ar para fazer a combustão,

resultando em uma corrente de gás de combustão composta principalmente por dióxido de carbono (CO_2) e vapor d'água. O principal objetivo desse processo é facilitar a separação do CO_2 , que, devido à alta concentração no gás de combustão, entre 80% e 98%, dependendo do combustível utilizado e do processo específico (YANG et al., 2008), torna o processo de captura mais eficiente e com menor demanda energética em comparação aos métodos tradicionais. A eficiência de captura de CO_2 em sistemas *oxy-fuel* pode atingir valores muito próximos de 100%, o que representa um grande potencial para mitigação das emissões de gases de efeito estufa.

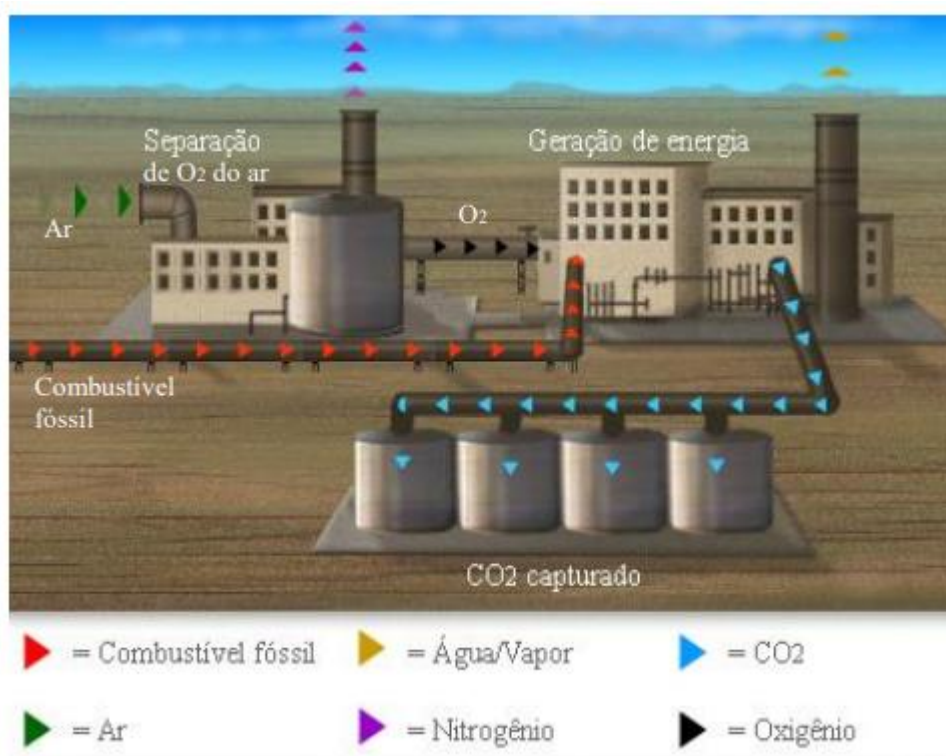
Um dos principais desafios desse processo está na produção do oxigênio utilizado para a combustão, pois a separação do O_2 do ar requer grandes quantidades de energia. O método mais comum de separação de oxigênio é a destilação criogênica, que é atualmente a técnica mais eficiente para aplicações de grande escala, como em caldeiras de usinas de energia que demandam mais de 200 toneladas de oxigênio por dia (WILKINSON et al., 2003). Embora a destilação criogênica seja uma tecnologia madura, o alto custo energético desse processo pode reduzir as vantagens econômicas obtidas pela eficiência da captura de CO_2 . Técnicas emergentes, como o uso de membranas poliméricas e ciclos de looping químico, estão sendo desenvolvidas com o objetivo de reduzir os custos relacionados à separação de oxigênio.

Na prática, o processo de combustão *oxy-fuel* também requer o resfriamento dos gases de combustão para condensar o vapor d'água presente. Isso resulta em um fluxo de CO_2 altamente concentrado que pode ser comprimido e transportado para armazenamento geológico ou outras formas de uso, como *Enhanced Oil Recovery* (EOR). Além disso, impurezas como óxidos de enxofre (SO_x), óxidos de nitrogênio (NO_x), ácido clorídrico (HCl) e mercúrio (Hg) precisam ser removidas para garantir a pureza do CO_2 e evitar problemas operacionais e ambientais relacionados ao descarte ou armazenamento (FIGUEROA et al., 2008).

Embora elementos da tecnologia de combustão com oxicombustível sejam amplamente utilizados nas indústrias de alumínio, ferro, aço e vidro, a captura de CO_2 por esse método ainda não foi implantada em escala comercial nas usinas de energia. O maior desafio para a adoção em larga escala continua sendo o custo elevado da

separação de oxigênio e a necessidade de desenvolvimento de tecnologias que tornem o processo mais economicamente viável (FIGUEROA et al., 2008). Entretanto, o potencial de captura de CO₂ próximo de 100% e a alta pureza do gás capturado fazem da combustão oxy-fuel uma alternativa promissora para a descarbonização da indústria. A Figura 2.23 ilustra o processo de captura por combustão *oxy-fuel*.

Figura 2.23 – Esquema de captura por combustão com oxicombustível



Fonte: HARO, 2009.

Por fim, a captura de dióxido de carbono (CO₂) em processos industriais é uma prática estabelecida há décadas, com o primeiro registro de captura datando de 80 anos atrás (KOHL; NIELSEN, 1997). Atualmente, essa captura ocorre em várias indústrias, como a purificação de gás natural e a produção de gases de síntese contendo hidrogênio, que são usados na fabricação de amônia, álcoois e combustíveis líquidos. No entanto, a maior parte do CO₂ capturado ainda é liberada na atmosfera devido à falta de incentivos

ou exigências regulatórias para seu armazenamento. Além disso, outras indústrias, como a produção de cimento e aço, também geram grandes volumes de CO₂, mas, em muitos casos, não aplicam técnicas de captura, o que representa uma oportunidade para a adoção de tecnologias de captura pós-combustão, combustão *oxy-fuel* e pré-combustão (IPCC, 2005).

Um dos setores com maior potencial para captura de CO₂ é o de purificação de gás natural. O gás natural contém diferentes concentrações de CO₂, que precisam ser removidas para atender às especificações dos gasodutos e evitar problemas como corrosão. Em 2003, a produção mundial de gás natural foi de 2.618,5 bilhões de metros cúbicos. Se metade dessa produção tivesse o teor de CO₂ reduzido de 4% para 2%, seria possível remover cerca de 50 milhões de toneladas de CO₂ por ano. Esse gás pode ser armazenado ou reutilizado, como é o caso dos projetos de recuperação avançada de petróleo (EOR) nos Estados Unidos, onde cerca de 6,5 milhões de toneladas de CO₂ por ano são injetadas no subsolo como parte de projetos comerciais de *Enhanced Oil Recovery* (BEECY; KUUSKRAA, 2005).

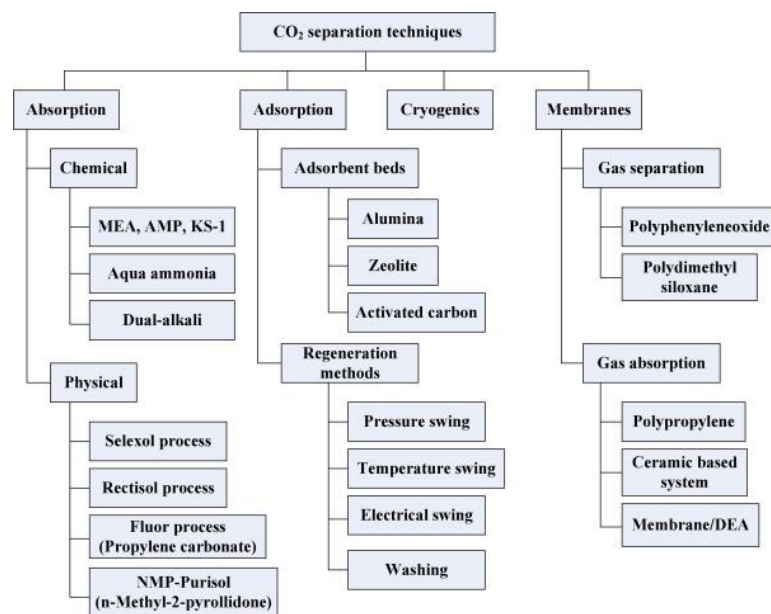
Outro setor importante é o de produção de aço, que é o maior consumidor de energia industrial no mundo, respondendo por 10-15% do consumo total de energia industrial (IEA GHG, 2000). As emissões associadas ao processo de produção de aço foram estimadas em 1442 MtCO₂ em 1995. Tecnologias como o processo COREX, que utiliza carvão de baixa qualidade e gera gás combustível isento de nitrogênio, podem facilitar a captura de CO₂ de forma eficiente. Além disso, a recuperação de CO₂ do gás do alto-forno e a reciclagem do gás rico em CO para o forno são técnicas promissoras, que poderiam reduzir em até 70% as emissões de CO₂ em uma planta de aço integrada, com a possibilidade de modernizar os altos-fornos existentes (Dongke et al., 1988).

As técnicas de separação de CO₂ são fundamentais para os processos de captura e armazenamento de carbono. Dentre as principais tecnologias, destaca-se a absorção química e física, onde o gás contendo CO₂ é passado por um absorvente líquido ou sólido. Na absorção química, os solventes mais utilizados são MEA (monoetanolamina), AMP e KS-1, enquanto na absorção física, processos como Selexol e Rectisol ganham destaque (IPCC, 2005). A regeneração do sorvente, que ocorre após a captura do CO₂,

é realizada por meio de variações de pressão, temperatura ou através de métodos elétricos. Esses ciclos de captura e regeneração permitem a reutilização do sorvente, mas apresentam desafios quanto ao consumo energético e ao tamanho dos equipamentos envolvidos, que devem lidar com grandes volumes de CO₂ processado.

Outra abordagem para a separação de CO₂ é o uso de membranas, que são materiais capazes de permitir a passagem seletiva de gases, baseando-se principalmente na diferença de pressão entre os lados da membrana. Materiais poliméricos, metálicos e cerâmicos são utilizados em sistemas de captura de CO₂ para separar componentes como hidrogênio (H₂) ou oxigênio (O₂) de misturas gasosas. Além disso, tecnologias baseadas em criogenia também desempenham um papel importante, especialmente na separação de CO₂ de outros gases por meio da compressão e resfriamento, sendo amplamente empregadas em operações comerciais, como a separação de oxigênio do ar para combustão *oxy-fuel* (IPCC, 2005). A Figura 2.24 resume as principais técnicas de separação de CO₂ em uso atualmente.

Figura 2.24 – Principais Técnicas de Separação de CO₂



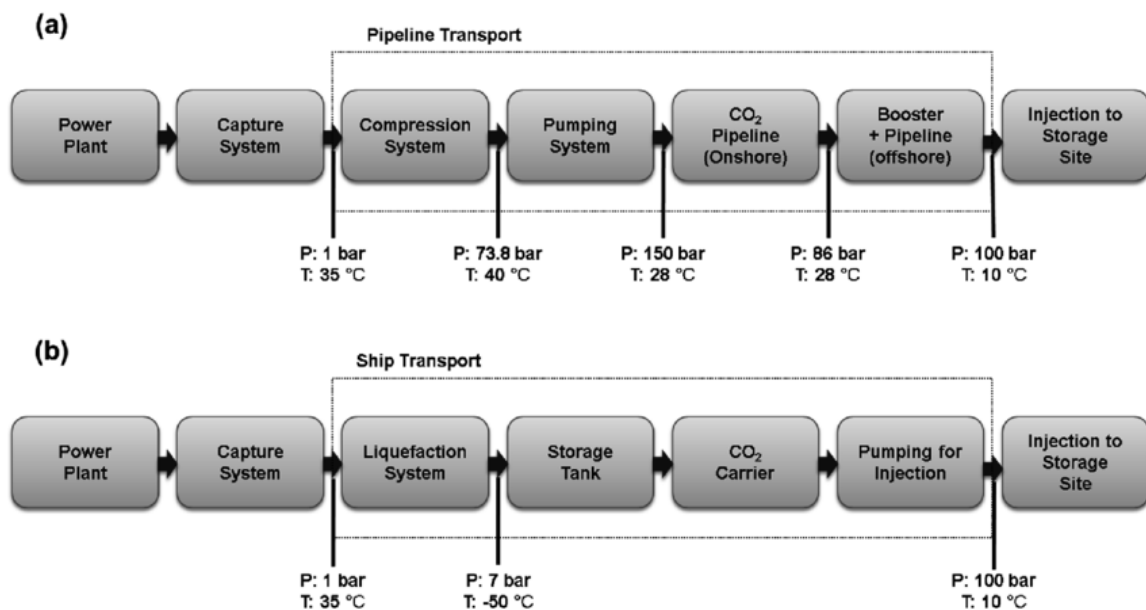
Fonte: SINGH et al., 2020.

2.2.3 Transporte de CO₂

O transporte de dióxido de carbono (CO₂) capturado é uma etapa sensível no processo de captura e armazenamento de carbono, uma vez que o CO₂ pode ser transportado em três estados principais: gasoso, líquido e supercrítico. Para operações comerciais de grande escala, o transporte em estado líquido ou supercrítico é o mais comum, pois permite uma densidade maior, reduzindo o volume necessário e, conseqüentemente, o custo por tonelada transportada (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2004). Tanto dutos quanto navios são amplamente utilizados para esse transporte, cada qual com suas vantagens e desafios técnicos específicos.

A Figura 2.25 apresenta um diagrama de blocos comparando o transporte de CO₂ por duto e por navio. No transporte por duto, o CO₂ é comprimido e bombeado para um sistema de tubulação, enquanto no transporte marítimo, ele é liquefeito e armazenado em tanques antes de ser carregado em navios para o local de injeção.

Figura 2.25 – Diagrama de Blocos do Transporte de CO₂ (duto versus marítimo)



Fonte: SEO; CHANG; KANG; HUH; KANG, 2015.

O transporte por dutos é a opção mais utilizada para movimentar grandes quantidades de CO₂ a longas distâncias. Esse método já é amplamente empregado nos Estados Unidos, com mais de 7.240 km de dutos operacionais concentrados principalmente em regiões de *Enhanced Oil Recovery (EOR)*, como o Texas e o Wyoming (ENERGY FUTURES INITIATIVE, 2022). Um dos principais benefícios desse método é a eficiência em transportar grandes volumes de CO₂ por longas distâncias a custos relativamente baixos.

Tecnicamente, o CO₂ transportado por dutos deve estar em estado supercrítico, o que exige pressões elevadas, normalmente entre 80 e 150 bar (8 a 15 MPa), e temperaturas superiores a 31°C, ponto crítico do CO₂. Nessas condições, o gás se comporta como um fluido com alta densidade, facilitando o transporte eficiente (IPCC, 2005). A necessidade de manter essas condições cria desafios técnicos, uma vez que os sistemas de dutos precisam ser projetados para suportar pressões e temperaturas elevadas de forma contínua. Além disso, qualquer falha no controle da pressão pode resultar em quedas abruptas de temperatura, causando a formação de sólidos (conhecidos como "hidratos"), que podem obstruir o fluxo no duto.

Outro desafio técnico no transporte por dutos é a corrosão causada por impurezas no CO₂ capturado, especialmente se houver a presença de umidade. O CO₂ seco em estado supercrítico não é corrosivo para os aços de carbono-manganês comumente usados em dutos. Entretanto, mesmo pequenas quantidades de água (umidade superior a 60%) podem reagir com contaminantes como SO₂ ou H₂S, formando ácidos corrosivos, como o ácido sulfúrico. Esses ácidos podem corroer os materiais dos dutos, o que exige a remoção prévia de impurezas ou a utilização de materiais resistentes à corrosão, como ligas de aço inoxidável, aumentando os custos operacionais (IPCC, 2005).

O transporte marítimo de CO₂ é uma solução viável para cenários em que a construção de dutos seria tecnicamente inviável ou economicamente proibitiva. O transporte por navios é amplamente utilizado em pequena escala na Europa para CO₂ de qualidade alimentar, com capacidade de cerca de 1.000 toneladas por viagem (GLOBAL CCS INSTITUTE, 2018). No entanto, para o transporte de CO₂ em larga escala, projeta-se o uso de navios com capacidade de 10.000 a 40.000 metros cúbicos,

utilizando tecnologia semelhante à do transporte de gás liquefeito de petróleo (GLP) e gás natural liquefeito (GNL).

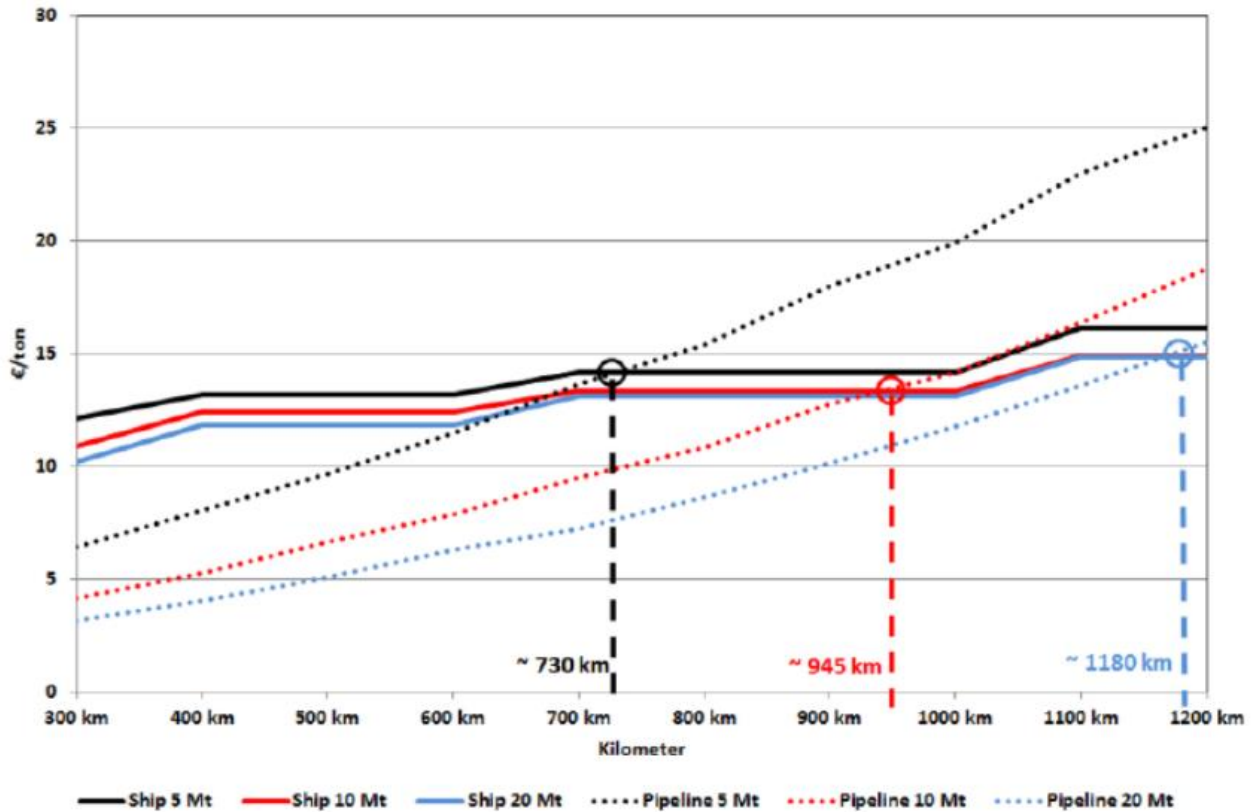
No transporte por navios, o CO₂ geralmente é transportado em estado líquido, o que requer temperaturas de -50°C e pressões moderadas, tipicamente entre 6 a 8 bar, para manter o CO₂ em seu estado líquido (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2004). O controle rigoroso da temperatura e da pressão é fundamental para evitar a vaporização do CO₂ durante o transporte, o que aumentaria significativamente o volume e os custos associados.

Apesar de ser uma solução flexível, o transporte por navios apresenta desafios técnicos específicos. Um dos principais desafios é a demanda de energia necessária para liquefazer o CO₂ antes do transporte e para mantê-lo em temperaturas criogênicas durante a viagem. De acordo com estudos, o transporte por navio exige maior consumo de energia por tonelada de CO₂ transportada em comparação com os dutos, o que se reflete nos custos totais (IEA BIOENERGY: TASK 40, 2020).

Além disso, as condições climáticas adversas podem afetar o transporte marítimo, causando atrasos na entrega, o que pode comprometer a eficiência do sistema. Em termos de custo, o transporte por navio é mais econômico para distâncias curtas e volumes menores. Segundo dados da IEA Bioenergy, para volumes de 5 Mt por ano, o transporte por navios tem custo inicial de cerca de 10 €/ton para distâncias de até 730 km, mas esse custo aumenta consideravelmente com o aumento da distância, chegando a 15 €/ton para distâncias superiores a 1000 km (IEA BIOENERGY: TASK 40, 2020).

A Figura 2.26 apresenta a comparação dos custos de transporte por navio e por duto, em euros por tonelada de CO₂, em função do volume anual de transporte e da distância, para volumes de transporte entre 5 e 20 milhões de toneladas métricas por ano (IEA BIOENERGY: TASK 40, 2020).

Figura 2.26 – Análise comparativa dos custos de transporte por navio e por duto em função da distância até o ponto de injeção [euros por tonelada de CO₂]



Fonte: IEA BIOENERGY: TASK 40, 2020.

O transporte de CO₂ por rodovias e ferrovias é viável apenas para pequenas quantidades e distâncias curtas, sendo utilizado principalmente em projetos piloto. Devido às limitações de capacidade e custos logísticos, essas opções não são adequadas para projetos de larga escala (IEA BIOENERGY: TASK 40, 2020).

2.2.4 Armazenamento de CO₂

O armazenamento de dióxido de carbono (CO₂) abrange três abordagens principais: armazenamento geológico (campos de petróleo e gás, formações salinas

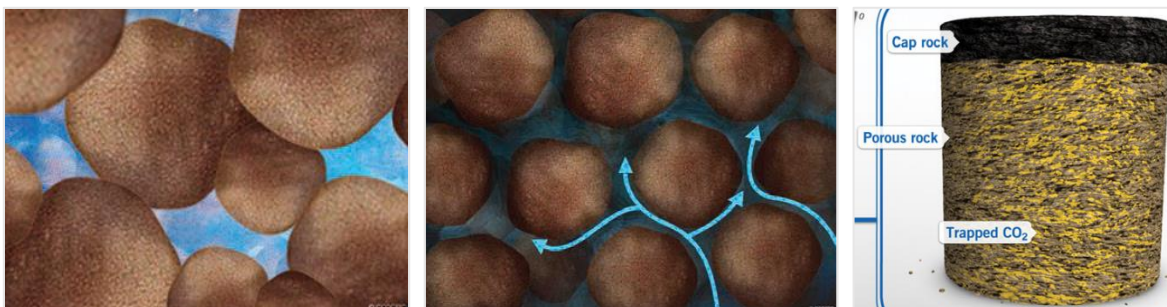
profunda e camadas de carvão), armazenamento em oceanos (injeção direta no oceano ou depositado no fundo do mar) ou carbonatação mineral (IPCC, 2005).

O armazenamento geológico de CO₂ envolve a injeção do dióxido de carbono em formações rochosas a profundidades superiores a 800 metros, a fim de garantir que o CO₂ permaneça em estado fluido denso, também conhecido como "supercrítico". Nesta condição, uma substância está acima de sua temperatura e pressão críticas, adquirindo propriedades intermediárias entre líquido e gás, com alta densidade e baixa viscosidade (MCHUGH; KRUKONIS, 1994).

Uma formação rochosa geralmente é adequada para o armazenamento de CO₂ quando possui as seguintes características físicas: (i) porosidade: possui pequenos espaços milimétricos, ou poros, para armazenar o CO₂; (ii) permeabilidade: os poros na rocha são suficientemente conectados para aceitar a quantidade de CO₂ injetado, permitindo que ele se mova e se espalhe pela formação; e (iii) barreira de confinamento: uma extensa rocha de cobertura impermeável que ajuda a garantir que o CO₂ fique contido permanentemente (GLOBAL CCS INSTITUTE, 2022).

A Figura 2.27 apresenta as características físicas necessárias para o armazenamento geológico de CO₂, incluindo porosidade, permeabilidade e barreira de confinamento.

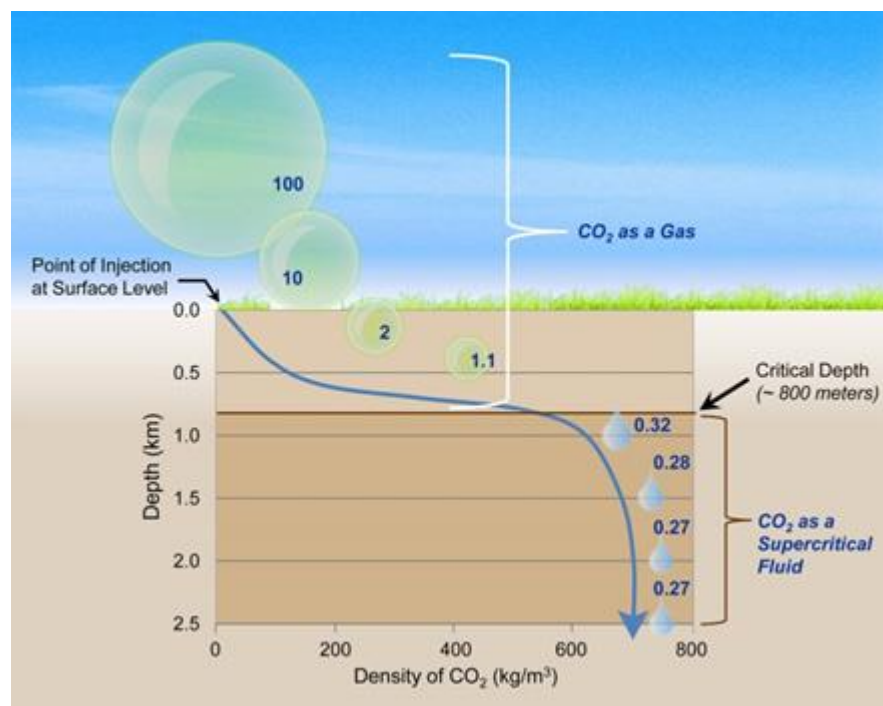
Figura 2.27 – Características físicas para armazenamento geológico de CO₂ (porosidade, permeabilidade e barreira de confinamento)



Fonte: GLOBAL CCS INSTITUTE, 2022.

Na maioria dos casos de injeção de CO₂ em rochas, devido ao aumento da temperatura e pressão com a profundidade, o dióxido de carbono estará em um estado supercrítico, com pressão superior a 7,38 MPa e temperatura acima de 31,1°C. Neste estado, o CO₂ adquire uma densidade semelhante à de um líquido, entre 600 e 800 kg/m³, ocupando, assim, um menor volume de poro, o que leva a um armazenamento mais eficiente (KETZER et al., 2014). A Figura 2.28 ilustra os efeitos da pressão e temperatura na densidade do dióxido de carbono.

Figura 2.28 – Variação da densidade do CO₂ a partir do ponto de injeção



Fonte: NETL, 2020.

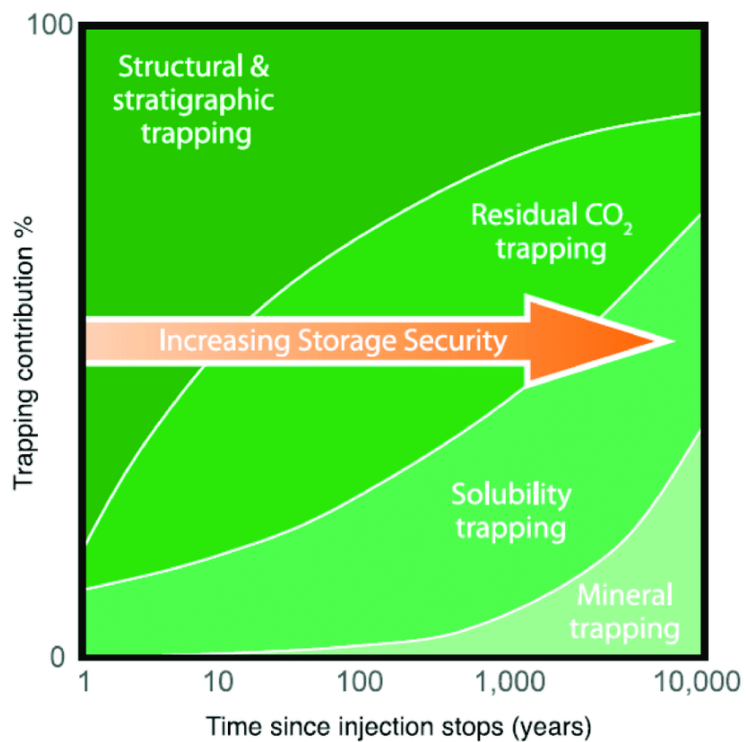
Após a captura, o CO₂ é comprimido até se tornar um fluido quase tão denso quanto a água e, então, é bombeado por um poço até uma formação geológica porosa. As formações subterrâneas são naturalmente preenchidas com fluidos, como óleo, gás ou água salgada, assim, o CO₂ injetado, por ser ligeiramente mais leve que a água

salgada presente, migra para o topo da formação, ficando retido sob a rocha de cobertura impermeável ou rocha selante (trapeamento estrutural).

Com o tempo, parte do CO₂ começa a se dissolver na água salina (trapeamento por solução), outra parte fica presa em poros minúsculos (trapeamento residual) e o restante pode reagir com as rochas do reservatório, formando minerais sólidos (trapeamento mineral), fixando o CO₂ permanentemente e impedindo seu retorno para a atmosfera (GLOBAL CCS INSTITUTE, 2022) (NETL, 2020).

A segurança do armazenamento depende de uma combinação de aprisionamento físico e geoquímico. Com o passar do tempo, o processo físico de aprisionamento residual de CO₂ e os processos geoquímicos de aprisionamento por solubilidade e aprisionamento mineral aumentam (IPCC, 2005). Os diferentes tipos de trapeamento ou aprisionamento de CO₂ no subsolo são ilustrados na Figura 2.29.

Figura 2.29 – Contribuição dos Mecanismos de Aprisionamento de CO₂ ao Longo do Tempo



Fonte: IPCC, 2005.

O sucesso a longo prazo do armazenamento geológico exigirá que o CO₂ injetado permaneça no subsolo por períodos de pelo menos milhares de anos. Alguns estudos argumentam que, para ser eficaz como uma ferramenta de mitigação das mudanças climáticas, o CO₂ deve ser retido com segurança por 10.000 anos, com uma taxa de vazamento inferior a 0,01% por ano do total de CO₂ injetado (DELERCE; MARIENI; OELKERS, 2021).

A injeção de CO₂ pode ser realizada, principalmente, em campos de petróleo e gás maduros ou esgotados, embora não exclusivamente. Campos de petróleo maduros são aqueles em que a produção de hidrocarbonetos está em suas etapas finais, enquanto os campos esgotados são aqueles em que resta apenas óleo residual (preso nos poros da rocha reservatório). Essa operação pode aumentar a produção de hidrocarbonetos nesses campos, resultando em benefícios econômicos. Além disso, esses projetos aproveitam os dados geológicos adquiridos durante a exploração e desenvolvimento, o que aumenta a previsibilidade dos estudos (KETZER et al., 2014).

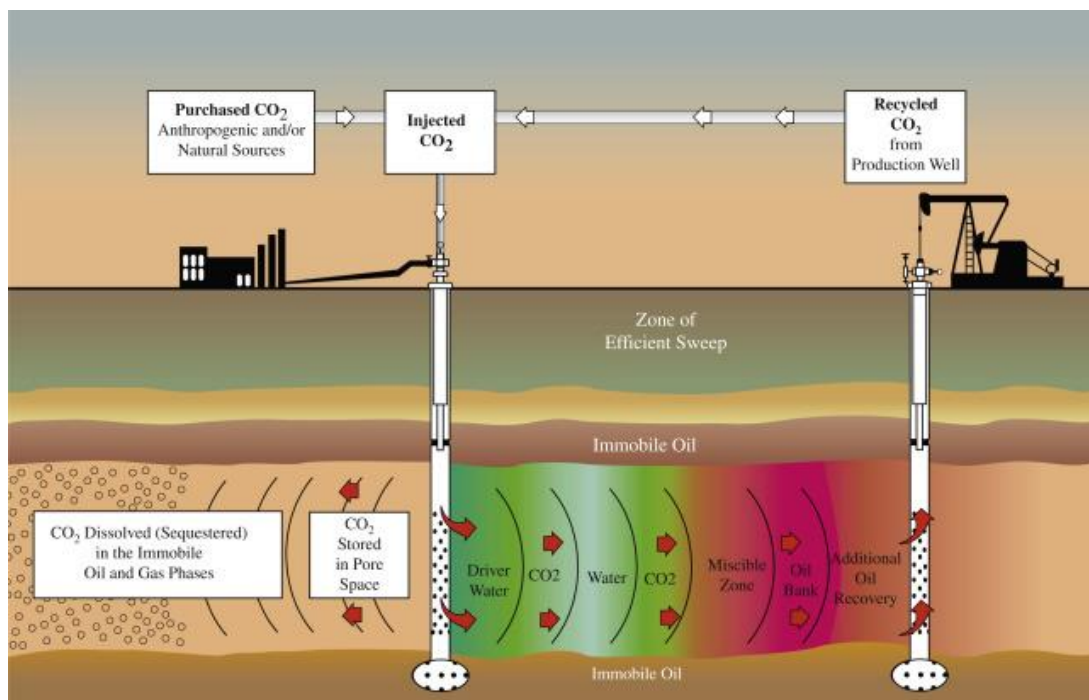
Por várias décadas, o CO₂ tem sido utilizado como fluido de injeção para recuperação adicional de petróleo e gás. Em mais de 100 (cem) projetos em todo o mundo, o CO₂ injetado foi usado com sucesso para recuperar petróleo adicional, dado que reservas significativas podem permanecer nos reservatórios após a recuperação convencional. Essa técnica é conhecida como Recuperação Aprimorada de Petróleo (*EOR - Enhanced Oil Recovery*). O Brasil possui projetos de EOR desenvolvidos na Bacia do Recôncavo (KETZER et al., 2014).

A recuperação aprimorada de petróleo (*EOR - Enhanced Oil Recovery*) por meio de injeção de CO₂ oferece potencial ganho econômico com a produção adicional de petróleo. Do petróleo original presente, geralmente 5% a 40% é recuperado pela produção primária convencional. Uma recuperação adicional de 10% a 20% é obtida pela recuperação secundária com injeção de água. Diversos agentes miscíveis, incluindo o CO₂, têm sido usados para recuperação aprimorada (terciária) de petróleo, com uma recuperação incremental de 7% a 23% (média de 13,2%) do petróleo original presente (IPCC, 2005).

Nessas aplicações, mais de 50% e até 67% do CO₂ injetado retorna com o petróleo produzido e geralmente é separado e reinjetado no reservatório para minimizar os custos operacionais. O restante é aprisionado no reservatório de petróleo (IPCC, 2005).

A Figura 2.30 ilustra os mecanismos de armazenamento geológico de CO₂, mostrando como o gás injetado se desloca por zonas porosas na formação subterrânea, ocupando espaços deixados por óleo, água ou gás imobilizados. O CO₂ injetado se distribui na chamada "zona de varredura eficiente", onde é aprisionado e dissolvido em fluidos ou fica retido em espaços porosos, enquanto parte pode ser reciclada para produção adicional. Essa técnica permite o armazenamento seguro e a potencial recuperação de hidrocarbonetos.

Figura 2.30 – Mecanismos de armazenamento geológico de CO₂



Fonte: ADVANCED RESOURCES INTERNATIONAL, 1999.

As Formações Salinas Profundas (DSF ou *Deep Saline Formations*) são formações rochosas com espaços porosos preenchidos por água subterrânea altamente

salina, também conhecida como salmoura, que se estendem por grandes volumes no subsolo profundo. O armazenamento de carbono, para esses casos, concentra-se em formações que contêm salmoura com níveis de sólidos totais dissolvidos superiores a 10.000 ppm ou 10.000 mg/l, a fim de proteger os aquíferos de água potável subterrâneos (KETZER et al., 2014).

Para efeito de comparação, a água potável no Brasil tem um limite máximo de 500 mg/l, enquanto a água do mar possui uma salinidade média de 34.600 mg/l. Em algumas DSF, a salinidade da salmoura pode chegar a 300.000 mg/l. Essas questões sobre a salinidade são menos relevantes em cenários de armazenamento offshore, onde a água subterrânea é improvável de ser utilizada. Estudos mostram que as formações salinas possuem o maior potencial de volume para o armazenamento de dióxido de carbono CO₂ em todo o mundo (KETZER et al., 2014) (NETL, 2020).

As camadas de carvão são outra opção promissora para o sequestro geológico de CO₂ devido ao benefício adicional que é a produção extra de metano. O carvão é uma rocha composta principalmente por material orgânico preservado que pode aprisionar aproximadamente duas vezes mais CO₂ do que metano, o qual é comumente encontrado preso nas camadas de carvão por milhões de anos. O metano nas camadas de carvão é explorado como recurso energético em países como Austrália, China e Estados Unidos, em uma atividade chamada recuperação de metano em camadas de carvão (CBM, do inglês *Coal-bed Methane Recovery*) (KETZER et al., 2014).

Devido à diferença na capacidade de adsorção do carvão entre dióxido de carbono e metano, o CO₂ gasoso injetado através de poços fluirá pelo sistema de *cleats* (pequenas fraturas) do carvão, difundirá na matriz do carvão e será adsorvido nas superfícies dos microporos, liberando gases com menor afinidade pelo carvão, ou seja, metano, em um processo chamado recuperação avançada de metano em camadas de carvão (ECBM, do inglês *Enhanced Coal-bed Methane Recovery*). A técnica de ECBM tem o potencial de recuperar cerca de 90% do metano presente na formação rochosa, em comparação com a recuperação convencional de apenas 50% pela depleção de pressão do reservatório (IPCC, 2005).

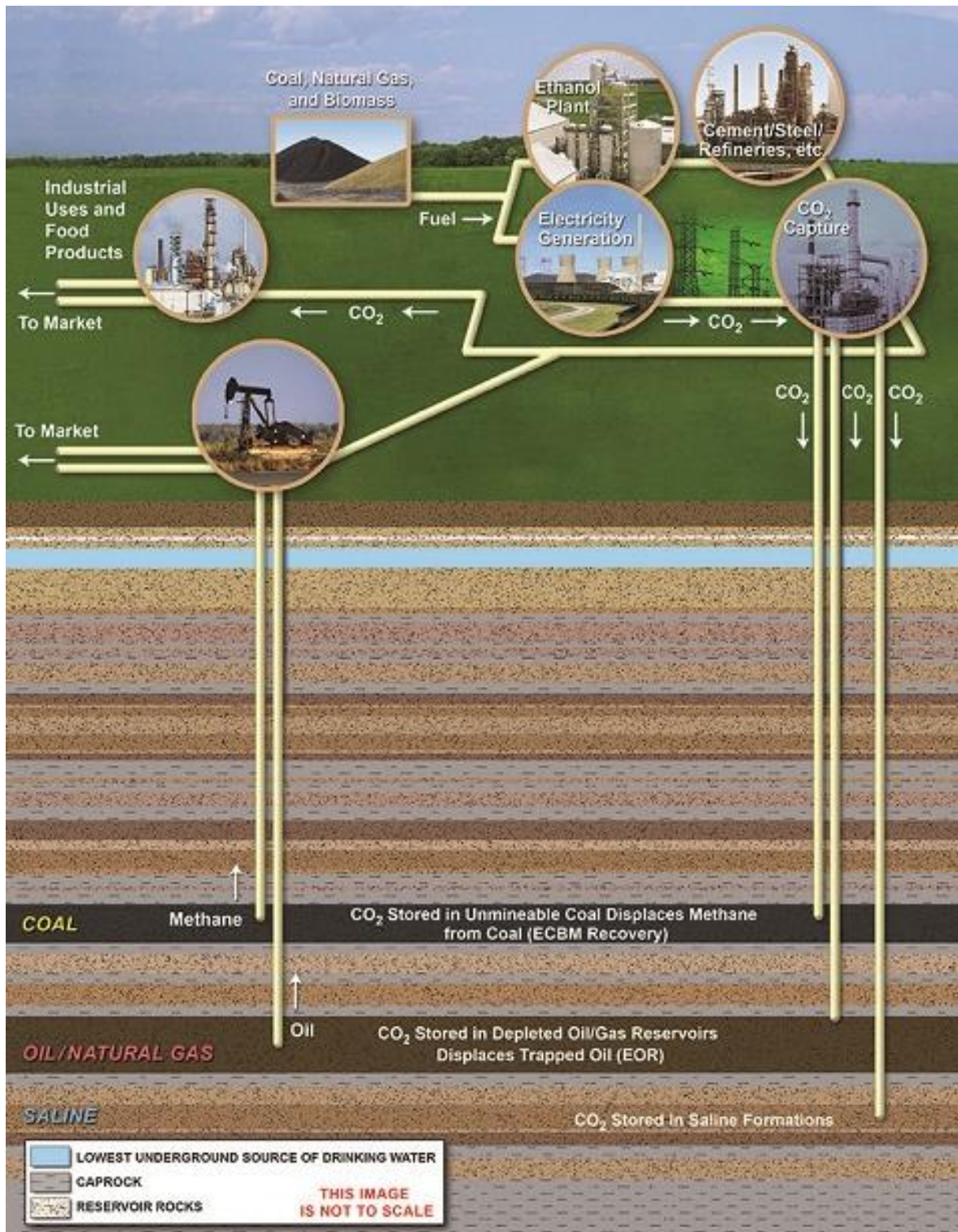
As camadas de carvão geralmente se encontram a profundidades entre 300 e 1.500 metros. Nessas profundidades, as condições de pressão e temperatura são adequadas para garantir que o CO₂ permaneça armazenado de forma segura, favorecendo as reações químicas necessárias. A recuperação de metano em camadas de carvão é frequentemente realizada a uma profundidade média de 1.000 metros (RATHMANN, org., 2017).

O dióxido de carbono atua como um "plastificante" para o carvão, todavia, este efeito de amolecimento do carvão pode afetar negativamente a permeabilidade que permitiria a injeção de CO₂. Além disso, o carvão incha à medida que o CO₂ é adsorvido e/ou absorvido, o que reduz a permeabilidade e a injetividade de modo considerável, levando ao aumento das pressões de injeção. Alguns estudos sugerem que o CO₂ injetado pode reagir com o carvão, destacando ainda mais a dificuldade de injetar CO₂ em carvões de baixa permeabilidade (IPCC, 2005). Abaixo são listados os principais estudos que sugerem que o CO₂ injetado pode reagir com o carvão:

1. **Puri, R., & Yee, D. (1990)**: estudaram a adsorção de CO₂ e seu impacto nas propriedades do carvão, incluindo o inchaço e a diminuição da permeabilidade.
2. **Reeves, S., & Oudinot, A. (2004)**: pesquisaram a viabilidade da injeção de CO₂ em camadas de carvão e o impacto do inchaço no transporte de gás, considerando a baixa permeabilidade em alguns tipos de carvão.
3. **White, C. M., Smith, D. H., Jones, K. L., Goodman, A. L., Jikich, S. A., LaCount, R. B., & Ozdemir, E. (2005)**: analisaram as interações químicas entre CO₂ e carvão, com foco na dificuldade de injeção em camadas de carvão de baixa permeabilidade.
4. **Gunter, W. D., & Gentzis, T. (1996)**: abordaram a reatividade do CO₂ com carvão e os desafios associados à injeção, especialmente em camadas com baixa capacidade de adsorção.

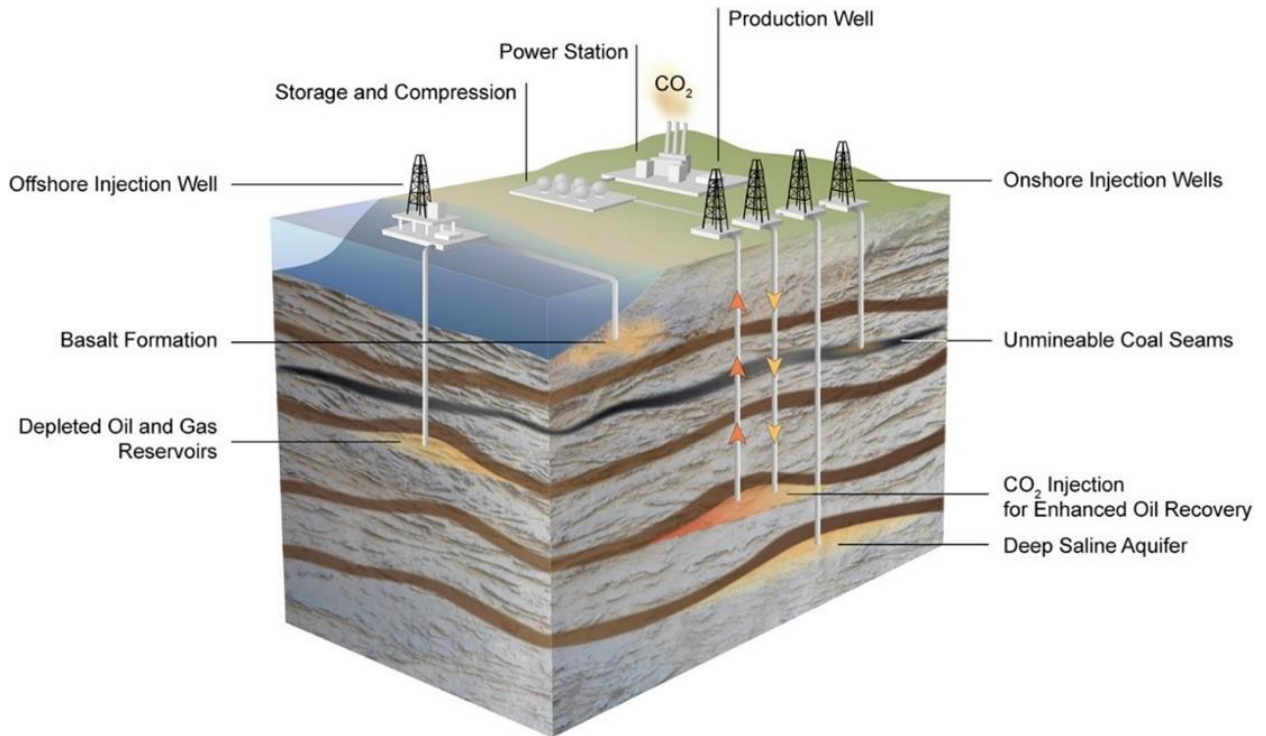
As Figuras 2.31 e 2.32 ilustram as características e os mecanismos de armazenamento geológico de CO₂ em diferentes formações subterrâneas, como camadas de carvão, reservatórios de petróleo e gás esgotados, e aquíferos salinos profundos, destacando opções *onshore* e *offshore* para a injeção e retenção do CO₂.

Figura 2.31 – Características de diferentes complexos de armazenamento de carbono



Fonte: NETL, 2020.

Figura 2.32 – Mecanismos de armazenamento geológico de CO₂



Fonte: XCALIBUR SMART MAPPING, 2023.

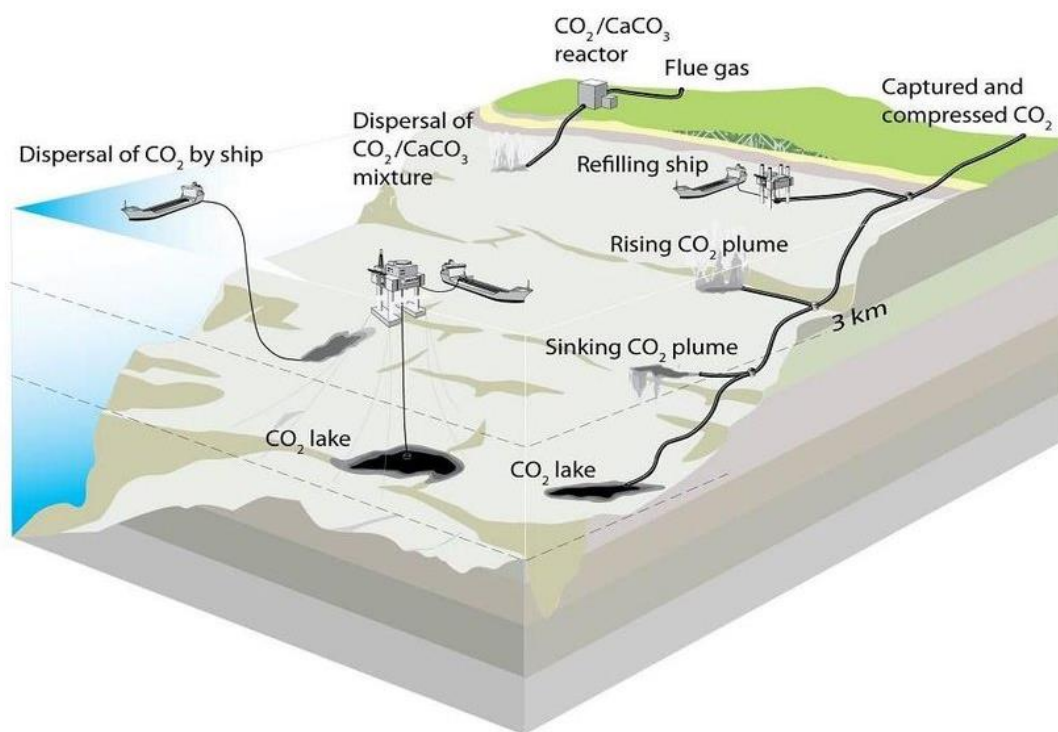
Na injeção direta de CO₂ nos oceanos ou depósito no fundo do mar, o armazenamento ocorre em grandes profundidades, entre 1.000 e 3.000 metros, onde a camada de água exerce pressão suficiente para manter o CO₂ injetado isolado do contato com a superfície por longos períodos, formando um lago de CO₂. Essa estratégia visa retardar o retorno do gás à atmosfera, potencialmente mitigando o aumento das concentrações atmosféricas de CO₂ (RATHMANN, org., 2017).

No entanto, os impactos ambientais dessa prática ainda são incertos. A injeção de CO₂ altera a química da água nas regiões próximas ao ponto de liberação, com potenciais efeitos adversos para os ecossistemas marinhos. Estudos indicam que a exposição a níveis elevados de CO₂ pode reduzir as taxas de calcificação, reprodução, crescimento, fornecimento de oxigênio circulatório e mobilidade dos organismos, além de aumentar a

mortalidade ao longo do tempo. Isso destaca a necessidade de mais pesquisas para compreender melhor os riscos a longo prazo e desenvolver práticas seguras de armazenamento oceânico (IPCC, 2005).

A Figura 2.33 apresenta diferentes estratégias de armazenamento oceânico de CO_2 , incluindo dispersão por navios e tubulações, formação de plumas e lagos de CO_2 no fundo do mar, além do uso de CaCO_3 para reduzir a acidez em águas profundas.

Figura 2.33 – Estratégias de Armazenamento Oceânico de CO_2

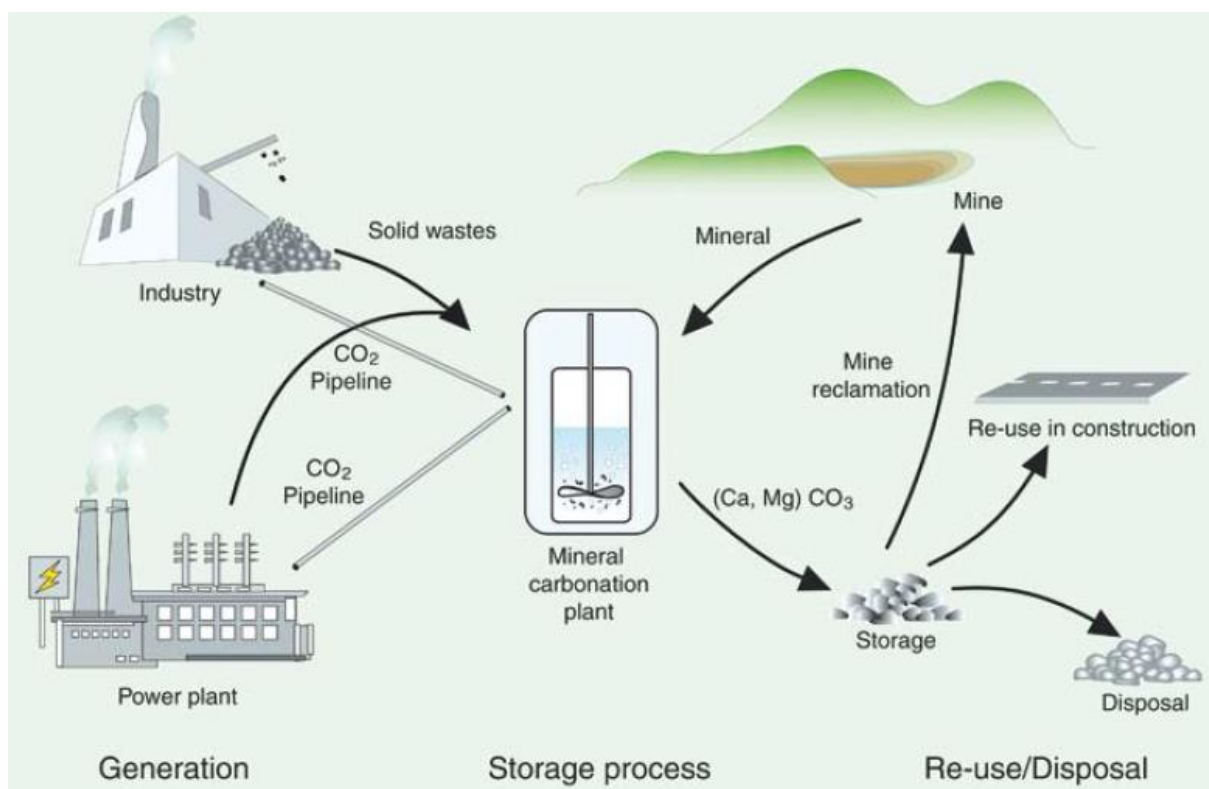


Fonte: IPCC, 2005.

A carbonatação mineral (Figura 2.34) é uma técnica de armazenamento de dióxido de carbono bastante diferente, uma vez que envolve a reação do CO_2 capturado com materiais ricos em óxidos metálicos, formando carbonatos estáveis. Essa abordagem fixa o CO_2 em uma forma sólida permanente, imitando o intemperismo natural das rochas, e pode ser realizada *ex-situ*, em instalações industriais, ou *in-situ*, em formações

geológicas. Embora ofereça potencial para armazenamento a longo prazo, a tecnologia ainda está em estágio inicial de desenvolvimento, enfrentando desafios de viabilidade devido ao alto consumo de energia, aos custos elevados e aos possíveis impactos, cujas implicações completas ainda não são totalmente conhecidas.

Figura 2.34 – Processo de carbonatação mineral de rochas de silicato ou resíduos industriais



Fonte: IPCC, 2005.

De acordo com a recente atualização do Catálogo de Recursos de Armazenamento de CO_2 (CSRC, do inglês *CO₂ Storage Resource Catalogue*), até o mês de agosto de 2024, o total de reservas globais para armazenamento é de 14.060 Gt. Deste total, 13.434 Gt são classificados como Não Descobertos, 625 Gt como Subcomerciais e os 1,7 Gt restantes como Comerciais. Os aquíferos salinos dominam o inventário de recursos (13.485 Gt, 95,9%), principalmente devido à inclusão de atlas e estudos em escala nacional e regional. Campos de petróleo e gás contribuem com

apenas 4% (575 Gt, 3%). Dos cinquenta e quatro países avaliados, apenas quatro (Austrália, Canadá, Noruega e EUA) incluem projetos comerciais (HALLIBURTON COMPANY, 2024).

A Figura 2.35 oferece uma visão geral dos recursos globais de armazenamento de CO₂, refletindo o grande potencial de armazenamento ainda disponível, mas subutilizado, além de apontar a necessidade de investimentos em exploração para ampliar as opções de armazenamento efetivo de CO₂.

Figura 2.35 – Resumo dos recursos de armazenamento de CO₂ em julho de 2024

Classification	CO ₂ storage resource (Gt)	
	Project and no project	Project specified only
Stored	0.05194	0.05124
Capacity	1.736	1.426
Sub-Commercial	624.777	67.385
Undiscovered	13433.721	54.618
Aggregated*	14060.286	123.481

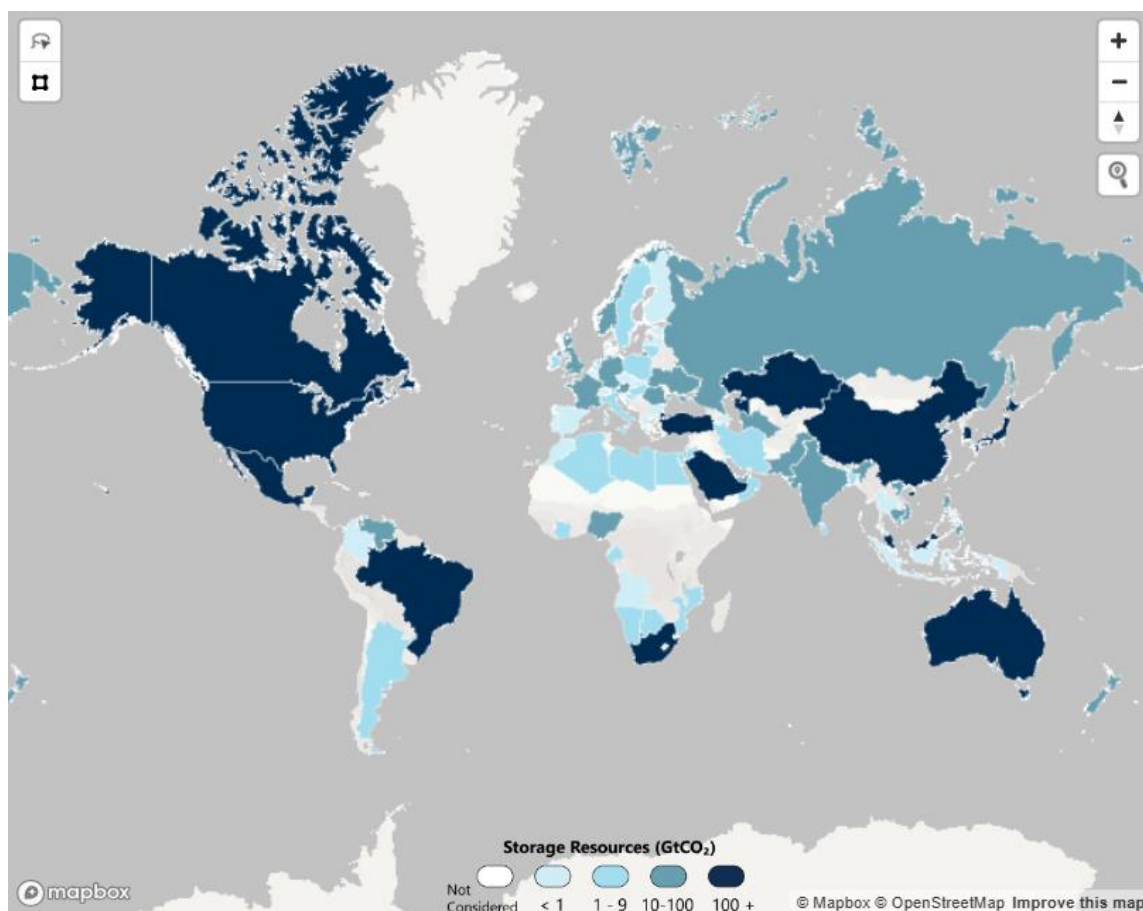
Fonte: HALLIBURTON COMPANY, 2024.

Com relação à classificação utilizada, destaca-se que “*Stored*” equivale à quantidade acumulada de CO₂ injetado e armazenado, ou seja, recursos de armazenamento descobertos que foram explorados até a data do levantamento. O grupo “*Capacity*” refere-se aos recursos totais de armazenamento que se espera serem comercialmente acessíveis a partir de uma data específica. Os recursos classificados como “*Sub-Commercial*” são aqueles que embora tenham sido identificados e possuam potencial para armazenamento de CO₂, ainda não são considerados suficientemente maduros para desenvolvimento comercial, devido a uma ou mais contingências. Por fim, a porção “*Undiscovered*” contempla recursos potenciais que não foram caracterizados por meio de testes, amostragens ou perfurações, e, portanto, permanecem não comprovados.

Importante citar que o CSRC incluiu o armazenamento de CO₂ em aquíferos salinos e campos de petróleo e gás esgotados ou parcialmente esgotados, mas excluem a recuperação aprimorada de petróleo (*EOR - Enhanced Oil Recovery*) com CO₂ e outras opções de armazenamento, como carvão não minerável, mineralização e folhelhos ricos em matéria orgânica (HALLIBURTON COMPANY, 2024).

De modo complementar, a Figura 2.36 apresenta um mapa, elaborado e atualizado em tempo real pelo Global CCS Institute, com as estimativas de armazenamento de CO₂.

Figura 2.36 – Mapa com estimativas de armazenamento de CO₂ (formações salinas profundas, campos de petróleo e gás esgotados e EOR)



Fonte: GLOBAL CCS INSTITUTE, 2024.

Conforme mapa elaborado pela *Global CCS Institute*, a capacidade global estimada de armazenamento de CO₂ apresenta ampla disponibilidade, principalmente nos países responsáveis pelas maiores emissões: China, EUA, Índia, União Europeia e Rússia.

2.2.5 Utilização do CO₂ Capturado

A utilização de CO₂, ou "reciclagem de carbono", refere-se ao uso do CO₂ como insumo para uma variedade de produtos e serviços. As aplicações potenciais para o uso do CO₂ incluem o uso direto, onde o CO₂ não é quimicamente alterado, e a transformação do CO₂ em um produto útil através de conversão (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2020).

A captura e utilização de carbono (CCU, do inglês *Carbon Capture and Utilisation*) é um conceito frequentemente discutido em conjunto com captura e armazenamento de carbono (CCS, do inglês *Carbon Capture and Storage*), uma vez que as cadeias de suprimentos e os processos de CCS e CCU se sobrepõem parcialmente. Todavia, existem diferenças substanciais em relação ao potencial de ambas para a mitigação das mudanças climáticas.

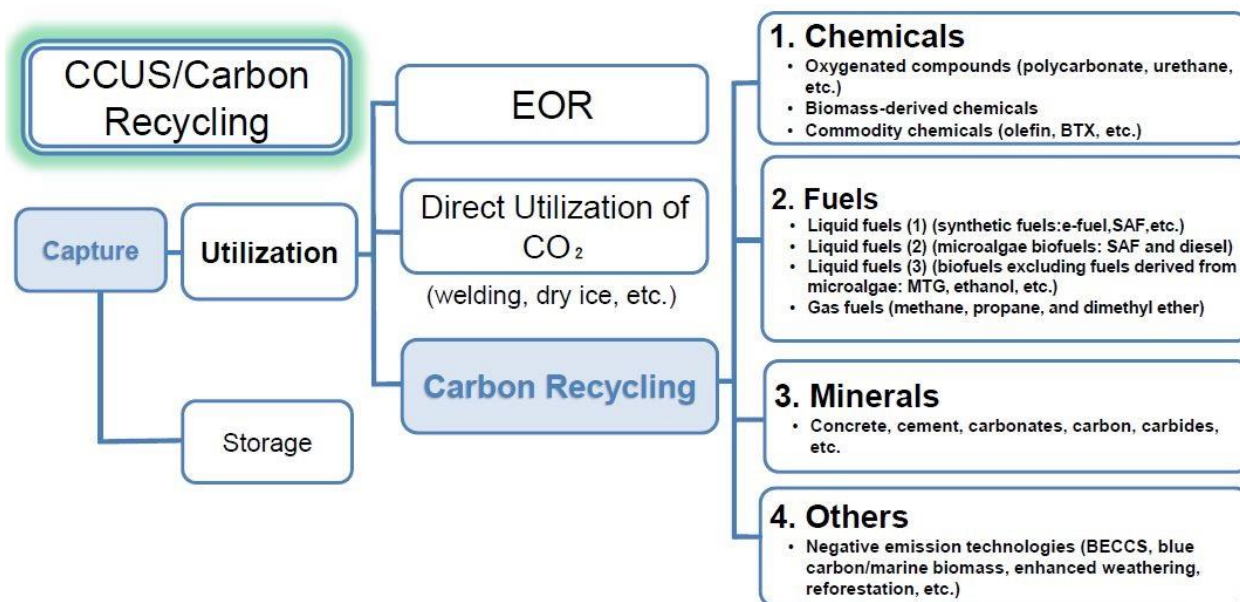
Em muitas aplicações de CCU, o CO₂ é liberado de volta na atmosfera em um período relativamente curto, limitando assim sua utilidade como medida de mitigação climática em comparação com a CCS. Enquanto o objetivo final da CCS biogênica é criar emissões líquidas negativas, o foco principal da BECCU (*Bioenergy with Carbon Capture and Utilisation*) é aumentar a eficiência de recursos e substituir combustíveis fósseis (IEA BIOENERGY: TASK 40, 2020).

Atualmente, cerca de 230 milhões de toneladas de CO₂ são usadas globalmente a cada ano. O maior consumidor é a indústria de fertilizantes, que utiliza 125 milhões de toneladas por ano na fabricação de ureia, seguida pela indústria de petróleo e gás, que consome entre 70 e 80 milhões de toneladas por ano para recuperação avançada de petróleo. Outras aplicações comerciais do CO₂ incluem a produção de alimentos e

bebidas, refrigeração, tratamento de água e uso em estufas para estimular o crescimento de plantas (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2020).

As rotas de CCU podem ser divididas em três categorias: utilização física, material e energética, conforme Figura 2.37. A utilização física inclui o uso direto de CO₂ na forma líquida ou gasosa, por exemplo, na produção de bebidas carbonatadas ou em estufas. A recuperação avançada de petróleo (EOR) ou de gás (EGR) também se enquadram nessa categoria de CCU, com o CO₂ sendo usado como fluido para extrair recursos fósseis adicionais. A utilização material envolve vários usos do CO₂ como bloco de construção químico que pode ser combinado com hidrogênio (H₂) para formar hidrocarbonetos sintéticos, que podem ser transformados em produtos químicos e plásticos. Por fim, a utilização energética também se baseia no uso do CO₂ como bloco de construção químico, mas para a produção de combustíveis hidrocarbonetos sintéticos.

Figura 2.37 – Rotas e aplicações para a utilização e reciclagem do CO₂



Fonte: METI JAPAN, 2021.

Tanto as abordagens de utilização material quanto energética do CO₂ dependem do hidrogênio, que geralmente se presume ser produzido via eletrólise usando eletricidade renovável. Por essa razão, essas duas rotas de CCU também são denominadas como *power-to-gas* (PtG), *power-to-liquid* (PtL) ou, genericamente, como *power-to-x* (PtX). O CO₂ necessário para todas essas aplicações pode ser obtido diretamente do ar (captura direta), de plantas fósseis ou de bioenergia, bem como de fontes industriais (como as indústrias de aço ou cimento). A vantagem de usar fontes de CO₂ biogênico é que existem tecnologias de captura já maduras e amplamente utilizadas, por exemplo, para a reforma de biogás ou produção de bioetanol. Esses processos também produzem fluxos relativamente puros de CO₂, o que dispensa procedimentos caros de purificação.

3. ESTUDO CONCEITUAL E EXPLORATÓRIO DO BECCS NA INDÚSTRIA DE CELULOSE BRASILEIRA

Nesta seção, desenvolve-se uma análise qualitativa e exploratória dos principais fatores que podem influenciar a implementação de BECCS na indústria de celulose nacional. Considerando o caráter inovador e ainda incipiente do tema no Brasil, optou-se por uma abordagem que prioriza a identificação e compreensão das barreiras e perspectivas para o avanço dessa tecnologia no setor.

A análise inicia-se pelas questões regulatórias e políticas, abordando o arcabouço legal existente ou em discussão diretamente relacionado ao assunto. Em seguida, são discutidos os aspectos técnicos e econômicos, como capacidade de armazenamento, infraestrutura de transporte, principais custos e prazos associados à implantação e operação, suporte financeiro e subsídios e nível de aceitação social, os quais representam atualmente desafios centrais para a viabilização dessa tecnologia no setor.

Por fim, a seção apresenta as mais recentes atualizações sobre o projeto de BECCS mais avançado no mundo na indústria de celulose, o *Rocky Mountain Carbon Project*, localizado na cidade de Hinton, Canadá. Esse exemplo proporciona uma visão concreta sobre a implementação do BECCS, ilustrando como as barreiras e perspectivas analisadas se manifestam na prática.

3.1 Regulação e Políticas Nacionais

A regulação e as políticas nacionais são fundamentais para viabilizar tecnologias de captura e armazenamento de carbono. Essas tecnologias, vistas como essenciais para o cumprimento das metas climáticas globais, dependem de um conjunto sólido de leis e regulamentações que promovam um ambiente favorável a investimentos e à implementação segura. Em países como Estados Unidos, Canadá, Reino Unido, Noruega e China, marcos regulatórios já robustos incentivam parcerias público-privadas

e oferecem incentivos financeiros, proporcionando a segurança jurídica necessária para expandir o uso de CCS.

No Brasil, o cenário regulatório para CCS está em fase de desenvolvimento, com iniciativas promissoras que podem posicionar o país como um ator relevante no setor. Apesar de avanços como a Lei dos Combustíveis do Futuro e a definição da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) como reguladora, o país ainda carece de um arcabouço mais completo, que facilite o acesso a investimentos e reduza as incertezas jurídicas, especialmente se comparado aos países líderes em CCS.

Essas iniciativas nacionais representam passos iniciais, mas há oportunidades para o Brasil alinhar-se aos padrões internacionais e fortalecer a sua competitividade no setor. A seguir, são apresentadas as principais regulamentações e políticas nacionais em vigor, bem como uma breve análise de como cada uma delas contribui para o desenvolvimento de CCS no contexto brasileiro.

#1. Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC)³ - Lei nº 12.187/2009

- **Objetivos:** compatibilizar o desenvolvimento econômico com a proteção climática, promovendo a redução de emissões de GEE, o fortalecimento de sumidouros e medidas de adaptação climática no Brasil.
- **Instrumentos:** Plano Nacional sobre Mudança do Clima e Fundo Nacional sobre Mudança do Clima, Mercado Brasileiro de Redução de Emissões (MBRE), Linhas de crédito e financiamento específicos.
- **Compromisso de Redução Voluntária:** o Brasil assumiu compromisso voluntário de reduzir suas emissões entre 36,1% e 38,9% até 2020, com base nas emissões projetadas.
- **Setores Prioritários para Mitigação:** planos setoriais com metas gradativas de redução de emissões antrópicas deverão ser estabelecidos para os setores de energia elétrica (geração e distribuição), transporte, indústria de transformação

³ Link para consulta: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/l12187.htm

e de bens de consumos duráveis, indústrias químicas fina e de base, papel e celulose, mineração, construção civil, serviços de saúde e agropecuária.

- Status: em atualização para alinhamento com o Acordo de Paris e elaboração do novo Plano Clima.

#2. Plano Nacional sobre Mudança do Clima⁴ – 2009

- Objetivos: o plano complementa a PNMC, definindo ações e medidas setoriais para a transição para uma economia de baixo carbono.
- Compromissos e Ações: o plano fomenta diferentes ações como aumentar a eficiência energética, expandir a participação de fontes renováveis na matriz elétrica, aumentar a participação de biocombustíveis na matriz de transportes nacional, reduzir a taxa de desmatamento, eliminar a perda líquida da área de cobertura florestal no Brasil, fortalecer ações intersetoriais voltadas para redução das vulnerabilidades das populações e fomentar pesquisas científicas que ajudem na adaptação e mitigação de impactos climáticos.
- Estratégia de Implantação: o plano foi dividido em duas fases. Uma primeira fase com foco em organizar ações em curso, fortalecer medidas existentes e identificar oportunidades. Em sua fase posterior, previu-se a criação de mecanismos de avaliação do desempenho das ações em curso e definição de instrumentos complementares, incluindo pactos com os estados da Federação.
- Status: parcialmente implementado, com monitoramento e atualização insuficientes, exigindo revisão para alinhamento com metas climáticas atuais.

#3. Projeto de Lei nº 2.148/2015 - Marco Legal do Mercado de Carbono⁵

- Objetivos: este projeto cria o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE), estabelecendo limites para emissões e regulamentando a compra e venda de créditos de carbono.

⁴ Link para consulta: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/l12187.htm

⁵ Link para consulta: https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/prop_mostrarintegra?codteor=2203893

- Redução Tributária para Produtos de Baixo Carbono: O projeto prevê redução de alíquotas de IPI, PIS/Pasep e Cofins para produtos que demonstram redução na intensidade de carbono.
- Critérios de Redução de Emissões: A redução tributária é escalonada conforme a empresa atinge determinadas metas de redução de intensidade de carbono, que são verificadas a partir de inventários de emissões diretas de Gases de Efeito Estufa (escopo 1) com base no *GHG Protocol* brasileiro. As reduções variam de 10% a 50%, correspondendo a benefícios fiscais de 20% a 100% sobre os tributos para períodos que variam entre dois e dez anos.
- Estabelecimento de Mercado Regulado de Créditos: o Mercado Brasileiro de Redução de Emissões (MBRE) é estabelecido como um mercado formal para a transação de créditos de carbono, com operações em bolsas de mercadorias e futuros, sob supervisão da Comissão de Valores Mobiliários (CVM). Esse mercado possibilita que empresas possam cumprir suas obrigações de compensação adquirindo créditos de outras empresas que reduziram suas emissões.
- Sistema de Limite e Monitoramento de Emissões: O PL 2.148/2015 implementa um sistema "*cap and trade*" para limitar emissões de GEE. Empresas que emitem entre 10 mil e 25 mil tCO₂e devem monitorar e reportar suas emissões, enquanto aquelas acima de 25 mil tCO₂e enviam relatórios anuais de conciliação.
- Status: embora tenha sido protocolado em 2015, ou seja, a nove anos atrás, o projeto de lei foi aprovado pela Câmara dos Deputados somente em dezembro de 2023 e aguarda análise e aprovação pelo Senado Federal.
- Status: está em tramitação no Senado como PL 182/2024, aguardando apreciação pelas comissões pertinentes e posterior votação em plenário.

#4. Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio)⁶ – 2017

- Objetivos: apoiar o compromisso do Brasil com o Acordo de Paris e reduzir emissões de gases de efeito estufa (GEE) ao longo do ciclo de vida dos

⁶ Link para consulta: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2015-2018/2017/Lei/L13576.htm

biocombustíveis (produção, na comercialização e no uso), assegurando a eficiência energética e incentivando o uso sustentável na matriz energética.

- Instrumentos: metas de redução de emissões na matriz de combustíveis, Créditos de Descarbonização (CBIOS) emitidos com base na eficiência ambiental dos biocombustíveis, Certificação de Biocombustíveis, adições compulsórias de biocombustíveis aos combustíveis fósseis e incentivos fiscais, financeiros e creditícios.
- Metas de Descarbonização e Penalidades: distribuidores de combustíveis precisam atingir metas de descarbonização proporcionais à participação de mercado, ou enfrentam penalidades que podem variar entre R\$ 100.000,00 (cem mil reais) e R\$ 50.000.000,00 (cinquenta milhões de reais).
- Bônus de Emissão Negativa: prevê um bônus de até 20% (vinte por cento) sobre o valor da Nota de Eficiência Energético-Ambiental para produtores que provem emissão negativa de GEE em comparação ao substituto fóssil.
- Status: política ativa, com metas de descarbonização atualizadas e em plena execução.

#5. Programa Nacional de Crescimento Verde (PNCV)⁷ - Decreto nº 10.846/2021

- Objetivos: instituição do Programa Nacional de Crescimento Verde (PNCV) que visa promover um crescimento econômico sustentável, alinhando conservação ambiental e redução de emissões de gases de efeito estufa com geração de empregos verdes.
- Eixos de atuação: incentivos econômicos e financeiros, transformação institucional, priorização de programas, projetos e ações verdes, e pesquisa e desenvolvimento (P&D).
- Financiamento e Investimentos: com o PNCV foram disponibilizados R\$ 400 bilhões em linhas de crédito nacionais e internacionais para áreas como conservação florestal, energia renovável, saneamento, ecoturismo e mobilidade urbana.

⁷ Link para consulta: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/decreto/d10846.htm

- Status: revogado pelo Decreto nº 11.550/2023 (criação do Comitê Interministerial sobre Mudança do Clima).

#6. Decreto nº 11.075/2022 - Sistema Nacional de Redução de Emissões de GEE⁸

- Objetivos: estabelecer procedimentos para a elaboração dos Planos Setoriais de Mitigação das Mudanças Climáticas e instituir o Sistema Nacional de Redução de Emissões de Gases de Efeito Estufa (Sinare).
- Planos Setoriais de Mitigação das Mudanças Climáticas: definiu diretrizes para a criação de planos setoriais visando a redução gradativa das emissões de gases de efeito estufa.
- Sistema Nacional de Redução de Emissões de Gases de Efeito Estufa (Sinare): instituiu o Sinare como central única de registro de emissões, remoções, reduções e compensações de gases de efeito estufa.
- Créditos de Carbono e de Metano: introduziu os conceitos de crédito de carbono e crédito de metano como ativos financeiros, ambientais e transferíveis.
- Unidade de Estoque de Carbono: definiu a unidade de estoque de carbono como ativo financeiro representativo da manutenção ou estocagem de uma tonelada de dióxido de carbono equivalente.
- Registro de Pegada de Carbono: previu a possibilidade de registro da pegada de carbono de produtos, processos e atividades, além do carbono de vegetação nativa, no solo e carbono azul, contemplando diversos setores, incluindo o agronegócio.
- Status: revogado pelo Decreto nº 11.550/2023 (criação do Comitê Interministerial sobre Mudança do Clima).

#7. Projeto de Lei nº 1425/2022 - Marco Legal da Captura e Armazenamento de Carbono (CCS)⁹

⁸ Link para consulta: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/decreto/D11075.htm

⁹ Link para consulta: <https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=2388818>

- Objetivos: disciplinar a exploração da atividade de armazenamento permanente de dióxido de carbono de interesse público, em reservatórios geológicos ou temporários, e seu posterior reaproveitamento, visando a descarbonização da economia.
- Injeção e armazenamento permanente de CO₂: devem ocorrer em formação geológica localizada nas bacias sedimentares do território nacional, na zona econômica exclusiva ou na plataforma continental sob jurisdição do Brasil.
- Outorga e Prazo: o armazenamento permanente requer outorga do Poder Executivo, com prazo inicial de 30 anos, renovável se as condições regulamentares forem cumpridas. A outorga não dispensa o licenciamento ambiental.
- Monitoramento e Gestão: as atividades de monitoramento e gestão do armazenamento permanente de CO₂ deverão ser mantidas por todo o período de vigência do termo de outorga qualificada, e até 40 (quarenta) anos após cessação permanente da atividade.
- Acesso e Uso de Infraestrutura: estabelece acesso não discriminatório para infraestrutura de transporte de CO₂.
- Órgão Regulador: a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), entidade integrante da Administração Federal indireta submetida ao regime autárquico especial, como órgão regulador da indústria do petróleo, gás natural, seus derivados e biocombustíveis e do armazenamento geológico de dióxido de carbono, vinculada ao Ministério de Minas e Energia.
- Status: está atualmente em tramitação na Câmara dos Deputados, após aprovação no Senado Federal.

#8. Lei nº 14.948/2024 - Marco Legal para o Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono¹⁰

- Objetivos: regular a produção e uso do hidrogênio de baixa emissão, promovendo alternativas energéticas mais limpas.

¹⁰ Link para consulta: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2023-2026/2024/Lei/L14948.htm

- Política Nacional do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono: instituí esta política que estabelece princípios como neutralidade tecnológica, inserção competitiva na matriz energética e fomento à pesquisa e desenvolvimento.
- Instrumentos: inclui o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2), o Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PHBC), a certificação do hidrogênio e o Regime Especial de Incentivos para a Produção de Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (Rehidro).
- Sistema Brasileiro de Certificação do Hidrogênio (SBCH2): Cria um sistema para certificar a intensidade de emissões do hidrogênio produzido no país, promovendo sua utilização sustentável.
- Incentivos Fiscais e Regulatórios: Institui o Rehidro, oferecendo benefícios fiscais para fomentar o desenvolvimento tecnológico e industrial do hidrogênio de baixa emissão de carbono.
- Status: lei em vigor.

#9. Lei nº 14.993/2024 - Lei do Combustível do Futuro¹¹

- Objetivos: Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV), o Programa Nacional de Diesel Verde (PNDV) e o Programa Nacional de Descarbonização do Produtor e Importador de Gás Natural e de Incentivo ao Biometano, ajustar limites de mistura de etanol e biodiesel nos combustíveis, regulamentar e fiscalizar a captura e estocagem geológica de CO₂ e a produção de combustíveis sintéticos e integrar iniciativas de políticas como Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), do Programa Mobilidade Verde e Inovação (Programa Mover), do Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBEV) e do Programa de Controle de Emissões Veiculares (Proconve).
- Captura e da estocagem geológica de dióxido de carbono: é uma das diretrizes para promoção da mobilidade sustentável de baixo carbono e do ProBioQAV, a fim de reduzir a intensidade média de carbono das fontes de energia.

¹¹ Link para consulta: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/L14993.htm

- Regulação CCS: compete à ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) regular as atividades de captura de dióxido de carbono para fins de estocagem geológica, seu transporte por meio de dutos e sua estocagem geológica.
- Status: lei em vigor.

A análise regulatória indica que o Brasil tem avançado na criação de um arcabouço para captura e armazenamento de carbono, embora ainda precise consolidar um marco robusto, como os existentes em países líderes. Nesses países, as regulamentações de CCS abrangem normas específicas para transporte, armazenamento e segurança operacional, garantindo um ambiente previsível e integrado para a implementação dessas tecnologias.

No Brasil, iniciativas como a Lei dos Combustíveis do Futuro e o Marco Legal de CCS (Projeto de Lei nº 1425/2022) são passos importantes, mas a regulamentação ainda fragmentada limita o desenvolvimento de CCS de forma abrangente. Para que o Brasil se posicione competitivamente no cenário global de CCS, é essencial avançar na construção de um marco regulatório completo, com clareza e segurança jurídica que favoreçam o crescimento sustentável dos setores industriais, incluindo celulose.

3.2 Capacidade de Armazenamento e Infraestrutura de Transporte

A localização de plantas de celulose é um fator crucial para viabilizar a implementação de BECCS no setor, uma vez que a proximidade com formações geológicas adequadas para armazenamento de CO₂ impacta diretamente na eficiência e nos custos do processo. Segundo o IPCC, reservatórios como aquíferos salinos profundos e reservatórios de hidrocarbonetos esgotados oferecem condições seguras e de alta capacidade para o armazenamento de carbono (IPCC, 2005). Assim, plantas próximas a esses locais podem reduzir a dependência de longos trajetos de transporte, diminuindo as barreiras econômicas e logísticas da captura e sequestro de carbono.

Além disso, a infraestrutura de transporte de CO₂ é um componente essencial para garantir a integração entre captura e armazenamento, especialmente em contextos em que as plantas de celulose estão distantes dos locais de armazenamento. O *Global CCS Institute* enfatiza a importância de redes regionais de gasodutos, que permitem o transporte eficiente de CO₂ em escala industrial, facilitando a criação de hubs de captura e armazenamento (GLOBAL CCS INSTITUTE, 2023). Esses hubs possibilitam a otimização de custos e promovem sinergias entre diferentes setores, fundamentais para tornar o BECCS economicamente viável e acessível em regiões com alta concentração de indústrias de base florestal.

No intuito de explorar preliminarmente a situação do setor de celulose nacional quanto ao atendimento do requisito de armazenamento geológico, analisou-se o grau de prospectividade das áreas onde estão implantadas as 10 (dez) maiores fábricas do Brasil em termos de capacidade de produção instalada. Em outras palavras, avaliou-se o potencial das bacias sedimentares, onde estão localizadas tais plantas, para armazenar CO₂ geologicamente, com base nos mapas de prospectividade para CCS publicados no Atlas Brasileiro de Captura e Armazenamento Geológico de CO₂ (KETZER et al., 2014).

Abaixo apresenta-se a lista das maiores fábricas de celulose kraft em capacidade produtiva no Brasil, a qual foi elaborada com base em consulta feita a informações públicas sobre as respectivas operações até a data de 01/11/2024.

- #1. Suzano – Três Lagoas (MS): 3,25 Mt/ano
- #2. Bracell – Lençóis Paulista (SP): 3,00 Mt/ano.
- #3. Suzano – Unidade Ribas do Rio Pardo (MS): 2,55 Mt/ano.
- #4. CMPC – Guaíba (RS): 2,35 Mt/ano.
- #5. Suzano – Unidade Aracruz (ES): 2,34 Mt/ano.
- #6. Eldorado Brasil – Três Lagoas (MS): 1,80 Mt/ano.
- #7. Suzano – Unidade Imperatriz (MA): 1,59 Mt/ano.
- #8. Klabin – Ortigueira (PR): 1,50 Mt/ano.
- #9. Suzano – Unidade Mucuri (BA): 1,48 Mt/ano.
- #10. Veracel – Eunápolis (BA): 1,10 Mt/ano.

A Figura 3.1, retirada do Atlas Brasileiro de Captura e Armazenamento Geológico de CO₂ (KETZER et al., 2014), mostra o mapa de prospectividade que classifica as bacias sedimentares em três grupos principais: baixa, média ou alta prospectividade para armazenamento de CO₂.

Figura 3.1 – Mapa de Prospectividade para CCS no Brasil



Fonte: KETZER et al., 2014.

A avaliação de prospectividade considerou todas as bacias sedimentares de acordo com sete critérios, relacionados às etapas de um projeto de CCS (KETZER et al., 2014). Os critérios considerados foram:

1. Ocorrência de depósitos de carvão;
2. Produção ativa de hidrocarbonetos;
3. Existência de dados sobre formações salinas;
4. Capacidade teórica para armazenamento de CO₂;
5. Existência de campos de petróleo/gás maduros;
6. Correspondência com fontes emissoras;
7. Existência de infraestrutura de transporte (dutos e terminais).

Ao cruzar-se as localizações das maiores plantas de celulose do Brasil com as áreas do mapa de prospectividade, obteve-se o resultado abaixo, conforme Tabela 3-1.

TABELA 3-1 – NÍVEL DE PROSPECTIVIDADE GEOLÓGICA DAS PLANTAS DE CELULOSE DO BRASIL

PLANTA		PROSPECTIVIDADE
#1.	Suzano – Três Lagoas (MS): 3,25 Mt/ano	ALTO
#2.	Bracell – Lençóis Paulista (SP): 3,00 Mt/ano.	ALTO
#3.	Suzano – Unidade Ribas do Rio Pardo (MS): 2,55 Mt/ano.	ALTO
#4.	CMPC – Guaíba (RS): 2,35 Mt/ano.	BAIXO
#5.	Suzano – Unidade Aracruz (ES): 2,34 Mt/ano.	MÉDIO
#6.	Eldorado Brasil – Três Lagoas (MS): 1,80 Mt/ano.	ALTO
#7.	Suzano – Unidade Imperatriz (MA): 1,59 Mt/ano.	MÉDIO
#8.	Klabin – Ortigueira (PR): 1,50 Mt/ano.	ALTO
#9.	Suzano – Unidade Mucuri (BA): 1,48 Mt/ano.	BAIXO
#10.	Veracel – Eunápolis (BA): 1,10 Mt/ano.	BAIXO

Fonte: Elaboração própria.

A partir da Tabela 3-1, é possível verificar que 50% das maiores plantas de celulose do país estão instaladas em áreas com alto potencial para armazenar CO₂ geologicamente e 20% estão em regiões com grau de prospectividade médio, o que pode contribuir para a viabilização de iniciativas de BECCS no setor.

Em termos de infraestrutura de transporte, as bacias do grupo de alto grau de prospectividade são atendidas por aproximadamente 14.300 km de dutos, que transportam petróleo, gás, minerais e CO₂, e parte dos quais poderia ser potencialmente utilizada para o transporte de CO₂. A mesma rota poderia ser aproveitada para dutos de CO₂, minimizando assim questões de uso do solo e posse de terras.

A Figura 3.2 apresenta o mapa dutoviário do Brasil no período de 2010 a 2022, destacando a rede de dutos de transporte de gás, petróleo e derivados, com ênfase nas regiões Sudeste e Nordeste, onde há maior concentração de infraestrutura dutoviária.

Figura 3.2 – Mapa Dutoviário 2010-2022 do Brasil



Fonte: INFRA S.A., 2021.

Apesar da localização das maiores plantas de celulose do Brasil indicarem áreas promissoras para o armazenamento geológico de CO₂ em diferentes bacias sedimentares, o potencial de armazenamento precisa ser confirmado por meio de estudos geológicos específicos que assegurem a adequação e a segurança das formações.

Por fim, no que se refere ao transporte de CO₂, embora a infraestrutura atual de dutos possa oferecer uma base, os guias internacionais (IPCC, IEA e Global CCS Institute) destacam que o uso seguro e eficiente dessa estrutura para CO₂ exige adaptações cuidadosas, como instalação de sistema de detecção de vazamentos específico para CO₂, uso de dutos com materiais de resistência específica à corrosão induzida por CO₂, instalação de sistema de monitoramento de pressão e temperatura para estado supercrítico, dentre outras intervenções. Assim, o desenvolvimento de redes de dutos específicas para CO₂, planejadas com foco na integração de captura, transporte e armazenamento, pode ser uma solução mais robusta, especialmente em localidades de alta concentração de fontes emissoras, como é o caso da região denominada como Vale da Celulose¹², no Estado do Mato Grosso do Sul.

3.3 Aspectos Técnicos e de Implantação

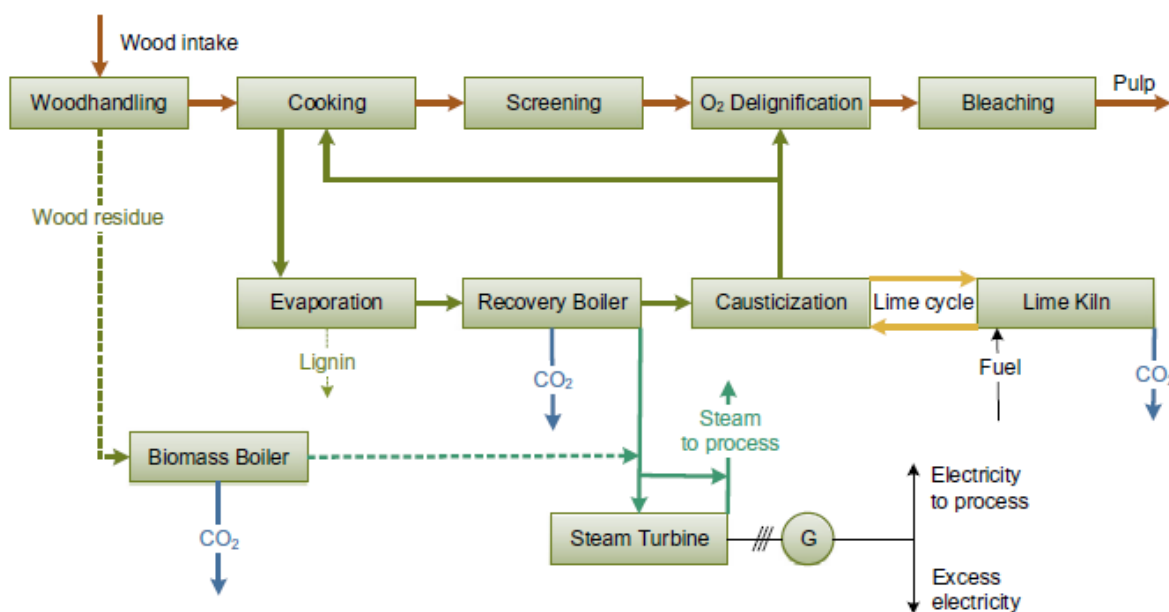
A indústria de celulose e papel é altamente intensiva em energia e apresenta potencial para implementar tanto o BECCS quanto o CCS voltado à indústria. Em fábricas integradas de celulose e papel, a maior proporção das emissões de CO₂ — entre 75% e 100% do total — é de origem biogênica, proveniente da biomassa. Se as matérias-primas utilizadas nessas fábricas forem manejadas de maneira sustentável, essas emissões de CO₂ de origem biogênica poderão ser consideradas neutras em carbono e, com a

¹² A região denominada "Vale da Celulose" está localizada na porção leste do Estado do Mato Grosso do Sul, abrangendo cidades como Três Lagoas, Ribas do Rio Pardo e Inocência. Essa região se tornou estratégica para o setor de celulose devido à abundância de terras para o cultivo de eucalipto, clima favorável para o crescimento rápido das árvores e proximidade com importantes vias de transporte, facilitando a logística de exportação de produtos.

implementação da tecnologia de CCS, seria possível alcançar emissões negativas em CO₂, contribuindo para a remoção efetiva de CO₂ da atmosfera (IEAGHG, 2016).

O CO₂ é formado em fábricas de celulose kraft principalmente durante a combustão, quando o carbono no combustível é oxidado. As principais fontes de CO₂ são a caldeira de recuperação, a caldeira de biomassa e o forno de cal. A destruição de gases não condensáveis (NCG) com várias ventilações também é uma fonte de CO₂, mas insignificante. Destas, o forno de cal é tipicamente a única fonte de CO₂ fóssil (KUPARINEN; VAKKILAINEN; TYNJÄLÄ, 2019). Um diagrama simplificado do processo de uma fábrica de celulose kraft mostrando as principais fontes de CO₂ está ilustrado na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Principais fluxos para remoção de CO₂ em uma fábrica de celulose kraft



Fonte: KUPARINEN; VAKKILAINEN; TYNJÄLÄ, 2019.

As fábricas de celulose queimam na caldeira de biomassa os resíduos de biomassa gerados nos processos de manuseio de madeira: cascas, cavacos, galhos,

folhas e outros finos gerados no processo de descascamento. A caldeira de biomassa utiliza combustíveis fósseis durante a etapa de partida e o desligamento. Em muitas fábricas, vapor auxiliar adicional é gerado com combustíveis fósseis, especialmente se a fábrica for integrada com uma máquina de pape. Para a fábrica de celulose, o uso de combustíveis fósseis gera pelo menos 20 quilos (kg) de CO₂ por tonelada de celulose seca ao ar (ADt).

O licor negro fraco, proveniente das lavadoras de polpa marrom após a polpação, é concentrado em um evaporador de múltiplos efeitos. A maior parte da água é removida, e o licor negro concentrado, com um teor de água de 10–35%, é queimado em uma caldeira de recuperação. O papel da caldeira de recuperação é queimar o resíduo orgânico da polpação e recuperar os produtos químicos de polpação à base de sódio presentes no licor negro. Quando o licor negro concentrado é pulverizado na parte inferior da caldeira de recuperação, as partes da madeira não utilizadas na celulose são queimadas. Na parte inferior do forno, é mantido um ambiente com deficiência de oxigênio para que o sulfeto de sódio (Na₂S) seja preferencialmente formado. A extensão da formação de sulfeto em relação ao sulfato é medida pela eficiência de redução, tipicamente superior a 90%. O restante do sódio reage para formar carbonato. O sódio e o enxofre inorgânicos são recuperados como uma escória fundida, que consiste principalmente em Na₂S e carbonato de sódio (Na₂CO₃). A escória fundida entra em um tanque de dissolução onde é dissolvida em licor branco fraco, quase semelhante à água, para formar licor verde. O dióxido de carbono no carbonato, portanto, é de origem biogênica (KUPARINEN; VAKKILAINEN; TYNJÄLÄ, 2019).

O CO₂ biogênico da caldeira de recuperação é liberado pela chaminé junto com os gases de combustão. Tipicamente, combustíveis fósseis também são usados durante a partida e o desligamento desta caldeira. Eventualmente, devido a grandes distúrbios de processo ou falhas de equipamentos, combustíveis fósseis, principalmente óleo e gás natural, são queimados. O uso de combustíveis fósseis gera de 10 a 20 kg de CO₂/ADt, enquanto o CO₂ biogênico produzido é de 1.600 a 2.400 kg de CO₂/ADt (KUPARINEN; VAKKILAINEN; TYNJÄLÄ, 2019).

O licor verde da caldeira de recuperação é transferido para a planta de caustificação, onde reage com cal (CaO) para converter o Na_2CO_3 em hidróxido de sódio (NaOH). Esta conversão é medida pela eficiência de caustificação, tipicamente de 80 a 85%. O produto da reação, carbonato de cálcio (CaCO_3), é regenerado para CaO no forno de cal com calor gerado pela queima, tipicamente de combustível fóssil (KUPARINEN; VAKKILAINEN; TYNJÄLÄ, 2019).

A reação de redução produz CO_2 biogênico que é liberado com os gases de combustão pela chaminé do forno de cal. Normalmente, combustíveis fósseis são usados para atingir a temperatura necessária, de pelo menos 850 °C. O uso de combustíveis fósseis, principalmente óleo e gás natural, gera de 100 a 250 kg de CO_2/ADt (KUPARINEN; VAKKILAINEN; TYNJÄLÄ, 2019).

Os efluentes líquidos da fábrica de celulose passam por tratamento extensivo, incluindo etapas primária, secundária e, em algumas instalações, tratamento terciário, para remover ao máximo partículas de biomassa, nutrientes e contaminantes persistentes antes do descarte ou reutilização. Os fluxos de efluentes contêm pequenas partículas de biomassa (lodo de fibras) que se sedimentam. O material separado é chamado de lodo primário. Muito frequentemente, o próximo passo é o tratamento biológico, onde os resíduos orgânicos restantes no efluente são consumidos por microrganismos, criando o biossólido (KUPARINEN; VAKKILAINEN; TYNJÄLÄ, 2019).

Em algumas fábricas novas, o biossólido recuperado é tratado para produção de biogás. A produção de biogás pode ser de 10 a 15 quilowatt-hora (kWh) por ADt. As emissões de CO_2 da produção de biogás podem ser consideradas crescentes, mas de importância menor em relação aos processos de combustão mencionados anteriormente (KUPARINEN; VAKKILAINEN; TYNJÄLÄ, 2019).

A captura de CO_2 em fábricas de celulose pode ser realizada utilizando-se diferentes tecnologias implementadas antes do processo de combustão (pré-combustão), durante a combustão (combustão com oxigênio ou oxicombustão) ou após o processo de combustão (pós-combustão). A eficiência de captura pré-combustão é de cerca de 85%, enquanto a combustão com oxigênio é de aproximadamente 87,5%. Já a captura pós-

combustão é a mais eficiente, capturando CO₂ a uma taxa de 95% (THANGARAJ et al., 2018).

Embora a taxa de captura pós-combustão seja maior, observa-se pelas literaturas consultadas que não existe uma tecnologia vencedora em termos de custo e que as comparações são complexas uma vez que as premissas e condições de contorno dos estudos variam significativamente.

Outro ponto relevante a ser comentado, diz respeito à taxa de captura, que é a proporção de CO₂ que o equipamento de CCS captura em relação ao que é liberado na atmosfera, sendo geralmente citada nos estudos como 90% ou mais (QUIGGIN, 2021). A captura pós-combustão geralmente utiliza um solvente sobre o qual as emissões da chaminé passam. As moléculas desse solvente se ligam às moléculas de CO₂, que são então liberadas do solvente com a aplicação de calor. Esse calor pode ser fornecido pela queima da biomassa inicial. No entanto, esse é o mesmo calor que está sendo utilizado no turbogerador para gerar eletricidade.

Assim, há uma "penalidade energética" associada ao processo de CCS, que reduz a eficiência da usina de BECCS em comparação com uma usina de bioenergia equivalente. Em outras palavras, as instalações BECCS para geração de energia experimentarão maiores quedas na eficiência de produção de energia para atingir maiores taxas de captura.

Sistemas de captura de CO₂ em arranjo pós-combustão e à base de amina são uma tecnologia comprovada e comercialmente disponível. A eficiência de captura do processo de monoetanolamina (MEA) geralmente varia entre 80 e 90% e, como método de pós-combustão, pode ser facilmente aplicado a plantas de celulose existentes (KUPARINEN; VAKKILAINEN; TYNJÄLÄ, 2019).

Nesse tipo de configuração, o CO₂ é absorvido a uma temperatura entre 45°C e 50 °C, e os gases de combustão precisam ser resfriados antes da absorção pela amina. A dessorção (processo de remoção de substâncias que foram absorvidas ou adsorvidas por um sólido) ocorre entre as temperaturas de 100°C e 120°C, sendo necessário aproximadamente 3,7 MJ por kg de CO₂ para a regeneração do sorvente. Tal processo

demanda eletricidade, o que aumenta o consumo próprio de energia elétrica da fábrica de celulose (ONARHEIM et al. 2015).

Os processos de oxidação aplicados à caldeira de recuperação, caldeira de biomassa ou forno de cal são uma opção, porém exigem uma fonte de oxigênio e possivelmente modificações nas passagens dos gases de combustão. Nos processos de oxidação, as zonas de reação e a atmosfera de gases no forno mudam, o que pode ter implicações na transferência de calor e nas reações, devendo, tal variável, ser considerada. O principal custo adicional dessa configuração é a produção de oxigênio, que, no caso de fábricas de celulose, pode ser relativamente acessível devido à presença frequente uma planta de produção de oxigênio “on site” (ONARHEIM et al. 2015).

Tecnologias avançadas de looping de cálcio pós-combustão também oferecem possibilidades interessantes para captura de CO₂. Neste tipo de processo, o óxido de cálcio é usado para captura de CO₂. No caso de uma fábrica de celulose, pode-se propor que a lama de cal do forno de cal seja utilizada como sorvente para captura de CO₂ nas fábricas de celulose (KUPARINEN; VAKKILAINEN; TYNJÄLÄ, 2019).

Ato contínuo, o estudo *"Techno-Economic Evaluation of Retrofitting CCS in a Market Pulp Mill and an Integrated Pulp and Board Mill"*, patrocinado pela IEA Greenhouse Gas R&D Programme, avaliou a viabilidade de integrar um sistema de captura e armazenamento de carbono em fábricas de celulose, examinando os impactos técnicos e econômicos dessa tecnologia em duas configurações industriais: uma fábrica dedicada à produção de celulose de mercado (com capacidade de 800 mil toneladas ao ano) e uma planta integrada de celulose e papel (produzindo 740 mil toneladas de celulose e 400 mil toneladas de papelão por ano) (IEAGHG, 2016).

Para desenvolver a análise, o estudo considerou-se uma taxa de captura de 90% do CO₂ emitido pelas principais fontes das fábricas (caldeira de recuperação, caldeira biomassa e forno de cal). Além disso, o sistema de captura foi modelado com base em uma tecnologia de pós-combustão utilizando monoetanolamina (MEA) em uma configuração de fluxo dividido, cujo objetivo é otimizar o consumo energético, reduzindo em até 10% a demanda de energia em relação a configurações convencionais (IEAGHG, 2016).

O estudo também considerou que as fábricas se encontram em uma região nórdica, sendo autossuficientes em energia por meio da combustão de licor negro e biomassa. Os cenários econômicos foram analisados considerando possíveis políticas de incentivo, como créditos para emissões negativas e para eletricidade renovável exportada, avaliando-se o impacto desses fatores no custo da celulose com e sem a presença do CCS.

Os cenários de viabilidade econômica foram estruturados para avaliar o impacto de diferentes políticas de incentivo e impostos sobre as emissões de CO₂, com uma análise detalhada de como esses fatores afetam o custo total de produção de celulose. Os itens, a seguir, apresentam o resumo dos resultados de cada cenário avaliado no estudo.

1. Cenário Base (Sem Incentivos):

No cenário inicial, a implementação do CCS ocorre sem apoio financeiro externo, como créditos para emissões negativas ou isenções fiscais para CO₂ biogênico. Nesse caso, o estudo mostra um aumento significativo no custo de produção da celulose, com elevação de 3% a 25% no preço, dependendo da taxa de captura. Sem incentivos, o CCS impõe uma carga financeira adicional, tornando a solução economicamente inviável sem benefícios diretos para a empresa.

2. Cenário com Imposto sobre o Carbono:

Neste cenário, uma taxa de carbono de 10 €/t de CO₂ é aplicada tanto a emissões fósseis quanto biogênicas, resultando em um aumento de 4 a 12 €/adt no custo de produção para taxas de captura mais altas. Esse cenário evidencia a importância de isentar o CO₂ biogênico de tributações, já que a taxa indistinta amplia o custo da produção com CCS, desestimulando sua adoção.

3. Cenário com Incentivo para Eletricidade Renovável Exportada:

Com a isenção das emissões biogênicas e um incentivo adicional de 4 €/MWh para a eletricidade renovável exportada, o impacto no custo é reduzido. No entanto, mesmo com esse incentivo, os custos operacionais do CCS ainda representam um aumento considerável, indicando que apenas o crédito na eletricidade exportada não é suficiente para cobrir o investimento necessário para a captura de carbono.

4. Cenário com Crédito para Emissões Negativas:

No cenário mais favorável, um crédito de 10 €/t de CO₂ capturado é concedido para emissões negativas, além dos incentivos para eletricidade e isenção para emissões biogênicas. Esse apoio cobre parte dos custos de transporte e armazenamento de CO₂, reduzindo o custo de produção. Contudo, o estudo aponta que, para uma viabilidade completa do CCS, o crédito para emissões negativas precisaria alcançar valores entre 60 e 75 €/t de CO₂.

Ainda, o estudo revelou que a introdução da tecnologia de CCS em fábricas de celulose, embora tecnicamente viável, envolve desafios econômicos significativos. A implementação acarreta um aumento substancial no consumo de vapor — até 7,8 GJ/adt em alguns casos — e uma redução na eletricidade exportada de até 70 MWe, afetando a rentabilidade da operação. Além disso, os custos operacionais se elevam devido à necessidade de reagentes e manutenção adicional, impactando o custo de produção em até 37%.

Esses cenários revelam que, para garantir a viabilidade econômica do CCS em plantas de celulose de grande porte, políticas de apoio são essenciais. Incentivos substanciais para emissões negativas e créditos de eletricidade renovável podem transformar o CCS em uma solução economicamente viável, auxiliando o setor a alcançar suas metas de descarbonização e sustentabilidade.

Outro ponto fundamental para implantação de projetos BECCS no setor de celulose, diz respeito ao correto entendimento das etapas de desenvolvimento do investimento. Desde o momento da ideação até a entrada em operação, o projeto passa por diferentes etapas, incluindo estudos de viabilidade, desenvolvimento de engenharia e construção.

A fase de viabilidade visa fornecer avaliações preliminares técnicas, econômicas, regulatórias e ambientais das instalações para determinar se a integração desta tecnologia em processos industriais, como em fábricas de celulose, técnica e economicamente viável.

Em geral, a etapa de viabilidade pode ser concluída entre 1 e 2 anos. Para projetos que incluem armazenamento geológico, essa fase é particularmente crítica, pois inclui a avaliação dos recursos de armazenamento de CO₂, determinando onde, em que quantidade, a que taxa e por quanto tempo o CO₂ pode ser injetado e armazenado com segurança. Isso requer inúmeros e extensos estudos, modelagem do subsolo, perfuração de poços de teste e avaliação sísmica, entre outras análises. Como resultado, os prazos para a avaliação de armazenamento podem ser mais longos do que para a viabilidade de captura e transporte, sendo recomendado começar antecipadamente estas análises (IEAGHG, 2016).

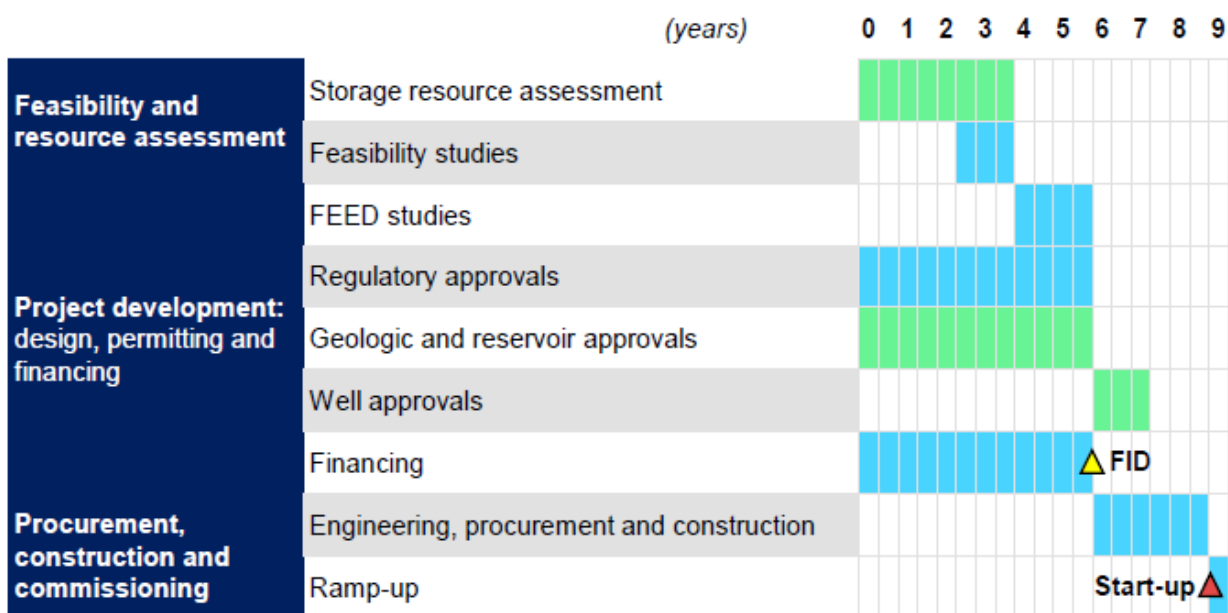
A fase de desenvolvimento busca traduzir os resultados dos estudos de viabilidade em especificações técnicas detalhadas do projeto, bem como planejar e garantir a obtenção de todas as licenças antes da decisão final de investimento (em inglês, FID ou *Final Investment Decision*). Essa fase inclui estudos de Engenharia de Pré-Detalhamento (em inglês, FEED ou *Front-End Engineering Design*) para as instalações de captura, transporte e injeção, que podem levar cerca de 2 anos. A obtenção de aprovações regulatórias, como licenças ambientais, de exploração e de injeção, pode ser o passo mais demorado e pode levar anos (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2023).

Uma vez tomada a decisão final positiva de investimento, os projetos podem avançar para engenharia detalhada, aquisição de equipamentos, construção e comissionamento. Essa etapa pode ser mais demorada para instalações de captura e transporte, que exigem aquisição de uma ampla gama de equipamentos de

processamento e a construção de instalações, do que para o armazenamento, que exige menos infraestrutura. No geral, essa fase pode levar de 2 a 4 anos para ser concluída.

A Figura 3.4 ilustra o cronograma típico de um projeto de CCS, dividido em três fases principais: Avaliação de Viabilidade e Recursos, Desenvolvimento do Projeto (engenharia, licenciamento e financiamento) e Compras, Construção e Comissionamento.

Figura 3.4 – Cronograma de alto nível de um projeto CCS

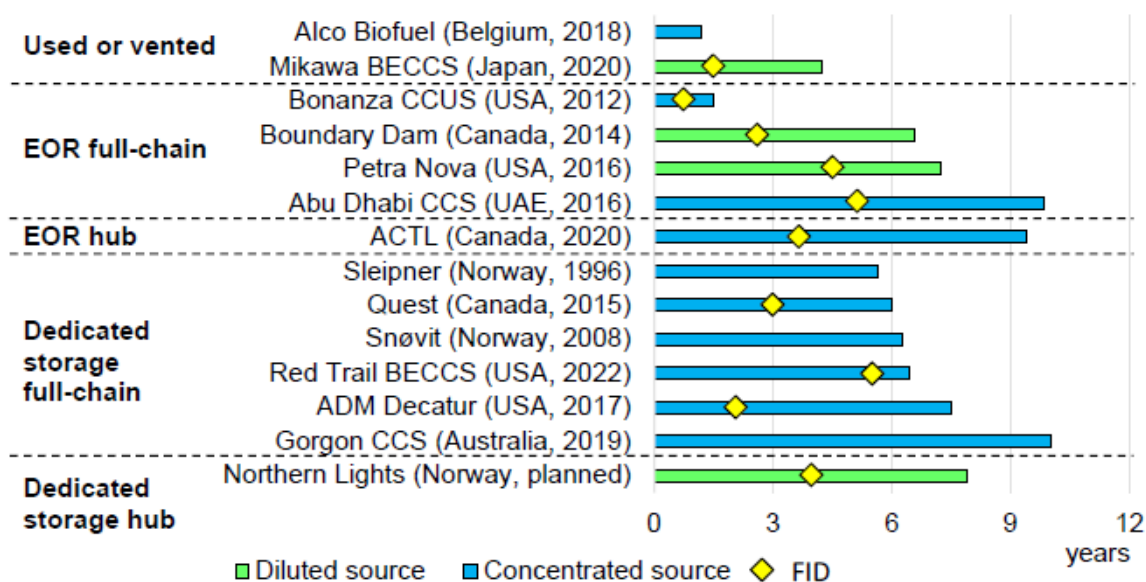


Fonte: International Energy Agency, 2023.

Embora os prazos acima sejam referenciais, na prática, projetos de CCS já em operação levaram de 2 (dois) a mais de 10 (dez) anos, da fase de anúncio até o comissionamento, com uma mediana de cerca de 6 (seis) anos para conclusão. Essa ampla faixa pode ser explicada pela diversidade de projetos em termos de aplicação para captura de CO₂, destino do CO₂ (armazenamento dedicado ou utilização) e requisitos de infraestrutura (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2023).

A Figura 3.5 mostra o intervalo de tempo entre o anúncio de projetos de CCS e sua entrada em operação, diferenciando fontes diluídas e concentradas de CO₂, bem como o momento da Decisão Final de Investimento (FID). Os projetos variam em tipo de armazenamento e em tempo necessário até o início das operações, evidenciando a complexidade e os diferentes prazos para implementação.

Figura 3.5 – Prazo entre anúncio do projeto e sua entrada em operação



Fonte: International Energy Agency, 2023.

O destino do CO₂ e a necessidade de avaliar recursos de armazenamento ou construir infraestrutura de transporte de CO₂ são os principais fatores que afetam o prazo dos projetos. Projetos que envolvem utilização do CO₂ tendem a ter prazos mais curtos que aqueles com armazenamento dedicado.

A fonte de CO₂ também pode ter um impacto significativo nos prazos. Projetos que capturam CO₂ de fluxos concentrados, como processamento de gás natural e produção de bioetanol, exigem apenas secagem e compressão do CO₂, enquanto fluxos diluídos,

como em geração de eletricidade e produção industrial, necessitam da instalação de uma unidade de captura.

Garantir o financiamento também pode representar uma fonte de atraso. Para projetos em operação, alcançar a Decisão Final de Investimento (FID) levou, em média, o mesmo tempo que a construção do projeto.

Em sumo, a implementação de tecnologias BECCS em fábricas de celulose representa um avanço crucial para o setor em direção à descarbonização e à obtenção de emissões negativas de CO₂. Os resultados de estudos técnicos e econômicos, como o patrocinado pela IEAGHG, apontam que, embora as configurações de pós-combustão, pré-combustão e oxícombustão apresentem diferentes taxas de captura e eficiência energética, todas elas impõem desafios consideráveis, tanto na adaptação dos processos industriais quanto no custo operacional. Incentivos robustos e políticas de apoio são, portanto, essenciais para viabilizar essas tecnologias e integrar de forma sustentável o CCS e BECCS nos fluxos produtivos da indústria, assim como um planejamento cuidadoso das etapas de implementação, desde a avaliação preliminar de viabilidade até o comissionamento final.

3.4 Mecanismos de Apoio, Incentivos e Subsídios

A principal barreira para o avanço de projetos de captura, armazenamento e uso de carbono (CCUS) é econômica: cerca de 49% dos projetos são adiados ou cancelados por limitações financeiras (CHIAPPINI, 2023). O alto custo e complexidade do BECCS aguçam a percepção de risco pelos investidores, tornando o financiamento com dívida mais caro para projetos de captura de carbono, necessitando de estruturas financeiras robustas.

O custo de implementação da tecnologia BECCS varia amplamente e uma revisão de toda a literatura sobre CCS mostra uma faixa de custo entre US\$ 20 a US\$ 300 por tonelada de CO₂ evitada (GLOBAL CCS INSTITUTE, 2019), dependendo do setor, indicando que esses empreendimentos ainda não são viáveis sem apoio governamental,

especialmente quando comparado aos preços de créditos de carbono, que permanecem muitas vezes abaixo de US\$ 10 por tonelada em mercados voluntários.

A Tabela 3-2 apresenta os custos do CCS aplicados a diferentes setores, mostrando a variação no custo de CO₂ evitado por tonelada (US\$/tCO₂) em cada setor. Os setores estão organizados em dois grupos principais: BECCS (Bioenergia com Captura e Armazenamento de Carbono) e combustíveis fósseis com CCS. Os valores variam amplamente, com setores como cimento e combustão apresentando custos mais elevados, enquanto o gás natural e as fábricas de papel e celulose apresentam custos mais baixos para a captura de CO₂.

TABELA 3-2 – CUSTO DO CCS APLICADO A DIFERENTES SETORES

Grupo	Setor	Custo do CO₂ evitado (US\$/tCO₂)
BECCS	Combustão	88-288
	Etanol	20-175
	Fábricas de papel e celulose	20-70
	Gaseificação de biomassa	30-76
	Geração de energia (carvão)	55-83
Combustíveis fósseis e CCS	Geração de energia (gás)	43-89
	Gás natural	20-21
	Ferro e aço	65-77
	Cimento	103-124

Fonte: GLOBAL CCS INSTITUTE, 2019.

Nesse contexto, políticas de incentivo, como o *Inflation Reduction Act* (IRA) nos EUA, que cobre até 92% dos custos para CCS industrial, e o Sistema de Comércio de Emissões da União Europeia (CHIAPPINI, 2023), têm sido fundamentais para viabilizar novos projetos, uma vez que os subsídios reduzem o custo marginal e promovem o

avanço do CCUS, mostrando que, sem esse suporte, a expansão dessa tecnologia enfrentaria barreiras significativas.

Em recente relatório emitido pela ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis), a fim de subsidiar a Diretoria Colegiada no processo de preparação da agência quanto às discussões sobre implementação do marco regulatório de CCS no país, foi destacado pelos autores a alta dependências de subsídios e mecanismos de financiamento para viabilização econômica de projetos de CCS (ANP, 2024).

O material desenvolvido pela Superintendência de Tecnologia e Meio Ambiente (STM) da ANP, cita que, até o momento de divulgação do relatório (09 de abril de 2024), não haviam sido criados instrumentos específicos para incentivar projetos de CCS no Brasil, embora recursos públicos estivessem disponíveis a partir de linhas de financiamento especiais voltados para a redução de emissões, como foi o caso do projeto de BECCS da FS Bioenergia, que contou com recursos advindos do Programa BNDES RenovaBio (ANP, 2024).

O BNDES também é responsável pela gestão do Fundo Nacional sobre Mudança Climática (Fundo Clima), que, em 2024, poderá contar com até R\$ 10 bilhões em recursos. Esse fundo se posiciona como um dos mais relevantes no cenário nacional para ações de mitigação e adaptação às mudanças climáticas. Embora atualmente o CCS não seja uma atividade contemplada para receber apoio do Fundo Clima, discussões com o Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima (MMA) estão em andamento para avaliar essa possibilidade.

O Programa Mais Inovação, também altamente competitivo, não impõe restrições a projetos de CCS. Contudo, conforme informado pelo BNDES, até o momento, nenhum recurso da instituição foi utilizado para financiar esse tipo de projeto, que tem progredido principalmente com recursos oriundos da cláusula de PD&I (Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação) nos contratos de E&P (Exploração e Produção) da ANP. Além de aprimorar as condições de acesso ao crédito, outros mecanismos em operação no Brasil, como a possibilidade de enquadramento no Regime Especial de Incentivos para o

Desenvolvimento da Infraestrutura (REIDI), poderiam contribuir para incentivar investimentos em CCS.

Os projetos iniciais de CCS em desenvolvimento no país indicam que a aceleração dessa atividade enfrentará desafios significativos. Além das complexidades técnicas, o financiamento surge como uma questão central, tal como ocorre em outros países. No cenário internacional, os principais projetos têm recebido substancial apoio financeiro público, complementado por medidas de incentivo, como a criação de mercados de carbono e a definição de metas de redução de emissões para setores específicos.

Nesse ambiente, não surpreende que os primeiros projetos que alcançaram a decisão final de investimento a nível global, ou têm perspectivas de fazê-lo, tenham se beneficiado de políticas governamentais adicionais de mitigação de riscos e de subsídios. Esquemas de Contratos de Carbono por Diferença (CCfD), contratos governamentais de compra, créditos fiscais para investimento ou injeção direta de capital são exemplos de ferramentas de mitigação na União Europeia e no Canadá. Além dos créditos fiscais, o governo dos Estados Unidos, por exemplo, oferece apoio por meio de empréstimos governamentais de baixo custo e subsídios diretos.

A situação de financiamento para projetos de CCS apresenta um cenário promissor com um crescimento significativo nos últimos anos, impulsionado por um suporte político crescente e mudanças nos mercados financeiros. Em 2023, o financiamento para CCS aumentou substancialmente, principalmente em economias desenvolvidas como os EUA e a União Europeia, que introduziram políticas e incentivos financeiros robustos. Embora o financiamento por capital próprio tenha liderado o apoio ao CCS, há uma crescente necessidade de diversificar para financiamentos por dívida, especialmente em países em desenvolvimento, onde a expansão de CCS é crucial para as metas climáticas globais.

Além do investimento corporativo e do capital próprio, o financiamento governamental tem desempenhado um papel fundamental. Nos EUA, a Lei de Redução da Inflação disponibilizou bilhões de dólares para projetos de CCS e outras tecnologias limpas, enquanto a UE e o Reino Unido também fizeram compromissos substanciais. A

Noruega e a Holanda avançaram com investimentos específicos, incluindo o uso de campos de gás esgotados para armazenamento de CO₂. Esses esforços são reforçados por uma maior participação de setores como petróleo, gás, fertilizantes, cimento e transporte marítimo, que veem o CCS como uma forma de reduzir suas emissões.

Nacionalmente, cabe destacar os esforços da Suzano Ventures, braço de capital de risco corporativo (*Corporate Venture Capital*) da Suzano, empresa brasileira líder na produção de bioprodutos a partir do cultivo de eucalipto, e que dispõe de US\$ 70 milhões destinados a investir em startups que desenvolvam soluções inovadoras alinhadas à bioeconomia baseada em florestas plantadas. Dentre as áreas de interesse para investimento, destaca-se o grupo “Remoção de Carbono” que busca por tecnologias que ampliem a remoção e a gestão de créditos de carbono ao longo da cadeia produtiva.

Dentro os mecanismos de incentivo mais recentes, cabe destaque ao Mecanismo de Ajuste de Fronteira para o Carbono (CBAM), uma política da União Europeia (UE) projetada para evitar a "fuga de carbono" – quando empresas transferem suas operações para países com regulamentações ambientais mais brandas. Implementado gradualmente a partir de 2023, o CBAM estabelece uma taxa sobre as emissões de carbono embutidas em produtos importados de setores intensivos em CO₂, como ferro, aço, alumínio, cimento e eletricidade. Essa medida visa garantir que as importações para o mercado europeu estejam sujeitas aos mesmos padrões ambientais dos produtos fabricados dentro da UE, promovendo uma concorrência justa e incentivando a descarbonização global através de tecnologias como CCS.

O CBAM funciona exigindo que importadores comprem certificados de carbono equivalentes ao preço do carbono que teria sido pago se os bens tivessem sido produzidos na Europa. Dessa forma, o mecanismo alinha as políticas de emissões da UE com as de outras regiões, reduzindo a vantagem competitiva de países com normas climáticas mais flexíveis. Além de incentivar práticas industriais mais limpas fora da Europa, o CBAM representa uma das principais estratégias da UE para alcançar suas metas de neutralidade de carbono até 2050, ao pressionar indústrias globais a internalizar o custo ambiental de suas emissões.

Por fim, a inclusão de CCS nos padrões de títulos verdes ainda é limitada, mas há movimento em direção a sua aceitação, o que poderia reduzir os custos de dívida. A perspectiva geral para o financiamento de CCS é positiva, com um crescimento acelerado previsto para os próximos anos. Para atingir as metas globais de mitigação climática, essa tendência deve se expandir para países em desenvolvimento, onde as emissões de gases de efeito estufa ainda são altas e a necessidade de soluções como CCS é urgente.

3.5 Aceitação Social e Percepção Pública

A implementação de tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCS) depende da aceitação social e da percepção pública, fatores cruciais para reduzir resistências e construir apoio. Estas tecnologias, especialmente em projetos que envolvem armazenamento geológico próximo a áreas habitadas, frequentemente geram receios locais relacionados à segurança e ao impacto ambiental. Portanto, compreender e gerenciar as percepções e o nível de apoio da sociedade é essencial para a viabilidade de projetos de CCS, que necessitam de um alinhamento entre benefícios percebidos e preocupações dos stakeholders e comunidades afetadas.

Nesse contexto, a aceitação social refere-se ao grau em que uma inovação, prática, tecnologia ou projeto é reconhecido, aprovado e integrado pela sociedade. Esse conceito é particularmente relevante em contextos de grandes projetos industriais e ambientais, onde o apoio da comunidade local, ONGs, grupos ambientais e outros stakeholders é essencial para a implementação e continuidade das atividades. A aceitação social pode ser alcançada através de práticas de transparência, comunicação efetiva, e desenvolvimento de iniciativas que envolvam e beneficiem as partes interessadas diretamente afetadas pelo projeto. Estudos indicam que a falta de aceitação social pode resultar em atrasos, protestos e, em alguns casos, no cancelamento de iniciativas (WÜSTENHAGEN et al., 2007).

Em complemento, a percepção pública diz respeito à forma como a população enxerga e interpreta informações relacionadas a determinado projeto, tecnologia ou

prática. Esse conceito abrange sentimentos, atitudes, valores e crenças do público sobre o impacto ambiental, econômico e social de iniciativas específicas. A percepção pública é moldada por diversos fatores, incluindo comunicação institucional, cobertura da mídia, interações sociais e experiências prévias da população com empreendimentos semelhantes. Percepções públicas negativas, muitas vezes derivadas de falta de informação ou experiências negativas passadas, podem ser um grande obstáculo à implementação de projetos industriais e tecnológicos (DEVINE-WRIGHT, 2009).

No Brasil, onde a implementação de CCS ainda está em estágios iniciais, estudos como o de Lima (2018) sobre a percepção pública no Espírito Santo demonstram a importância da informação para aumentar o apoio às tecnologias de captura e armazenamento de carbono. O estudo, que envolveu uma pesquisa de opinião com moradores de Vitória e São Mateus, revelou que o conhecimento sobre CCS era inicialmente limitado: 78% dos entrevistados em São Mateus e 82% em Vitória nunca haviam ouvido falar sobre a tecnologia CCS antes da introdução ao tema (LIMA, 2018).

Após a apresentação de material informativo, os participantes foram convidados a expressarem suas opiniões quanto ao grau de concordância para o desenvolvimento da tecnologia CCS no Brasil e verificou-se que o apoio aumentou significativamente (82% dos entrevistados em São Mateus e 81% em Vitória concordaram com o desenvolvimento de CCS no Brasil), indicando que a exposição aos dados e a conscientização é crucial para ampliar a aceitação social (LIMA, 2018).

A pesquisa de Lima (2018) também analisou o apoio dos entrevistados no que diz respeito a fomentos do governo nesta tecnologia. Os resultados mostraram que tanto na capital (87%) como no interior (86%) havia uma posição favorável do público para que o governo invista em CCS, visto que é uma tecnologia com grande potencial para as reduções de gases de efeito estufa no Brasil.

Ato contínuo, a última questão da pesquisa de Lima (2018) abordou a ordem de prioridade dos investimentos do governo na concepção dos entrevistados para cinco opções: saúde, transporte, segurança pública, mudanças climáticas e geração de emprego. Em ambas as cidades a primeira opção mais votada foi a saúde, seguida da segurança pública e geração de emprego. Logo, observou-se que apesar do apoio

público nas duas cidades para o desenvolvimento do CCS no Brasil e investimentos do governo na tecnologia, as mudanças climáticas ainda não são prioritárias.

A percepção dos riscos e benefícios desempenha um papel central na aceitação ou rejeição da tecnologia de captura e armazenamento de carbono. Embora a visão dos benefícios, como a redução das emissões de gases de efeito estufa, possa aumentar o apoio, a preocupação com riscos específicos, como vazamento de CO₂, explosões e impactos ambientais subterrâneos e marinhos, tende a gerar resistência e até protestos. Outros riscos percebidos, como atividade sísmica, perda de terras para infraestrutura e falta de eficácia no alcance das metas de emissões, reforçam a necessidade de uma política clara e consistente que assegure uma interação transparente e proativa entre todos os stakeholders, favorecendo tanto a compreensão dos benefícios quanto o manejo das preocupações com segurança (TCVETKOV; CHEREPOVITSYN; FEDOSEEV, 2019).

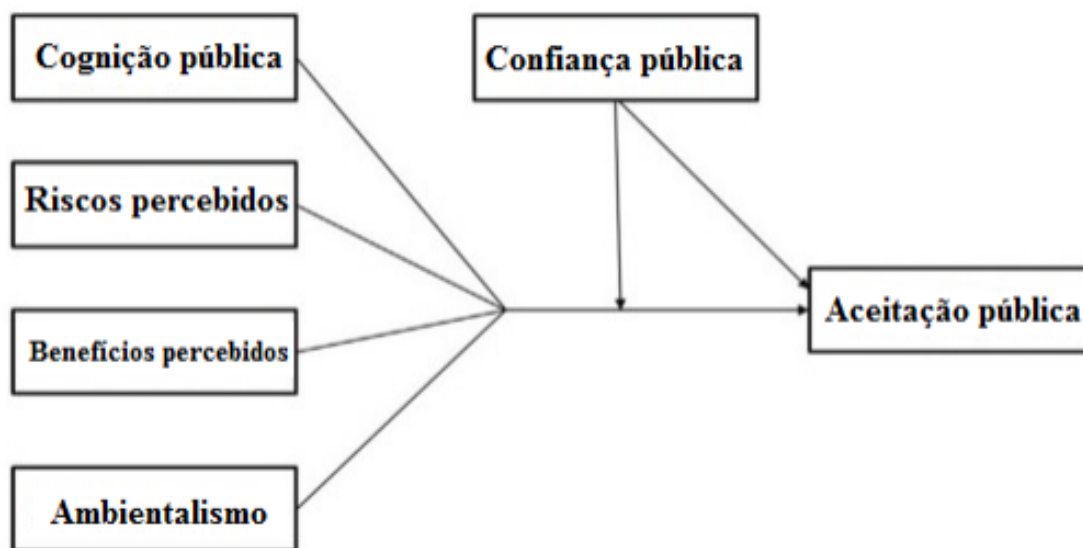
A dissertação de Lima (2018) também detalha o modelo de fatores determinantes para aceitação pública do CCS. A autora cita que o aumento da cognição pública (processo coletivo pelo qual uma sociedade interpreta e responde a informações de interesse comum), ampliação dos benefícios percebidos (principalmente vantagens econômicas) e aumento da consciência ambiental (compreensão dos impactos ao meio ambiente) favorecem a aceitação pública do CCS. O reforço da confiança pública (credibilidade e segurança que a sociedade deposita nos responsáveis pela implementação do projeto) credibilidade e segurança que a sociedade deposita nos responsáveis pela implementação do projeto de CCS.

Todos os fatores supracitados contribuem para a obtenção e manutenção da Licença Social para Operar (LSO) de um projeto de CCS, que não é um documento obtido pelo preenchimento de requisitos, mas antes, uma permissão da comunidade que é fruto da aceitação, pela população local e outros stakeholders, das atividades em torno de um determinado projeto, que precisa ser validada continuamente (ANP, 2024).

A Figura 3.6 apresenta os fatores que influenciam a aceitação pública, destacando elementos como cognição pública, riscos e benefícios percebidos, ambientalismo e confiança pública. Esses fatores se inter-relacionam, contribuindo para moldar a

percepção e aceitação da população em relação a determinadas iniciativas ou tecnologias.

Figura 3.6 – Fatores determinantes para aceitação pública



Fonte: LIMA, 2018.

Apesar da importância crescente das tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCS) e bioenergia com captura e armazenamento de carbono (BECCS) para a mitigação das mudanças climáticas, não foram identificados informativos, publicações ou reportagens sobre esses temas nos veículos de comunicação ou eventos das principais associações do setor de celulose, como a IBÁ e a ABTCP. Essas entidades, que tradicionalmente promovem discussões técnicas e comerciais para o setor, poderiam desempenhar um papel fundamental na disseminação de conhecimento e no aumento da consciência pública e empresarial sobre as oportunidades e desafios relacionados ao CCS e BECCS.

Em síntese, a aceitação social e a percepção pública são fundamentais para o avanço de tecnologias de captura e armazenamento de carbono, especialmente no

Brasil, onde o conhecimento sobre CCS ainda é limitado e muitas vezes sujeito a desinformação. Nesse sentido, iniciativas de divulgação e fóruns de discussão promovidos por associações do setor de celulose podem desempenhar um papel crucial na construção de confiança e conscientização pública, facilitando a adoção do BECCS como uma solução sustentável para o setor.

3.6 Caso Rocky Mountain Carbon Project

O projeto Rocky Mountain Carbon é uma iniciativa pioneira de Bioenergia com Captura e Armazenamento de Carbono (BECCS) no Canadá, localizado na fábrica de celulose Kraft não branqueada da West Fraser em Hinton, Alberta, que tem capacidade de 250 mil toneladas de celulose por ano. Com um investimento total de CAD\$15,6 milhões (quinze milhões e seiscentos mil dólares canadenses), o projeto visa capturar e armazenar permanentemente entre 1,0 e 1,3 milhão de toneladas de CO₂ biogênico por ano, contribuindo significativamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa.

A Vault 44.01 lidera o estudo do projeto, em colaboração com a West Fraser e a TorchLight Bioresources. A Vault 44.01 possui vasta experiência em captura e armazenamento geológico seguro de CO₂. A West Fraser é uma empresa diversificada de produtos de madeira (madeira engenheirada e serrada, cavacos de madeira, celulose, papel jornal e energias renováveis), com mais de 60 instalações na América do Norte e Europa. A TorchLight Bioresources atua como consultoria estratégica em descarbonização, integrando os setores de energia, silvicultura e agricultura. A Figura 3.7 traz uma visão aérea da planta de celulose da West Fraser em Hinton, Canadá.

Figura 3.7 – Foto área da planta de celulose da West Fraser em Hinton, Canadá



Fonte: MONDI PLC, 2023.

O projeto já recebeu do Governo de Alberta os direitos para avaliar e utilizar o local de armazenamento de CO₂, conhecido como Rocky Mountain Carbon Vault, a nordeste de Hinton, Alberta. Esse local será fundamental para o sequestro seguro do carbono capturado. Para viabilizar o transporte e armazenamento do CO₂, o projeto prevê a construção de um gasoduto com mais de 30 km de extensão e a instalação de múltiplos poços de sequestro e monitoramento. O engajamento com as comunidades locais e povos originários será parte integral do estudo, garantindo um diálogo aberto e respeitoso ao longo de todas as etapas.

Atualmente, o projeto está na fase de *Front-End Engineering and Design* (FEED), com financiamento de CAD\$2,5 milhões (dois milhões e quinhentos mil dólares canadenses) fornecido pela *Emissions Reduction Alberta* (EMISSIONS REDUCTION ALBERTA, 2023). Essa etapa envolve engajamento contínuo com fornecedores potenciais e compradores de CDRs, além do desenvolvimento da infraestrutura necessária. O sucesso desta fase será determinante para a implementação completa do projeto, posicionando o Canadá como um líder em tecnologias de remoção de carbono.

Figura 3.8 – Cronograma do Rocky Mountain Carbon Project



Fonte: VAULT 44.01, 2024.

Além de remover grandes volumes de CO₂ da atmosfera, o projeto visa gerar certificados de remoção de carbono (CDRs), que podem ser adquiridos por setores de difícil descarbonização, como aviação, tecnologia, siderurgia e transporte marítimo. Isso oferece uma solução viável para empresas que buscam compensar suas emissões, alinhando-se às metas climáticas globais.

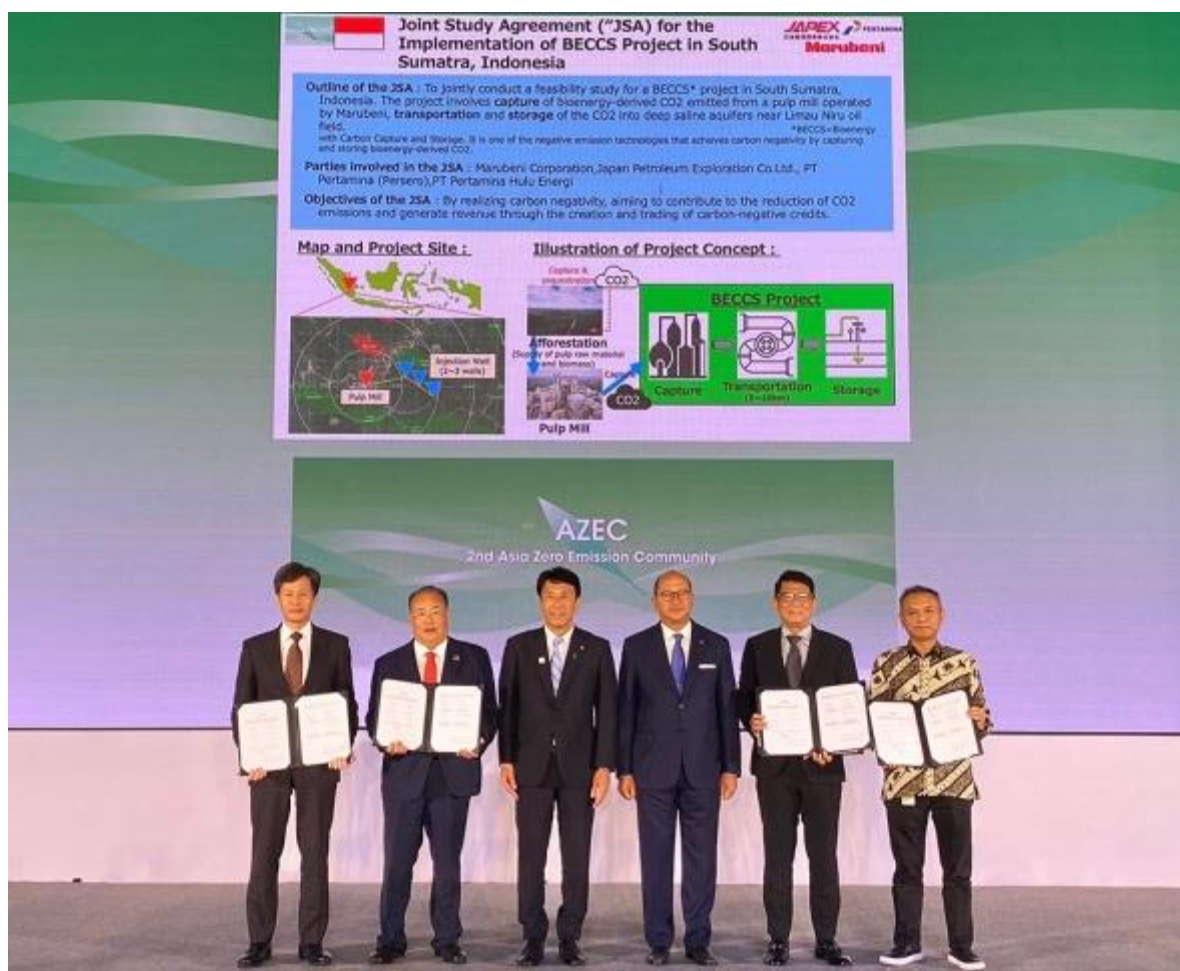
Em julho de 2023, a Mondi plc adquiriu a fábrica de celulose Hinton Pulp e anunciou a intenção de investir mais €400 milhões, principalmente em uma nova máquina de papel kraft de 200.000 toneladas por ano na fábrica (MONDI PLC, 2023). Desde o anúncio não foram identificadas notícias sobre impactos ao projeto de BECCS.

3.7 Caso PT Tanjungenim Lestari Pulp and Paper Project

Recentemente, em 26 de agosto de 2024, a Marubeni Corporation e a Japan Petroleum Exploration Co., Ltd. (JAPEX) firmaram um acordo conjunto de estudo de viabilidade com a empresa estatal indonésia PT Pertamina e sua subsidiária PT Pertamina Hulu Energi. O projeto, localizado na Província de Sumatra do Sul, Indonésia, tem como objetivo avaliar a viabilidade da tecnologia BECCS (Bioenergia com Captura e Armazenamento de Carbono) em uma fábrica de celulose e um campo de petróleo adjacente (MARUBENI CORPORATION, 2024).

O estudo focará na captura de CO₂ derivado de biomassa, gerado nas caldeiras da fábrica de celulose PT Tanjungenim Lestari Pulp and Paper, subsidiária da Marubeni. Esse CO₂ será transportado e armazenado em aquíferos salinos profundos próximos ao campo de petróleo Limau, operado pelo grupo Pertamina. Além de contribuir para a redução das emissões de CO₂, o projeto visa gerar receita por meio da criação e comercialização de créditos de carbono negativos. As partes envolvidas esperam iniciar as operações até 2030, estabelecendo um marco pioneiro para BECCS na região (MARUBENI CORPORATION, 2024).

Figura 3.9 – Lançamento do Projeto com os Ministros de ambos os Países



Fonte: MARUBENI CORPORATION, 2024.

Este estudo conjunto integra um acordo mais amplo, assinado em fevereiro de 2022 entre Marubeni e Pertamina, para desenvolver projetos de descarbonização na Indonésia, incluindo a produção de combustíveis de biomassa e a geração de créditos de carbono (ARGUS, 2024).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base no estudo conceitual exploratório detalhado anterior, apresenta-se uma análise dos principais pontos discutidos neste trabalho, abordando tanto as barreiras como as oportunidades para a implementação de BECCS na indústria de celulose nacional. Cada elemento discutido ao longo do estudo — incluindo aspectos regulatórios, capacidade de armazenamento geológico, infraestrutura de transporte, fatores técnicos e econômicos, aceitação social e estudo de casos internacionais — é avaliado com o intuito de contextualizar as complexidades envolvidas na aplicação dessa tecnologia no Brasil.

Em relação à variável “Regulação e Políticas Nacionais”, a análise das regulamentações brasileiras indicou avanços importantes, como a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e a Lei do Combustível do Futuro, todavia, ainda é perceptível a falta de um arcabouço robusto e consolidado para captura e armazenamento de carbono, que tem sido determinante para o sucesso dessa tecnologia em países líderes em distintos setores da economia, não somente nas áreas de óleo, gás e biocombustíveis.

Ato contínuo, a tramitação dos Projetos de Lei nº 2.148/2015 e nº 1.425/2022, referentes ao Marco Legal do Mercado de Carbono e ao Marco Legal da Captura e Armazenamento de Carbono, é essencial para reconhecer e impulsionar o potencial do CCS e BECCS no Brasil. A demora em aprová-los limita o desenvolvimento de um mercado de carbono robusto, indispensável para atrair investimentos e viabilizar as tecnologias de descarbonização. Acelerá-los é, portanto, crucial para integrar o país à economia de baixo carbono.

Ao avaliar as iniciativas de CCS ao redor do mundo, nota-se que os governos nacionais estão colaborando entre si e com pesquisadores para criar e melhorar estruturas regulatórias e políticas, enquanto empresas do setor privado colaboram entre si para desenvolver cadeias de valor de CCS. Neste sentido, o Brasil firmou acordos bilaterais com EUA, Reino Unido e Japão que incluem CCS em seu escopo, destacando, por exemplo, a criação do Brasil ID Hub (acordo de cooperação entre Brasil e Reino

Unido) cujo objetivo é promover o desenvolvimento e a implementação de tecnologias que apoiem a descarbonização do setor industrial.

Quanto ao apoio do setor de celulose nas regulamentações, destaca-se a participação da Indústria Brasileira de Árvores (Ibá) no recém-criado Comitê Técnico da Indústria de Baixo Carbono (CTIBC) do Governo Federal, cujo objetivo é promover a articulação dos órgãos públicos e da iniciativa privada para implementar, monitorar e revisar as políticas e projetos que estimulem a transição para a economia de baixo carbono no setor industrial do país.

No que diz respeito ao item “Capacidade de Armazenamento e Infraestrutura de Transporte”, a análise do Mapa de Prospectividade para CCS mostrou que 50% das maiores plantas de celulose brasileiras estão situadas em bacias sedimentares com alta capacidade de armazenagem geológico de CO₂, sugerindo um bom indicativo de viabilidade técnica para a implementação de BECCS, o que não descarta a necessidade de avançar em estudos geológicos detalhados, como perfurações de sondagem e análises de solo e subsolo, para confirmar os indícios preliminares.

Todavia, embora o aspecto geológico pareça ser favorável ao setor de celulose, constatou-se pelo presente estudo que o desafio permanece em estabelecer infraestrutura adequada para transporte de CO₂, especialmente considerando que a maioria dos dutos disponíveis no Brasil serve a outros setores. A criação de hubs regionais de captura e armazenamento pode ser uma solução viável para otimizar custos e promover sinergias, uma vez que algumas regiões do país apresentam concentração de plantas de celulose, como é o caso do Estado do Mato Grosso do Sul, o que facilita a formação desses cluster e a construção de dutos específicos para o transporte de CO₂.

No tocante aos “Aspectos Técnicos e Econômicos da Implementação”, destaca-se que o estudo exploratório demonstrou que a maior parte das emissões de CO₂ em fábricas de celulose e papel provém da biomassa, gerando emissões biogênicas. Isso implica que, se manejadas de forma sustentável, essas emissões podem ser consideradas neutras em carbono e com a aplicação do CCS, é possível alcançar emissões negativas, contribuindo para a remoção de CO₂ da atmosfera.

Verificou-se, também, que as principais fontes de emissão de CO₂ em fábricas de celulose incluem a caldeira de recuperação, a caldeira de biomassa e o forno de cal. As tecnologias de captura para essas áreas da planta podem ser aplicadas em três etapas do processo: pré-combustão, oxicomustão e pós-combustão. Dentre essas possibilidades, a captura pós-combustão é a mais eficiente e com maior maturidade comercial, com uma taxa de captura de até 95%, utilizando tecnologias à base de solventes como a monoetanolamina (MEA).

A captura pós-combustão, que é uma das tecnologias mais estudadas para esse setor, mostra alta eficiência com solventes como monoetanolamina (MEA), alcançando taxas de captura em torno de 90%. Esse processo, entretanto, apresenta desafios energéticos, pois requer resfriamento intensivo dos gases de combustão e um consumo considerável de reagentes, aumentando a demanda energética da planta. Tecnologias como o looping de cálcio, que reutilizam a lama de cal, surgem como alternativa promissora em termos de custos operacionais, embora sua aplicação exija mudanças no processo principal, o que pode tornar sua implantação mais complexa e custosa.

Sobre os desafios da implementação dos projetos de BECCS, constatou-se que a implantação de sistemas de captura e armazenamento de carbono em plantas industriais demanda tempo considerável para vencer todas as etapas de viabilidade, desenvolvimento de engenharia e construção, sendo que o tempo médio de execução para um projeto bem-sucedido é de seis anos.

Acerca da “Aceitação Social e Percepção Pública” para implantação de tecnologias BECCS, verificou-se através de consulta a literatura acadêmica que a percepção pública sobre CCS é limitada no Brasil, mas a exposição a informações claras e detalhadas pode aumentar significativamente o apoio da população a essa tecnologia. Embora o público entrevistado apoie o desenvolvimento do CCS, prioridades sociais como saúde e segurança pública são vistas como mais urgentes, o que pode influenciar os investimentos governamentais e a aceitação da tecnologia.

A licença social para implantar e operar tecnologias de captura e armazenamento de carbono no setor de celulose depende de fatores como cognição pública, confiança, percepção de riscos e benefícios, e consciência ambiental. Quanto maior o conhecimento

e a confiança da população nas instituições responsáveis, bem como a percepção de benefícios claros e o alinhamento com valores ambientalistas, maior é o suporte social para esses projetos.

Todavia, constatou-se a falta de divulgação setorial sobre CCS/BECCS, não sendo identificada informativos sobre o tema nos veículos de comunicação das associações do setor, como IBÁ e ABTCP, que poderiam desempenhar um papel significativo na conscientização pública e empresarial e fomentar discussões e disseminar conhecimento sobre CCS/BECCS, aumentando a confiança pública e o apoio à adoção de tecnologias sustentáveis no setor de celulose.

Quanto à importância dos “Mecanismos de Apoio, Incentivos e Subsídios” para à viabilização do BECCS na indústria de celulose nacional, fica evidente a necessidade de suporte financeiro para tornar esses projetos economicamente viáveis. O alto custo de implementação, variando de US\$ 20 a US\$ 300 por tonelada de CO₂ evitada, é uma barreira significativa, especialmente para os setores onde as margens são limitadas.

Ao avaliar a estratégia adotada por nações líderes em projetos de CCS, fica evidente que a criação de subsídios governamentais e políticas específicas são fundamentais para reduzir o custo marginal desses projetos e abrir espaço para a expansão da tecnologia em regiões onde ainda há pouca implementação, como é o caso das economias em desenvolvimento.

No contexto brasileiro, a falta de incentivos específicos para CCS e/ou BECCS, apesar de recursos disponíveis em programas como o BNDES RenovaBio e o Fundo Clima, ressalta a importância de uma abordagem regulatória direcionada. Ainda que esses fundos ofereçam linhas de financiamento para projetos de redução de emissões, eles atualmente não contemplam diretamente o BECCS. A criação de mecanismos específicos de apoio financeiro e de incentivos fiscais para captura de carbono seria um passo decisivo para atrair novos investimentos e acelerar o desenvolvimento dessa tecnologia no setor.

A redução dos custos para implantação de projetos de BECCS também passar por outros variáveis relevantes, como aperfeiçoar o mapeamento de formações geológicas

para uma melhor compreensão dos reservatórios onde o CO₂ pode ser armazenado. Uma melhor caracterização da subsuperfície nacional poderia ajudar a reduzir as distâncias de transporte e potencializar a criação de hubs de CCS (conjuntos de instalações industriais, todas conectadas a um único aparato compartilhado de transporte e armazenamento).

Além disso, a criação do mercado regulado de carbono no Brasil (lei ainda em tramitação) e a inclusão de projetos de BECCS em padrões de títulos verdes representam oportunidades estratégicas para facilitar o financiamento. Títulos verdes e esquemas como Contratos de Carbono por Diferença (CCfD) podem contribuir para a redução do custo de capital e possibilitar a captação de recursos para novos projetos. Contudo, o sucesso desse modelo dependerá de uma convergência entre políticas de incentivo e a aceitação de BECCS como ferramenta válida de mitigação, criando um ambiente financeiro e regulatório favorável para a adoção em larga escala na indústria de celulose.

Finalmente, o status dos projetos de BECCS no mercado de celulose demonstra que, embora haja um crescente interesse e iniciativas pioneiras, como o *Rocky Mountain Carbon Project* no Canadá e o *PT Tanjungenim Lestari Pulp and Paper Project* na Indonésia, a adoção em larga escala dessa tecnologia ainda enfrenta desafios substanciais e que demandam subsídios governamentais e o engajamento com setores estratégicos.

No Brasil, há somente um projeto de BECCS em estágio de estudo e desenvolvimento. O investimento sob responsabilidade da FS Bioenergia, empresa produtora de etanol de milho, passou por uma primeira fase de realização de estudos técnicos e perfuração de poço estratigráfico (aproximadamente R\$ 110 milhões) que comprovaram as condições geológicas adequadas para CO₂ no subsolo da cidade de Lucas do Rio Verde, Estado do Mato Grosso. Nesse momento, o projeto avança para a segunda fase (cerca de R\$ 350 milhões) referente à aquisição e implantação dos equipamentos de captura, desidratação, compressão e injeção de CO₂ no subsolo.

Quando analisasse a situação do setor de celulose e papel, a única iniciativa de BECCS identificada é uma linha de investimento da Suzano Ventures voltada para tecnologias de remoção de carbono, que abre portas para possíveis desenvolvimentos

futuros. Contudo, o país carece de uma estrutura regulatória e de incentivos específicos para BECCS, limitando o avanço dessa tecnologia no setor de base florestal.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo exploratório e qualitativo trouxe uma análise abrangente dos fatores que influenciam a implementação de tecnologias de bioenergia com captura e armazenamento de carbono (BECCS) na indústria de celulose brasileira, com foco em aspectos regulatórios, técnicos, econômicos e sociais.

A análise demonstrou que, embora o Brasil tenha dado importantes passos iniciais para estruturar um marco regulatório voltado ao mercado de carbono, as regulamentações específicas para CCS ainda estão em fase de discussão, o que limita a segurança jurídica e a atratividade de investimentos em BECCS. Para que o Brasil se alinhe aos países líderes em tecnologias de descarbonização, é fundamental que se consolide uma estrutura legal que suporte a viabilidade desses projetos de forma robusta e integrada, alinhando-se ao movimento global por uma economia de baixo carbono.

A análise geológica de prospectividade destacou que uma parte significativa das maiores plantas de celulose do país está localizada em regiões com alto potencial de armazenamento geológico de CO₂. Esse aspecto favorável indica que o setor possui viabilidade técnica preliminar para a implementação de BECCS, embora o desenvolvimento de infraestrutura específica para transporte de CO₂ e a criação de hubs regionais sejam necessários para otimizar os custos e possibilitar uma adoção ampla da tecnologia.

Os aspectos técnicos e econômicos abordados evidenciam a necessidade de incentivos financeiros e subsídios para que o BECCS se torne economicamente viável no Brasil. Projetos pioneiros internacionais demonstram que a viabilidade econômica de BECCS depende de políticas de apoio que compensem os altos custos operacionais e de implementação, os quais impactam diretamente o custo da produção de celulose.

Além disso, tecnologias de captura, como pós-combustão, apesar de serem eficientes, apresentam desafios energéticos que afetam a rentabilidade e exigem altos investimentos em infraestrutura. Neste contexto, a criação de incentivos robustos, como

créditos fiscais e subsídios diretos, seria uma etapa crucial para fomentar a adoção de BECCS no setor brasileiro.

A aceitação social e a percepção pública também surgem como fatores decisivos para o avanço de projetos de BECCS no Brasil. Estudos indicam que, embora o conhecimento sobre a tecnologia seja limitado entre a população brasileira, ações de conscientização e comunicação podem aumentar significativamente o apoio público. Essa questão é particularmente relevante para garantir uma licença social para operar, visto que as preocupações sobre segurança e impacto ambiental podem gerar resistências.

Assim, iniciativas de comunicação e engajamento com as comunidades, bem como o apoio de associações do setor de celulose (como o IBÁ e ABTCP), são essenciais para construir uma base de aceitação social e fortalecer o papel do BECCS como uma solução de descarbonização deste segmento da economia.

Este estudo, no entanto, possui limitações inerentes a seu caráter exploratório e qualitativo, que impede a mensuração precisa de alguns dos fatores abordados. A análise se baseou em dados disponíveis e exemplos de iniciativas internacionais, o que pode não capturar integralmente as especificidades do contexto brasileiro. Estudos adicionais e investigações quantitativas serão necessários para aprofundar a compreensão sobre a viabilidade e os impactos econômicos de BECCS no setor de celulose no Brasil, especialmente no que tange aos custos de implementação e às implicações regulatórias.

Conclui-se, portanto, que a implementação de BECCS na indústria de celulose nacional é uma alternativa promissora para alcançar emissões negativas, aproveitando o CO₂ biogênico do processo produtivo para remover carbono da atmosfera de forma permanente. No entanto, o sucesso dessa tecnologia depende de avanços no marco regulatório e na criação de incentivos financeiros que tornem o BECCS viável e atrativo. Com esses pilares em desenvolvimento, o setor de celulose no Brasil poderá contribuir de maneira efetiva para a descarbonização global, posicionando o país como um importante ator na redução de emissões de carbono.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). **Relatório Anual da Ibá 2024**. [S. L.]: Ibá, 2024. Disponível em: <https://iba.org/publicacoes/relatorios>. Acesso em: 06 out. 2024.

KUPARINEN, Katja; VAKKILAINEN, Esa; TYNJÄLÄ, Tero. **Biomass-based carbon capture and utilization in kraft pulp mills**. 2019. Disponível em: <https://d-nb.info/1206304782/34>. Acesso em: 25 ago. 2024.

THE EUROPEAN HOUSE. **Zero Carbon Technology Roadmap: Carbon Capture & Storage: a strategic lever for the decarbonisation and competitiveness of Italy**. Carbon Capture & Storage: a strategic lever for the decarbonisation and competitiveness of Italy. 2023. Disponível em: <https://www.ambrosetti.eu/en/news/zero-carbon-technology-roadmap/>. Acesso em: 25 ago. 2024.

HM Government. **CCUS Net Zero Investment Roadmap: Capturing carbon and a global opportunity**. Capturing carbon and a global opportunity. 2023. Disponível em: <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/64a29b7d06179b00131ae94e/ccus-investment-roadmap.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2024.

QUIGGIN, Daniel. **BECCS deployment: the risks of policies forging ahead of the evidence**. The risks of policies forging ahead of the evidence. 2021. Disponível em: <https://www.chathamhouse.org/sites/default/files/2021-09/2021-10-01-beccs-deployment-quiggin.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2024.

European Commission. **CCUS Roadmap to 2030**. 2021. Disponível em: https://www.ccus-setplan.eu/wp-content/uploads/2021/11/CCUS-SET-Plan_CCUS-Roadmap-2030.pdf. Acesso em: 25 ago. 2024.

THANGARAJ, P.; OKOYE, S.; GORDON, B.; ZILBERMAN, D.; HOCHMAN, G.. **Factsheet: Bioenergy With Carbon Capture And Storage**. 2018. Disponível em: https://www.usda.gov/sites/default/files/documents/BECCS_Bioenergy_with_Carbon_Capture_Factsheet.pdf. Acesso em: 25 ago. 2024.

ENERGY FUTURES INITIATIVE. **Surveying the BECCS Landscape**. 2022. Disponível em: https://energyfuturesinitiative.org/wp-content/uploads/sites/2/2022/03/Surveying-the-BECCS-Landscape_Report.pdf. Acesso em: 25 ago. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Technology Roadmap: delivering sustainable bioenergy**. Delivering Sustainable Bioenergy. 2017. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-delivering-sustainable-bioenergy>. Acesso em: 25 ago. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Technology Roadmap: carbon capture and storage in industrial applications**. Carbon Capture and Storage in Industrial Applications. 2011. Disponível em: https://www.unido.org/sites/default/files/2011-09/CCS_Industry_Roadmap_WEB_2.pdf. Acesso em: 25 ago. 2024.

EFI FOUNDATION. **Taking Root: A Policy Blueprint for Responsible BECCS Development in the United States**. 2023. Disponível em: <https://efifoundation.org/wp-content/uploads/sites/3/2023/06/Taking-Root-Final.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2024.

BROWN, Adam. **BECCS and BECCU in the IEA Bioenergy Roadmap**. 2018. Disponível em: <https://task41project5.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/sites/7/2017/11/BROWN.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2024.

IEA BIOENERGY: TASK 40. **Deployment of BECCS/U value chains: technological pathways, policy options and business models**. Technological pathways, policy options and business models. 2020. Disponível em: <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2020/06/Deployment-of-BECCS-Value-Chains-IEA-Bioenergy-Task-40.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2024.

GLOBAL CCS INSTITUTE. **Global Status of CCS 2023: scaling up through 2030**. 2023. Disponível em: https://res.cloudinary.com/dbtfcnfij/images/v1700717007/Global-Status-of-CCS-Report-Update-23-Nov/Global-Status-of-CCS-Report-Update-23-Nov.pdf?_i=AA. Acesso em: 06 out. 2024.

FASTMARKETS. **Global market pulp outlook: six pulp price drivers in 2023**. Fastmarkets, 2023. Disponível em: <https://www.fastmarkets.com/insights/global-market-pulp-outlook-six-pulp-price-drivers-2023/>. Acesso em: 13 out. 2024.

GLOBENEWSWIRE. **Outlook on the World's Pulp Market 2023-2028: Specialty Cellulose Sparks Unprecedented Growth.** GlobeNewswire, 2024. Disponível em: <https://www.globenewswire.com/news-release/2024/01/17/2811049/0/en/Outlook-on-the-World-s-Pulp-Market-2023-2028-Specialty-Cellulose-Sparks-Unprecedented-Growth.html>. Acesso em: 13 out. 2024.

RESEARCH AND MARKETS. **Global Pulp Market: Analysis by Demand, Production, Type, End Market, Region, Size and Trends with Impact of COVID-19 and Forecast up to 2028.** Daedal Research, 2024. Disponível em: <https://www.researchandmarkets.com/reports/5923044/global-pulp-market-demand-production-end-markets>. Acesso em: 13 out. 2024.

REVISTA QUIMICA E DERIVADOS. **Produção de Ácido Sulfúrico a partir de Gases Odoríferos: Indústria de Papel e Celulose.** 2020. Disponível em: <https://www.quimica.com.br/producao-de-acido-sulfurico-a-partir-de-gases-odoriferos/>. Acesso em: 18 out. 2024.

KLEMEŁ, Jiří Jaromír (ed.). **Handbook of Process Integration (PI): Minimisation of Energy and Water Use, Waste and Emissions.** 2. ed. Cambridge: Woodhead Publishing, 2022.

ANDRITZ PULP & PAPER. **ANDRITZ successfully starts up dissolving pulp production plant for Bracell's "STAR" project, Brazil.** 2022. Disponível em: <https://www.andritz.com/newsroom-en/pulp-paper/2022-05-18-bracell-group>. Acesso em: 18 out. 2024.

EPE (Empresa de Pesquisa Energética). **Atlas da Eficiência Energética – Brasil | 2023.** Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-788/Atlas_Brasil_2023_PT_rev_set2024.pdf. Acesso em: 18 out. 2024.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. **Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG).** Disponível em: <https://seeg.eco.br/>. Acesso em: 18 out. 2024.

RIO, Dylan D. Furszyfer del; SOVACOOOL, Benjamin K.; GRIFFITHS, Steve; BAZILIAN, Morgan; KIM, Jinsoo; FOLEY, Aoife M.; ROONEY, David. **Decarbonizing the pulp and paper industry: A critical and systematic review of sociotechnical developments and policy options.** Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032122005950>. Acesso em: 18 out. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Bioenergy with Carbon Capture and Storage.** Disponível em: <https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage/bioenergy-with-carbon-capture-and-storage>. Acesso em: 18 out. 2024.

GLOBAL CCS INSTITUTE. **2019 Perspective – Bioenergy and Carbon Capture and Storage.** Disponível em: https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2019/03/BECCS-Perspective_FINAL_PDF.pdf. Acesso em: 25 ago. 2024.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Carbon Dioxide Capture and Storage.** 2005. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs_wholereport-1.pdf. Acesso em: 18 out. 2024.

HARO, Herberth Arturo Vasquez. **Investigação Numérica do Processo de Separação de Dióxido de Carbono por Absorção com Amina para Aplicação em Projetos de Armazenamento de Carbono (CCS).** 2009. 88 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Puc-Rio, –Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/15511/15511_1.PDF. Acesso em: 18 out. 2024

FIGUEROA, J. D.; FOUT, T.; PLASYNSki, S.; MCDONALD, M.; SRIVASTAVA, R. D. **Advances in CO₂ capture technology—The U.S. Department of Energy's Carbon Sequestration Program.** International Journal of Greenhouse Gas Control, v. 2, n. 1, p. 9-20, 2008.

YANG, H. et al. **Progress in carbon dioxide separation and capture: A review.** Journal of Environmental Sciences, v. 20, n. 1, p. 14-27, 2008.

WILKINSON, M. B. et al. **Oxyfuel combustion for CO₂ capture in power plants**. Energy Procedia, v. 1, n. 1, p. 623-630, 2003.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Prospects for CO₂ Capture and Storage**. 2004. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/da1632ed-168a-4c36-bbf9-fc5d60fb4543/ProspectsforCO2CaptureandStorage.pdf>. Acesso em: 18 out. 2024.

KOHL, A.L.; NIELSEN, R.B.. **Gas Purification**. 5. ed. Houston: Gulf Publishing Company, 1997.

BEECY, D.; KUUSKRAA, V. **The role of CO₂ sequestration in climate management**. In: Proceedings of the 7th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies. Vancouver, 2005. Disponível em: <https://www.osti.gov/servlets/purl/860528/>. Acesso em: 18 out. 2024.

IEA GREENHOUSE GAS R&D PROGRAMME (IEA GHG). **Reduction of CO₂ emissions from steelmaking**. Cheltenham: IEA GHG, 2000. 112 p.

DONGKE, Z.; BENNETT, C.; LAING, P. **Oxy-fuel combustion for carbon capture in the steel industry**. In: Proceedings of the International Conference on CO₂ Capture and Storage. Kyoto, 1988. pp. 243-256.

SINGH, S.; GAUTAM, S.; VERMA, A.; SINGH, B. P. **Biomass-based hydrogen production techniques: State-of-the-art review and future applications**. International Journal of Hydrogen Energy, [S.l.], v. 45, n. 52, p. 26804-26830, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319920345079>. Acesso em: 20 out. 2024.

SEO, Youngkyun; CHANG, Daejun; KANG, Seong-Gil; HUH, Cheol; KANG, Kwangu. **Estimation of CO₂ Transport Costs in South Korea Using a Techno-Economic Model**. 2015. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/8/3/2176>. Acesso em: 18 out. 2024.

Régis Rathmann (org.). **Opções transversais para mitigação de emissões de gases de efeito estufa: captura, transporte e armazenamento de carbono**. 2017. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/cgcl/arquivos/opcoes-de-mitigacao-de-emissoes-de-gee-em-setores-chave/opcoes-transversais-para-mitigacao-de>

emissoes-de-gases-de-efeito-estufa-captura-transporte-e-armazenamento-de-carbono.pdf. Acesso em: 26 out. 2024

KETZER, João Marcelo Medina; MACHADO, Claudia Xavier; ROCKETT, Gabriela Camboim; IGLESIAS, Rodrigo Sebastian (org.). **Brazilian Atlas of CO₂ Capture and Geological Storage**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2014

National Energy Technology Laboratory (NETL). **Carbon Storage FAQs**. 2020. Disponível em: <https://netl.doe.gov/carbon-management/carbon-storage/faqs/carbon-storage-faqs>. Acesso em: 26 out. 2024.

MCHUGH, Mark A.; KRUKONIS, Val J.. **Supercritical Fluid Extraction: Principles and Practice**. 2. ed. Stoneham: Butterworth-Heinemann, 1994.

GLOBAL CCS INSTITUTE. **Understanding CCS Storage**. 2022. Disponível em: https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2022/07/Factsheet_CCS-Explained_Storage.pdf. Acesso em: 26 out. 2024.

DELERCE, Sylvain; MARIENI, Chiara; OELKERS, Eric H.. **Carbonate geochemistry and its role in geologic carbon storage**. 2021. Disponível em: https://hal.science/hal-03433164v1/file/Chapter_CO2_storage_V8.pdf. Acesso em: 26 out. 2024.

XCALIBUR SMART MAPPING. **Underground Storage of CO₂**. 2023. Disponível em: <https://xcaliburmp.com/solution/underground-storage-of-co2/>. Acesso em: 27 out. 2024.

ADVANCED RESOURCES INTERNATIONAL. **Enhanced Oil Recovery Scoping Study**. 1999. Disponível em: https://www.adv-res.com/pdf/electrotech_opps_tr113836.pdf. Acesso em: 27 out. 2024.

GLOBAL CCS INSTITUTE. **Storage Resources Database**. 2024. Disponível em: <https://co2re.co/StorageData>. Acesso em: 27 out. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Special Report on Carbon Capture Utilisation and Storage**. 2020. Disponível em: https://iea.blob.core.windows.net/assets/181b48b4-323f-454d-96fb-0bb1889d96a9/CCUS_in_clean_energy_transitions.pdf. Acesso em: 27 out. 2024.

METI JAPAN. **Roadmap for Carbon Recycling Technologies**. 2021. Disponível em: https://www.meti.go.jp/english/press/2021/pdf/0726_003a.pdf. Acesso em: 27 out. 2024.

INVESTALK. **Setorial Papel e Celulose | Setembro 2024**. 2024. Disponível em: <https://investalk.bb.com.br/noticias/mercado/setorial-papel-e-celulose-setembro-2024>. Acesso em: 17 set. 2024.

CHEN, Chaoji; HU, Liangbing. **Nanoscale Ion Regulation in Wood-Based Structures and Their Device Applications**. 2020. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adma.202002890>. Acesso em: 27 out. 2024.

MONDI PLC. **Hinton Pulp mill acquisition supports growth in Mondi's Americas paper bags business**. 2023. Disponível em: <https://www.mondigroup.com/news-and-insight/2023/hinton-pulp-mill-acquisition-supports-growth-in-mondis-americas-paper-bags-business/>. Acesso em: 01 nov. 2024.

VAULT 44.01. **Rocky Mountain Carbon**. 2024. Disponível em: <https://www.rockymountaincarbon.com>. Acesso em: 01 nov. 2024.

EMISSIONS REDUCTION ALBERTA. **The Hinton Bioenergy Carbon Capture and Storage Project**. 2023. Disponível em: <https://www.eralberta.ca/projects/details/hinton-bioenergy-carbon-capture-and-storage-project/>. Acesso em: 01 nov. 2024.

MARUBENI CORPORATION. **Joint Study Agreement for a Feasibility Assessment on BECCS in South Sumatra, Indonesia**. 2024. Disponível em: <https://www.marubeni.com/en/news/2024/info/00038.html>. Acesso em: 01 nov. 2024.

ARGUS. **Marubeni, Japex, Pertamina to study bioenergy with CCS**. 2024. Disponível em: <https://www.argusmedia.com/en/news-and-insights/latest-market-news/2602284-marubeni-japex-pertamina-to-study-bioenergy-with-ccs>. Acesso em: 01 nov. 2024.

INFRA S.A.. **Mapa Dutoviário Anuário Estatístico 2010 - 2022**. 2021. Disponível em: <https://www.infrasa.gov.br/wp-content/uploads/2024/06/MapaDutoviario.pdf>. Acesso em: 01 nov. 2024.

LIMA, Pâmela Rossoni. **Estudo da percepção pública sobre Captura e Armazenamento Geológico de CO₂ (CCS) no Espírito Santo**. 2018. 166 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Universitário Norte do Espírito Santo, São Matheus, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufes.br/server/api/core/bitstreams/4a07031c-bd4a-4d7f-bf2b-2edadbc4ccb1/content>. Acesso em: 01 nov. 2024.

WÜSTENHAGEN, R.; WOLSINK, M.; BÜRER, M. J. **Social acceptance of renewable energy innovation: An introduction to the concept**. *Energy Policy*, v. 35, n. 5, p. 2683-2691, 2007.

DEVINE-WRIGHT, P. **Rethinking NIMBYism: The role of place attachment and place identity in explaining place-protective action**. *Journal of Community & Applied Social Psychology*, v. 19, n. 6, p. 426-441, 2009.

TCVETKOV, Pavel; CHEREPOVITSYN, Alexey; FEDOSEEV, Sergey. **Public perception of carbon capture and storage: a state-of-the-art overview**. *Heliyon*, v. 5, n. 12, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02845>. Acesso em: 3 nov. 2024.

ANP. **Relatório sobre a implementação do marco regulatório de CCUS no país**. 2024. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/canais_atendimento/imprensa/relatorioccusstm24.04.09.pdf. Acesso em: 03 nov. 2024.

IEAGHG. **Techno-economic evaluation of retrofitting CCS in a market pulp mill and an integrated pulp and board mill**. 2016. Disponível em: <https://ieaghg-publications.s3.eu-north-1.amazonaws.com/Technical+Reports/2016-10+Techno-Economic+Evaluation+of+Retrofitting+ccs+in+a+market+pulp+mill+and+an+integrated+pulp+and+board+mill.pdf>. Acesso em: 03 nov. 2024.

ONARHEIM, Kristin; GARDARSDOTTIR, Stefania; MATHISEN, Anette; NORD, Lars; BERSTAD, David. **Industrial implementation of Carbon Capture in Nordic industry sectors**. 2015. Disponível em: <https://www.sintef.no/globalassets/sintef-energi/nordiccs/d4.2.1501-d18-co2-capture-cases.pdf>. Acesso em: 03 nov. 2024.

CHIAPPINI, Gabriel. **Projetos de CCUS são adiados por falta de financiamento**. 2023. Disponível em: <https://eixos.com.br/transicao-energetica/projetos-de-ccus-sao-adiados-por-falta-de-financiamento/>. Acesso em: 03 nov. 2024.

JORNALCANA. **FS realizará segunda fase de investimento no projeto BECCS e produzirá o primeiro etanol carbono negativo do mundo**. 2024. Disponível em: <https://jornalcana.com.br/usinas-notas/fs-realizara-segunda-fase-de-investimento-no-projeto-beccs-e-produzira-o-primeiro-etanol-carbono-negativo-do-mundo/>. Acesso em: 04 nov. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **CCUS Policies and Business Models: Building a Commercial Market**. 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/ccus-policies-and-business-models-building-a-commercial-market>. Acesso em: 04 nov. 2024.

CAMPOS, Edison da Silva. **Curso básico de fabricação de celulose e papel**. 2011. Disponível em: https://www.eucalyptus.com.br/artigos/outros/2011_Curso_Fabricacao_Celulose_Papel.pdf. Acesso em: 04 nov. 2024.

PURI, R.; YEE, D. **Enhanced coalbed methane recovery through CO₂ injection: a laboratory study**. *Energy Fuels*, v. 4, n. 1, p. 34-39, 1990.

REEVES, S.; OUDINOT, A. **The use of CO₂ for enhanced coal bed methane recovery: a field demonstration**. In: *Proceedings of the 7th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies*. Vancouver, Canada, 2004.

WHITE, C. M.; SMITH, D. H.; JONES, K. L.; GOODMAN, A. L.; JIKICH, S. A.; LACOUNT, R. B.; OZDEMIR, E. **Sequestration of carbon dioxide in coal with enhanced coalbed methane recovery: a review**. *Energy & Fuels*, v. 19, n. 3, p. 659-724, 2005.

GUNTER, W. D.; GENTZIS, T. **Evaluating the potential for CO₂ sequestration in coal seams with enhanced methane recovery**. *Energy Conversion and Management*, v. 37, n. 6-8, p. 1023-1028, 1996.

Presidência da República. **LEI Nº 12.187, DE 29 DE DEZEMBRO DE 2009**. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/l12187.htm. Acesso em: 01 nov. 2024.

Presidência da República. **LEI Nº 12.187, DE 29 DE DEZEMBRO DE 2009**. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/l12187.htm. Acesso em: 01 nov. 2024.

Câmara dos Deputados. **PROJETO DE LEI Nº 2.148/2015**. Disponível em: https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/prop_mostrarintegra?codteor=1355144&filename=PL%202148/2015. Acesso em: 01 nov. 2024.

Presidência da República. **LEI Nº 13.576, DE 26 DE DEZEMBRO DE 2017**. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2015-2018/2017/Lei/L13576.htm. Acesso em: 01 nov. 2024.

Presidência da República. **DECRETO Nº 10.846, DE 25 DE OUTUBRO DE 2021**. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/decreto/d10846.htm. Acesso em: 01 nov. 2024.

Presidência da República. **DECRETO Nº 11.075, DE 19 DE MAIO DE 2022**. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/decreto/D11075.htm. Acesso em: 01 nov. 2024.

Senado Federal. **PROJETO DE LEI Nº 1425/2022**. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=2388818>. Acesso em: 01 nov. 2024.

Presidência da República. **LEI Nº 14.948, DE 2 DE AGOSTO DE 2024**. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2023-2026/2024/Lei/L14948.htm. Acesso em: 01 nov. 2024.

Presidência da República. **LEI Nº 14.993, DE 8 DE OUTUBRO DE 2024**. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/L14993.htm. Acesso em: 01 nov. 2024.

7. ANEXOS

Não aplicável.