

**DYLAN MATTOSO NOBILE**

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA IMPLEMENTAÇÃO DA  
CAPTURA E ARMAZENAMENTO DE CARBONO EM REFINARIAS  
DO BRASIL**

São Paulo

2023



**DYLAN MATTOSO NOBILE**

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA IMPLEMENTAÇÃO DA  
CAPTURA E ARMAZENAMENTO DE CARBONO EM REFINARIAS  
DO BRASIL**

Trabalho de formatura apresentado à  
Escola Politécnica da Universidade de  
São Paulo para a obtenção do diploma de  
Engenheiro de Produção.

São Paulo

2023



**DYLAN MATTOSO NOBILE**

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA IMPLEMENTAÇÃO DA  
CAPTURA E ARMAZENAMENTO DE CARBONO EM REFINARIAS  
DO BRASIL**

Trabalho de formatura apresentado à  
Escola Politécnica da Universidade de  
São Paulo para a obtenção do diploma de  
Engenheiro de Produção.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Associada Celma de  
Oliveira Ribeiro

Co-orientador: Dr. Pedro Gerber  
Machado

São Paulo

2023



## **AGRADECIMENTOS**

Ao finalizar este importante capítulo da minha jornada acadêmica, gostaria de expressar minha profunda gratidão àqueles que tornaram este trabalho possível.

Primeiramente, agradeço aos meus orientadores, Pedro Gerber Machado e Celma de Oliveira Ribeiro, por sua orientação inestimável, apoio e paciência. Sem a experiência e o conhecimento de vocês, este trabalho não teria a profundidade e a qualidade que possuí. Suas contribuições foram fundamentais não apenas para o desenvolvimento deste projeto, mas também para o meu crescimento pessoal e profissional.

À minha família, meu eterno agradecimento. Vocês foram a minha força e meu refúgio nos momentos de dúvida e cansaço. O apoio incondicional, o amor e a compreensão de vocês foram essenciais para que eu pudesse seguir adiante e alcançar este objetivo.

Aos meus amigos, agradeço pela companhia, pelos momentos de descontração e pelas palavras de incentivo. Vocês foram essenciais para tornar esta jornada mais leve e agradável. Cada risada compartilhada e cada palavra de apoio ajudaram a manter meu foco e determinação.

À Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, por ter aberto tantas portas em meu caminho.

Este trabalho é um reflexo do apoio, do encorajamento e da sabedoria compartilhada por cada um de vocês. Sou profundamente grato por ter pessoas tão maravilhosas ao meu lado e dedico a vocês este sucesso.

Obrigado.





## RESUMO

Este trabalho foca na avaliação do desempenho da implementação da captura e armazenamento de carbono (CAC) em refinarias no Brasil. Com o aumento preocupante das emissões de gases do efeito estufa (GEE), estratégias como a CAC emergem como soluções promissoras. O Brasil, com suas significativas emissões de CO<sub>2</sub> e compromissos climáticos globais, apresenta um potencial considerável para a implementação da CAC, especialmente em seus reservatórios geológicos. Este estudo visa explorar a viabilidade da CAC no Brasil, abordando possibilidades de implementação, desafios e políticas que podem influenciar seu desenvolvimento. Selecionou-se um setor com alta emissão de CO<sub>2</sub> e utilizou-se a metodologia da dinâmica de sistemas para analisar diversos cenários simulados. O objetivo é contribuir para a mitigação das mudanças climáticas e para o desenvolvimento sustentável do país, destacando a importância do tema no contexto atual.

**Palavras-chave:** Captura e armazenamento de carbono. Mitigação de emissões. Gás carbônico. Dinâmica de sistemas.

## ABSTRACT

This work focuses on the evaluation of the performance of the implementation of carbon capture and storage (CCS) in refineries in Brazil. With the worrying increase in greenhouse gas (GHG) emissions, strategies such as CCS emerge as promising solutions. Brazil, with its significant CO<sub>2</sub> emissions and global climate commitments, presents considerable potential for the implementation of CCS, especially in its geological reservoirs. This study aims to explore the feasibility of CCS in Brazil, addressing implementation possibilities, challenges, and policies that can influence its development. A sector with high CO<sub>2</sub> emissions was selected, and the system dynamics methodology was used to analyze various simulated scenarios. The objective is to contribute to the mitigation of climate change and the sustainable development of the country, highlighting the importance of the theme in the current context.

**Keywords:** Carbon capture and storage. Emission mitigation. Carbon dioxide. System dynamics.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Os Processos da Captura e Armazenamento de Carbono                                                       | 18 |
| Figura 2 - Simplificação do Processo de Captura Pré-Combustão                                                       | 20 |
| Figura 3 - Simplificação do Processo de Captura Pós-Combustão                                                       | 21 |
| Figura 4 - Simplificação do Processo de Oxidcombustão                                                               | 22 |
| Figura 5 - Exemplo do Processo de Captura de Carbono Direta do Ar                                                   | 24 |
| Figura 6 - Custos e Capacidade de Cada Meio de Transporte do CO <sub>2</sub>                                        | 27 |
| Figura 7 - Processo de Armazenamento de CO <sub>2</sub>                                                             | 29 |
| Figura 8 - Capacidade de Captura de Projetos de CAC em Construção e em Desenvolvimento (Mt CO <sub>2</sub> por ano) | 30 |
| Figura 9 - Número de Instalações e Capacidade de Captura                                                            | 31 |
| Figura 10 - Top 5 Países com Mais Instalações de CAC                                                                | 32 |
| Figura 11 - Simbologia para as quatro possíveis relações causais entre duas variáveis                               | 35 |
| Figura 12 - Ciclos causais de Reforço (R) e Balanço (B) e suas curvas de comportamento das variáveis do sistema     | 35 |
| Figura 13 - Exemplo de Diagrama de Estoque e Fluxo                                                                  | 36 |
| Figura 14 - Modelo Qualitativo de Dinâmica de Sistemas do Setor de Agricultura do Nordeste da Baixa Saxônia         | 37 |
| Figura 15 - Modelo de Dinâmica de Sistemas para Emissões Veiculares                                                 | 38 |
| Figura 16 - Modelo de Dinâmica de Sistemas para CO <sub>2</sub> -EOR-CCUS                                           | 41 |
| Figura 17 - Dinâmica de Sistemas para o Desenvolvimento da Captura e Armazenamento de Carbono                       | 43 |
| Figura 18 - Modelo Baseado em Dinâmica de Sistemas para Viabilidade de Captura de Carbono                           | 45 |
| Figura 19 - Histórico Anual das Maiores Atividades Emissoras de Gases Poluentes                                     | 48 |
| Figura 20 - Histórico Anual das Maiores Subcategorias Emissoras de Gases Poluentes do Setor de Energia              | 49 |

|                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 21 - Localização da Bacia de Campos                                                                                         | 51 |
| Figura 22 - Visão Geral do Modelo                                                                                                  | 56 |
| Figura 23 - Bloco A do Modelo (Captura de CO <sub>2</sub> )                                                                        | 57 |
| Figura 24 - Bloco B do Modelo (Resultados Financeiros)                                                                             | 58 |
| Figura 25 - Curva do Efeito do Aprendizado                                                                                         | 59 |
| Figura 26 - Curva do Custo Total com CAC (dólares por tonelada de CO <sub>2</sub> emitida)                                         | 60 |
| Figura 27 - Curva do Incentivo - Redução dos Impostos                                                                              | 60 |
| Figura 28 - Valor do Imposto sobre Emissões de CO <sub>2</sub> (dólares por tonelada de CO <sub>2</sub> )                          | 61 |
| Figura 29 - Economia Gerada pela Captura e Armazenamento de Carbono (em dólares por tonelada de CO <sub>2</sub> emitida)           | 66 |
| Figura 30 - Comportamento do Imposto e dos Custos com CAC (em dólares por tonelada de CO <sub>2</sub> emitida)                     | 66 |
| Figura 31 - CO <sub>2</sub> Capturado Acumulado na Simulação (toneladas de CO <sub>2</sub> )                                       | 67 |
| Figura 32 - Resultado Financeiro Acumulado e Imposto a Ser Cobrado Acumulado (em dólares)                                          | 67 |
| Figura 33 - Curvas de Custos Marginais de Redução de Emissões no Setor Florestal Global                                            | 68 |
| Figura 34 - Mitigação Anual Projetada por Bioma, por Atividade de Mitigação, Considerando Preço Inicial de USD 50/tCO <sub>2</sub> | 69 |

## **Lista de Tabelas**

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Países com Mais Publicações Sobre Captura de CO <sub>2</sub>            | 20 |
| Tabela 2 - Informações Sobre os Três Tipos de Captura de Carbono                   | 23 |
| Tabela 3 - Média Diária de Captura de Carbono na Represa Boundary                  | 25 |
| Tabela 4 - Quantidade de Artigos por Métodos de Simulação e Área da Saúde]         | 40 |
| Tabela 5 - Políticas para o Desenvolvimento do CAC no Brasil e suas Probabilidades | 53 |
| Tabela 6 - Estimativa das Emissões Anuais de Cada Refinaria                        | 59 |
| Tabela 7 - Detalhamento das Variáveis do Modelo                                    | 64 |
| Tabela 8 - Valor do Imposto e Economia Inicial e Final com CAC                     | 65 |

# SUMÁRIO

|                                                              |           |
|--------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO</b>                                         | <b>16</b> |
| <b>2. REVISÃO DA LITERATURA</b>                              | <b>17</b> |
| 2.1 Captura e Armazenamento de Carbono (CAC)                 | 17        |
| 2.1.1 Processos de Captura de CO <sub>2</sub>                | 18        |
| 2.1.2 Processos de Transporte de CO <sub>2</sub>             | 25        |
| 2.1.3 Processos de Armazenamento de CO <sub>2</sub>          | 27        |
| 2.2 A Captura e Armazenamento de Carbono no Mundo Atualmente | 29        |
| 2.3 Dinâmica de Sistemas (System Dynamics)                   | 33        |
| 2.4 Aplicações da Dinâmica de Sistemas                       | 36        |
| <b>3. METODOLOGIA</b>                                        | <b>46</b> |
| 3.1 Escolha do Setor                                         | 46        |
| 3.2 Definição das Refinarias                                 | 49        |
| 3.3 Definição da Política para o Brasil                      | 51        |
| <b>4. DESCRIÇÃO DO MODELO</b>                                | <b>54</b> |
| 4.1 Visão Geral do Modelo                                    | 54        |
| 4.2 Estrutura do Modelo                                      | 55        |
| 4.2.1 Detalhamento do Modelo                                 | 55        |
| 4.2.2 Variáveis do Sistema Dinâmico                          | 58        |
| <b>5. RESULTADOS</b>                                         | <b>64</b> |
| <b>6. CONCLUSÃO</b>                                          | <b>71</b> |
| <b>7. REFERÊNCIAS</b>                                        | <b>72</b> |



## 1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, temos observado um fenômeno preocupante e de crescente importância no cenário global: o aumento alarmante das emissões de gases do efeito estufa (GEE). Estes gases, como o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) e óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), são os principais contribuintes para o aquecimento global e as mudanças climáticas. Segundo relatórios recentes do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), as emissões de GEE em 2019 aumentaram cerca de 12% em relação a 2010, e impressionantes 54% em comparação com 1990. Esses números não só são alarmantes, mas também refletem a urgência com que devemos abordar esta questão. O aumento das emissões de GEE tem consequências diretas e graves para o meio ambiente e para a vida na Terra. Uma das consequências mais notáveis é o aquecimento global, um fenômeno que tem levado a uma série de eventos climáticos extremos, como ondas de calor, secas prolongadas, e tempestades mais intensas. Além disso, o aquecimento global é uma das principais causas da extinção acelerada de diversas espécies da fauna e da flora, afetando a biodiversidade e o equilíbrio dos ecossistemas. Outras consequências incluem a diminuição da produtividade agrícola, afetando a segurança alimentar de bilhões de pessoas, a elevação dos níveis dos oceanos, que ameaça comunidades costeiras, e a alteração dos padrões de precipitação, resultando em secas em algumas regiões e enchentes em outras (IPCC, 2007b).

No Brasil, as emissões de GEE têm aumentado nos últimos anos, principalmente devido ao desmatamento da Amazônia e da produção agropecuária. Em 2020, o Brasil emitiu 2.16 bilhões de toneladas de  $\text{CO}_2$ , 9.5% a mais que no ano anterior e o maior número desde 2006, frente a uma queda de quase 7% nas emissões globais por conta da pandemia da Covid-19. Ou seja, o país foi possivelmente o único grande emissor a constatar uma alta nas emissões neste ano (POTENZA et al., 2021). Nesse sentido, é importante ressaltar, também, que o Brasil tem o compromisso de reduzir suas emissões em 53% até 2030, em relação às emissões de 2005, e alcançar emissões líquidas neutras até 2050, isto é, tudo que o país emitir deverá ser compensado com fontes de captura de carbono, como plantio de florestas, recuperação de biomas e outras tecnologias, através do que é chamado de “Contribuição Nacionalmente Determinada”, da sigla NDC em inglês (BNDES, 2023).

Diante desse cenário, a captura e armazenamento de carbono (CAC) surge como uma estratégia promissora para reduzir as emissões de GEE. A CAC consiste em capturar o  $\text{CO}_2$  emitido por fontes industriais ou de geração de energia e armazená-lo em reservatórios subterrâneos, impedindo que ele seja liberado na atmosfera.



Nesse sentido, o Brasil demonstra grande potencial para a CAC, dado que é um dos grandes emissores do mundo, tanto em reservatórios geológicos quanto em florestas plantadas. A implementação e desenvolvimento da CAC é essencial para atender às metas climáticas, além de apresentar diversos benefícios como oportunidades de crescimento limpo, criação e retenção de empregos e a garantia de uma transição justa e sustentável para as comunidades (TCVETKOV; CHEREPOVITSYN; FEDOSEEV, 2019).

Portanto, este trabalho final tem como objetivo estudar a viabilidade da captura e armazenamento de carbono no Brasil, analisando as possibilidades de implementação, os desafios a serem enfrentados e as políticas que poderiam impactar negativamente ou positivamente o desenvolvimento da CAC no país. Para cumprir este objetivo, foi selecionado um setor específico com alto volume de emissões de gás carbônico no Brasil, além do uso da metodologia da dinâmica de sistemas para permitir a análise de diferentes cenários que serão simulados. Acredita-se que este tema é de extrema importância para a mitigação das mudanças climáticas e para o desenvolvimento sustentável do país.

## **2. REVISÃO DA LITERATURA**

### **2.1 Captura e Armazenamento de Carbono (CAC)**

As tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CAC) vêm ganhando destaque global devido à crescente conscientização ambiental e à implementação de leis e políticas de sustentabilidade rigorosas. Essas tecnologias emergem como uma resposta crucial aos desafios das mudanças climáticas, buscando mitigar os impactos negativos no meio ambiente através de processos inovadores. O objetivo principal das tecnologias de CAC é a captura do dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) - um dos principais gases do efeito estufa - tanto de grandes fontes industriais de emissão quanto diretamente da atmosfera. Uma vez capturado, o  $\text{CO}_2$  é armazenado de maneira segura no subsolo. Este processo é vital, pois impede que o gás armazenado contribua para as mudanças climáticas, que são prejudiciais ao equilíbrio dos ecossistemas (MAHAJAN; LAHTINEN, 2022).

A captura e armazenamento do carbono diz respeito à separação do  $\text{CO}_2$  de fontes industriais, compressão e transporte para um sítio geológico para armazenamento, ou para a recuperação avançada de petróleo (EOR, *enhanced oil recovery*). As tecnologias de CAC existem para resolver diversos problemas industriais relacionados à emissão de gases, como uma redução de  $\text{CO}_2$  nos processos, através de, por exemplo, a separação do  $\text{CO}_2$  do  $\text{H}_2$  na pré-combustão, do  $\text{N}_2$  na pós-combustão e do  $\text{H}_2\text{O}$  na oxi-combustão, e no processamento de

gás natural, onde o  $\text{CO}_2$  é separado do  $\text{CH}_4$  e de hidrocarbonetos leves (ARAÚJO; DE MEDEIROS, 2017).

Assim, é possível identificar que o processo de CAC é composto por três etapas principais: captura, transporte e armazenamento. Cada uma dessas etapas desempenha um papel fundamental no ciclo completo do CAC e, portanto, merece ser explorada detalhadamente. Entender cada etapa individualmente é crucial para garantir uma compreensão abrangente de como o CAC pode ser efetivamente implementado e otimizado. Este aprofundamento nas nuances de cada etapa permite não apenas entender o funcionamento interno da tecnologia, mas também avaliar suas implicações ambientais, econômicas e sociais.

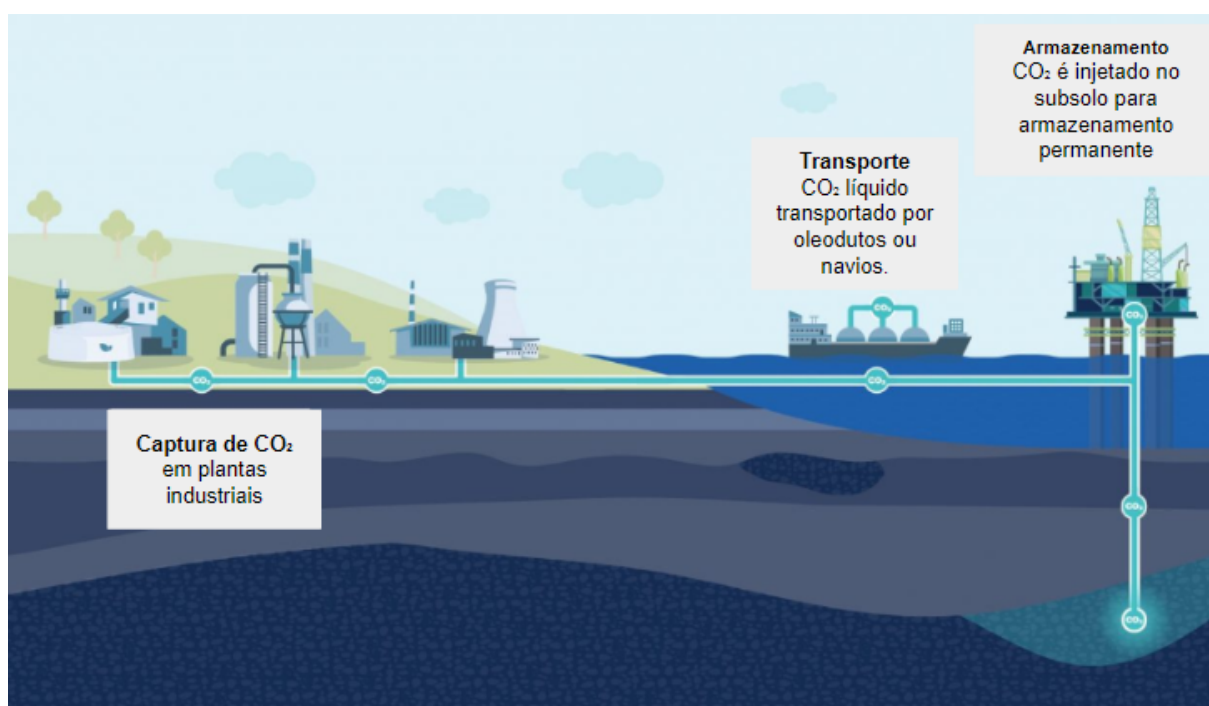


Figura 1 - Os Processos da Captura e Armazenamento de Carbono

Fonte: adaptado de (GLOBAL CCS INSTITUTE, 2023)

### 2.1.1 Processos de Captura de $\text{CO}_2$

Começando pela captura, este é um processo que pode ser realizado de diversas maneiras, todas bem estabelecidas e efetivas. A captura ocorre antes de o  $\text{CO}_2$  atingir a atmosfera em indústrias como a geração de energia e a produção de cimento e aço. Como na maioria dessas indústrias o  $\text{CO}_2$  está impuro, a captura acaba sendo justamente a purificação do gás carbônico para que ele possa ser devidamente armazenado, de forma isolada e econômica (BAENA-MORENO, F. M. et al., 2019).

Existe uma extensão de literaturas publicadas sobre a captura de CO<sub>2</sub>, conforme mostra a tabela 1. Nota-se que o Brasil ainda conta com uma escassez de estudos sobre a captura de CO<sub>2</sub>, dado que nem aparece na tabela, a qual apresenta os países com pelo menos 10 publicações sobre o tema (OMOREGBE et al., 2020).

| <b>País</b>   | <b>Publicações</b> | <b>Documento mais Citado</b> | <b>Número de Citações</b> | <b>Tipo de Captura</b>     |
|---------------|--------------------|------------------------------|---------------------------|----------------------------|
| EUA           | 146                | Merkel et al. (2010)         | 680                       | Pós-combustão              |
| Inglaterra    | 124                | Wang et al. (2011)           | 560                       | Pós-combustão              |
| China         | 120                | Drage et al. (2012)          | 172                       | Pós-combustão              |
| Austrália     | 107                | Stanger et al. (2015)        | 128                       |                            |
| Noruega       | 105                | Kvamsdal et al. (2009)       | 150                       | Pós-combustão              |
| Alemanha      | 87                 | Oexmann and Kather (2010)    | 154                       | Pós-combustão              |
| França        | 58                 | Kanniche et al. (2010)       | 350                       | Pré, pós e oxiconcombustão |
| Canadá        | 58                 | Linga et al. (2007)          | 302                       | Pré e pós-combustão        |
| Holanda       | 54                 | Mason et al. (2011)          | 252                       | Pós-combustão              |
| Escócia       | 43                 | Lucquiaud (2011)             | 61                        | Pós-combustão              |
| Espanha       | 42                 | Martín et al. (2011)         | 222                       | Pré-combustão              |
| Coreia do Sul | 38                 | Lee et al. (2010)            | 145                       | Pré-combustão              |
| Itália        | 36                 | Giuffrida et al. (2013)      | 55                        | Pós-combustão              |
| Bélgica       | 25                 | Mertens et al. (2013)        | 66                        | Pós-combustão              |
| Grécia        | 22                 | Ekstrom et al. (2009)        | 65                        | Pré e oxiconcombustão      |
| Suécia        | 21                 | Hedin et al. (2013)          | 198                       | Pós-combustão              |
| Romênia       | 21                 | Padurean et al. (2012)       | 85                        | Pré-combustão              |

|                        |    |                                 |     |                   |
|------------------------|----|---------------------------------|-----|-------------------|
| Singapura              | 19 | Babu et al. (2013)              | 138 | Pré-combustão     |
| Índia                  | 19 | Babu et al. (2013)              | 138 | Pré-combustão     |
| Emirados Árabes Unidos | 19 | Mokhtar et al. (2012)           | 62  | Pós-combustão     |
| Suíça                  | 18 | Jansen et al. (2015)            | 50  | Pré-combustão     |
| Dinamarca              | 16 | Ekstrom et al. (2009)           | 65  | Pré e oxcombustão |
| Japão                  | 15 | Goto et al. (2013)              | 202 | Pós-combustão     |
| Polônia                | 11 | Hanak et al. (2014)             | 41  | Pós-combustão     |
| Irã                    | 10 | Afkhamipour and Mofarahi (2013) | 30  | Pós-combustão     |

Tabela 1 - Países com Mais Publicações Sobre Captura de CO<sub>2</sub>

Fonte: adaptado de (OMOREGBE et al., 2020)

São três os principais tipos de captura do gás carbônico: pré-combustão, pós-combustão e combustão com oxigênio (oxicombustão). Na pré-combustão, o combustível é convertido em uma mistura gasosa de hidrogênio e gás carbônico, onde o hidrogênio é separado e pode ser queimado sem produzir CO<sub>2</sub>, ao passo que o CO<sub>2</sub> deve ser comprimido para que possa ser transportado e armazenado, como mostra a representação simplificada deste processo na figura 2 (BAENA-MORENO, F. M. et al., 2019).

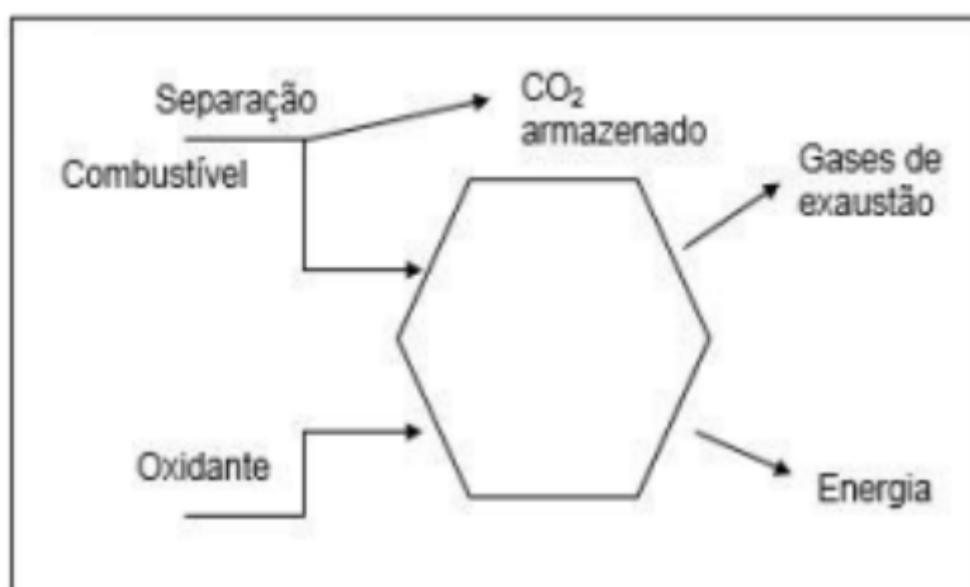


Figura 2 - Simplificação do Processo de Captura Pré-Combustão

Fonte: adaptado de (SANTOS; AQUINO; WATZKO, 2020)

Já na pós-combustão, demonstrada de forma simplificada pela figura 3, o gás carbônico é separado dos gases de exaustão da combustão, permitindo que o  $\text{CO}_2$  seja capturado por um solvente líquido ou quaisquer outros métodos de separação. No exemplo da absorção, o  $\text{CO}_2$  é absorvido pelo solvente e posteriormente liberado através de aquecimento, de forma a gerar um fluxo de gás carbônico de elevada pureza. Este tipo de tecnologia é comumente utilizado na indústria de alimentos e bebidas (BAENA-MORENO, F. M. et al., 2019).

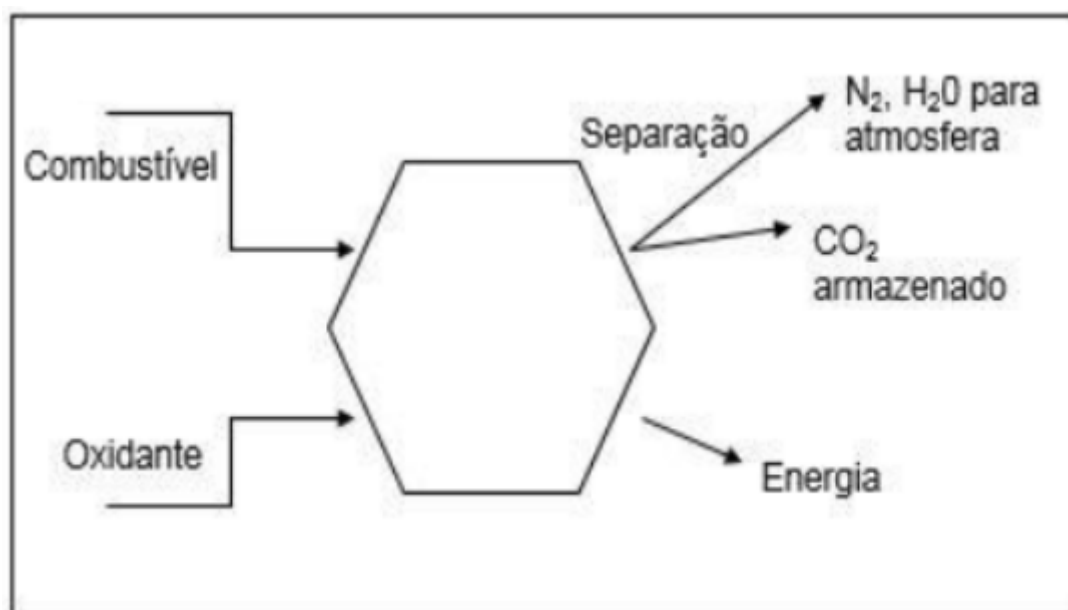


Figura 3 - Simplificação do Processo de Captura Pós-Combustão

Fonte: adaptado de (SANTOS; AQUINO; WATZKO, 2020)

Com relação ao processo de oxicombustão, é uma operação que utiliza oxigênio em vez de ar para a combustão do combustível. Com isso, gases de exaustão são produzidos, sendo eles principalmente vapor de água e  $\text{CO}_2$ , que são facilmente separados buscando produzir um fluxo de  $\text{CO}_2$  bastante puro (BAENA-MORENO, F. M. et al., 2019).

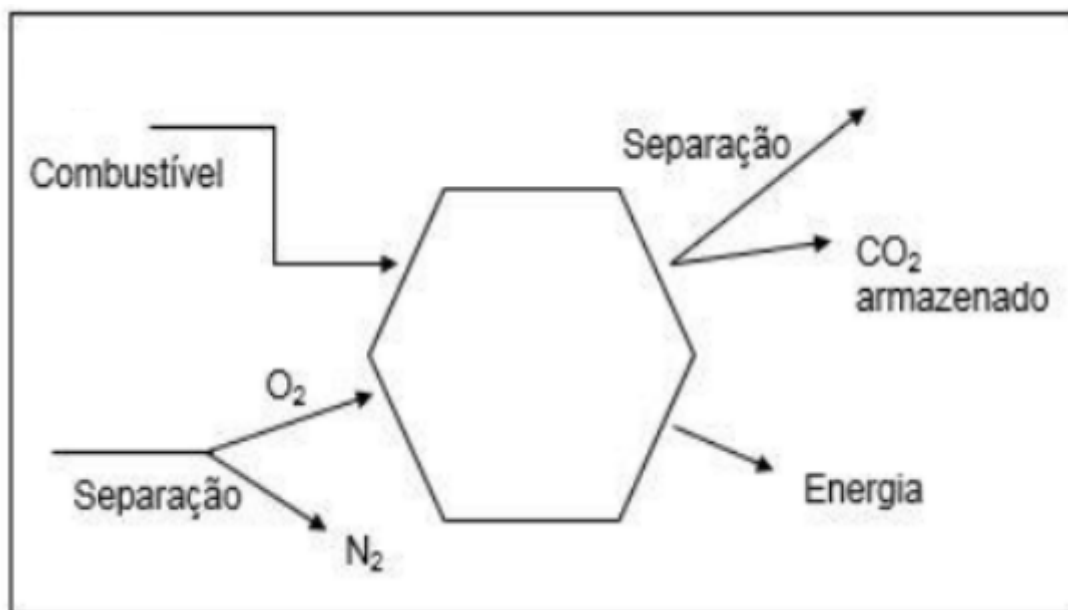


Figura 4 - Simplificação do Processo de Oxidação

Fonte: adaptado de (SANTOS; AQUINO; WATZKO, 2020)

A tabela a seguir apresenta um resumo das três tecnologias de captura de carbono citadas acima, com informações relevantes sobre cada uma.

| Parâmetro                       | Pré-Combustão                                                          | Pós-Combustão                                                                                       | Oxidação                                                                                                  |
|---------------------------------|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Concentração de CO <sub>2</sub> | 15–40 vol%                                                             | 4–14 vol%                                                                                           | 75–80 vol%                                                                                                |
| Gases ácidos                    | Compostos de enxofre precisam ser removidos.                           | Contém NO <sub>x</sub> , SO <sub>x</sub> , COS e H <sub>2</sub> S.                                  | NO <sub>x</sub> ausente, mas a dessulfurização do gás é necessária.                                       |
| Meio de combustão               | Vapor/ar é necessário para a gaseificação para gerar CO <sub>2</sub> . | Ar é usado.                                                                                         | Oxigênio puro para combustão.                                                                             |
| Tamanho do equipamento          | Equipamento de tamanho médio.                                          | Equipamento de grande tamanho requerido com alto investimento.                                      | Equipamento de baixo tamanho.                                                                             |
| Temperatura e pressão           | Baixa temperatura e alta pressão (depende do processo empregado).      | Fluido gasoso precisa ser resfriado e a pressão depende do processo de captura de CO <sub>2</sub> . | Temperatura criogênica para separação de O <sub>2</sub> . Altas temperaturas são obtidas para a combustão |

|                |                                                                                                                             |                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                   |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                |                                                                                                                             |                                                                                                                          | oxi-combustível e, portanto, o gás é reciclado para reduzir a temperatura.                                                                                                        |
| Potencial      | Ciclo combinado de gaseificação integrada e turbinas que podem usar eficientemente gás de síntese rico em H <sub>2</sub> .  | Pode ser aplicado às plantas de combustão de carvão existentes.                                                          | Ciclos inovadores foram empregados em sinergia com o ciclo combinado de gaseificação, que atinge eficiência de captura de CO <sub>2</sub> de 100%. Não há presença de NOx nocivo. |
| Prós           | Penalidade energética menor que processos de pós-combustão. Regeneração pode ser alcançada alterando pressão e temperatura. | Pequenas concentrações de CO <sub>2</sub> podem ser capturadas. Tecnologia de retroajuste.                               | Nenhuma presença de gases nocivos NOx.                                                                                                                                            |
| Contras        | Secagem de gás de síntese e seu tratamento antes da captura de CO <sub>2</sub> . Altos investimentos e custos de capital.   | Altos custos operacionais e de regeneração. Perdas significativas de solvente.                                           | Alto capital e custos operacionais. Anexar às plantas existentes é difícil.                                                                                                       |
| Estado da arte | Plantas combinadas de gaseificação integrada e produção de amônia estão em funcionamento atualmente.                        | Plantas de lavagem com amina (reação com monoetanolamina) estão em prática. Plantas atualmente empregam esta tecnologia. | Separação eficiente de CO <sub>2</sub> .                                                                                                                                          |

Tabela 2 - Informações Sobre os Três Tipos de Captura de Carbono

Fonte: adaptado de (NANDA, S. et al., 2016)

Existe também a captura direta da atmosfera, exemplificada pela figura 5 (onde CDA significa Captura Direta do Ar), em que são dois os principais processos que atingem este objetivo: a Energia de Biomassa com Captura e Armazenamento de Carbono (Biomass

Energy with Carbon Capture and Storage, BECCS), onde o  $\text{CO}_2$  é retirado da atmosfera através da vegetação e recuperado dos produtos da combustão conforme a queima da biomassa, e a Captura e Armazenamento de Carbono Direto do Ar (Direct Air Carbon Capture and Storage, DACCS), em que o  $\text{CO}_2$  é capturado diretamente do ar (BAENA-MORENO, F. M. et al., 2019).

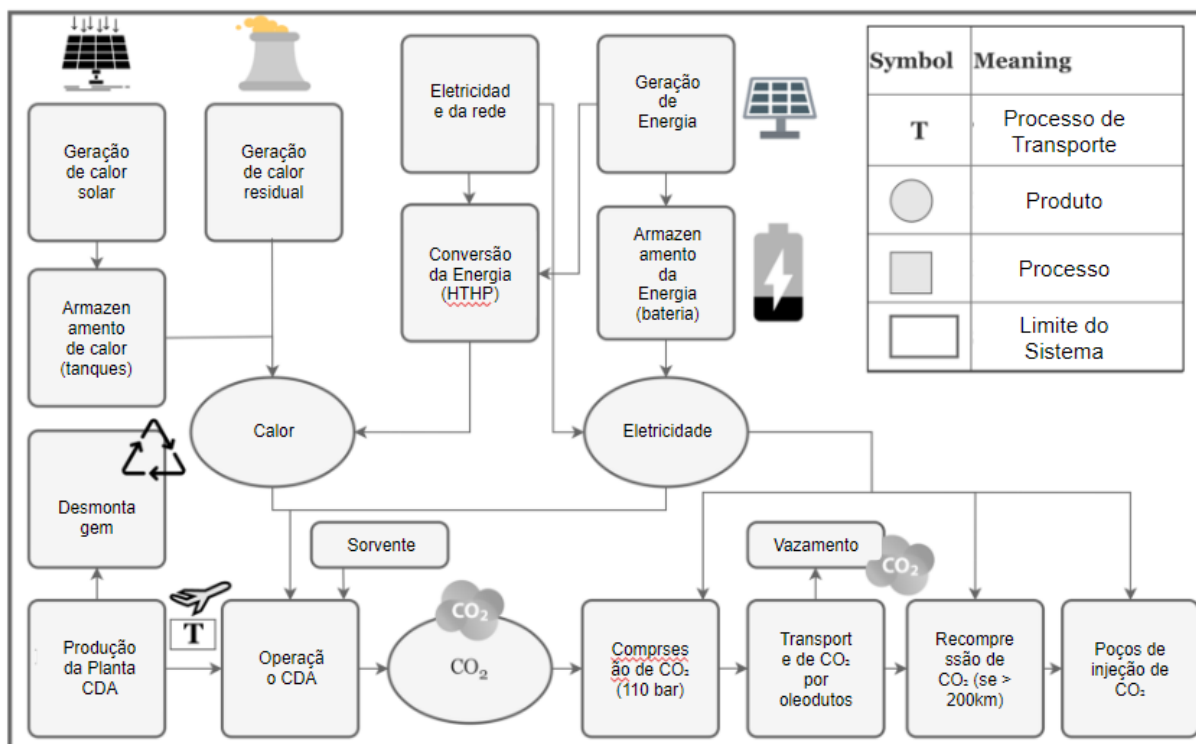


Figura 5 - Exemplo do Processo de Captura de Carbono Direta do Ar

Fonte: adaptado de (TERLOUW et al., 2021)

Um exemplo de sucesso da implementação de tecnologias de CAC é a Represa Boundary (“Boundary Dam”), uma usina movida a carvão de 824MW localizada em Estevan em Saskatchewan, Canadá, de propriedade da SaskPower. Neste projeto, até 90% do  $\text{CO}_2$  emitido é removido e a tecnologia de captura utilizada na primeira planta em escala comercial do mundo é a pós-combustão. Além disso, é feita a venda do dióxido de carbono localmente na cidade para recuperação avançada de petróleo (EOR). Em números, a Represa Boundary capturou 3.6 milhões de toneladas de  $\text{CO}_2$  de outubro de 2014 a outubro de 2020. Por fim, a tabela 3 evidencia a média diária de captura da represa no período citado (JANOWCZYK et al., 2021).

| Período | Média Diária da Taxa de Captura |
|---------|---------------------------------|
|---------|---------------------------------|



|                                | (toneladas/dia) |
|--------------------------------|-----------------|
| 12 primeiros meses de operação | 1238            |
| Novembro/2015 a Agosto/2017    | 2041            |
| Setembro/2017 a Dezembro/2017  | 2342            |
| Janeiro/2018 a Junho/2018      | 2245            |
| Setembro/2018 a Março/2019     | 2198            |
| Maio/2019 a Novembro/2019      | 2269            |
| Dezembro/2019 a Março/2020     | 2056            |
| Abril/2020 a Junho/2020        | 2264            |
| Julho/2020 a Outubro/2020      | 2343            |

Tabela 3 - Média Diária de Captura de Carbono na Represa Boundary

Fonte: adaptado de (JANOWCZYK et al., 2021)

### 2.1.2 Processos de Transporte de CO<sub>2</sub>

Na sequência do projeto de captura e armazenamento de carbono, o CO<sub>2</sub>, depois de ser devidamente capturado, deve ser transportado, de forma segura e confiável, até o local de armazenamento. Esta pode ser uma etapa complexa, visto que o ponto de captura pode ficar a longas distâncias do ponto de armazenamento, além de ser bastante custosa, demandando investimentos extensivos para permitir a implementação em maiores escalas.

O CO<sub>2</sub> é muito mais seguro que outras substâncias pelo fato de que ele não forma misturas inflamáveis ou explosivas com o ar, como é o caso do óleo e do gás. Ademais, excluindo raras exceções de liberações extremamente rápidas e volumosas, o dióxido de carbono não é diretamente tóxico para os animais se liberado no ambiente. Dessa forma, ainda que existam riscos e eles devam ser profundamente estudados, o nível de risco assumido em processos de transporte de CO<sub>2</sub> é mais baixo se comparado a outras substâncias (NANDA, S. et al., 2016).

Tanques, dutos e navios são exemplos comuns de transporte comercial de alto volume de gás carbônico, nas formas líquida e gasosa. Vale ressaltar que a forma gasosa ocupa bem mais espaço e, portanto, o dióxido de carbono é geralmente comprimido ao estado líquido para ser transportado. Dentre os meios de transporte citados, os dutos são os mais utilizados hoje e, provavelmente, continuarão sendo por um bom tempo. Hoje, existem redes de dutos em todo o mundo, tanto terrestre quanto marítimo, onde somente nos Estados Unidos já são

mais de 800 mil quilômetros de dutos de gás natural e líquido. Porém, para que seja possível alcançar as metas climáticas, será preciso escalar expressivamente e mundialmente a construção de dutos. Para este tipo de transporte, é necessário que o gás esteja seco, evitando corrosão, seja medido, comprimido e, por fim, transportado (NANDA, S. et al., 2016).

Além disso, é possível fazer o transporte terrestre do CO<sub>2</sub>, através de caminhões, trens e navios. Os navios são usados, em geral, para regiões muito distantes de pontos de armazenamento, mas também podem ser eficientes para o transporte em larga escala do gás liquefeito. Por outro lado, os caminhões podem ser uma boa alternativa para locais de captura muito próximos a locais de armazenamento. Todos os meios de transporte citados para o gás carbônico possuem garantia de segurança, visto que são fortemente gerenciados por alguns órgãos, dependendo da localização, sob a ótica de padrões internacionais. No exemplo dos Estados Unidos, os dutos são regulamentados pela Administração Federal de Segurança de Dutos e Materiais Perigosos (PHMSA), onde os dados de segurança são relatados publicamente (NANDA, S. et al., 2016).

O gráfico da figura 6 explicita a capacidade de transporte de cada tipo, bem como os custos envolvidos. Nota-se que o transporte terrestre é o mais caro, com a menor capacidade de carga. Na sequência, o ferroviário consegue comportar uma carga maior do que o terrestre e é mais barato do que ele, mas segue menos eficiente do que os oleodutos e navios. Estes dois últimos são os mais eficientes, que conseguem alcançar uma maior capacidade e, também, um menor custo por tonelada de CO<sub>2</sub> transportado.

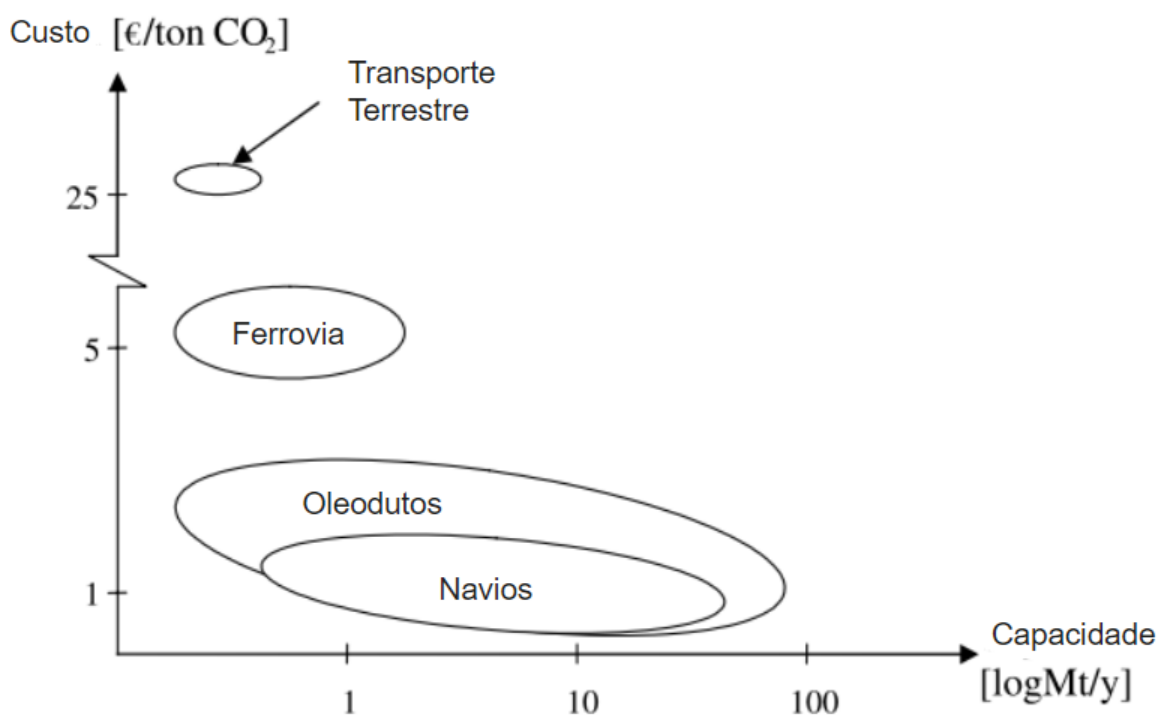


Figura 6 - Custos e Capacidade de Cada Meio de Transporte do CO<sub>2</sub>

Fonte: adaptado de (SVENSSON et al., 2004)

### 2.1.3 Processos de Armazenamento de CO<sub>2</sub>

Por fim, a fase final do processo de CAC é a injeção e armazenamento do gás carbônico já capturado e transportado, exemplificado pela figura 7. A CAC pode contribuir para reduzir até 15% das emissões globais de CO<sub>2</sub> até 2040, em que o armazenamento continua sendo a melhor solução para a redução da emissão de gases danosos ao meio ambiente, visto que o planeta Terra conta com abundantes recursos de armazenamento subterrâneo capazes de conservar séculos de CO<sub>2</sub> capturados das mais diversas formas (IPCC, 2007b).

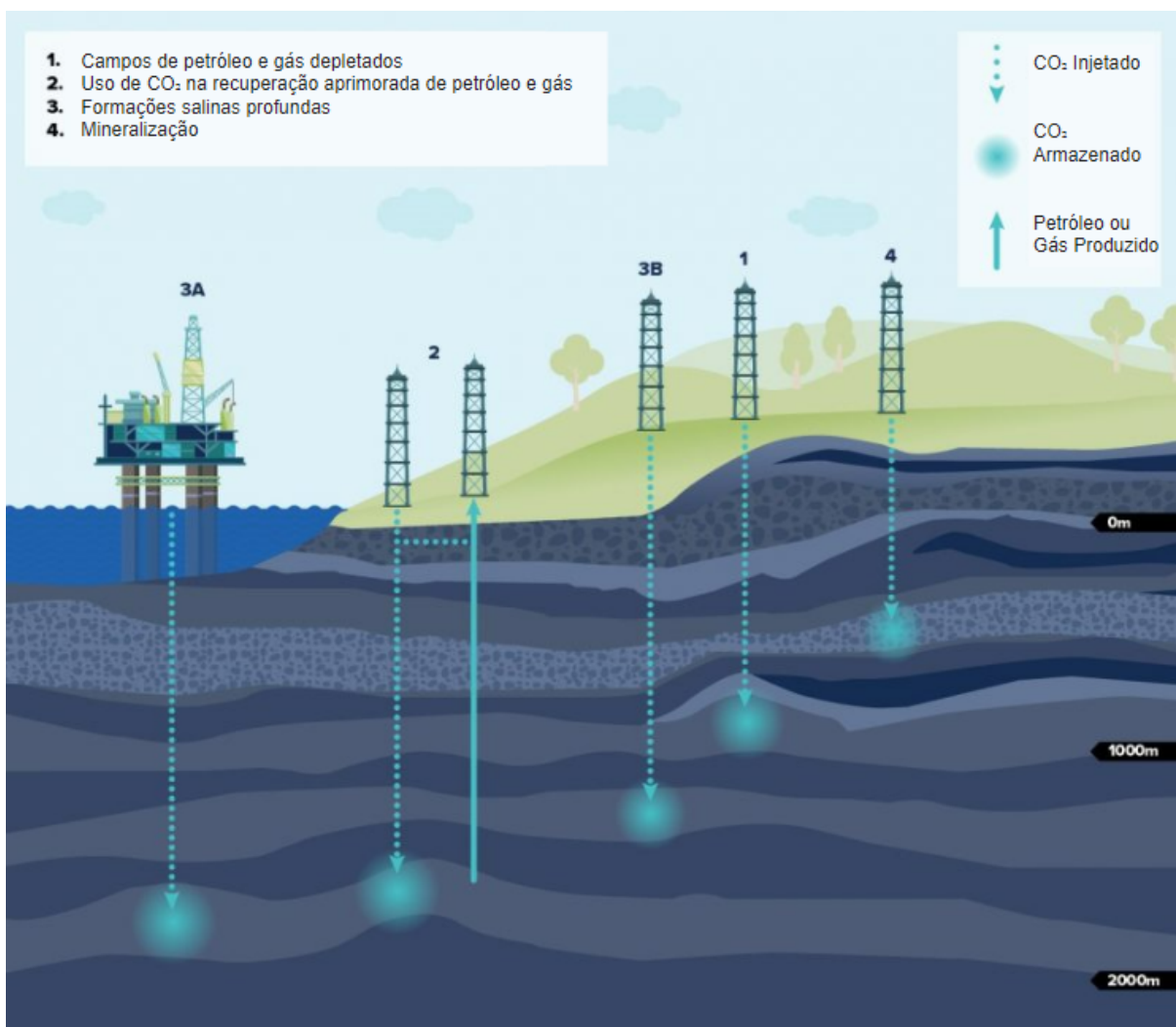


Figura 7 - Processo de Armazenamento de CO<sub>2</sub>

Fonte: (GLOBAL CCS INSTITUTE, 2023)

O armazenamento geológico de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) está se tornando um dos métodos mais prevalentes na luta contra as alterações climáticas, sendo uma tecnologia crítica no conjunto de estratégias de mitigação de carbono. Este método envolve a injeção de CO<sub>2</sub> em formações geológicas profundas, tipicamente mais de um quilômetro abaixo da superfície da Terra, onde se encontram rochas porosas, aquíferos salinos profundos, veios de carvão não explorados ou campos de petróleo e gás natural já esgotados. A escolha dessas formações não é aleatória; ela depende de uma série de características geológicas e físicas que devem ser meticulosamente avaliadas para assegurar que o armazenamento seja não só eficaz, mas também seguro e duradouro (NANDA, S. et al., 2016).

Diversos critérios técnicos e regulatórios são rigorosamente analisados para determinar a adequação de um local para o armazenamento geológico. Entre esses critérios, a

porosidade das rochas é essencial, pois são os espaços vazios milimétricos dentro do substrato rochoso que fornecem a capacidade física para reter o  $\text{CO}_2$ . A permeabilidade da formação também é crucial, pois uma formação geológica será mais permeável e, portanto, mais adequada para o armazenamento de  $\text{CO}_2$  se os poros dentro da rocha estiverem suficientemente conectados para permitir a injeção do  $\text{CO}_2$  na taxa necessária e assegurar a mobilidade do gás através da formação geológica (CUÉLLAR-FRANCA; AZAPAGIC, 2015).

Além disso, a permanência é um fator não negociável, exigindo que as formações escolhidas possuam barreiras naturais robustas que impeçam o escape do  $\text{CO}_2$ . Essas barreiras são tipicamente capas de rochas impermeáveis que atuam como selos superiores, mantendo o  $\text{CO}_2$  confinado no subsolo. Após a seleção cuidadosa do local de armazenamento, o próximo passo no processo de armazenamento geológico é a compressão do  $\text{CO}_2$  capturado. Esta compressão é realizada para que o  $\text{CO}_2$  atinja uma densidade próxima à da água, facilitando o seu bombeamento por meio de poços até a formação geológica escolhida. Com o passar do tempo, o  $\text{CO}_2$  começa a se dissolver na água salina da formação, num processo conhecido como aprisionamento de solução. Este é um mecanismo de longo prazo que garante que o  $\text{CO}_2$  permaneça confinado indefinidamente, contribuindo para uma redução permanente da sua presença na atmosfera. Adicionalmente, uma parte do  $\text{CO}_2$  permanece fisicamente presa dentro dos espaços porosos da própria formação geológica, um fenômeno conhecido como aprisionamento residual (CUÉLLAR-FRANCA; AZAPAGIC, 2015).

Nesse sentido, destaca-se a importância de compreender e monitorar ambos os tipos de aprisionamento, pois eles representam os mecanismos finais que garantem a segurança e a efetividade do armazenamento geológico de  $\text{CO}_2$ . A aplicação cuidadosa e o monitoramento contínuo dessas técnicas são essenciais para assegurar que o  $\text{CO}_2$  permaneça isolado do ciclo do carbono da superfície e, por consequência, não contribua para o efeito estufa e o aquecimento global (CUÉLLAR-FRANCA; AZAPAGIC, 2015).

## **2.2 A Captura e Armazenamento de Carbono no Mundo Atualmente**

Com a definição clara dos processos de captura, transporte e armazenamento do carbono, torna-se importante trazer um panorama geral de como anda o desenvolvimento das tecnologias de CAC no mundo. Nesse sentido, o relatório “Status Global da CAC”, lançado anualmente pelo Instituto Global de CAC (Global CCS Institute) mostra-se de grande ajuda. O primeiro destaque é para a capacidade de captura projetada para os projetos que já estão em construção ou desenvolvimento, como mostra a figura a seguir. Nota-se que o

desenvolvimento de projetos de captura e armazenamento de carbono vem crescendo a uma elevada taxa anualmente desde 2018 até 2023, chegando a uma capacidade de captura de 312 mega toneladas de CO<sub>2</sub> por ano para os projetos em construção em 2023. O gráfico desconsidera projetos que já estão operando.

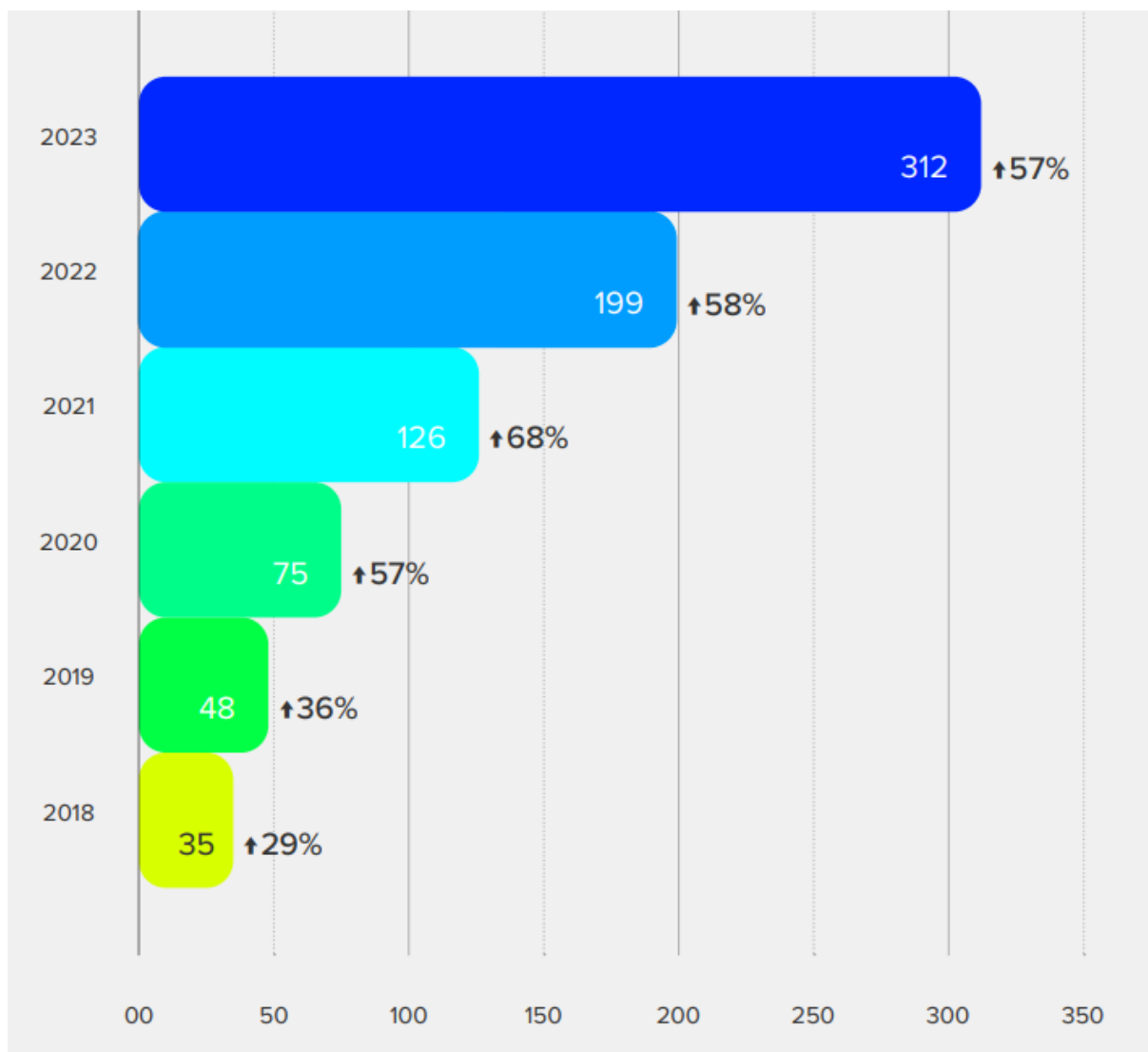


Figura 8 - Capacidade de Captura de Projetos de CAC em Construção e em Desenvolvimento  
(Mt CO<sub>2</sub> por ano)

Fonte: (GLOBAL CCS INSTITUTE, 2023)

Outrossim, o número de instalações (considerando todas, desde em construção até as que já estão em operação) quase dobrou de 2022 para 2023. No ano passado, existiam 194 instalações ao todo, enquanto que no ano presente já são 392 instalações. Quanto à capacidade de captura, esta foi de 241 mega toneladas de CO<sub>2</sub> por ano, em 2022, para 361 em 2023, como mostra a figura 9.

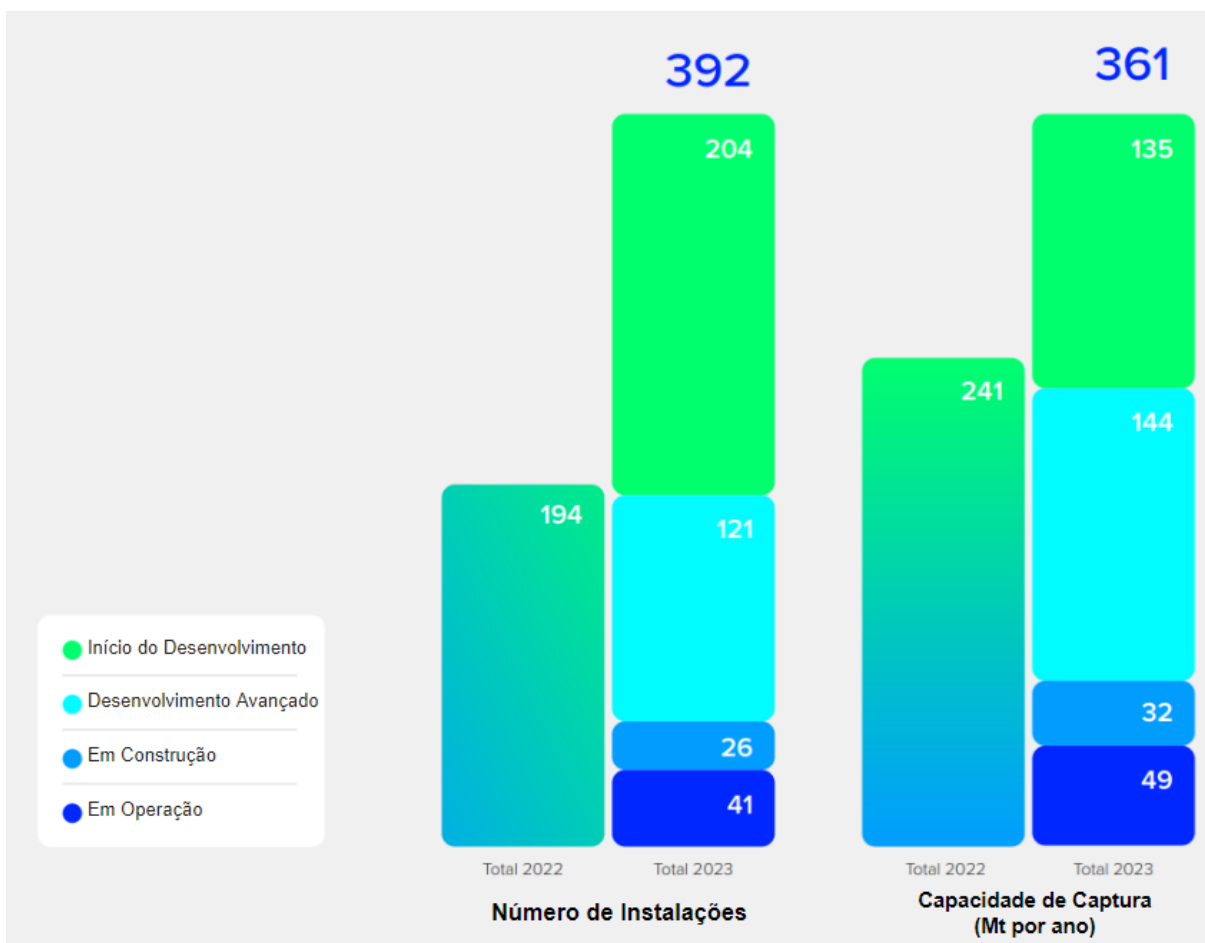


Figura 9 - Número de Instalações e Capacidade de Captura

Fonte: adaptado de (GLOBAL CCS INSTITUTE, 2023)

Quanto à distribuição geográfica dessas instalações de captura e armazenamento de carbono, os Estados Unidos seguem sendo o maior polo das tecnologias de CAC. Na Arábia Saudita, a Cidade Industrial de Jubail, um dos maiores centros de CAC do mundo, está programada para iniciar operações até 2027, com uma capacidade inicial de até 9 Mtpa (mega toneladas por ano) de CO<sub>2</sub>. Este projeto contribuirá para a meta da Arábia Saudita de extrair, utilizar e armazenar 44 Mtpa de CO<sub>2</sub> até 2035.

Na China, três projetos tornaram-se operacionais em 2023, incluindo a maior instalação de CCS em usina a carvão da Ásia, a primeira instalação de armazenamento offshore de CO<sub>2</sub> e a captura de carbono em uma refinaria de petróleo. A China agora abriga 11 instalações operacionais, incluindo seu primeiro gasoduto de transporte de CO<sub>2</sub> em escala comercial, parte da instalação Sinopec Qilu-Shengli. O Japão anunciou o suporte para sete redes de CCS, que irão capturar CO<sub>2</sub> no país para armazenamento nas águas *offshore* do Japão e na região da Ásia-Pacífico. Na Grécia, foram anunciadas cinco instalações como parte da

rede de CCS Prinos, com usinas de gás natural, cimento e hidrogênio tendo acesso à infraestrutura de transporte e armazenamento de CO<sub>2</sub>.

O crescimento no número de instalações de CCS anunciadas e em desenvolvimento em todo o mundo indica que a tecnologia está se tornando atrativa, à medida que países e empresas buscam cumprir seus compromissos climáticos em um cenário de orçamento de carbono cada vez mais restrito. Entre 2022 e 2023, 11 novos países registraram instalações de CCS em vários estágios de desenvolvimento. Os Estados Unidos continuam a liderar a implementação de CCS, com 73 novas instalações entrando no pipeline em 2023. O Reino Unido, o Canadá e a China aumentaram suas contagens de instalações e permanecem entre os cinco principais países na implementação de CCS. Os Países Baixos foram substituídos pela Austrália, que agora possui 12 instalações em desenvolvimento. Japão e Grécia, que não tinham instalações comerciais em 2022, agora hospedam sete e cinco instalações, respectivamente, em 2023.

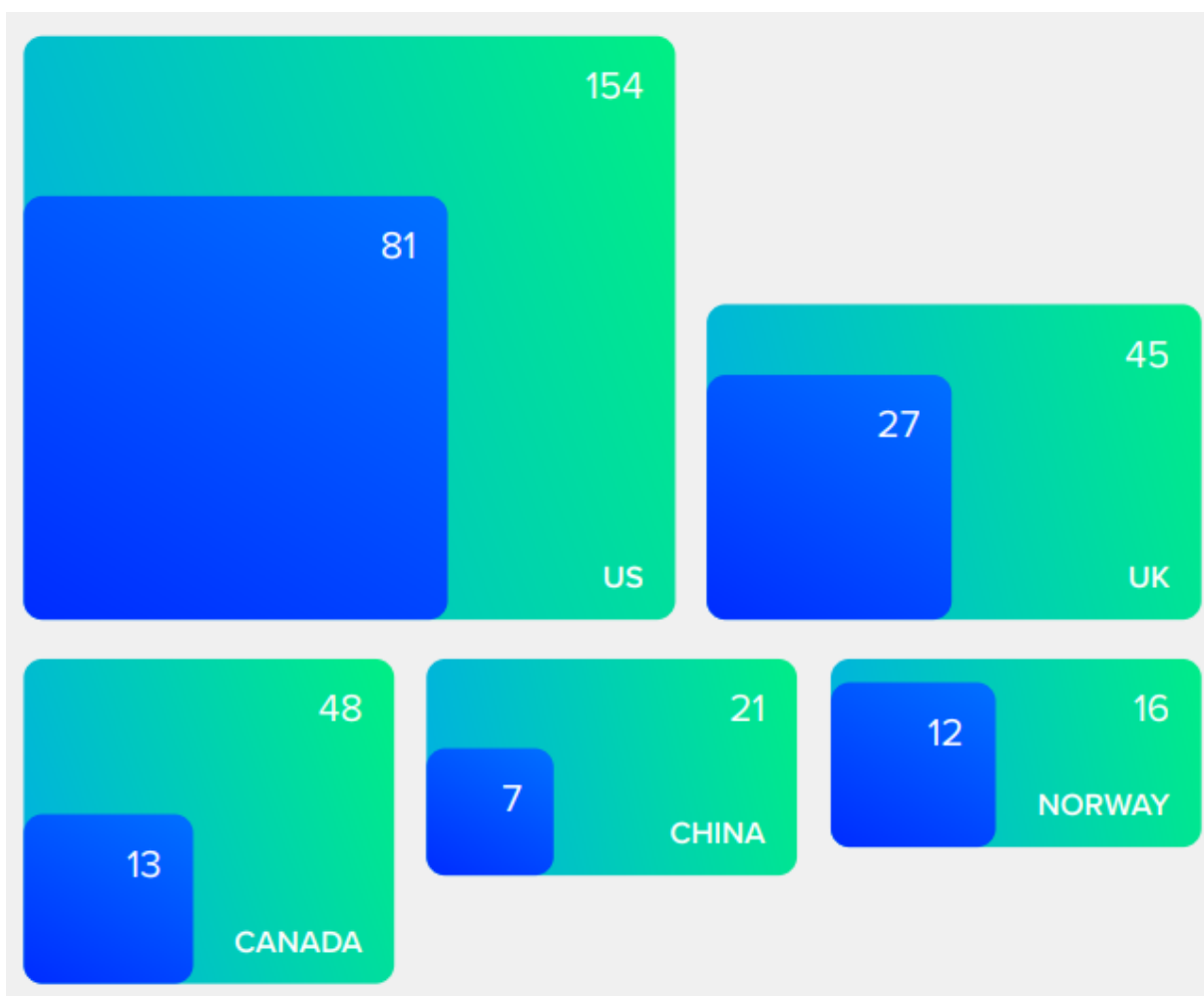


Figura 10 - Top 5 Países com Mais Instalações de CAC

Fonte: (GLOBAL CCS INSTITUTE, 2023)



### 2.3 Dinâmica de Sistemas (*System Dynamics*)

A dinâmica de sistemas é uma metodologia utilizada para modelar e simular sistemas complexos, com o objetivo de compreender e até prever o funcionamento desses sistemas ao longo de um período de tempo. Esta metodologia foi criada por um pesquisador do Massachusetts Institute of Technology (MIT), Jay Forrester, em meados dos anos 1950, se mostrando uma ferramenta bastante útil para gestores, pesquisadores e formuladores de políticas públicas em diversas áreas do conhecimento. O *system dynamics* permite uma melhor identificação de causas de problemas e avaliação do impacto de diferentes mudanças no sistema, como intervenções políticas, em sistemas complexos. Além disso, através da aplicação desta metodologia, torna-se possível antecipar as consequências de diferentes decisões e projetar cenários futuros, por meio de simulações a longos prazos (LEVESON, 2018).

Esta ferramenta é composta de elementos interconectados que influenciam uns aos outros e evoluem ao longo do tempo. Esses elementos variam de acordo com as necessidades e complexidade do sistema estudado, podendo ser elementos físicos, como equipamentos, ou abstratos, como políticas e comportamentos humanos. Sua modelagem é realizada por meio de diagramas de estoque e fluxo, que mostram como as variáveis do sistema mudam ao longo do tempo, e por equações diferenciais, que descrevem as relações causais entre essas variáveis (LEVESON, 2018).

A abordagem de *system dynamics* é aplicada em uma ampla gama de áreas, incluindo negócios, economia, saúde, meio ambiente, engenharia e política pública. Na área de negócios, por exemplo, ela é usada para avaliar o desempenho de empresas, projetar novos produtos e serviços e antecipar mudanças no mercado. Na área de saúde, é usada para modelar epidemias, prever o impacto de diferentes políticas públicas e avaliar o custo-efetividade de tratamentos médicos (KARNOPP; MARGOLIS; ROSENBERG, 2012).

Um conceito importante na construção de sistemas dinâmicos é a relação de causalidade entre duas variáveis, representado pela figura 11. Nota-se que a variável A pode influenciar positivamente a variável B (como mostram os símbolos de “+” no primeiro e segundo diagramas), isto é, se A cresce, então B também cresce. Além disso, o contrário também acontece, onde a variável A pode influenciar negativamente a variável B, o que é identificado pelo sinal de menos. Por fim, o duplo traço sobre a seta representa que esta relação de causalidade entre A e B (seja positiva ou negativa) só acontecerá depois de um determinado tempo (VILLELA, 2005).

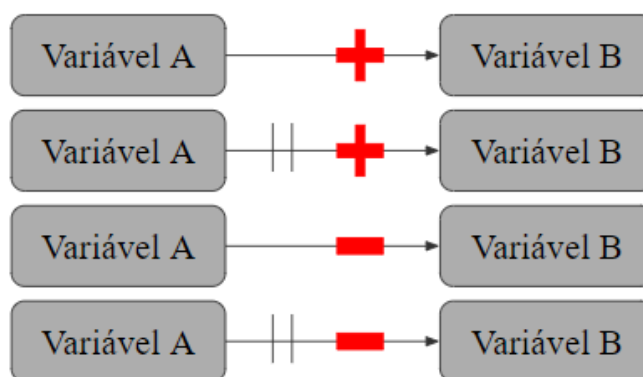


Figura 11 - Simbologia para as quatro possíveis relações causais entre duas variáveis

Fonte: adaptado de (VILLELA, 2005).

Ademais, na dinâmica de sistemas existem dois tipos de ciclos, sendo eles o de reforço (R) e o de balanço (B), demonstrados pela figura 12. Os ciclos de reforço (R) são responsáveis por gerar um crescimento ou decrescimento exponencial nas variáveis do sistema, os quais acontecem quando não existirem setas com sinal negativo, ou quando a quantidade de setas com sinal negativo seja par. Já os ciclos de balanço (B) geram comportamentos que tendem ao equilíbrio no sistema, sempre ocorrendo quando a quantidade de setas com sinal negativo for ímpar (ISSAKOWICZ; TOLEDO; AMBROSIO, 2020).

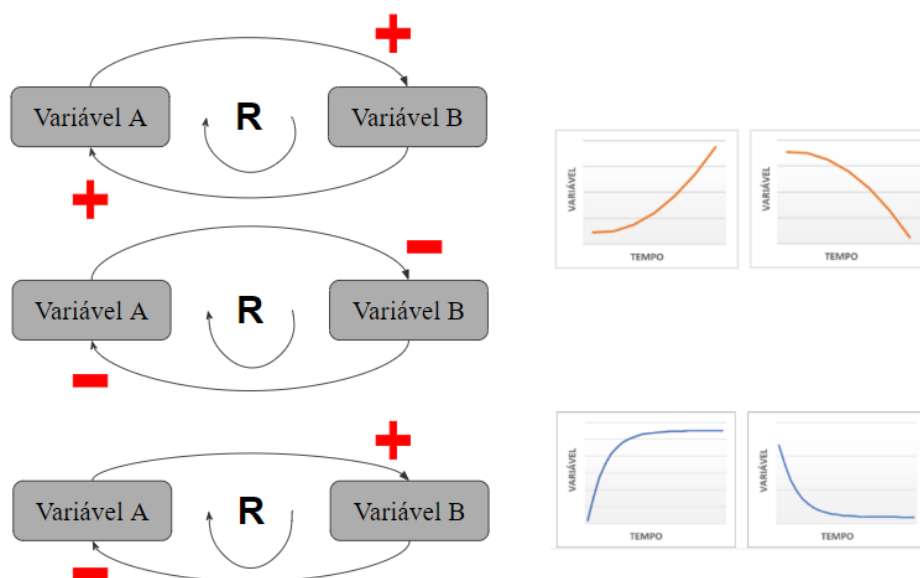


Figura 12 - Ciclos causais de Reforço (R) e Balanço (B) e suas curvas de comportamento das variáveis do sistema

Fonte: adaptado de (ISSAKOWICZ; TOLEDO; AMBROSIO, 2020).

Para representar de forma quantitativa as relações de causa e efeito em uma dinâmica de sistemas, são utilizados diagramas de estoque e fluxo. Nesse sentido, os estoques (ou níveis) podem representar, por exemplo, o número de funcionários em uma empresa ou o volume de produção de CO<sub>2</sub>. Em contrapartida, os fluxos (ou taxas) no sistema são meios de movimentar recursos e produzir crescimento ou redução dos estoques, podendo ser, seguindo os exemplos de estoque, a admissão ou demissão de funcionários ou problemas no processo industrial que emite CO<sub>2</sub> (RIBEIRO; SANTOS; ALEGRE, 2019). A figura 13 demonstra os quatro principais elementos que compõem uma dinâmica de sistemas.

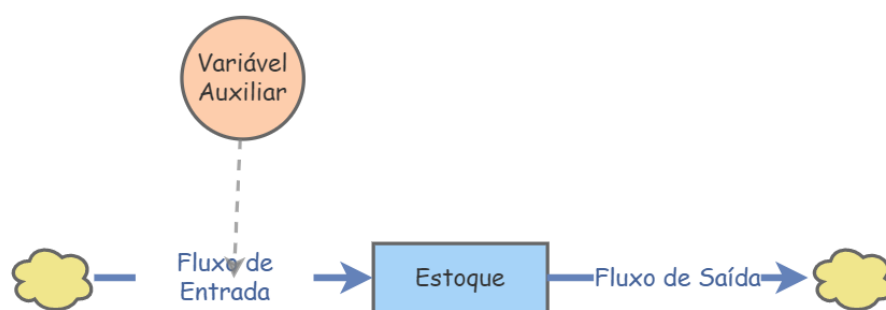


Figura 13 - Exemplo de Diagrama de Estoque e Fluxo

Fonte: adaptado de (RIBEIRO; SANTOS; ALEGRE, 2019)

Ainda sobre esses elementos, é importante ressaltar que os estoques são representados por retângulos, os quais podem acumular fluxos ao longo do tempo, enquanto que os fluxos são representados por setas, que influenciam na velocidade de mudanças no estoque, sejam elas positivas (fluxos de entrada) ou negativas (fluxos de saída). As pontas do diagrama estão fora do limite do modelo e representam o início e o fim do fluxo, em que, caso não influenciem o sistema, são representados por nuvens. As variáveis auxiliares podem representar características intermediárias, processos internos ou fatores latentes que afetam as interações entre as variáveis de estoque e fluxo (GROESSER; SCHAFFERNICHT, 2012). Por fim, as setas transportam as informações entre os elementos, auxiliando no equacionamento das variáveis de estoque, auxiliares e de fluxo (RIBEIRO; SANTOS; ALEGRE, 2019).

Finalmente, faz-se relevante descrever o funcionamento das equações matemáticas que ditam a relação entre os estoques, fluxos e variáveis. Jay Forrester, o criador da metodologia da dinâmica de sistemas, construiu uma metáfora hidráulica, uma abordagem conceitual usada para explicar a dinâmica de sistemas complexos, de forma a ilustrar as

relações entre fluxos e estoques em um sistema (STERMAN, 2000). De acordo com a metáfora hidráulica, o comportamento de um sistema pode ser entendido comparando-o a um sistema hidráulico, onde a água flui de um reservatório para outro através de tubos e válvulas. Nessa analogia, os estoques são representados pelos reservatórios de água, enquanto os fluxos correspondem ao movimento da água entre os reservatórios. Os princípios da física dos fluidos, como a conservação de massa e a lei de Bernoulli, são aplicados para descrever as equações matemáticas que governam os fluxos e estoques em um sistema dinâmico. Nesse sentido, essas equações correspondem às seguintes (STERMAN, 2000):

$$Estoque(t) = \int_{t_0}^t [Fentrada(s) - Fsaída(s)]ds + Estoque(t_0),$$

em que  $Fentrada(s)$  e  $Fsaída(s)$  representam, respectivamente, os fluxos de entrada e saída no tempo  $s$  entre o tempo inicial  $t_0$  e o tempo corrente  $t$ . Ademais, a derivada do estoque equivale à diferença entre o fluxo de entrada e o fluxo de saída, conforme a equação a seguir (STERMAN, 2000):

$$d(Estoque)/dt = Fentrada(t) - Fsaída(t),$$

em que:

- $Estoque(t_0)$ : estoque no tempo de início  $t_0$ ;
- $Estoque(t)$ : estoque no tempo corrente  $t$ ;
- $Fentrada(s)$ : fluxo de entrada no tempo  $s$  entre o momento inicial  $t_0$  e o corrente  $t$ ;
- $Fsaída(s)$ : fluxo de saída no tempo  $s$  entre o momento inicial  $t_0$  e o corrente  $t$ ;
- $dt$ : diferencial de tempo  $t$ .

Portanto, nota-se que a dinâmica de sistemas é uma abordagem de muito valor para pessoas que estejam buscando entender e prever a evolução e comportamento de sistemas complexos. Dessa forma, esta ferramenta será amplamente utilizada neste trabalho para que seja possível modelar e entender o pleno funcionamento de soluções para a captura e armazenamento de carbono, levando em consideração todos os aspectos que possam impactar seus resultados.

## 2.4 Aplicações da Dinâmica de Sistemas

Conforme demonstrado no tópico anterior, a dinâmica de sistemas é uma ferramenta poderosa para modelar sistemas complexos e prever o comportamento deles com base em diferentes variáveis e relações entre elas. Dessa forma, suas aplicações são diversas: Sabine Egerer, juntamente com outros autores, desenvolveram um método inovador, baseado em um modelo qualitativo de dinâmica de sistemas, demonstrado pela figura a seguir, desenvolvido

dentro de um quadro de modelagem participativa, para identificar pontos de alavancagem para medidas eficazes de adaptação às mudanças climáticas, especificamente no setor agrícola do nordeste da Baixa Saxônia, um estado da Alemanha. As conclusões tiradas deste estudo foram que a ação coletiva é necessária para lidar com esses desafios, onde os tomadores de decisão devem fornecer incentivos financeiros para aumentar a retenção de água na região, os agricultores terão que melhorar a eficiência de irrigação e a tecnologia para produção de culturas e a conscientização aumentada da sociedade sobre escassez de água relacionada às mudanças climáticas tem o potencial de direcionar o sistema para padrões de uso e consumo de água mais sustentáveis (EGERER et al., 2021).

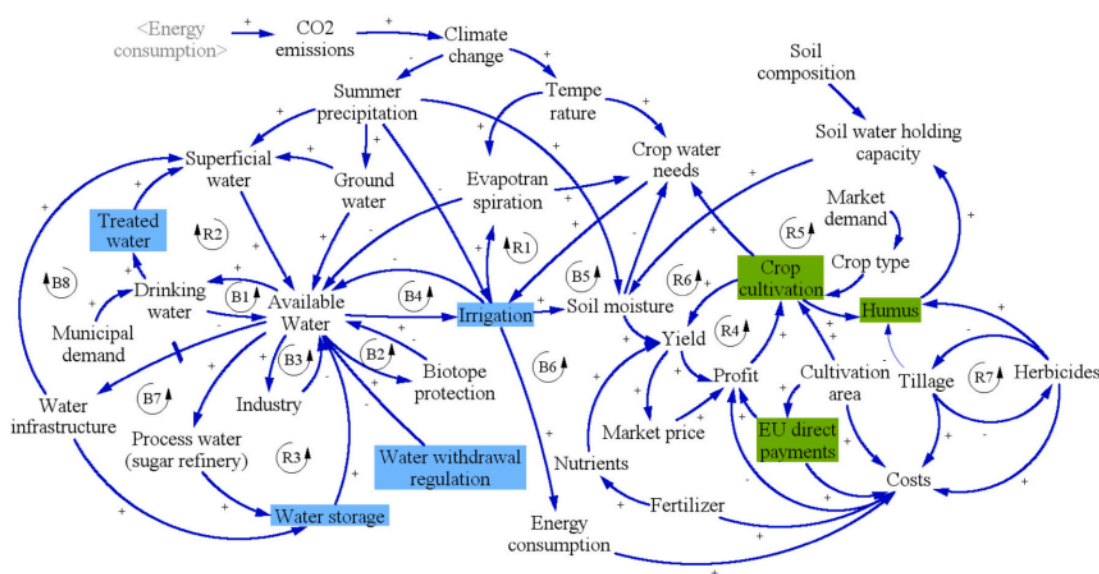


Figura 14 - Modelo Qualitativo de Dinâmica de Sistemas do Setor de Agricultura do Nordeste da Baixa Saxônia

Fonte: (EGERER et al., 2021)

Outro estudo baseado na dinâmica de sistemas foi feito na área de políticas energéticas para a transportação sustentável, cujo modelo se encontra na figura 15. A contribuição deste estudo é a avaliação de políticas sustentáveis de energia de biocombustíveis para aumentar o uso de biocombustíveis no setor de transporte sem afetar a segurança alimentar do país e alcançar benefícios sociais, econômicos e ambientais. Para concretizar tal análise, Vishwakarma et al. construíram um modelo de dinâmica de sistemas para avaliar a produção de biocombustíveis com foco na segurança alimentar e avaliar seu impacto na economia e no meio ambiente. Os resultados da simulação mostraram que é possível realizar uma mistura máxima de biodiesel entre 3% e 11% sem afetar a segurança alimentar, que somente 20% ou

menos de misturas de biodiesel podem ser usados como substitutos diretos do combustível diesel em todos os veículos a diesel de grande porte sem qualquer alteração ou modificação em seus motores e que as estratégias de mistura de biocombustíveis têm um impacto positivo na redução das emissões de CO<sub>2</sub> no setor de transporte da Índia (MAHATE et al., 2023).

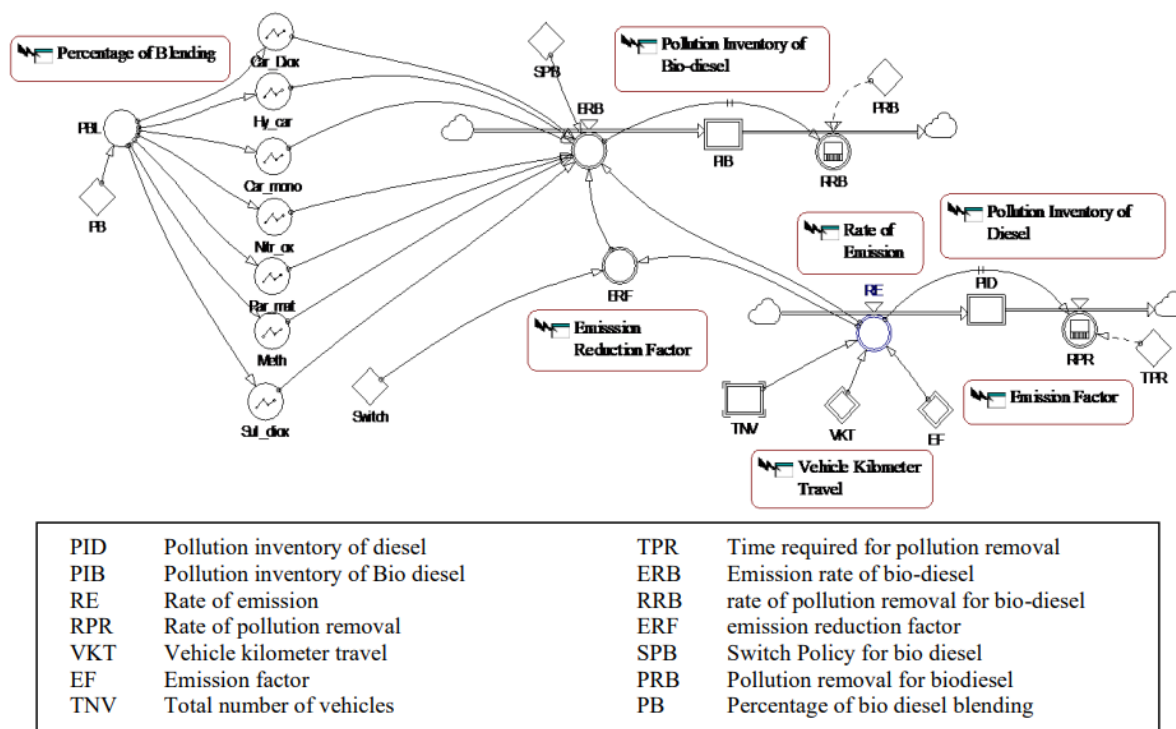


Figura 15 - Modelo de Dinâmica de Sistemas para Emissões Veiculares

Fonte: (MAHATE et al., 2023)

Já no setor de saúde, houve um interesse significativo no desenvolvimento de modelos de simulação de dinâmica de sistemas para analisar problemas complexos nos últimos anos. No entanto, há uma falta de estudos que buscam resumir os artigos disponíveis na área da saúde e apresentar evidências sobre a eficácia da simulação de dinâmica de sistemas nessa área. Dessa forma, foi feito um estudo de síntese da literatura de 2000 a 2019, na Universidade Central da Flórida, a fim de obter uma visão abrangente das aplicações atuais da metodologia de dinâmica de sistemas que abordam questões complexas de saúde. Os resultados indicam que a aplicação da dinâmica de sistemas tem atraído atenção significativa de pesquisadores em saúde desde 2013, como mostra a tabela 4, em que a dinâmica de sistemas foi usada em um grande volume de artigos em temas variados de saúde. Até o momento, os artigos sobre dinâmica de sistemas têm se concentrado em uma variedade de tópicos de saúde. As áreas de pesquisa mais populares entre os artigos revisados incluíram os

temas do fluxo de pacientes, obesidade, demanda por mão de obra e HIV/AIDS (DAVAHLI; KARWOWSKI; TAIAR, 2020). Ou seja, ainda existem muitas oportunidades de aplicação da dinâmica de sistemas no setor de saúde, principalmente sobre tópicos que não apresentaram nenhum estudo utilizando a metodologia.

| <b>Área de Aplicação</b>                          | <b>Método de Simulação</b>         | <b>Número de Artigos Publicados</b> |
|---------------------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| Assistência Médica                                | Abordagens de pesquisa operacional | 342                                 |
| Assistência Médica                                | Diferentes métodos de simulação    | 251                                 |
| Entrega de cuidados de saúde e saúde populacional | Técnicas de Simulação              | 182                                 |
| Assistência Médica                                | Diferentes métodos de simulação    | 201                                 |
| Assistência Médica                                | Diferentes métodos de simulação    | 232                                 |
| Todos as áreas                                    | Dinâmica de Sistemas               | 800                                 |
| Todos as áreas                                    | Dinâmica de Sistemas               | 1441                                |
| Departamentos de Emergência                       | Diferentes métodos de simulação    | 106                                 |
| Serviços médicos de emergência                    | Modelos de simulação               | 24                                  |
| Departamentos de emergência                       | Diferentes métodos de simulação    | 254                                 |
| Gestão de leitos de internação                    | Técnicas de Modelagem              | 92                                  |
| Assistência Médica                                | Simulação de eventos discretos     | 211                                 |
| Política de saúde                                 | Dinâmica de Sistemas               | 6                                   |
| Artrite reumatoide                                | Técnicas de Modelagem              | 58                                  |
| Cuidados com o câncer                             | Abordagens de pesquisa operacional | 90                                  |
| Assistência Médica no                             | Abordagens de pesquisa             | 142                                 |

|              |                                 |     |
|--------------|---------------------------------|-----|
| Reino Unido  | operacional                     |     |
| Saúde Mental | Diferentes métodos de simulação | 160 |

Tabela 4 - Quantidade de Artigos por Métodos de Simulação e Área da Saúde]

Fonte: adaptado de (DAVAHLI; KARWOWSKI; TAIAR, 2020)

Ademais, alinhado ao objetivo geral desta tese, existem estudos que se utilizaram da dinâmica de sistemas para analisar cenários de aplicação da captura e armazenamento de carbono, variando políticas que poderiam contribuir com o desenvolvimento e comercialização desta tecnologia no mundo. Assim, Eduard Romanenko realizou um projeto que aborda tecnologias de captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS) e a indústria de recuperação aprimorada de petróleo (EOR) por meio de dióxido de carbono. Neste projeto, foi desenvolvido um modelo de dinâmica de sistemas, representado pela figura 16, para analisar o sistema integrado de CO<sub>2</sub>-EOR-CCUS e identificar mecanismos de crescimento sustentável. Portanto, as conclusões deste trabalho foram que os mecanismos de reforço adicionais trazidos pela política permitem alcançar o crescimento mesmo com orçamentos menores do que o necessário, que o critério fundamental para a robustez do design de uma política nesse sistema é se o crescimento autossustentável na variável chave do sistema pode ser mantido após a implementação do programa e que existem vários designs de políticas genéricas que atendem a esse critério (ROMANENKO, 2014).





Figura 16 - Modelo de Dinâmica de Sistemas para CO<sub>2</sub>-EOR-CCUS

Fonte: (ROMANENKO, 2014)

No contexto específico da indústria holandesa, Janipour et al. fizeram um estudo, através do uso da dinâmica de sistemas, para chegar a uma conclusão sobre o papel da captura e armazenamento de carbono. A dinâmica de sistemas, como mostra a figura 17, foi definida com base em entrevistas com especialistas, com o objetivo de identificar os mecanismos de feedback que impulsionam a dinâmica da CAC na transição do sistema industrial holandês. Com isso, foi descoberto que a captura e armazenamento de carbono pode reforçar o aprisionamento de carbono por meio de mecanismos de feedback de legitimação, exclusão e integração, e que a CAC pode desempenhar um papel em uma transição climática justa por meio do emprego, mecanismos econômicos e ambientais (JANIPOUR et al., 2020).

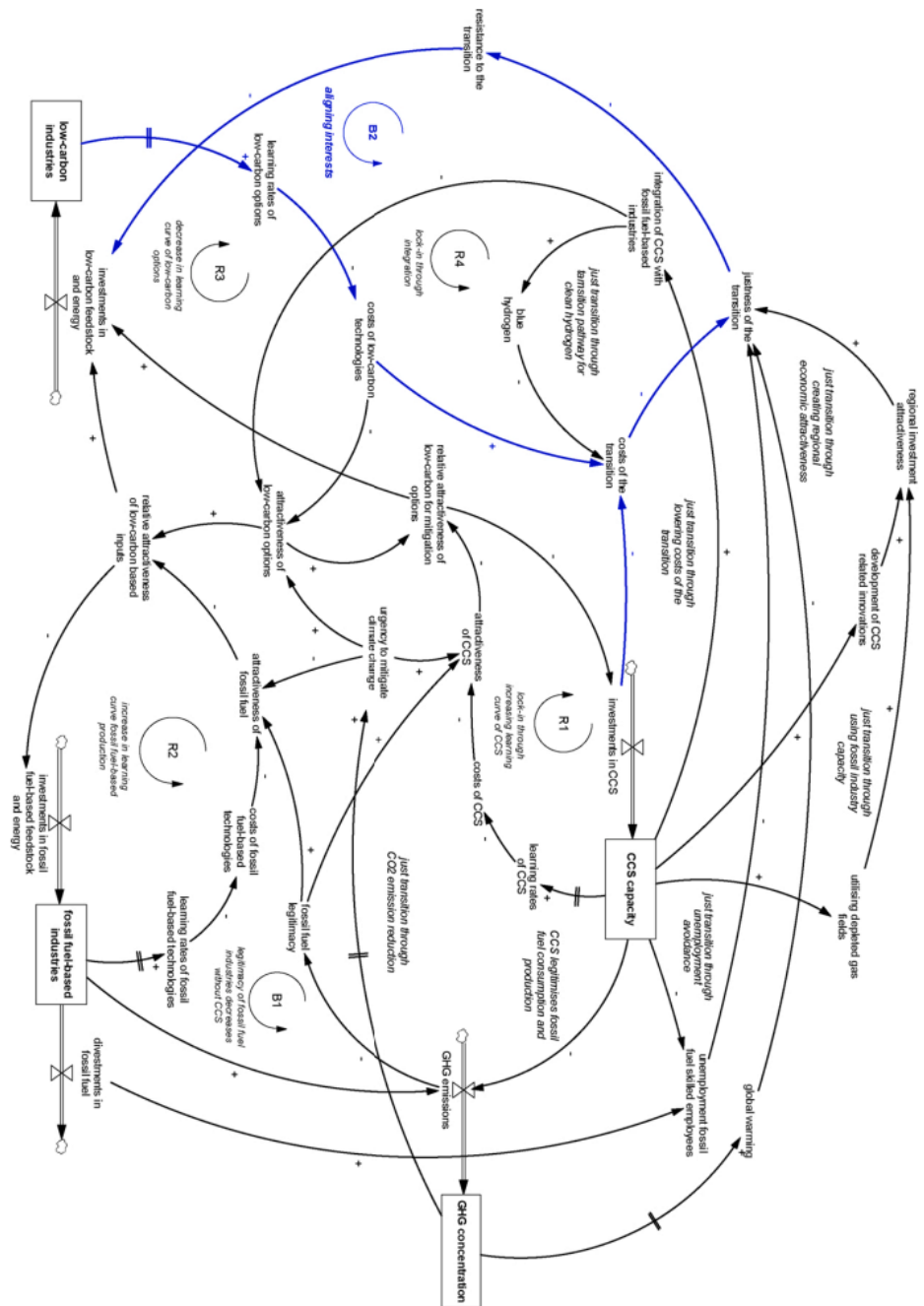


Figura 17 - Dinâmica de Sistemas para o Desenvolvimento da Captura e Armazenamento de Carbono

Fonte: (JANIPOUR et al., 2020)

Mais um estudo foi conduzido com base no fato de que, apesar da captura e armazenamento de carbono ser uma tecnologia comprovadamente capaz de reduzir as emissões de carbono, a viabilidade das tecnologias de CAC ainda é incerta e submetida a diversos parâmetros dinâmicos. Nesse sentido, o estudo tem como objetivo avaliar a viabilidade econômica de longo prazo da integração de tecnologias de captura de carbono no planejamento comunitário de emissões. As principais variáveis de decisão foram identificadas e o desempenho econômico dinâmico dos investimentos do CAC foi avaliado para complexos acadêmicos localizados em duas localizações no Canadá, onde uma dinâmica de sistemas, apresentada na figura 18, foi desenvolvida para estimar o custo futuro de projetos de captura de carbono. Um dos resultados foi que a CAC é mais viável em províncias com alta dependência de fontes de energia de combustíveis fósseis. Também, uma parcela significativa dos custos de captura de carbono é assumida pela infraestrutura, e as políticas governamentais têm um papel crítico na aceleração da comercialização das tecnologias de captura e armazenamento de carbono (KOTAGODAHETTI et al., 2022).

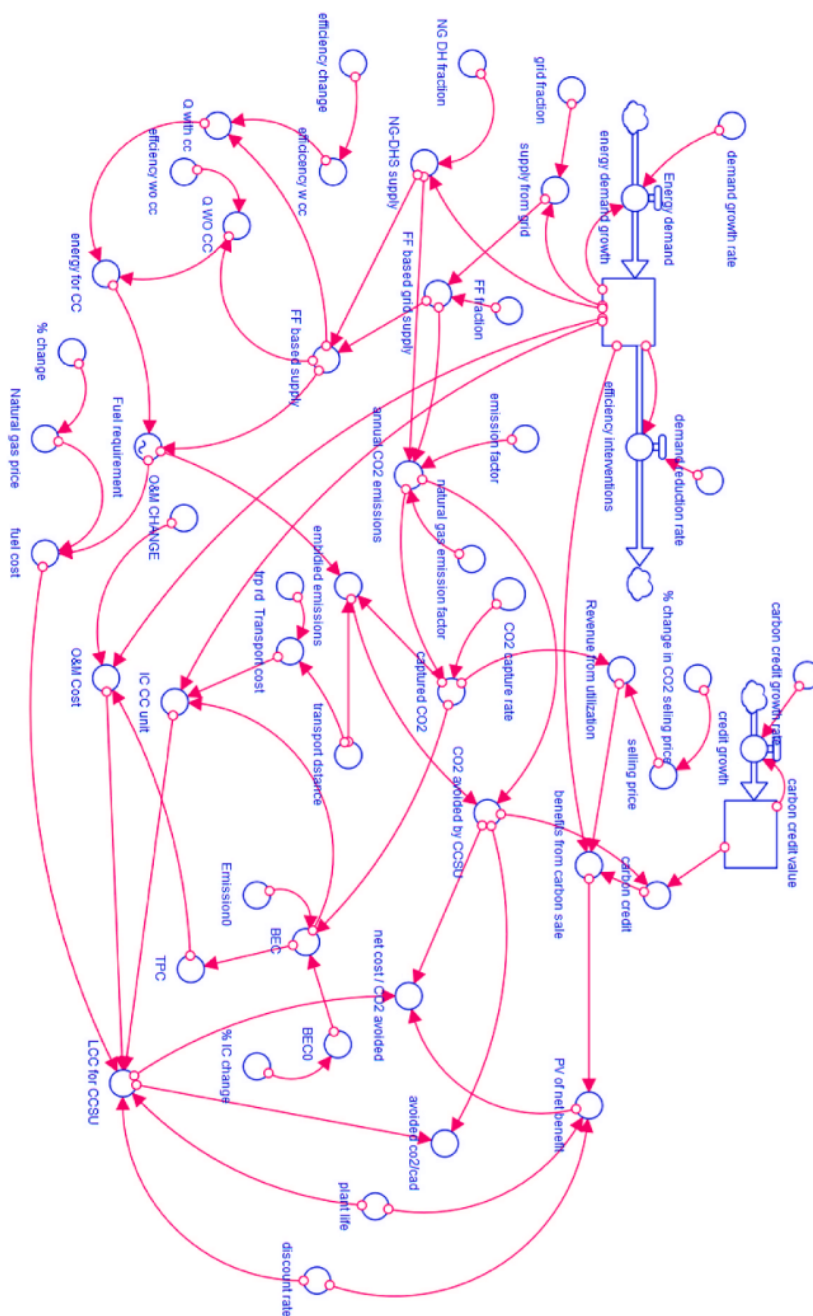


Figura 18 - Modelo Baseado em Dinâmica de Sistemas para Viabilidade de Captura de Carbono

Fonte: (KOTAGODAHETTI et al., 2022)

Finalmente, o último estudo analisado questiona que a captura e armazenamento de carbono ainda está em seu estágio inicial, com muitas incertezas quanto ao modelo de negócio e políticas de incentivo, ao passo que ainda são poucos os trabalhos que analisaram este problema. Nesta pesquisa, usinas termelétricas a carvão foram tomadas como foco, onde uma dinâmica de sistemas é desenvolvida para comparar a viabilidade econômica, estabilidade e efeito de redução de emissão de dióxido de carbono no modelo de integração vertical e no modelo de operador da CAC. Diferentes políticas de incentivo também foram analisadas, para se entender o impacto de cada uma no desenvolvimento da CAC. Os resultados mostram que ambos os modelos são viáveis (integração vertical e operador de CAC), em que a estabilidade é maior para o operador de CAC. Em termos de efeito de políticas individuais, a preferência do governo por subsídios à usina termelétrica a carvão pode reduzir significativamente as emissões de CO<sub>2</sub>. Ainda, caso os subsídios e a taxação do carbono não atinjam certo nível, o sistema de CAC, considerando todas as empresas e, principalmente, a empresa de armazenamento, se tornará inviável. Finalmente, o impacto de várias políticas simultâneas não é a soma individual de cada política, onde uma política pode influenciar de forma positiva ou negativa nas outras (YE et al., 2022).

Portanto, nota-se que a metodologia da dinâmica de sistemas possui uma ampla variedade de aplicações, em diversos setores e cenários distintos. Porém, observa-se também que o Brasil carece de estudos que se utilizam desta metodologia para estudar o desenvolvimento das tecnologias de captura e armazenamento de carbono no país, o que poderia ajudar fortemente no atingimento de metas climáticas. Com isso, o presente trabalho busca preencher esta lacuna através da aplicação da dinâmica de sistemas para estudar diferentes cenários para a captura e armazenamento de carbono no Brasil.

### **3. METODOLOGIA**

#### **3.1 Escolha do Setor**

É importante ter noção dos setores que, atualmente, são os principais emissores de gases poluentes, para que seja possível direcionar o foco do trabalho em iniciativas de maior impacto e potencial de sucesso. Além disso, é relevante entender o desenvolvimento das tecnologias de captura e armazenamento de carbono nestes setores, de forma a garantir ainda mais clareza do potencial de implementação de novas soluções. Dessa forma, levando em consideração quatro dos maiores setores industriais, sendo eles os setores siderúrgico, de

cimento, de refino e de papel e celulose, nota-se que os setores siderúrgico e de cimento são os mais desenvolvidos quanto à inovação em tecnologias de CAC. Isto se confirma pelo fato de que, de 71 artigos direcionados para uma indústria em específico, 39% deles focaram na indústria de cimento e 40% na indústria siderúrgica, enquanto que 11% dos artigos eram direcionados ao setor de refinaria, mesmo este sendo responsável por 10% de todas as emissões industriais (VAN STRAELEN et al., 2010), e somente 10% diziam respeito à indústria de papel e celulose (LEESON et al., 2017). Conclui-se que essa diferença do foco no desenvolvimento de tecnologias de CAC se dá pelo tamanho de cada setor e pela facilidade da sua aplicação. Nota-se que as duas indústrias mais inovadoras nestas tecnologias são justamente a primeira e a segunda maiores emissoras de CO<sub>2</sub>, a siderúrgica e a de cimento, respectivamente (LEESON et al., 2017).

Ademais, visto que o trabalho tem seu foco no Brasil, faz-se necessário elencar as principais indústrias e processos ou produtos emissores de CO<sub>2</sub> neste país, de forma a garantir um melhor direcionamento. Nesse sentido, segundo os dados sobre os processos industriais brasileiros do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), as maiores atividades emissoras de gases poluentes, no Brasil, são a produção de ferro gusa e aço, produção de cimento, produção de cal e produção de outros não-ferrosos, como mostra a figura 19.

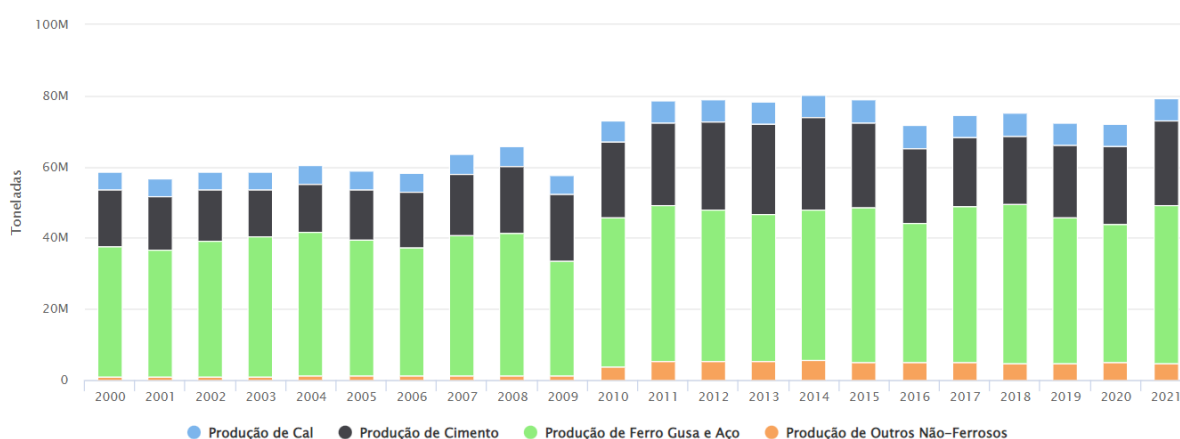


Figura 19 - Histórico Anual das Maiores Atividades Emissoras de Gases Poluentes

Fonte: (SEEG, 2023)

Outrossim, o Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa também apresenta dados sobre o setor de Energia no Brasil, permitindo um agrupamento por subcategorias. Desta forma, nota-se que algumas das subcategorias do setor

de energia que mais emitem gases no país, excluindo todas as subcategorias de transporte são o refino de petróleo, exploração de petróleo e gás natural, cimento, química, ferro gusa e aço, alimentos e bebidas, papel e celulose, dentre outras.

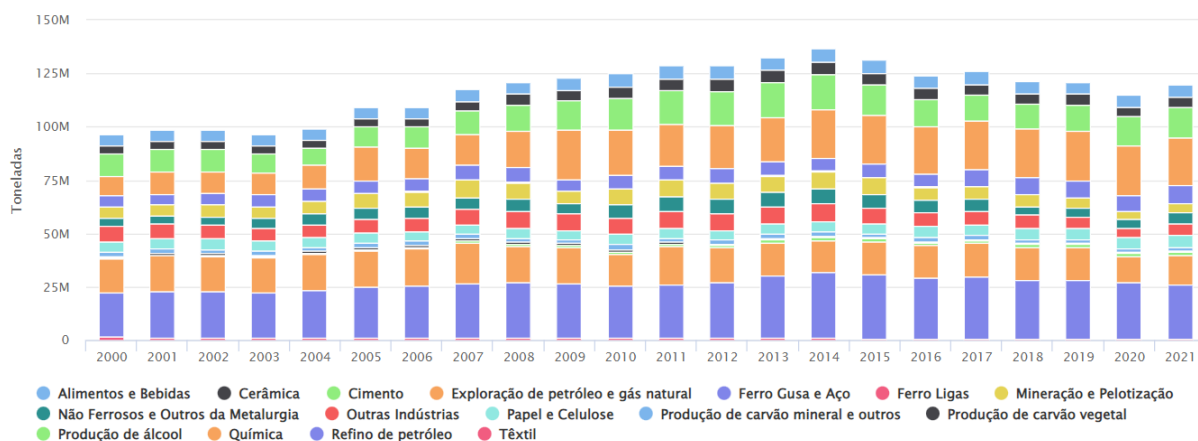


Figura 20 - Histórico Anual das Maiores Subcategorias Emissoras de Gases Poluentes do Setor de Energia

Fonte: (SEEG, 2023)

Para dar um direcionamento mais claro a este trabalho, um único setor industrial brasileiro será tido como foco, de forma a garantir um maior nível de detalhamento. Isto é importante porque, com o foco em um só setor, será possível calcular com maior precisão os custos envolvidos no processo da captura e armazenamento de carbono, desde a captura até o armazenamento.

Dessa forma, faz-se necessária uma análise dos setores que mais emitem gases do efeito estufa no Brasil, dado que quanto maior a emissão, maior o potencial de captura e armazenamento do carbono. Nesse sentido, com base nos dados do SEEG, apresentados no capítulo 2.2, observa-se que alguns dos setores com maior volume de emissões dos gases do efeito estufa são produção de ferro gusa e aço, cimento e refino de petróleo. Dentre estes 3, o setor de refino de petróleo ganha vantagem por ter proximidade com possíveis pontos de armazenamento de CO<sub>2</sub>. O Brasil possui grande potencial para o armazenamento de CO<sub>2</sub> em poços inutilizados de petróleo, localizados próximos aos centros de refino. Isso pode reduzir significativamente os custos de transporte do CO<sub>2</sub> capturado, tornando a implementação de projetos de captura e armazenamento de carbono mais viável economicamente (CIOTTA et al., 2021).



Outro fator que contribuiu para a escolha deste setor é a sua importância para a economia do país. O setor de refino de petróleo é responsável por processar o petróleo bruto extraído no Brasil, gerando combustíveis e matérias-primas para diversos outros setores (FALLIS, 2013). Além disso, é um setor que apresenta grande potencial para a redução de emissões de gases do efeito estufa, já que existem tecnologias de captura e armazenamento de carbono que podem ser aplicadas nos processos de refino. Ademais, o setor de refino de petróleo no Brasil já conta com iniciativas voltadas para a redução de emissões de gases do efeito estufa, como o programa "Combustível Brasil", lançado pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) em parceria com outras instituições. O programa tem como objetivo melhorar a eficiência energética e reduzir as emissões de gases poluentes do setor de combustíveis (ROCHEDO et al., 2016).

Portanto, a escolha do setor de refino de petróleo no Brasil como foco deste trabalho se justifica não só pela relevância das emissões de gases do efeito estufa provenientes deste setor, mas também pelo seu potencial para a aplicação de tecnologias de captura e armazenamento de carbono, bem como pela sua importância para a economia do país e pelas iniciativas já existentes voltadas para a redução de emissões.

### **3.2 Definição das Refinarias**

Com a definição do setor finalizada, faz sentido a especificação de algumas refinarias para focar neste trabalho, de modo a alcançar um nível de detalhe ainda maior. Nessa linha, tomaremos como base a Bacia de Campos, a maior reserva de petróleo do Brasil, justamente por ser um local com muito potencial para armazenamento de carbono. A Bacia de Campos é uma das mais importantes e produtivas bacias sedimentares de petróleo e gás natural do Brasil. Localizada na costa norte do estado do Rio de Janeiro, como mostra a figura 21, é conhecida por abrigar vastas reservas de hidrocarbonetos e por ser uma das principais áreas de exploração e produção de petróleo no país. Com uma área total de aproximadamente 100.000 km<sup>2</sup>, a Bacia de Campos possui uma história de exploração que remonta aos anos 1960. No entanto, foi na década de 1970 que foram feitas descobertas significativas de petróleo em campos como Albacora e Marlim, que impulsionaram o desenvolvimento da indústria petrolífera brasileira (AZEVEDO; GOMIDE; VIVIERS, 1987).



Figura 21 - Localização da Bacia de Campos

Fonte: (ROCKETT et al., 2013)

O principal reservatório de petróleo da Bacia de Campos é a Formação Albacora, que consiste em rochas do período Cretáceo. Essa formação é conhecida por conter petróleo de alta qualidade e grande volume, o que contribuiu para o crescimento da produção na região. A Bacia de Campos também é famosa pelo campo de petróleo de Roncador, um dos maiores do Brasil e um dos maiores campos offshore do mundo. Roncador possui reservas significativas de petróleo e gás, sendo operado por diversas empresas de petróleo e gás. A exploração e produção de petróleo na Bacia de Campos envolvem a perfuração de poços offshore e a instalação de plataformas de produção. A região possui uma infraestrutura desenvolvida para suportar a produção de petróleo, incluindo sistemas de transporte por oleodutos e uma rede de refinarias próximas que processam o petróleo produzido na região. Em resumo, a Bacia de Campos desempenha um papel crucial na indústria de petróleo e gás do Brasil. Com suas vastas reservas e produção significativa, contribui para a economia do país, impulsiona o

desenvolvimento tecnológico e representa um setor estratégico para o fornecimento de energia (AZEVEDO; GOMIDE; VIVIERS, 1987).

A Petrobrás, empresa estatal brasileira de petróleo, desempenha um papel fundamental na exploração e produção de petróleo na Bacia de Campos. A empresa possui concessões e parcerias com outras empresas nacionais e internacionais para operar campos de petróleo na região. Tendo isso em vista, nota-se que as quatro refinarias mais próximas à Bacia de Campos, e, portanto, as refinarias que serão focadas neste trabalho, são todas da Petrobrás, sendo elas: a Refinaria Duque de Caxias (REDUC), localizada no Rio de Janeiro a aproximadamente 130 km a sudeste da Bacia de Campos; a Refinaria Presidente Bernardes (RPBC), situada em Cubatão (São Paulo), localizada a 370 km a sudoeste da Bacia de Campos; a Refinaria Presidente Getúlio Vargas (REPAR) que fica em Araucária (Paraná), a 900 km a sudoeste da Bacia de Campos; e a Refinaria Gabriel Passos (REGAP), em Betim (Minas Gerais), 750 km a oeste da Bacia de Campos. As distâncias foram aproximadas de acordo com a localização de cada refinaria, presente no site da Petrobrás, e a localização da Bacia de Campos, com ajuda do *Google Maps*.

### **3.3 Definição da Política para o Brasil**

Tecnologias avançadas, rápida implementação ou garantia de captura de altíssimos volumes de CO<sub>2</sub> não são suficientes para fazer com que a captura e armazenamento de carbono seja uma opção viável para as indústrias. Segundo uma pesquisa conduzida pelo *SBC Energy Institute*, 89% de 27 profissionais globais da indústria de CAC entrevistados indicaram que o maior desafio para o avanço e comercialização da CAC é que “a economia não bate”, ou seja, as condições de mercado (preço do CO<sub>2</sub> e taxas do carbono) não são grandes o suficiente para permitir um grande desenvolvimento da CAC, além de que os subsídios governamentais não são suficientes (SBC ENERGY INSTITUTE, 2012).

Dessa maneira, é de extrema relevância que este trabalho leve em consideração a possibilidade da implementação de diferentes políticas, por parte do governo brasileiro, que possam vir a contribuir com o desenvolvimento do CAC. Machado et al., com a ajuda de especialistas no assunto, estimaram a probabilidade de diferentes políticas entrarem em vigor no Brasil (MACHADO; HAWKES; RIBEIRO, 2021). As possíveis políticas, suas descrições e probabilidades constam na tabela 5.

O mercado de carbono, que permite que empresas, organizações e indivíduos compensem as suas emissões de gases de efeito estufa (GEE) a partir da aquisição de créditos gerados por projetos de redução de emissões e/ou de captura de carbono (DA SILVEIRA; DE

OLIVEIRA, 2021), é a política com maior probabilidade de ser implementada (65%). Segundo o presidente da Associação Brasileira de Direito da Energia e do Meio Ambiente (ABDEM), Alexandre Sion, em reportagem ao portal Brasil61, o mercado de carbono tem potencial para incorporar a sustentabilidade como valor agregado às empresas, desenvolver novos negócios e gerar novos empregos.

Na sequência, a isenção de impostos seria a segunda política mais provável de ser implementada no Brasil, com cerca de 60% de probabilidade de implementação, dado que essa medida já acontece no país em outros setores como os de infraestrutura e energia. Neste caso, as empresas podem garantir isenção de alguns impostos, de acordo com metas de sustentabilidade referentes à redução das emissões de carbono. Em seguida, tem-se a taxação do carbono, com 50% de probabilidade de ser implementada (MACHADO; HAWKES; RIBEIRO, 2021), onde as empresas seriam taxadas de acordo com o volume de emissões de gases do efeito estufa, o que condiz bastante com a estrutura política em 2023, onde o governo vem buscando formas de aumentar a arrecadação através de novos impostos, como na taxação de apostas esportivas.

Com uma probabilidade de implementação de 42%, o subsídio da captura e armazenamento de carbono também gerou discussões entre os especialistas, dada a existência de projetos de subsídio em outros setores, como o de energia. Por fim, as políticas menos prováveis são a tarifa renovável avançada, mecanismo usado em políticas públicas para acelerar o investimento em tecnologias de energias renováveis por meio da oferta de contratos de longo prazo aos produtores de energias renováveis, com 30%, e forçar a aplicação de captura e armazenamento de carbono, com 15% (MACHADO; HAWKES; RIBEIRO, 2021).

| <b>Política</b>             | <b>Descrição</b>                                                                                                                                                                                                    | <b>Probabilidade (%) de ser Implementada</b> |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| Mercado de Carbono          | Permite que empresas, organizações e indivíduos compensem as suas emissões de gases de efeito estufa (GEE) a partir da aquisição de créditos gerados por projetos de redução de emissões e/ou de captura de carbono | 65%                                          |
| Isenção de Impostos por CAC | A empresa pode garantir isenção de alguns impostos,                                                                                                                                                                 | 60%                                          |

|                                                     |                                                                                                                                                                                                             |     |
|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
|                                                     | conforme a implementação de projetos de redução de emissões de carbono.                                                                                                                                     |     |
| Taxação do CO <sub>2</sub>                          | Imposto cobrado sobre volume de emissões de gases do efeito estufa.                                                                                                                                         | 50% |
| Subsídio de CAC                                     | Subsídio, por parte do governo, em projetos de captura e armazenamento de carbono.                                                                                                                          | 42% |
| Tarifa Renovável Avançada ( <i>feed-in tariff</i> ) | Mecanismo utilizado por políticas públicas destinadas a acelerar o investimento em tecnologias de energias renováveis por meio da oferta de contratos de longo prazo aos produtores de energias renováveis. | 30% |
| Forçar a Aplicação da CAC                           | Forçar a implementação de projetos de captura e armazenamento de carbono às empresas.                                                                                                                       | 15% |

Tabela 5 - Políticas para o Desenvolvimento do CAC no Brasil e suas Probabilidades

Portanto, a política selecionada para este trabalho será a de taxaço sobre a emissão de dióxido de carbono por empresas, em que o governo deve recolher impostos sobre a emissão de gás carbônico das empresas. Essa abordagem é baseada na premissa de que a aplicação de impostos sobre as emissões de CO<sub>2</sub> pode atuar como um incentivo eficaz para que as empresas adotem tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CAC). A essência dessa política é estabelecer um mecanismo de custo que torne economicamente viável para as refinarias a implementação de sistemas de CAC, considerando os custos associados à sua instalação e operação.

O valor deste imposto será definido através do modelo, que deve entregar o valor mínimo a partir do qual a implementação de equipamentos de captura e armazenamento de carbono passe a fazer sentido para as refinarias. Além disso, a política proposta também incluirá elementos incentivadores. Isso será feito por meio de uma estrutura de impostos diferenciada, onde o valor do imposto pode ser reduzido para as empresas que alcançarem metas específicas de captura acumulada de carbono. Essas metas serão estabelecidas com base

em critérios rigorosos, destinados a promover uma redução significativa nas emissões de CO<sub>2</sub>. A ideia é que, ao atingir essas metas, as empresas não só beneficiam o meio ambiente, mas também sejam recompensadas com uma carga tributária reduzida, criando um estímulo econômico para a adoção de práticas mais sustentáveis.

## 4. DESCRIÇÃO DO MODELO

### 4.1 Visão Geral do Modelo

Os capítulos anteriores descreveram extensivamente a definição do problema e uma série de questões relacionadas ao design da pesquisa com o objetivo de abordar o problema declarado. Esta seção descreve o que o modelo faz (ou seja, a dinâmica das variáveis que ele gera ou o escopo do modelo), em qual contexto (setor definido, refinarias escolhidas) e por quanto tempo. Com base nessa descrição, o propósito do modelo é explicado.

Todos esses elementos fornecem uma visão geral do modelo, para que o leitor possa entender, em termos gerais, do que se trata o modelo sem se referir às especificações exatas utilizadas. Em seguida, a discussão se desloca para um nível muito mais detalhado ao descrever a estrutura dos setores do modelo em termos de estoques, fluxos e formulações principais.

Conforme definido anteriormente, o modelo se concentra na dinâmica da emissão de CO<sub>2</sub> pelas refinarias selecionadas para análise no tópico 3.2. Para tanto, é gerada a dinâmica das seguintes variáveis-chave:

- Emissão Anual de CO<sub>2</sub> (das refinarias);
- Custos com a Captura, Transporte e Armazenamento de CO<sub>2</sub>;
- Taxa Efetiva de Captura de CO<sub>2</sub>;
- Taxação da Emissão do CO<sub>2</sub>.

O modelo é então usado para testar a política de taxação das emissões de carbono nas refinarias, de forma que as empresas conseguiriam gerar economia no pagamento desses impostos através da captura e armazenamento do CO<sub>2</sub> emitido.

O período de tempo da simulação do modelo é de 50 anos a partir do ponto de partida, que é o ano atual de 2023. A escolha de 50 anos é ditada pelo fato de que uma perspectiva comum na análise do problema, tanto para praticantes quanto para analistas, não excede o período de 50 anos. Isso também é baseado na vida útil de projetos de captura de CO<sub>2</sub> (normalmente em torno de 30 a 50 anos) (ROMANENKO, 2014).

Como tal, o modelo pode ser descrito como o modelo de escopo, no sentido de que ele fornece uma visão geral altamente agregada do sistema composto por interações complexas entre o processo de emissão de CO<sub>2</sub> pelas refinarias, a implementação dos equipamentos necessários à captura do gás emitido, a capacidade da captura e o impacto financeiro às refinarias resultante da implementação desses equipamentos. Por fim, o efeito de aprendizado, o desenvolvimento dos custos de CO<sub>2</sub>, a política de impostos incidentes na emissão de CO<sub>2</sub> e os custos envolvidos em todo o processo são todas representações muito simplificadas, que, no entanto, juntas geram uma dinâmica não trivial resultante da interação desses elementos.

## **4.2 Estrutura do Modelo**

Este capítulo descreve com mais detalhes o funcionamento do modelo. Esta seção está organizada da seguinte maneira. Primeiro, o mecanismo geral do modelo é apresentado. Em seguida, cada um dos dois blocos do modelo é descrito em detalhes. A documentação completa do modelo, que inclui todas as equações, unidades das variáveis e referências às fontes de valores estimados, bem como comentários gerais sobre algumas das variáveis e formulações, está contida no tópico 4.2.2.

### **4.2.1 Detalhamento do Modelo**

Como demonstra a figura a seguir, o modelo da dinâmica de sistemas deste estudo, construído na ferramenta *Insight Maker*, consiste em 2 blocos:

- Bloco A - Captura de CO<sub>2</sub>;
- Bloco B - Resultados Financeiros.

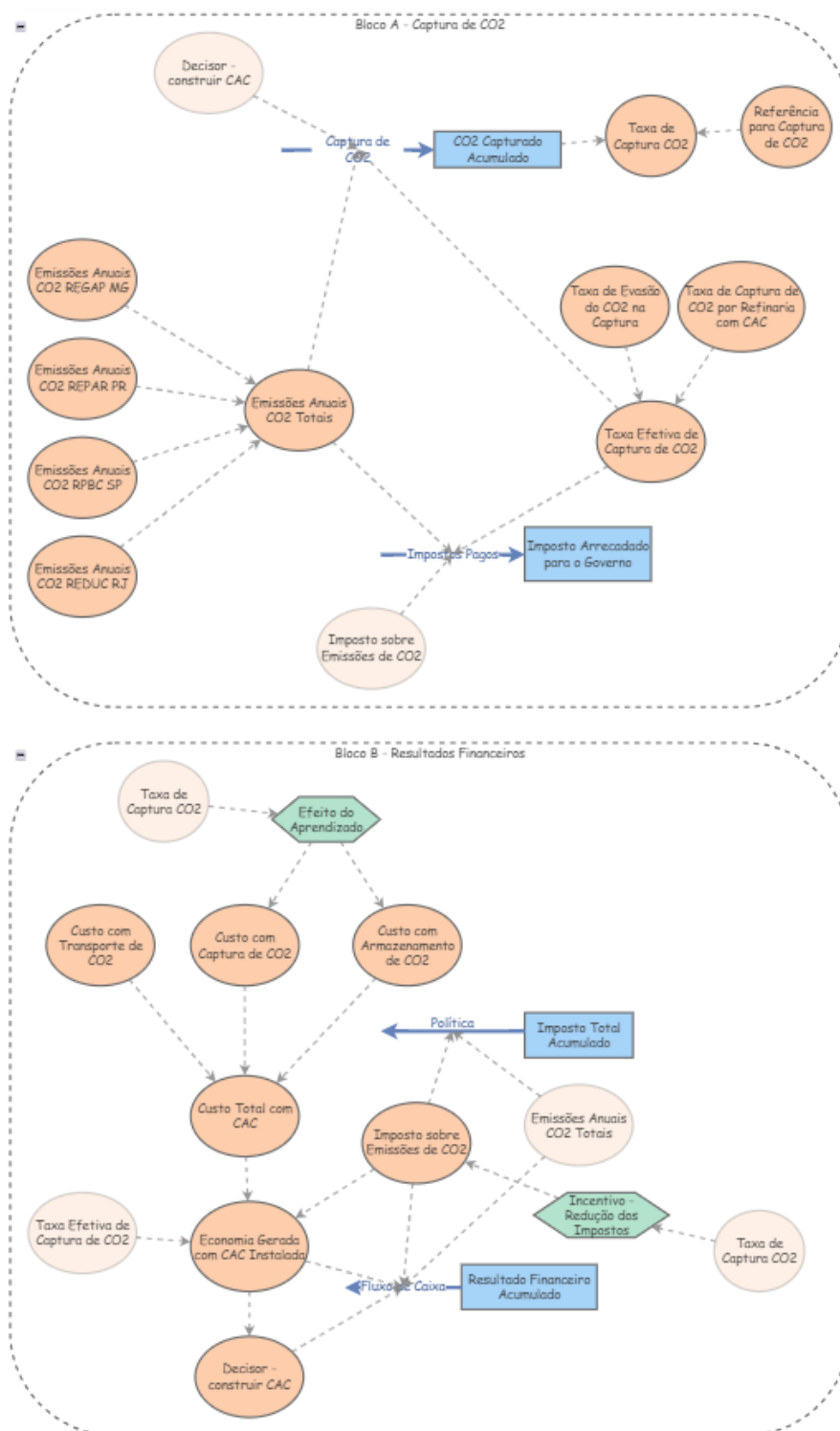


Figura 22 - Visão Geral do Modelo

O Bloco A “Captura de CO<sub>2</sub>”, demonstrado pela figura 23, parte das variáveis de emissões anuais de CO<sub>2</sub> em cada uma das refinarias selecionadas para o estudo, que compõem a variável de “Emissões Anuais CO<sub>2</sub> Totais”, a qual consiste na soma das emissões das 4 refinarias. Além disso, a “Taxa Efetiva de Captura de CO<sub>2</sub>” é definida neste bloco como quanto de fato é possível capturar de CO<sub>2</sub> caso sejam instalados equipamentos de captura, considerando também uma taxa de evasão. O “CO<sub>2</sub> Capturado Acumulado” também é



calculado neste bloco, o qual se refere à quantidade de CO<sub>2</sub> efetivamente capturado durante toda a simulação. Esta variável alimenta a “Taxa de Captura CO<sub>2</sub>”, que será usada para embasar o efeito do aprendizado que reduzirá os custos com a captura e armazenamento de CO<sub>2</sub> no bloco B. As variáveis “Decisor - construir CAC” e “Imposto sobre Emissões de CO<sub>2</sub>” são “variáveis fantasma”, definidas no bloco B. Por fim, este bloco foi aproveitado para calcular também o imposto efetivamente arrecadado para o governo, de forma acumulada.

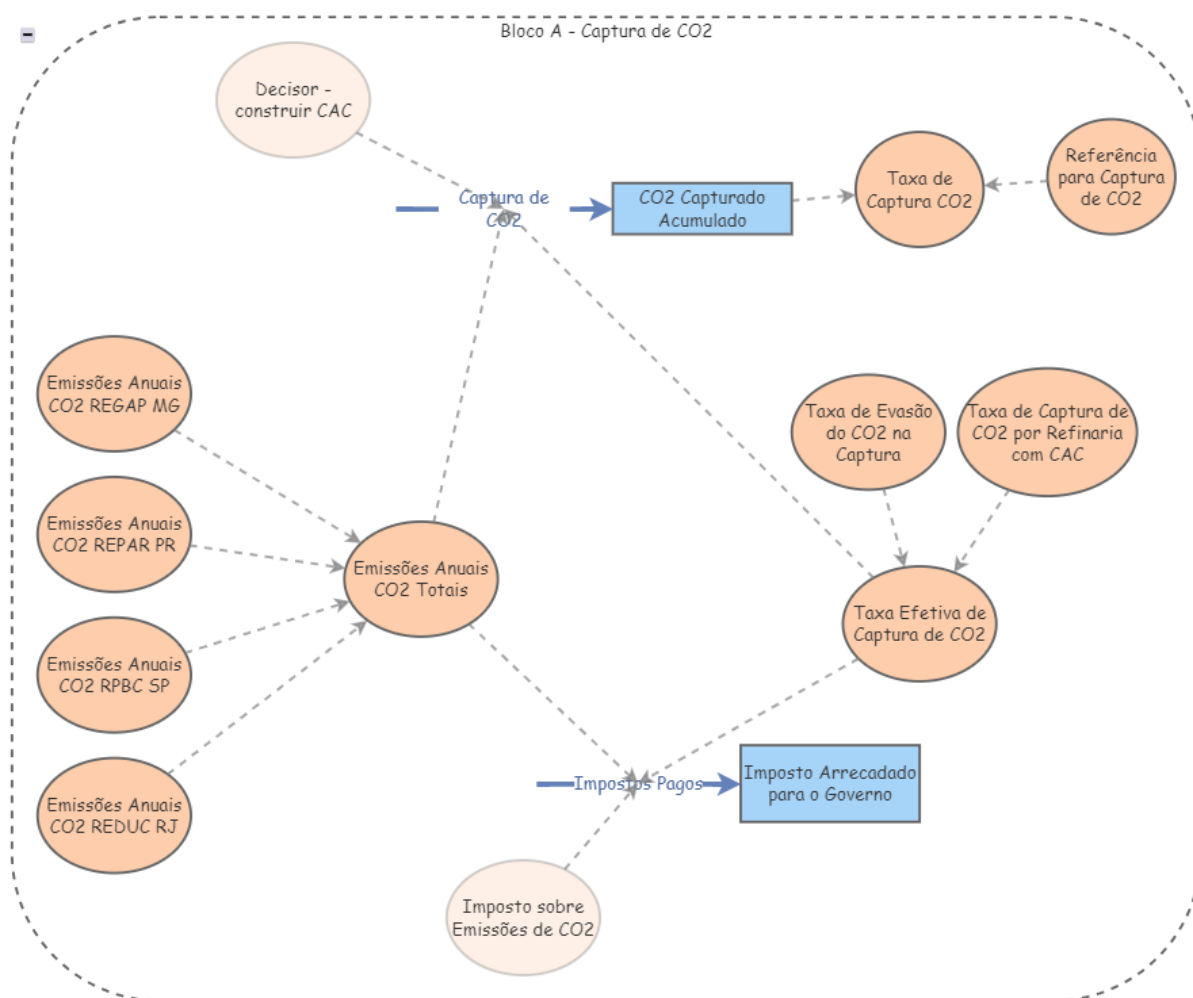


Figura 23 - Bloco A do Modelo (Captura de CO<sub>2</sub>)

Já o Bloco B “Resultados Financeiros” parte dos custos com a captura, transporte e armazenamento do CO<sub>2</sub>, bem como dos impostos sobre as emissões de CO<sub>2</sub>, que se referem à política selecionada para análise. Os custos com captura e armazenamento de CO<sub>2</sub> possuem um mecanismo de “Efeito do Aprendizado” em que, conforme é atingida a referência de captura acumulada de CO<sub>2</sub> (representado pela variável “Taxa de Captura CO<sub>2</sub>” do bloco A), tais custos vão decaindo até um certo limite. A variável “Decisor - construir CAC” foi criada para decidir se faz sentido ou não instalar equipamentos de CAC nas refinarias, dado que se o imposto for muito baixo, os custos com a captura, transporte e armazenamento são superiores à economia gerada pela captura e, portanto, não faria sentido para as refinarias instalarem os equipamentos de CAC. Finalmente, como principais resultados deste bloco, são gerados o

“Imposto a Ser Cobrado Acumulado”, que representa quanto o governo teria de cobrar às refinarias caso não instalassem equipamentos de CAC, e o “Resultado Financeiro Acumulado”, que representa o fluxo de caixa negativo às refinarias (imposto pago somado aos custos com a captura, transporte e armazenamento do CO<sub>2</sub>).

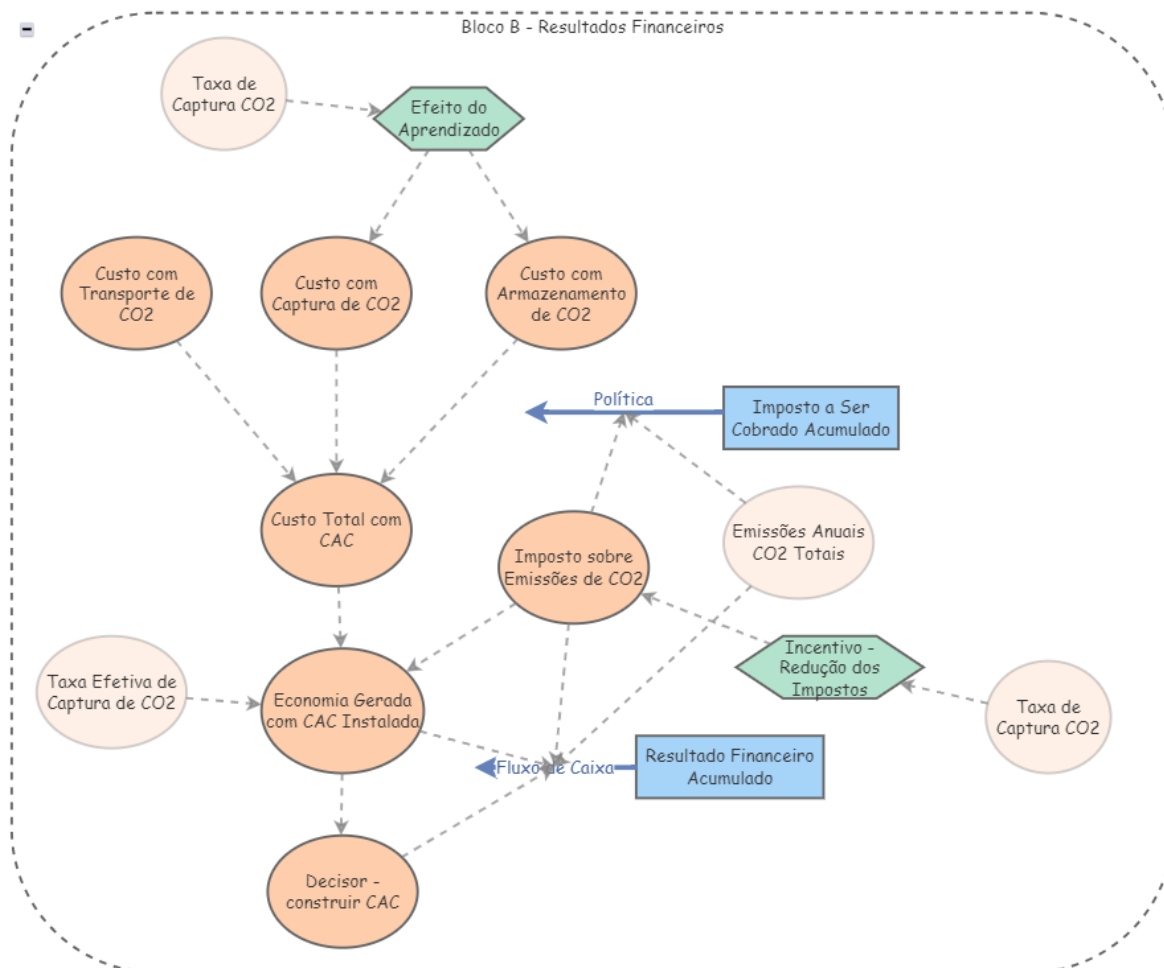


Figura 24 - Bloco B do Modelo (Resultados Financeiros)

#### 4.2.2 Variáveis do Sistema Dinâmico

A tabela 7 contém a descrição, os valores, as referências e as fórmulas de todas as variáveis utilizadas no modelo. Com relação às emissões anuais de cada refinaria, a estimativa foi feita com base em dados da produtividade de cada uma das refinarias em comparação com as emissões do setor em cada Estado. Os dados das emissões do setor de refino para cada Estado foi extraído do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), no período de 10 anos entre 2012 e 2021. Além disso, coletaram-se dados da Agência Nacional do Petróleo (ANP) da produtividade das refinarias selecionadas e todas as refinarias existentes em cada Estado, para se calcular o percentual que cada refinaria representa da produção total do Estado. A partir deste percentual e do total de emissões de cada Estado, foi possível estimar as emissões de cada refinaria selecionada, conforme a tabela 6.

| Refinarias Seleccionadas                                  | REDUC - RIO DE JANEIRO | RPBC - SÃO PAULO | REPAR - PARANÁ | REGAP - MINAS GERAIS |
|-----------------------------------------------------------|------------------------|------------------|----------------|----------------------|
| Estado                                                    | RIO DE JANEIRO         | SÃO PAULO        | PARANÁ         | MINAS GERAIS         |
| Volume Estado                                             | 122.020.697            | 456.274.053      | 106.437.904    | 83.833.573           |
| Volume refinaria                                          | 118.479.750            | 88.525.219       | 106.437.904    | 83.833.573           |
| % Refinaria / Estado                                      | 97%                    | 19%              | 100%           | 100%                 |
| Média Anual de Emissões do Estado (t CO <sub>2</sub> )    | 2.307.370              | 8.636.807        | 2.015.213      | 1.590.649            |
| Média Anual de Emissões da Refinaria (t CO <sub>2</sub> ) | 2.240.412              | 1.675.693        | 2.015.213      | 1.590.649            |

Tabela 6 - Estimativa das Emissões Anuais de Cada Refinaria

A figura 25 mostra o comportamento do efeito do aprendizado, responsável pela redução nos custos com a captura e o armazenamento do CO<sub>2</sub>. Os custos se mantêm no seu valor inicial até que a simulação atinja 100 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> capturados, de forma acumulada. A partir deste valor, os custos começam a decair, chegando em até, no limite, 50,3% do valor inicial.

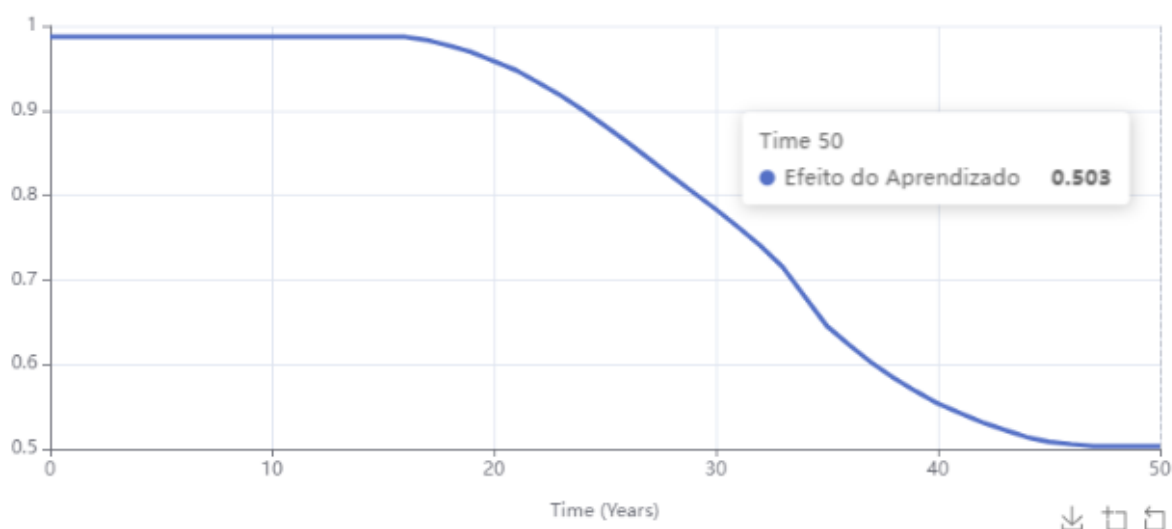


Figura 25 - Curva do Efeito do Aprendizado

Por conta disso, os custos com a captura, transporte e armazenamento do carbono, que se iniciam em 131 dólares por tonelada de CO<sub>2</sub>, chegam perto dos 84 dólares no final da simulação, seguindo o mesmo comportamento da curva do efeito do aprendizado, dado que é a única variável que afeta esses custos.

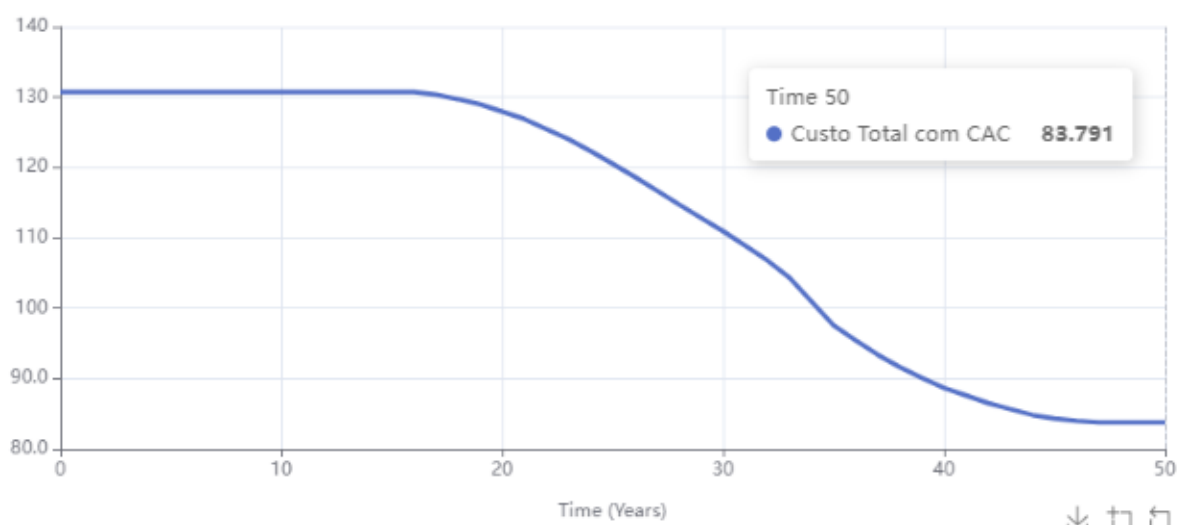


Figura 26 - Curva do Custo Total com CAC (dólares por tonelada de CO<sub>2</sub> emitida)

Ademais, é importante mostrar, também, a curva dos incentivos que irão reduzir o valor dos impostos. Isto é, conforme a simulação acumular 100 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> capturadas, o valor do imposto vai decaindo até o máximo de 80% do valor inicial, como mostra a figura a seguir.

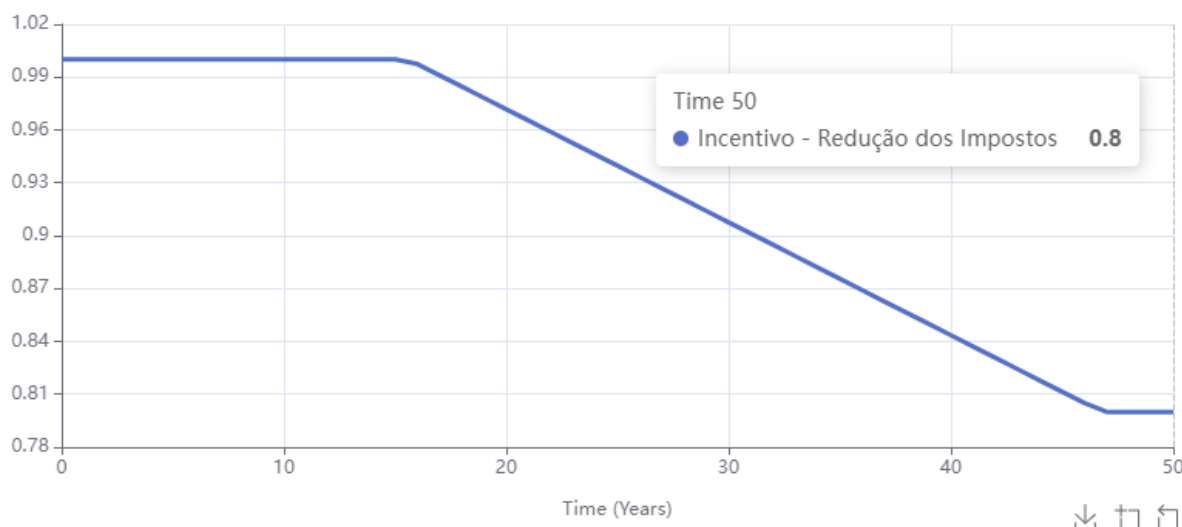


Figura 27 - Curva do Incentivo - Redução dos Impostos

Dessa forma, o comportamento do valor do imposto segue a mesma linha da curva do incentivo mostrada anteriormente, como demonstra a figura 28. Nesta simulação, o valor inicial do imposto foi de 155 dólares por tonelada de CO<sub>2</sub> e, no final, ficou em 124 dólares.

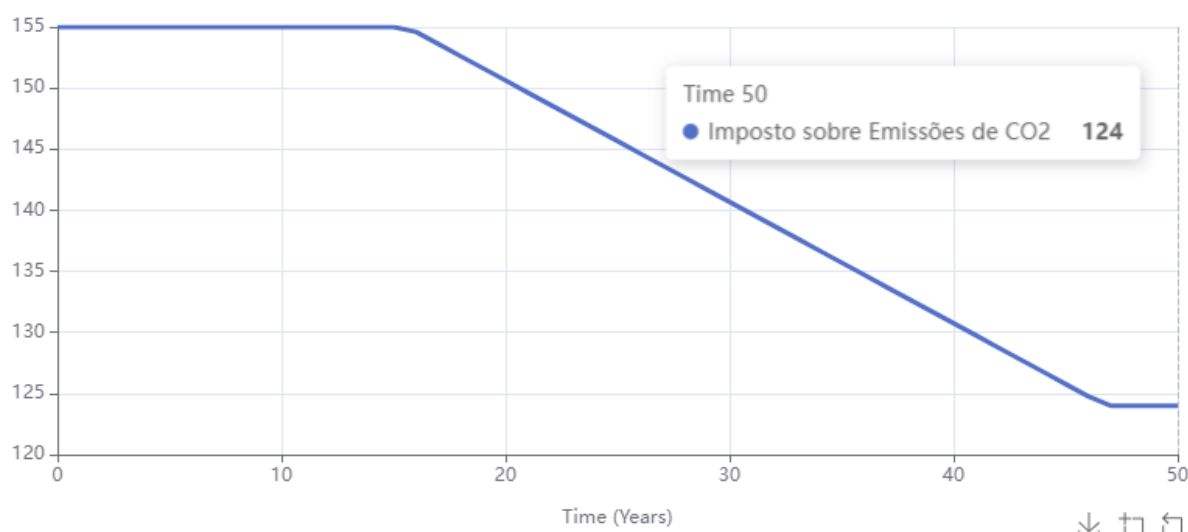


Figura 28 - Valor do Imposto sobre Emissões de CO<sub>2</sub> (dólares por tonelada de CO<sub>2</sub>)

| Bloco                                | Variável (unidade)                                  | Descrição                                                                                               | Valor e Referência                                                                                                                                                                      |
|--------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A -<br>Captura de<br>CO <sub>2</sub> | Emissão Anual de CO <sub>2</sub> (Mton/ano)         | Volume total de CO <sub>2</sub> emitido, por ano, pelas refinarias de petróleo definidas no tópico 3.2. | <b>Fórmula:</b> soma das emissões das 4 refinarias.                                                                                                                                     |
|                                      | Emissões Anuais CO <sub>2</sub> REGAP MG (Mton/ano) | Emissões anuais de CO <sub>2</sub> para esta refinaria.                                                 | 1.6Mton/ano.<br>Estimativa feita com base em dados de emissões das refinarias deste Estado (SEEG) e da produtividade desta refinaria em comparação com as outras do mesmo Estado (ANP). |
|                                      | Emissões Anuais CO <sub>2</sub> REPAR PR (Mton/ano) | Emissões anuais de CO <sub>2</sub> para esta refinaria.                                                 | 2Mton/ano.<br>Estimativa feita com base em dados de emissões das refinarias deste Estado (SEEG) e da produtividade desta refinaria em comparação com as outras do mesmo Estado (ANP).   |
|                                      | Emissões Anuais CO <sub>2</sub>                     | Emissões anuais de CO <sub>2</sub>                                                                      | 1.7Mton/ano.                                                                                                                                                                            |

|  |                                                                        |                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                      |
|--|------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <b>RPBC SP (Mton/ano)</b>                                              | para esta refinaria.                                                                                                                      | Estimativa feita com base em dados de emissões das refinarias deste Estado (SEEG) e da produtividade desta refinaria em comparação com as outras do mesmo Estado (ANP).              |
|  | <b>Emissões Anuais CO<sub>2</sub> REDUC RJ (Mton/ano)</b>              | Emissões anuais de CO <sub>2</sub> para esta refinaria.                                                                                   | 2.2Mton/ano. Estimativa feita com base em dados de emissões das refinarias deste Estado (SEEG) e da produtividade desta refinaria em comparação com as outras do mesmo Estado (ANP). |
|  | <b>Taxa de Captura de CO<sub>2</sub> por Refinaria com CAC (%)</b>     | Quantos % do CO <sub>2</sub> emitido pela refinaria os equipamentos de CAC são capazes de capturar.                                       | 90% (ROMANENKO, 2014)                                                                                                                                                                |
|  | <b>Taxa de Evasão do CO<sub>2</sub> na Captura (%)</b>                 | Considera-se uma taxa de evasão do CO <sub>2</sub> capturado.                                                                             | 5% (IPCC Fugitive Emissions, 2019)                                                                                                                                                   |
|  | <b>Taxa Efetiva de Captura de CO<sub>2</sub> (%)</b>                   | Quantos % do CO <sub>2</sub> emitido será efetivamente capturado com a instalação dos equipamentos de CAC, considerando a taxa de evasão. | <b>Fórmula:</b> [Taxa de Captura de CO <sub>2</sub> por Refinaria com CAC]*(1-[Taxa de Evasão do CO <sub>2</sub> na Captura])                                                        |
|  | <b>CO<sub>2</sub> Capturado Acumulado (ton CO<sub>2</sub>)</b>         | Volume de CO <sub>2</sub> efetivamente capturado ao longo de toda a simulação.                                                            | <b>Fórmula:</b> [Emissões Anuais CO <sub>2</sub> Totais]*[Decisor - construir CAC]*[Taxa Efetiva de Captura de CO <sub>2</sub> ]                                                     |
|  | <b>Referência para Captura de CO<sub>2</sub> (Mton CO<sub>2</sub>)</b> | Referência a partir da qual os custos com CAC começarão a cair, com base no efeito do aprendizado.                                        | 100 Mton CO <sub>2</sub> . (ROMANENKO, 2014)                                                                                                                                         |
|  | <b>Taxa de Captura CO<sub>2</sub></b>                                  | Quantos % da referência já                                                                                                                | <b>Fórmula:</b> [CO <sub>2</sub>                                                                                                                                                     |

|                                   |                                                                           |                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                         |
|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                   | (%)                                                                       | foram atingidos. Esta variável irá alimentar o efeito do aprendizado no bloco B.                                                                                                               | Capturado Acumulado]/[Referência para Captura de CO <sub>2</sub> ]                                                                                      |
|                                   | <b>Imposto Arrecadado para o Governo (USD)</b>                            | Valor, em dólares, efetivamente arrecadado pelo governo com a coleta dos impostos sobre as emissões de CO <sub>2</sub> , já considerando a redução pela captura de CO <sub>2</sub> .           | <b>Fórmula:</b> [Emissões Anuais CO <sub>2</sub> Totais]*(1-[Taxa Efetiva de Captura de CO <sub>2</sub> ])*[Imposto sobre Emissões de CO <sub>2</sub> ] |
| <b>B - Resultados Financeiros</b> | <b>Custo Total com CAC (USD / ton CO<sub>2</sub>)</b>                     | Custo total necessário para instalar e manter a operação de captura e armazenamento de carbono.                                                                                                | <b>Fórmula:</b> soma dos custos com transporte, captura e armazenamento de CO <sub>2</sub> .                                                            |
|                                   | <b>Custo com Transporte de CO<sub>2</sub> (USD/ton CO<sub>2</sub>)</b>    | Custo para transportar cada tonelada de CO <sub>2</sub> capturada.                                                                                                                             | 35 USD/ton CO <sub>2</sub> (GLOBAL CSS INSTITUTE, 2019)                                                                                                 |
|                                   | <b>Custo com Captura de CO<sub>2</sub> (USD/ton CO<sub>2</sub>)</b>       | Custo para capturar CO <sub>2</sub> , já considerando custos de instalação e de operação dos equipamentos. Como a referência é de 2015, o valor foi corrigido pela inflação do dólar até 2023. | Inicialmente 96 USD/ton CO <sub>2</sub> (ROCHEDO, 2015). O valor da referência foi corrigido pela inflação do dólar. Decai com o Efeito do Aprendizado. |
|                                   | <b>Custo com Armazenamento de CO<sub>2</sub> (USD/ton CO<sub>2</sub>)</b> | Custo para armazenar cada tonelada de CO <sub>2</sub> transportada.                                                                                                                            | Inicialmente 1 USD/ton CO <sub>2</sub> (GLOBAL CSS INSTITUTE, 2019). Decai com o Efeito do Aprendizado.                                                 |
|                                   | <b>Efeito do Aprendizado</b>                                              | Curva de aprendizado que reduzirá os custos com a captura e com o armazenamento de CO <sub>2</sub> conforme for atingida a referência de captura.                                              | O valor dos custos vai decaindo até no máximo 50% de redução (ROMANENKO, 2014)                                                                          |
|                                   | <b>Imposto sobre Emissões de CO<sub>2</sub> (USD/ton CO<sub>2</sub>)</b>  | Imposto cobrado pela política pública, baseado no volume de emissão de CO <sub>2</sub> .                                                                                                       | Variável que iremos trabalhar, testando diferentes valores e analisando os resultados.                                                                  |

|                                                                   |                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                       |
|-------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Incentivo - Redução dos Impostos</b>                           | Semelhante ao Efeito do Aprendizado, foi estabelecido para a política pública que os impostos também irão cair conforme o aumento do CO <sub>2</sub> capturado acumulado, como forma de incentivar a captura. | Pode cair para 90% do valor inicial se atingir 2x a referência (de 100Mton de CO <sub>2</sub> capturado acumulado), e no máximo para 80% se atingir 3x.               |
| <b>Economia Gerada com CAC Instalada (USD/ton CO<sub>2</sub>)</b> | Quantos dólares por tonelada de CO <sub>2</sub> seriam economizados caso os equipamentos de CAC fossem instalados nas refinarias.                                                                             | <b>Fórmula:</b> [Imposto sobre Emissões de CO <sub>2</sub> ]*([Taxa Efetiva de Captura de CO <sub>2</sub> ]) - [Custo Total com CAC]                                  |
| <b>Decisor - construir CAC (0 ou 1)</b>                           | Variável utilizada para decidir se compensa ou não instalar CAC. Isto porque, dependendo do valor do imposto, os custos da operação de CAC podem ser caros demais e não compensar financeiramente.            | <b>Fórmula:</b> se a economia gerada é positiva, então 1. Caso contrário, 0.                                                                                          |
| <b>Imposto a Ser Cobrado Acumulado (USD)</b>                      | Um estoque com a soma total de quanto o governo teria de cobrar às refinarias caso não instalassem equipamentos de CAC (ou seja, fossem taxados em 100% das emissões).                                        | <b>Fórmula:</b> [Emissões Anuais CO <sub>2</sub> Totais]*[Imposto sobre Emissões de CO <sub>2</sub> ]                                                                 |
| <b>Resultado Financeiro Acumulado (USD)</b>                       | Resultado financeiro total para as refinarias, de forma acumulada, somando quanto o total de imposto que elas deveriam pagar junto aos custos das operações de CAC.                                           | <b>Fórmula:</b> [Emissões Anuais CO <sub>2</sub> Totais]*([Imposto sobre Emissões de CO <sub>2</sub> ]-[Economia Gerada com CAC Instalada]*[Decisor - construir CAC]) |

Tabela 7 - Detalhamento das Variáveis do Modelo

## 5. RESULTADOS

O primeiro passo para a inicialização do modelo é a definição de um valor para o imposto a partir do qual a instalação de equipamentos de captura e armazenamento de carbono passe a fazer sentido. Ou seja, a economia gerada pela captura do CO<sub>2</sub>, dada pela redução nos pagamentos dos impostos, deve ser maior do que os custos para implementação e



manutenção das tecnologias de captura, transporte e armazenamento. Após diversos testes, foi constatado que o menor valor plausível para os impostos, que incentiva as refinarias a instalarem os equipamentos de CAC, seria de 155 dólares por tonelada de CO<sub>2</sub>. A tabela 8 demonstra o comportamento da economia gerada pela captura no início e no fim da simulação, para cada valor do imposto. A economia gerada cresce durante a simulação por conta do efeito do aprendizado, e o imposto decresce com base no incentivo à captura definido pela política, explicados no capítulo anterior.

| <b>Imposto inicial<br/>(USD / ton CO<sub>2</sub>)</b> | <b>Imposto final<br/>(USD / ton CO<sub>2</sub>)</b> | <b>Economia inicial<br/>com CAC<br/>(USD / ton CO<sub>2</sub>)</b> | <b>Economia final<br/>com CAC<br/>(USD / ton CO<sub>2</sub>)</b> |
|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| 155                                                   | 124                                                 | 2                                                                  | 22                                                               |
| 160                                                   | 128                                                 | 6                                                                  | 25                                                               |
| 170                                                   | 136                                                 | 14                                                                 | 33                                                               |
| 180                                                   | 144                                                 | 23                                                                 | 39                                                               |
| 190                                                   | 152                                                 | 37                                                                 | 46                                                               |
| 200                                                   | 160                                                 | 40                                                                 | 53                                                               |

Tabela 8 - Valor do Imposto e Economia Inicial e Final com CAC

Vale ressaltar que a curva da economia gerada pela operação de captura e armazenamento de carbono não é uma constante. Isso acontece porque, quando os custos envolvidos nesta operação começam a cair, o imposto também cai, visto que a política definiu um incentivo para a captura de CO<sub>2</sub>. Com isso, a curva da economia gerada se apresenta conforme a figura a seguir.

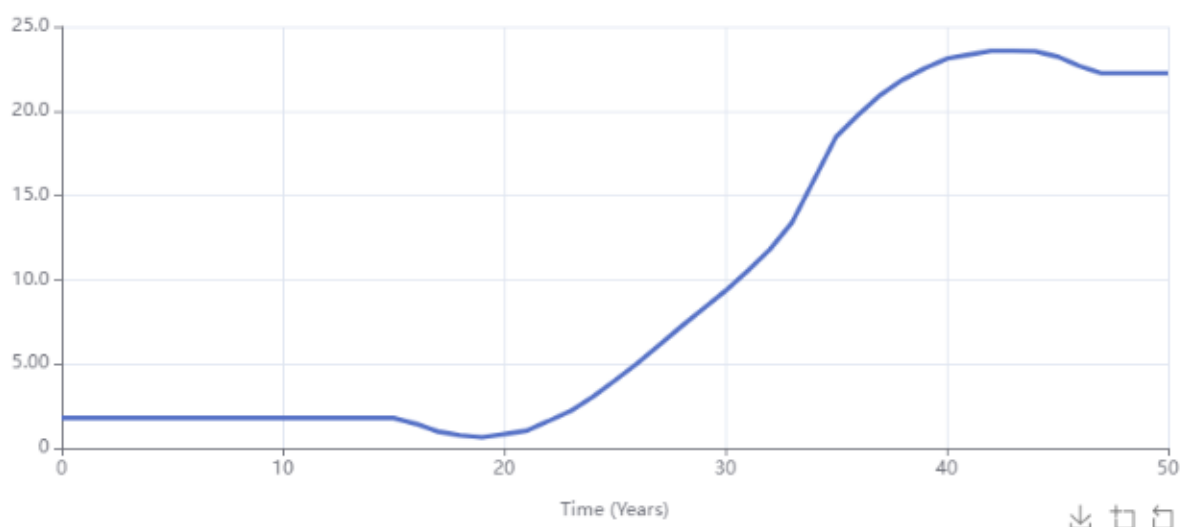


Figura 29 - Economia Gerada pela Captura e Armazenamento de Carbono (em dólares por tonelada de CO<sub>2</sub> emitida)

A figura 30 mostra o comportamento das curvas de imposto e custos com CAC para uma simulação com 155 dólares por tonelada de CO<sub>2</sub> de imposto inicial.

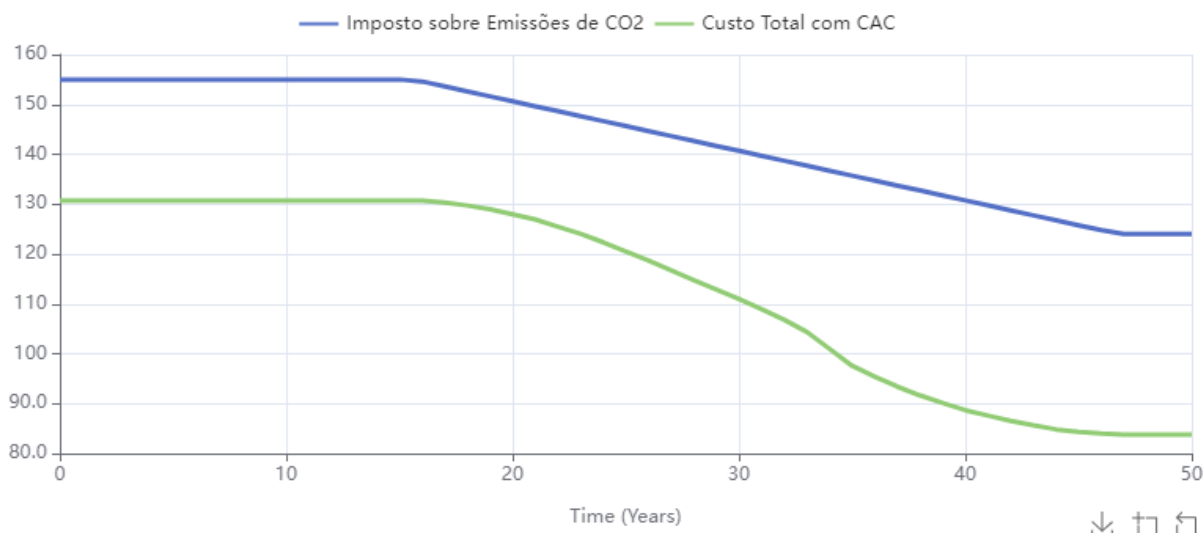


Figura 30 - Comportamento do Imposto e dos Custos com CAC (em dólares por tonelada de CO<sub>2</sub> emitida)

Dessa forma, é possível constatar que esse valor tão alto para o imposto pode ter fortes implicações econômicas, principalmente pensando na população em geral. A taxação de pelo menos 155 dólares por tonelada de CO<sub>2</sub> visa incentivar a redução de emissões, mas também leva a um aumento nos custos de produção. Isso pode ser repassado aos consumidores na forma de preços mais altos dos derivados do petróleo, como a gasolina, afetando a economia do país e o poder aquisitivo da população.

Além disso, a complexidade técnica da instalação de sistemas de CAC também é um desafio significativo. Isso inclui as limitações de espaço nas refinarias existentes, a necessidade de integração com processos atuais, e a demanda por tecnologia especializada. Nas refinarias, o gás natural seria, provavelmente, utilizado para alimentar a energia necessária para operar os equipamentos, o que reduziria a receita gerada pela venda deste gás. Outro ponto seria a energia necessária para injetar o CO<sub>2</sub> no processo de armazenamento, dado que não existe energia sendo retirada do poço onde o gás será injetado.

Quanto à captura efetiva de gás carbônico, nota-se que as 4 refinarias são responsáveis por aproximadamente 30% das emissões anuais do setor de refino de petróleo brasileiro, emitindo 7,5 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>, frente aos 25 milhões do setor. Nesse sentido, os resultados do modelo para o total de CO<sub>2</sub> capturado ao longo da simulação de 50 anos foram de 320 milhões de toneladas do gás, como mostra a figura 31.

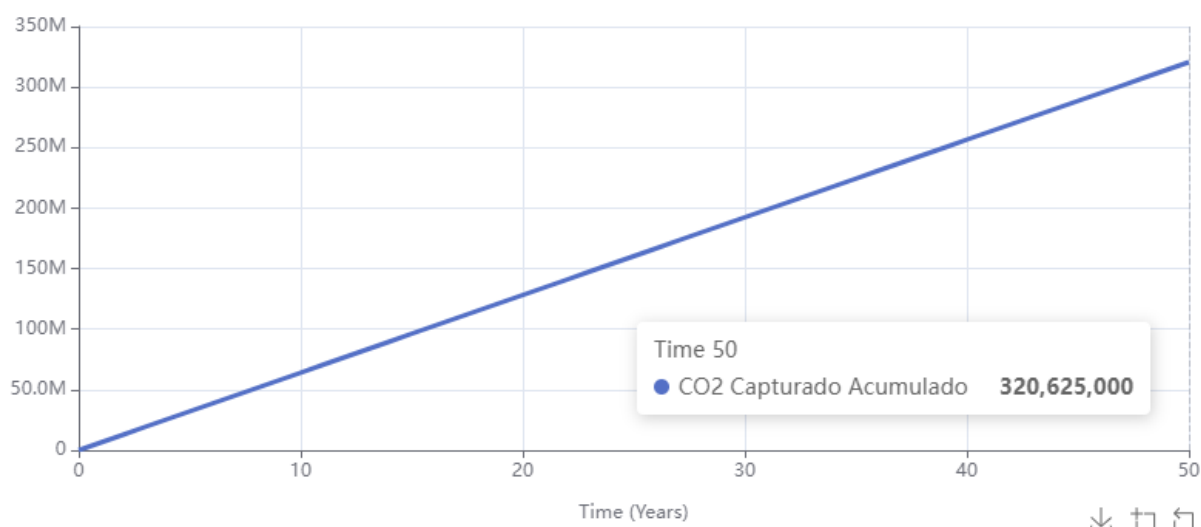


Figura 31 - CO<sub>2</sub> Capturado Acumulado na Simulação (toneladas de CO<sub>2</sub>)

Percebe-se que este valor não é significativo considerando o capital movimentado para esta captura. Conforme a figura 32, as 4 refinarias desembolsariam mais de 1 bilhão de dólares no primeiro ano, considerando pagamento de impostos e custos com a captura, transporte e armazenamento do carbono, numa simulação com imposto inicial de 155 dólares por tonelada de CO<sub>2</sub> emitido.

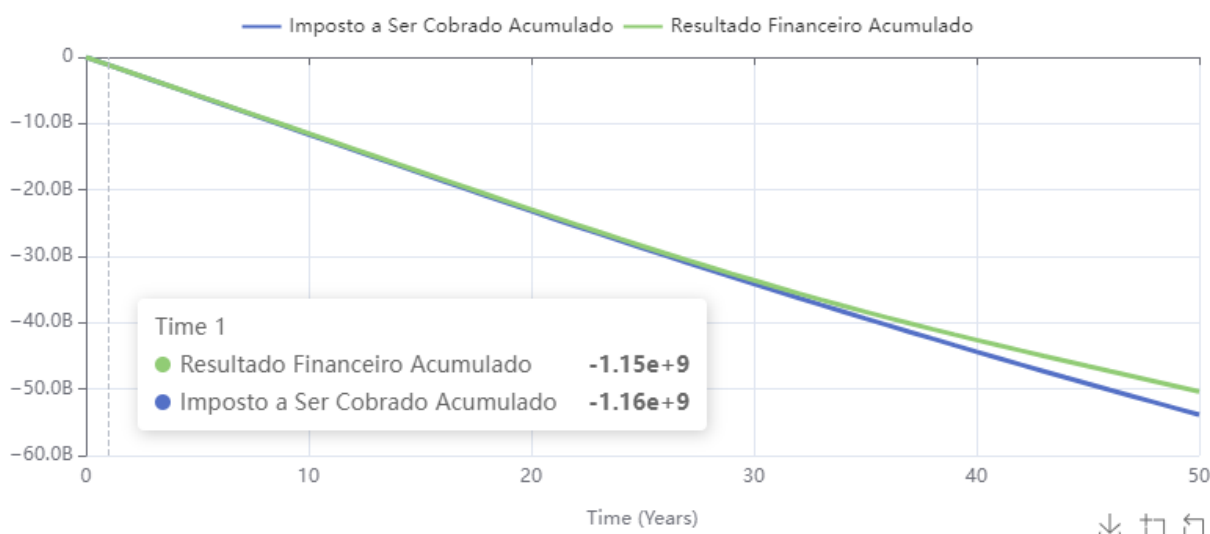


Figura 32 - Resultado Financeiro Acumulado e Imposto a Ser Cobrado Acumulado (em dólares)

Para se ter uma ideia do quanto inefetivo, em termos ambientais, se mostra essa operação, pode-se fazer um paralelo com o setor florestal. Este setor, em especial nos trópicos, apresenta o maior potencial de mitigação climática que poderia atingir as metas globais de redução de emissões, através da prevenção ao desmatamento, gestão florestal, reflorestamento e o aumento do tamanho da rotação da colheita. A figura 33 representa os custos por tonelada de CO<sub>2</sub> evitada, em dólares, para o setor florestal. Nota-se pelo gráfico que, quanto maior a quantidade de toneladas de CO<sub>2</sub> evitadas no ano, mais custoso ficam os

processos, além de que esse custo também irá aumentar com o passar do tempo (AUSTIN; BAKER; SOHNGEN et al., 2020).

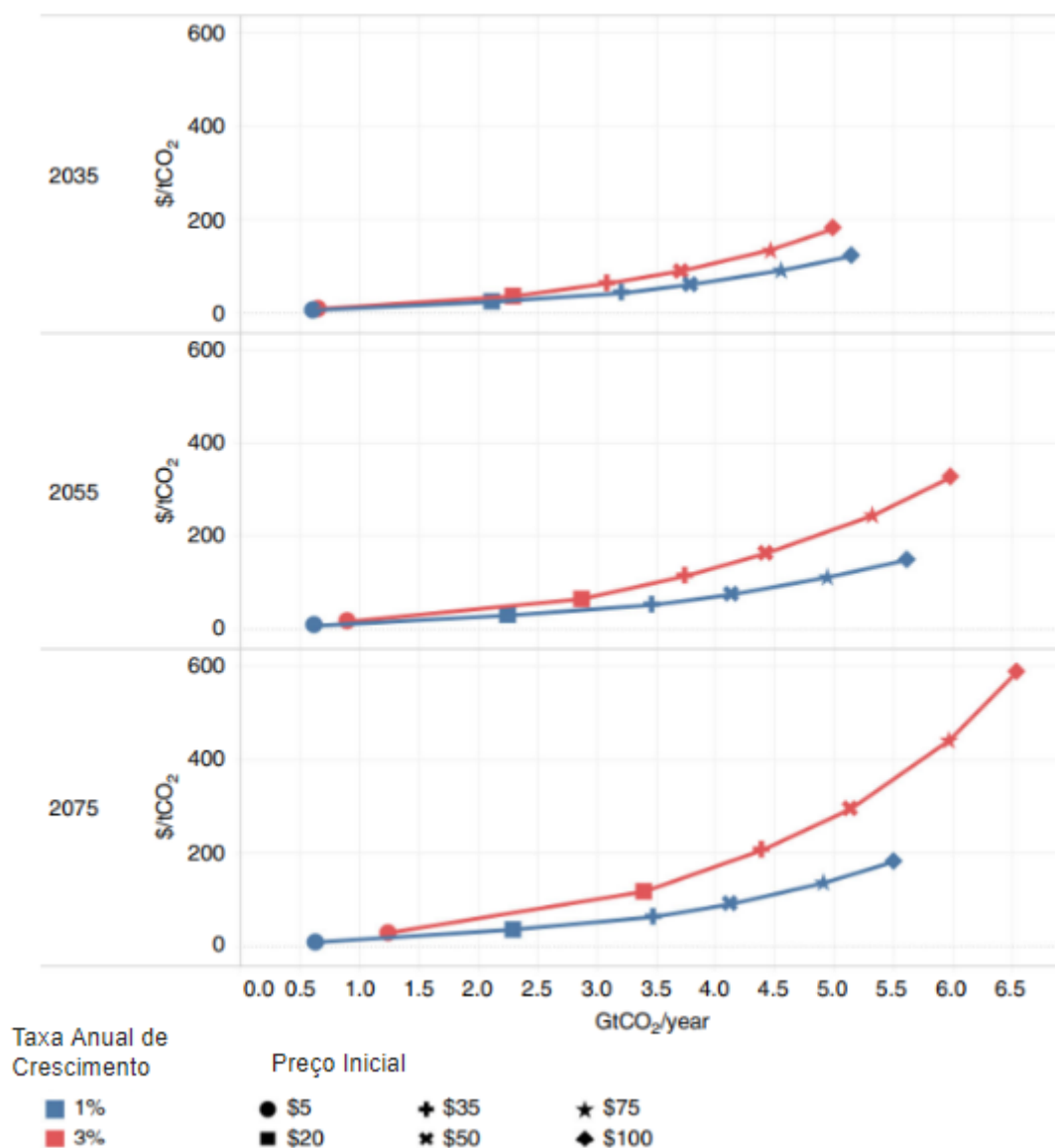


Figura 33 - Curvas de Custos Marginais de Redução de Emissões no Setor Florestal Global  
Fonte: adaptado de (AUSTIN; BAKER; SOHNGEN et al., 2020)

Para ilustrar o potencial de diferentes biomas, os gráficos a seguir representam estimativas para a mitigação das emissões até 2075 nos trópicos, nas regiões temperadas e nas boreais. Observa-se que, independentemente do cenário de crescimento, a maior contribuição para a mitigação vem da evitação do desmatamento. A gestão florestal também contribui significativamente, embora em menor medida em comparação com a evitação do desmatamento. O reflorestamento e as mudanças no comprimento da rotação têm as menores contribuições. Comparando os cenários de 1% e 3% de crescimento, percebe-se que a quantidade total de mitigação é maior no cenário de crescimento mais rápido, o que sugere que há uma correlação entre o crescimento econômico e a capacidade de mitigar as emissões de carbono através dessas práticas. Nos biomas tropicais, a evitação do desmatamento é

particularmente predominante, o que é consistente com o fato de que muitas das emissões de carbono atuais são devidas ao desmatamento em larga escala nessas regiões. Em contraste, nos biomas boreais, o manejo florestal representa uma parcela maior da mitigação total, o que pode refletir práticas de manejo florestal mais desenvolvidas nessas áreas.

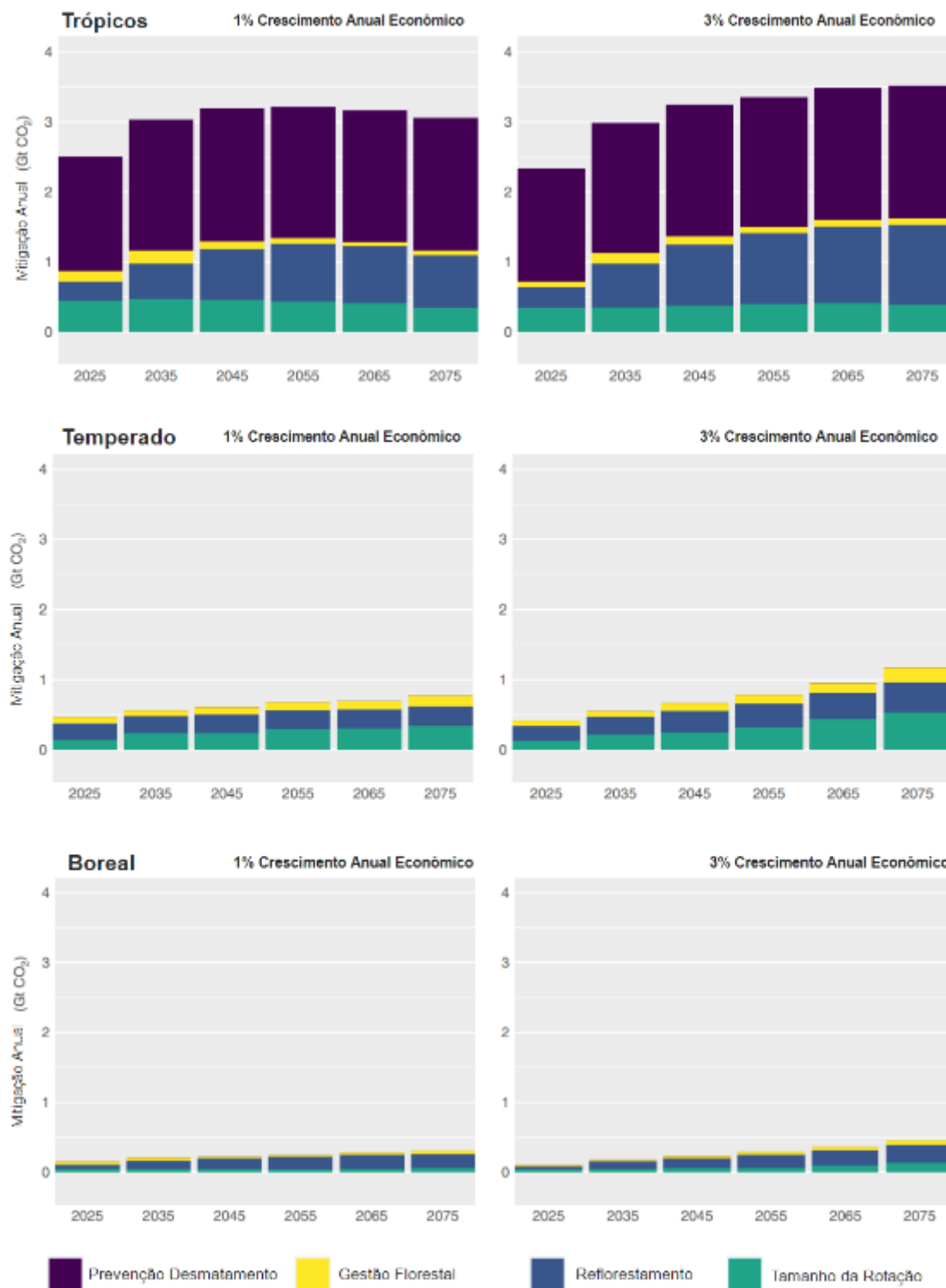


Figura 34 - Mitigação Anual Projetada por Bioma, por Atividade de Mitigação, Considerando Preço Inicial de USD 50/tCO<sub>2</sub>

Fonte: adaptado de (AUSTIN; BAKER; SOHNGEN et al., 2020)

Dessa forma, se os mais de 1 bilhão de dólares movimentados anualmente durante a simulação fossem direcionados para o setor florestal, seria possível evitar mais de 200 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> no cenário mais otimista (considerando 5 dólares por tonelada de CO<sub>2</sub> evitada), e mais de 10 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> no cenário mais conservador (considerando 100 dólares por tonelada de CO<sub>2</sub> evitada), muito acima dos resultados obtidos para a captura do CO<sub>2</sub> nas refinarias (AUSTIN; BAKER; SOHNGEN et al., 2020).

A implementação prática de projetos de captura e armazenamento de carbono enfrenta uma gama complexa de desafios que frequentemente resultam em cancelamentos, atrasos e suspensões. Economicamente, o preço do CO<sub>2</sub> é uma barreira fundamental. A falta de uma valoração de mercado eficaz e estável para o carbono capturado mina a viabilidade financeira dos projetos de CAC. Os custos iniciais de capital e operacionais são elevados, e sem um preço de CO<sub>2</sub> que reflita adequadamente o custo ambiental das emissões, esses projetos não conseguem competir com fontes de energia que têm custos externos menos internalizados. Além disso, os incentivos financeiros, essenciais para impulsionar o investimento inicial em tecnologias de CAC, são influenciados por uma miríade de outras barreiras. A incerteza política e econômica pode desencorajar o comprometimento de recursos a longo prazo, enquanto as flutuações nos mercados de energia podem alterar rapidamente a atratividade dos investimentos em CAC. Legalmente, os projetos de CAC são desafiados por regulamentos ainda em formação, questões de responsabilidade de longo prazo relacionadas ao armazenamento de CO<sub>2</sub> e a necessidade de estruturas claras para o comércio de créditos de carbono. Essas incertezas jurídicas adicionam riscos que muitos investidores acham proibitivos (SARA; STIKKELMAN; HERDER, 2015). Por conta desses fatores, nota-se que as instituições estão tentando mostrar que o desenvolvimento das tecnologias de CAC é maior do que a realidade com algumas falácias, como é o caso do Instituto Global de CAC na figura 8, que apresenta o cenário de CAC como em grande evolução ano a ano, quando na verdade se fala somente em projetos em construção ou desenvolvimento, e não projetos efetivamente concluídos, os quais ainda podem ser cancelados ou adiados, como acontece com frequência por conta das barreiras citadas.

Ademais, como demonstrado por Budinis et al., apesar da inclusão da captura e armazenamento de carbono em muitos modelos de mitigação climática, existem poucas plantas de CAC em grande escala operacionais atualmente, o que revela uma discrepância entre as expectativas e a realidade. As barreiras à adoção da CAC não são exclusivamente técnicas, mas o custo da CAC é o obstáculo mais significativo no curto a médio prazo. A longo prazo, a CAC é considerada muito custo-efetiva em comparação com outras opções de mitigação. As estimativas de custo variam amplamente, dependendo do tipo de processo, tecnologia de separação, técnica de transporte de CO<sub>2</sub> e local de armazenamento. O potencial da CAC foi quantificado comparando a quantidade de combustíveis fósseis que poderiam ser usados globalmente com e sem CAC. Em cenários que limitam o aquecimento global a menos de 2 °C, os cenários sem CAC resultam em 26% das reservas de combustíveis fósseis consumidas até 2050, contra 37% quando a CAC está disponível. Contudo, até 2100, os cenários sem CAC consomem apenas ligeiramente mais reservas de combustíveis fósseis (33%), enquanto os cenários com CAC disponíveis acabam consumindo 65% das reservas.

Também foi demonstrado que as emissões residuais das instalações de CAC são o fator limitante para a adoção a longo prazo, em vez do custo (BUDINIS et al., 2018).

Portanto, pode-se concluir que a captura e armazenamento de carbono é uma alternativa considerável para tornar mais sustentável a produção de combustíveis fósseis, visto que o mundo continuará a utilizar estes combustíveis por um bom tempo, dada a baixa velocidade de desenvolvimento das energias renováveis e nucleares. Porém, as tecnologias de CAC precisam de novas abordagens, a serem desenvolvidas pela indústria do petróleo e as escolas de engenharia, dado que os custos da implementação e manutenção dessas tecnologias, atualmente, se mostram inviáveis em vários cenários. Além disso, não só a indústria do petróleo como também as principais emissoras de gás carbônico, como a indústria do cimento e a produção de ferro gusa e aço, precisarão se unir em busca das melhorias no cenário da captura e armazenamento de carbono, de forma a garantir um futuro sustentável para o planeta (FAROUQ ALI, S.M.; Y. SOLIMAN, MOHAMED, 2023).

## 6. CONCLUSÃO

O trabalho apresentado explora a aplicação da dinâmica de sistemas na análise de políticas públicas, especificamente a aplicação de imposto sobre emissões de CO<sub>2</sub>, para a captura e armazenamento de carbono (CAC) no Brasil, focando particularmente no setor de refino de petróleo. Esta conclusão procura sintetizar as principais descobertas e oferecer uma perspectiva para futuras pesquisas.

Inicialmente, a introdução do estudo estabelece o tema de captura e armazenamento de carbono como uma alternativa para redução de emissões, especialmente no contexto brasileiro, onde o setor de refino de petróleo é um contribuinte significativo para as emissões estáticas de CO<sub>2</sub>. Além disso, o Brasil tem um compromisso com *Nationally Determined Contribution* (NDC) de alcançar emissões líquidas neutras até 2050. Este panorama contextual serve de base para uma revisão da literatura abrangente, que detalha os processos de captura, transporte e armazenamento de CO<sub>2</sub>. Além disso, o estudo também aborda a dinâmica de sistemas e suas diversas aplicações, estabelecendo o alicerce teórico para a metodologia adotada.

A metodologia utilizada no estudo envolveu a seleção cuidadosa do setor de refino de petróleo, com uma definição específica de refinarias e a formulação de uma política adaptada para o contexto brasileiro. Este enfoque metodológico proporcionou uma abordagem detalhada e estruturada para avaliar a viabilidade e o impacto das tecnologias de CAC.

A descrição do modelo desenvolvido é um dos pontos cruciais do trabalho. Ele fornece uma visão geral da estrutura do modelo, incluindo detalhes e as variáveis do sistema dinâmico. Este modelo serviu como uma ferramenta importante para simular diferentes cenários e avaliar os efeitos de várias políticas e estratégias de captura e armazenamento de carbono.

Através das simulações com o modelo construído, descobriu-se que um imposto de pelo menos 155 dólares por tonelada de CO<sub>2</sub> seria necessário para incentivar as refinarias a adotarem a CAC. Esta taxa, embora promova a redução das emissões, poderia aumentar os custos de produção e afetar a economia e o poder aquisitivo da população.

O modelo revelou que, apesar do potencial de mitigação de emissões, os custos envolvidos na operação de CAC não são constantes, variando devido ao efeito do aprendizado e incentivos fiscais. A complexidade técnica e as limitações de espaço nas refinarias, junto com a demanda por tecnologia especializada, apresentam desafios significativos. Observou-se que as quatro refinarias estudadas são responsáveis por cerca de 30% das emissões anuais do setor de refino de petróleo do Brasil, com uma projeção de captura de 320 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> ao longo de 50 anos. Contudo, este valor é considerado insignificante diante do investimento necessário para essa captura.

Comparando com o setor florestal, a operação de CAC mostrou-se ineficiente em termos ambientais. Investimentos similares no setor florestal poderiam evitar 10 milhões de toneladas de emissões de CO<sub>2</sub>, no cenário mais pessimista, e 200 milhões no mais otimista, enquanto que este mesmo investimento direcionado para operação de CAC se limitaria a 7,5 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> capturadas, num cenário bem otimista. Além disso, os desafios econômicos, técnicos e legais enfrentados pela implementação de projetos de CAC, como a falta de uma valoração de mercado estável para o carbono capturado e a incerteza política, minam a viabilidade financeira desses projetos.

Em conclusão, apesar de ser uma alternativa para tornar mais sustentável a produção de combustíveis fósseis, a captura e armazenamento de carbono enfrenta obstáculos significativos que limitam sua adoção prática a longo prazo, especialmente quando comparada a outras opções de mitigação.

Para futuras pesquisas, recomenda-se o foco no desenvolvimento de tecnologias de CAC mais econômicas, pois isso pode potencializar sua adoção em larga escala. Além disso, é fundamental a análise de diferentes políticas governamentais para entender melhor seu impacto na promoção da captura e armazenamento de carbono. Expandir a pesquisa para outros setores de alta emissão, como a indústria de cimento e siderurgia, poderia oferecer percepções adicionais sobre o potencial e a viabilidade das tecnologias de CAC. Também é crucial investigar os efeitos a longo prazo dessas tecnologias no meio ambiente, bem como explorar como elas podem ser integradas com o desenvolvimento de energias renováveis, contribuindo para uma transição energética mais sustentável.

Este estudo, portanto, não só contribui para o corpo de conhecimento existente sobre captura e armazenamento de carbono no Brasil, mas também abre caminho para investigações futuras que podem ajudar a moldar políticas ambientais e práticas industriais de forma mais sustentável e eficiente.

## 7. REFERÊNCIAS

CUÉLLAR-FRANCA, R. M.; AZAPAGIC, A. **Carbon capture, storage and utilisation technologies: A critical analysis and comparison of their life cycle environmental impacts.** *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, 2015.



BAENA-MORENO, F. M. et al. **Carbon capture and utilization technologies: a literature review and recent advances. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects**, 2019.

IPCC, Geneva, Switzerland: **Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**, 2007.

VILLELA, P. R. C. **INTRODUÇÃO À DINÂMICA DE SISTEMAS**. Juiz de Fora: [s.n.], 2011.

RIBEIRO, E.; SANTOS, D.; ALEGRE, P. **Guia para Iniciantes na Aplicação da Técnica de Dinâmica de Sistemas**, 2019.

JANIPOUR, Zahra et al. **Understanding contrasting narratives on carbon dioxide capture and storage for Dutch industry using system dynamics. International Journal of Greenhouse Gas Control**, [S. l.], p. 1-16, 28 fev. 2020.

STERMAN, J. D. **Business Dynamics-Systems Thinking and Modeling for a Complex World**. 1st. ed. Cambridge, Massachusetts: Jeffrey J. Shelstad, 2000. v. 1

ARAÚJO, O. DE Q. F.; DE MEDEIROS, J. L. **Carbon capture and storage technologies: present scenario and drivers of innovation. Current Opinion in Chemical Engineering**, 2017.

TERLOUW, T., TREYER, K., BAUER, C., & MAZZOTTI, M. Life Cycle Assessment of Direct Air Carbon Capture and Storage with Low-Carbon Energy Sources. **Environmental Science and Technology**, 2021.

POTENZA et al., **Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil (1970 - 2020)**, 2021.

AZEVEDO, R. L. M. DE; GOMIDE, J.; VIVIERS, M. C. GEO-HISTÓRIA DA BACIA DE CAMPOS, BRASIL: DO ALBIANO AO MAASTRICHTIANO. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 17, n. 2, 1987.

CIOTTA, M. et al. CO<sub>2</sub> storage potential of offshore oil and gas fields in Brazil. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 112, 2021.

DA SILVEIRA, C. S.; DE OLIVEIRA, L. Análise do mercado de carbono no Brasil: histórico e desenvolvimento. **Novos Cadernos NAEA**, v. 24, n. 3, 2021.

DAVAHLI, M. R.; KARWOWSKI, W.; TAIAR, R. **A system dynamics simulation applied to healthcare: A systematic review. International Journal of Environmental Research and Public Health**, 2020.

EGERER, S. et al. A leverage points analysis of a qualitative system dynamics model for climate change adaptation in agriculture. **Agricultural Systems**, v. 189, 2021.

YE, J. et al. Economic feasibility and policy incentive analysis of Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) in coal-fired power plants based on system dynamics. **Environmental Science and Pollution Research**, 2022.

**SBC Energy Institute's Factbook on Bringing CCS to Market.** [S. l.], 30 jan. 2013. Disponível em: <https://www.slideshare.net/globalccs/sbc-energy-institute-factbook-bringing-ccs-to-market-webinar-30-jan>. Acesso em: 11 abr. 2023.

FALLIS, A. G. Análise Do Refino No Brasil: Estado E Perspectivas - Uma Análise "Cross-Section". **Journal of Chemical Information and Modeling**, v. 53, n. 9, 2013.

GROESSER, S. N.; SCHAFFERNICHT, M. Mental models of dynamic systems: Taking stock and looking ahead. **System Dynamics Review**, v. 28, n. 1, 2012.

**Banco Nacional do Desenvolvimento (BNDES).** Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/desenvolvimento-sustentavel/resultados/emissoes-evitadas>. Acesso em: 18 mar. 2023.

OMOREGBE, O., MUSTAPHA, A. N., STEINBERGER-WILCKENS, R., EL-KHAROUF, A., & ONYEAKA, H. Carbon capture technologies for climate change mitigation: A bibliometric analysis of the scientific discourse during 1998–2018. **Energy Reports**, 6, 1200–1212, 2020.

SANTOS, G. C. DOS, AQUINO, T. F. DE, & WATZKO, E. S. CONFIGURAÇÃO INDICADA PARA UMA PLANTA DE CAPTURA DE CO<sub>2</sub> PARA UNIDADES TERMOELÉTRICAS. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, 9, 387, 2020.

ISSAKOWICZ, A. C. K. S.; TOLEDO, L. M.; AMBROSIO, L. A. Dinâmica do sistema de criação de bezerras no período de aleitamento: modelo conceitual. **Boletim de Indústria Animal**, v. 77, 2020.

**Sistema de Estimativa de Emissão de Gases (SEEG)**. Disponível em: <https://plataforma.seeg.eco.br/sectors/energia>. Acesso em: 07 abr. 2023.

JANOWCZYK, D. et al. Derates and Outages Analysis - A Diagnostic Tool for Performance Monitoring of SaskPower's Boundary Dam Unit 3 Carbon Capture Facility. **SSRN Electronic Journal**, 2021.

SARA, J., STIKKELMAN, R. M., & HERDER, P. M. Assessing relative importance and mutual influence of barriers for CCS deployment of the ROAD project using AHP and DEMATEL methods. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, 2015.

GLOBAL CCS INSTITUTE. **CCS Explained: The Basics**. Disponível em: <https://www.globalccsinstitute.com/resources/ccs-101-the-basics/>. Acesso em: 28 mar. 2023.

KARNOPP, D. C.; MARGOLIS, D. L.; ROSENBERG, R. C. **System Dynamics: Modeling, Simulation, and Control of Mechatronic Systems: Fifth Edition**. [s.l.: s.n.].

LEESON, D. et al. A Techno-economic analysis and systematic review of carbon capture and storage (CCS) applied to the iron and steel, cement, oil refining and pulp and paper industries, as well as other high purity sources. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 61, 2017.

LEVESON, N. G. A Brief Introduction to System Dynamics Modeling. Em: **Engineering a Safer World**. [s.l.] The MIT Press, 2018.

NANDA, S. et al. **The progressive routes for carbon capture and sequestration**. **Energy Science and Engineering**, 2016.

MACHADO, P. G.; HAWKES, A.; RIBEIRO, C. DE O. What is the future potential of CCS in Brazil? An expert elicitation study on the role of CCS in the country. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 112, 2021.

KOTAGODAHETTI, R. et al. Long-term feasibility of carbon capturing in community energy systems: A system dynamics-based evaluation. **Journal of Cleaner Production**, v. 377, 2022.

BUDINIS, S., KREVOR, S., DOWELL, N. M., BRANDON, N., & HAWKES, A. An assessment of CCS costs, barriers and potential. **Energy Strategy Reviews**, 2018.

S.M. FAROUQ ALI, MOHAMED Y. SOLIMAN. Limitations and Fallacies of Carbon Capture and Storage (CCS) and Impact on Oil and Gas Production. **Department of Petroleum Engineering, University of Houston**, Houston, TX, U.S.A, 2023.

SVENSSON, R., ODENBERGER, M., JOHNSON, F., & STROMBERG, L. Transportation systems for CO<sub>2</sub> - Application to carbon capture and storage. **Energy Conversion and Management**, 2004.

ROMANENKO. Carbon Capture Utilization and Storage Market Dynamics: Matching CO<sub>2</sub> Supply and Demand for Enhanced Oil Recovery. **University of Bergen**, 2014.

MAHATE, V. et al. Evaluating Biofuel Energy Policies for Sustainable Transportation Sector: A System Dynamics Approach. **International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences**, v. 8, n. 1, 2023.

ROCHEDO, P. R. R. et al. Carbon capture potential and costs in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 131, 2016.

ROCKETT, G. C. et al. CO<sub>2</sub> storage capacity of Campos Basin's oil fields, Brazil. *Energy Procedia*, 2013.

AUSTIN, K.G., BAKER, J.S., SOHNGEN, B.L. et al. **The economic costs of planting, preserving, and managing the world's forests to mitigate climate change**, 2020.

TCVETKOV, P.; CHEREPOVITSYN, A.; FEDOSEEV, S. **The changing role of CO<sub>2</sub> in the transition to a circular economy: Review of carbon sequestration projects. Sustainability (Switzerland)**, 2019.

VAN STRAELEN, J. et al. CO<sub>2</sub> capture for refineries, a practical approach. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 4, n. 2, 2010.

MAHAJAN, S.; LAHTINEN, M. Recent progress in metal-organic frameworks (MOFs) for CO<sub>2</sub> capture at different pressures. **Journal of Environmental Chemical Engineering**. [S.l.]: Elsevier Ltd., 2022.