

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO  
ESCOLA DE QUÍMICA

**Paula Castellani Troise**



COMPARAÇÃO DE TECNOLOGIAS PARA CAPTURA DE  
CO<sub>2</sub>: ABSORÇÃO POR AMINAS VERSUS ADSORÇÃO POR  
CARVÃO ATIVADO

RIO DE JANEIRO

2025

Paula Castellani Troise

COMPARAÇÃO DE TECNOLOGIAS PARA CAPTURA DE CO<sub>2</sub>: ABSORÇÃO POR  
AMINAS VERSUS ADSORÇÃO POR CARVÃO ATIVADO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Orientador(es): Chaline Detoni  
Robinson Luciano Manfro

Rio de Janeiro

2025

## CIP - CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO

T845c      Troise, Paula Castellani  
              Comparação de Tecnologias para Captura de CO<sub>2</sub>:  
Absorção por Aminas versus Adsorção por Carvão  
Ativado / Paula Castellani Troise. -- Rio de  
Janeiro, 2025.  
              92 f.

              Orientadora: Chaline Detoni.  
              Coorientador: Robinson Luciano Manfro.  
              Trabalho de conclusão de curso (graduação) -  
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de  
Química, Bacharel em Engenharia Química, 2025.

              1. Captura de Carbono. 2. Absorção por Aminas. 3.  
Adsorção por Carvão Ativado. I. Detoni, Chaline,  
orient. II. Manfro, Robinson Luciano, coorient.  
III. Título.

Paula Castellani Troise

COMPARAÇÃO DE TECNOLOGIAS PARA CAPTURA DE CO<sub>2</sub>: ABSORÇÃO POR  
AMINAS VERSUS ADSORÇÃO POR CARVÃO ATIVADO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Química da Universidade Federal do  
Rio de Janeiro, como parte dos requisitos  
necessários à obtenção do grau de Engenheiro  
Químico.

Aprovado em 14 de julho de 2025.

---

Prof. Chaline Detoni, D.Sc., UFRJ

---

Prof. Robinson Luciano Manfro, D.Sc., UFRJ

---

Aryane Azevedo Marciniak, D.Sc., UFRJ

---

Alana Leahy-Dios, D.Sc., Exxon Mobil

Rio de Janeiro  
2025

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer aos meus pais, Mônica e Djalma, pelo apoio incondicional que sempre me foi dado. Essa graduação não seria possível sem todo o investimento que fizeram em mim como aluna e como pessoa. Obrigada por me incentivarem a correr atrás dos meus sonhos e por me apoiarem nas minhas escolhas. Essa conquista é nossa.

Ao meu irmão, Bernardo, com quem pude dividir desde o banheiro de casa até a engenharia química, eu agradeço pelo companheirismo e por todo material que guardou para que, um dia, eu talvez usasse. À minha irmã, Luiza, que sempre foi um refúgio e meu lugar seguro no mundo, obrigada por escutar meus desabafos e ter tornado essa trajetória mais leve.

À minha família, que nunca me permitiu duvidar da minha capacidade de sucesso e me encheu de amor, vocês são muitos para serem nomeados, mas sou grata a cada um pelo carinho e apoio que nunca faltaram. Ao meu namorado, Gabriel Porto, por ser meu melhor amigo e acreditar em mim mais do que eu mesma. De todas as coisas que eu aprendi na faculdade, construir um relacionamento com você foi, sem sombra de dúvidas, a mais cativante.

Aos amigos que fiz ao longo da vida, agradeço e reconheço a importância de cada um na minha formação. Em especial, obrigada a Nathalia Lopes, Raphaela Picorelli, Paula Barroso e Ana Clara Villela, por estarem comigo desde pequena e terem acompanhado e celebrado cada conquista minha, fosse ela profissional ou pessoal. Agradeço também a Júlia Valério, João Marques, Lucas Portela e Leonardo Bayão, amigos que chegaram junto à UFRJ e fizeram com que minha graduação nunca fosse solitária, mas sempre com companhia para dividir os momentos bons e ruins.

Aos meus orientadores Chaline Detoni e Robinson Luciano Manfro, por terem sido guias e companheiros ao longo dessa trajetória. Obrigada pelos conselhos, pelas chamadas de atenção e por confiarem em mim.

À Escola de Química, por ter sido minha casa durante muitos anos e me ter formado como profissional de engenharia química. Tenho orgulho de ter aprendido com os professores que tive e total confiança em mim mesma como engenheira. Por fim, gostaria de agradecer à UFRJ por ter sido meu sonho de adolescente e, agora, me permitir cultivar novos sonhos como adulta.

*“Quando as pessoas dizem impossível, geralmente querem dizer improvável.”*

*Leigh Bardugo*

## RESUMO

TROISE, Paula. **Comparação de Tecnologias para Captura de CO<sub>2</sub>: Absorção por Aminas versus Adsorção por Carvão Ativado**. Rio de Janeiro, 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2025.

Com o aumento excessivo de emissões de gás carbônico ao longo do tempo, surgiu a necessidade de endereçar esse problema a fim de evitar a criação e o agravamento de uma série de consequências climáticas. Nesse contexto, diversas tecnologias de captura de carbono começaram a ser pesquisadas: métodos de pós-combustão, métodos de pré-combustão e métodos de oxi-combustão. Sob essa ótica, estabeleceu-se industrialmente o processo de absorção química por aminas, que é, atualmente, a tecnologia de separação de CO<sub>2</sub> mais utilizada e madura na indústria. Entretanto, por ainda apresentar algumas desvantagens, estudos foram feitos com processos de captura de carbono alternativos, entre eles a adsorção com carvão ativado. Apesar de esse método não ser utilizado comercialmente, ele apresenta vantagens que mostram seu potencial para tal. Esse trabalho compara essas duas tecnologias sob diversas óticas, como eficiência, aplicabilidade e impactos ambientais, e analisa os pontos positivos e negativos de cada uma nos mais diversos cenários industriais. Além disso, é abordado o contexto do século XXI no que tange aos principais países e fontes emissores de CO<sub>2</sub> e às unidades operacionais existentes atualmente. A partir disso, observa-se a tendência de quais tecnologias de CCUS são as mais utilizadas e quais são as mais adequadas para os setores industriais avaliados para que se alcance uma redução robusta nas emissões de gás carbônico.

Palavras-chave: captura de carbono; CCS; CCUS; absorção por aminas; adsorção por carvão ativado; eficiência de captura; impactos ambientais; larga escala.

## ABSTRACT

TROISE, Paula. **Comparação de Tecnologias para Captura de CO<sub>2</sub>: Absorção por Aminas versus Adsorção por Carvão Ativado**. Rio de Janeiro, 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2025.

With the excessive increase in carbon dioxide emissions over time, the need arose to address this issue in order to prevent the creation and aggravation of a series of climate-related consequences. In this context, various carbon capture technologies began to be researched: post-combustion methods, pre-combustion methods and oxy-combustion methods. From this perspective, the chemical absorption process using amines was industrially established and is currently the most widely used and mature CO<sub>2</sub> separation technology in the industry. However, since it still presents some disadvantages, studies have been conducted on alternative carbon capture processes, including activated carbon adsorption. Although this method is not yet used commercially, it has advantages that demonstrate its potential for such applications. This work compares these two technologies from various perspectives, such as efficiency, applicability and environmental impacts, and analyzes the strengths and weaknesses of each in different industrial scenarios. Furthermore, it addresses the context of the 21st century regarding the main CO<sub>2</sub>-emitting countries and sources, as well as the operational units currently in place. From this, it is possible to observe the trends in which CCUS technologies are most used and which are best suited for specific industrial sectors in order to achieve a reduction in carbon dioxide emissions.

Keywords: carbon capture; CCS; CCUS; amine absorption; activated carbon adsorption; capture efficiency; environmental impacts; large scale.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Emissões de CO<sub>2</sub> ao longo do tempo.

Figura 2 – Emissões de gases do efeito estufa de 2008 a 2012.

Figura 3 – Tecnologias de captura de carbono.

Figura 4 – Esquema dos métodos de captura de carbono pós-combustão.

Figura 5 – Fluxograma da extração do CO<sub>2</sub> por solventes à base de amina.

Figura 6 – Reações entre MEA, DEA e MDEA com CO<sub>2</sub>.

Figura 7 – Fluxograma do sistema de amônia resfriada.

Figura 8 – Fluxograma da extração do CO<sub>2</sub> por Selexol.

Figura 9 – Fluxograma da extração do CO<sub>2</sub> por Rectisol.

Figura 10 – Adsorventes usados para a captura de CO<sub>2</sub>.

Figura 11 – Esquema da técnica de separação de membranas.

Figura 12 – 10 Principais Países Emissores de CO<sub>2</sub> em 2023.

Figura 13 – Média de emissões anuais de CO<sub>2</sub> no século XXI.

Figura 14 – Emissões de CO<sub>2</sub> per capita em 2023.

Figura 15 – Emissões de CO<sub>2</sub> por setor da indústria.

Figura 16 – Emissões de CO<sub>2</sub> por fonte.

Figura 17 – Eficiência de captura de CO<sub>2</sub> para diferentes temperaturas de MEA.

Figura 18 – Eficiência de captura de CO<sub>2</sub> para uma solução de MEA em diferentes condições de pressão.

Figura 19 – Capacidade de adsorção de CO<sub>2</sub> do carvão ativado em diferentes condições de temperatura e pressão.

Figura 20 – Capacidade de adsorção de CO<sub>2</sub> de diferentes amostras de carvão ativado.

Figura 21 – Relação entre área específica e capacidade de adsorção de CO<sub>2</sub> do carvão ativado.

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 – Principais aminas utilizadas no método de captura de CO<sub>2</sub> através de absorção por aminas.
- Tabela 2 – Comparação entre os métodos de ativação física e química.
- Tabela 3 – 10 maiores emissores de CO<sub>2</sub> atualmente.
- Tabela 4 – Emissões de CO<sub>2</sub> por setor da indústria.
- Tabela 5 – Emissões de CO<sub>2</sub> por fonte.
- Tabela 6 – Condições de corrente dos principais emissores de CO<sub>2</sub>.
- Tabela 7 – Capacidade de adsorção de diferentes tipos de carvão ativado em diferentes temperaturas.
- Tabela 8 – Composição das amostras do estudo da Figura 20.
- Tabela 9 – Capacidade de adsorção de diferentes carvões ativados.
- Tabela 10 – TRL da absorção química por aminas e adsorção física.
- Tabela 11 – Custos de captura de carbono em diferentes setores da indústria.
- Tabela 12 – Custo de instalação de unidades de CCS em usinas de carvão.
- Tabela 13 – Custo de instalação de unidades de CCUS em refinarias de petróleo.
- Tabela 14 – Custo de instalação de unidades de CCS na indústria do cimento.
- Tabela 15 – Custo de instalação de unidades de CCS na indústria siderúrgica.
- Tabela 16 – Custo de instalação de unidades de CCUS no processamento de gás natural.
- Tabela 17 – Custo de instalação de uma unidade de CCS na produção de etanol.
- Tabela 18 – Custo de instalação de uma unidade de CCS na produção de H<sub>2</sub>.
- Tabela 29 – As 5 maiores unidades de CCS/CCUS em operação atualmente.
- Tabela 20 – Destinos do CO<sub>2</sub> capturado pelas plantas em operação atualmente.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

GFC	<i>Global Financial Crisis</i>
CCS	<i>Carbon Capture and Storage</i>
CCUS	<i>Carbon Capture, Utilization and Storage</i>
MEA	Monoetanolamina
DEA	Dietanolamina
MDEA	Metildietanolamina
PZ	Piperazina
AMP	2-amino-2-metilpropan-1-ol
PSA	<i>Pressure Swing Adsorption</i>
TSA	<i>Temperature Swing Adsorption</i>
ESA	<i>Electrical Swing Adsorption</i>
TRL	<i>Technology Readiness Value</i>
TPSA	<i>Temperature and Pressure Swing Adsorption</i>
MOF	<i>Metal organic framework</i>
RFG	<i>Refinery Fuel Gas</i>
S.I.	Sem informação
VPSA	<i>Vacum Pressure Swing Adsorption</i>
EOR	<i>Enhanced Oil Recovery</i>

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	13
1.2 OBJETIVO	14
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>15</b>
2.1 A PROBLEMÁTICA DO CO <sub>2</sub>	15
2.2 CAPTURA DE CO <sub>2</sub>	18
<b>2.2.1 Absorção Química</b>	<b>21</b>
2.2.1.1 Solventes à Base de Amina	21
2.2.1.2 Amônia	26
2.2.1.3 Hidróxido de Sódio	28
<b>2.2.2 Absorção Física</b>	<b>29</b>
2.2.2.1 Dimetil éter de polietilenoglicol (processo Selexol)	29
2.2.2.2 Metanol (processo Rectisol)	30
<b>2.2.3 Adsorção</b>	<b>32</b>
2.2.3.1 Carvão Ativado	34
2.2.3.2 Zeólitas	36
2.2.3.3 MOFs	37
2.2.3.4 Separação por Membranas	38
2.3 UTILIZAÇÃO DO CO <sub>2</sub>	39
2.4 MAIORES EMISSORES DE CO <sub>2</sub>	40
<b>3 METODOLOGIA</b>	<b>48</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>49</b>
4.1 ADEQUABILIDADE DOS MÉTODOS DE CAPTURA	51
<b>4.1.1 Usina de Carvão</b>	<b>52</b>
<b>4.1.2 Refinaria de Petróleo</b>	<b>52</b>
<b>4.1.3 Produção de Cimento</b>	<b>52</b>
<b>4.2.1.4 Produção de Ferro e Aço</b>	<b>53</b>
<b>4.2.1.5 Processamento de Gás Natural</b>	<b>53</b>
<b>4.2.1.6 Produção de Etanol</b>	<b>53</b>
<b>4.2.1.7 Produção de Hidrogênio</b>	<b>53</b>
4.2 EFICIÊNCIA DE CAPTURA	54
<b>4.2.1 Temperatura</b>	<b>54</b>

<b>4.2.2 Pressão</b>	<b>56</b>
<b>4.2.3 Outros Parâmetros</b>	<b>57</b>
<b>4.3 CUSTOS ASSOCIADOS</b>	<b>61</b>
<b>4.3.1 Usina de Carvão</b>	<b>63</b>
<b>4.3.2 Refinaria de Petróleo</b>	<b>64</b>
<b>4.3.3 Produção de Cimento</b>	<b>66</b>
<b>4.3.4 Produção de Ferro e Aço</b>	<b>68</b>
<b>4.3.5 Processamento de Gás Natural</b>	<b>70</b>
<b>4.3.6 Produção de Etanol</b>	<b>72</b>
<b>4.3.7 Produção de Hidrogênio</b>	<b>72</b>
<b>4.3.8 Transporte e Armazenamento</b>	<b>73</b>
<b>4.3.9 Análise dos Custos</b>	<b>74</b>
<b>4.4 ASPECTOS AMBIENTAIS</b>	<b>74</b>
<b>4.5 VIABILIDADE DE APLICAÇÃO EM DIFERENTES ESCALAS</b>	<b>76</b>
<b>4.2.5.1 Unidades de Captura de Carbono em Operação</b>	<b>77</b>
<b>5 CONCLUSÕES</b>	<b>80</b>
<b>6 REFERÊNCIAS</b>	<b>83</b>

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A Revolução Industrial, no final do século XVIII, marcou o início do desenvolvimento industrial, que foi energeticamente sustentado pelo uso de combustíveis fósseis, especialmente carvão e petróleo. Nesse sentido, atrelado à industrialização e à urbanização dos países ao longo dos anos, houve um aumento expressivo nas emissões de CO<sub>2</sub>, que são consequência direta da queima desses combustíveis (Andrew, 2020; Rothenberg, 2023). Nesse contexto, o excesso de gás carbônico na atmosfera gera uma série de impactos ambientais, como acidificação dos oceanos, aumento da temperatura média da Terra, derretimento de calotas polares, entre outros. Com o intuito de evitar e/ou amenizar essas consequências climáticas, os países se juntaram para criar acordos internacionais visando a diminuição das emissões de CO<sub>2</sub> (Olabi et al., 2022).

Nesse cenário, desenvolveram-se tecnologias de captura de carbono para aplicação industrial visando reduzir efetivamente as emissões de CO<sub>2</sub>. Nesse sentido, métodos de pré-combustão, pós-combustão e oxi-combustão para captura de carbono foram desenvolvidos e estudados com o objetivo de implementação industrial. Cada um desses métodos apresenta vantagens e desvantagens, mas, de maneira geral, as tecnologias de pós-combustão estão bem estabelecidas comercialmente, apesar de os métodos de pré-combustão serem os mais usuais na gaseificação de combustíveis fósseis para a produção de H<sub>2</sub> (Fu et al., 2022).

Dentre as tecnologias desenvolvidas e investigadas, a absorção por aminas destaca-se como a mais consolidada atualmente. Essa tecnologia se baseia na absorção química do CO<sub>2</sub> no solvente, sendo as aminas mais comumente utilizadas a monoetanolamina (MEA), a dietanolamina (DEA) e a metildietanolamina (MDEA). Dentre as razões que justificam a adoção em larga escala desse método estão a alta eficiência de captura de dióxido de carbono, alta seletividade para o CO<sub>2</sub>, o baixo custo do solvente e sua boa taxa de regeneração. Por outro lado, algumas desvantagens, como alta demanda energética para regeneração e a corrosividade, levaram a comunidade científica a continuar buscando outros meios de remoção/captura de CO<sub>2</sub> (Gouedard et al., 2012; Meng et al., 2022).

Uma das alternativas encontradas foi a adsorção física em carvão ativado. Essa tecnologia se baseia na interação de forças de Van der Waals entre o adsorbato, nesse caso o gás carbônico, e o adsorvente (carvão ativado). Apesar de ainda não ser utilizado em larga escala, a adsorção via carvão ativado apresenta algumas vantagens que tornam esse método atrativo. Entre elas estão a alta eficiência de captura, a alta taxa de regeneração e elevada

estabilidade. Por outro lado, desvantagens como maior custo, sensibilidade a impurezas e difícil reprodutibilidade são fatores que ainda dificultam sua aplicação em escala industrial (Fu et al., 2022).

Com isso, esse trabalho buscou uma comparação crítica entre duas abordagens de captura de CO<sub>2</sub>, sob diferentes óticas, a fim de se obter informações relevantes sobre a viabilidade de uso de cada tecnologia. Os parâmetros analisados foram: adequabilidade a cada processo; custos associados; impactos ambientais; viabilidade de aplicação em larga escala. Devido à diversidade de setores industriais, não é viável estabelecer uma única tecnologia como a ideal para todas as situações, sendo imprescindível uma análise comparativa mais detalhada entre esses dois métodos. Ainda assim, por serem influenciadas por diversos fatores, diferentes empresas podem atribuir pesos distintos a cada parâmetro. Dessa forma, enquanto uma empresa opta por priorizar a tecnologia com menor impacto ambiental, outra pode optar pela alternativa mais econômica. Assim, a comparação entre a absorção por aminas e a adsorção com carvão ativado precisa ser realizada caso a caso.

## 1.2 OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo estabelecer uma análise comparativa entre dois métodos de captura de CO<sub>2</sub>: a absorção química por aminas e a adsorção física por carvão ativado. Esse objetivo principal pode ser dividido nos seguintes objetivos específicos:

- Contextualizar o cenário das emissões globais de CO<sub>2</sub>, identificando os principais países emissores, setores industriais responsáveis pelas maiores emissões e tendências observadas no século XXI;
- Descrever os princípios fundamentais e mecanismos envolvidos na captura de CO<sub>2</sub> por absorção química com aminas, eficiência, limitações técnicas e desafios operacionais;
- Caracterizar a tecnologia de adsorção de CO<sub>2</sub> utilizando carvão ativado, detalhando as propriedades do adsorvente, vantagens, limitações e fatores que afetam sua eficiência;
- Comparar as tecnologias de absorção por aminas e adsorção por carvão ativado.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 A PROBLEMÁTICA DO CO<sub>2</sub>

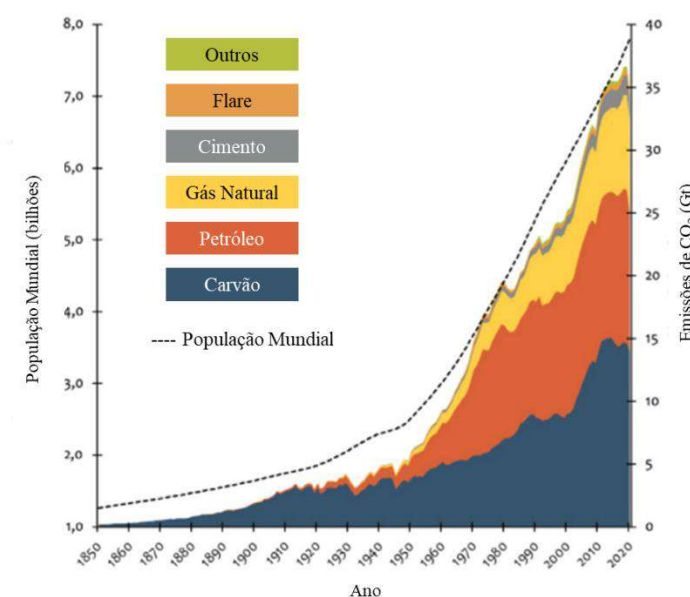
O dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) é um dos principais componentes gasosos presentes na atmosfera. Além de ser fundamental para o processo de fotossíntese das plantas, ele também contribui significativamente para o chamado “efeito estufa” (Marco Boscolo, 2023; Redação National Geographic Brasil, 2024). O efeito estufa consiste no fenômeno pelo qual a radiação solar que atinge o solo, ao retornar em direção à atmosfera, é parcialmente absorvida pelos gases nela presentes. Além do CO<sub>2</sub>, os outros principais gases que participam desse fenômeno por terem essa capacidade de absorção são o metano, os óxidos de nitrogênio e os fluorocarbonetos. Essa radiação retida é responsável por manter a temperatura do planeta mais elevada. (Manabe, 2019).

Entretanto, com o advento da Revolução Industrial no final do século XVIII, as emissões de CO<sub>2</sub> começaram a aumentar devido à queima de carvão, principal fonte de energia na época. Ao longo do século XIX, cientistas descobriram que o aumento de emissões de gás carbônico poderia levar à intensificação do aquecimento global. Foi também no século XIX que o petróleo, outro combustível fóssil, passou a ser utilizado como fonte de energia, sendo umas das principais fontes energéticas até os dias atuais (Andrew, 2020; Friedlingstein et al., 2023; Ge; Friedrich; Vigna, 2020; Peters et al., 2011; Redação National Geographic Brasil, 2024). O uso intensivo de combustíveis fósseis fez com que a concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera aumentasse muito com o passar dos anos, uma vez que, para produzir energia, esses combustíveis liberam gás carbônico (Ramos, 2019):



Ainda nesse sentido, o aumento populacional, associado ao aumento na qualidade de vida das populações, aumentou a demanda por energia. Essa demanda vem sendo quase que integralmente suprida por combustíveis fósseis, levando à impressionante emissão de 35 bilhões de toneladas de CO<sub>2</sub> em 2020, como apresentado na Figura 1.

**Figura 1 – Emissões de CO<sub>2</sub> ao longo do tempo.**



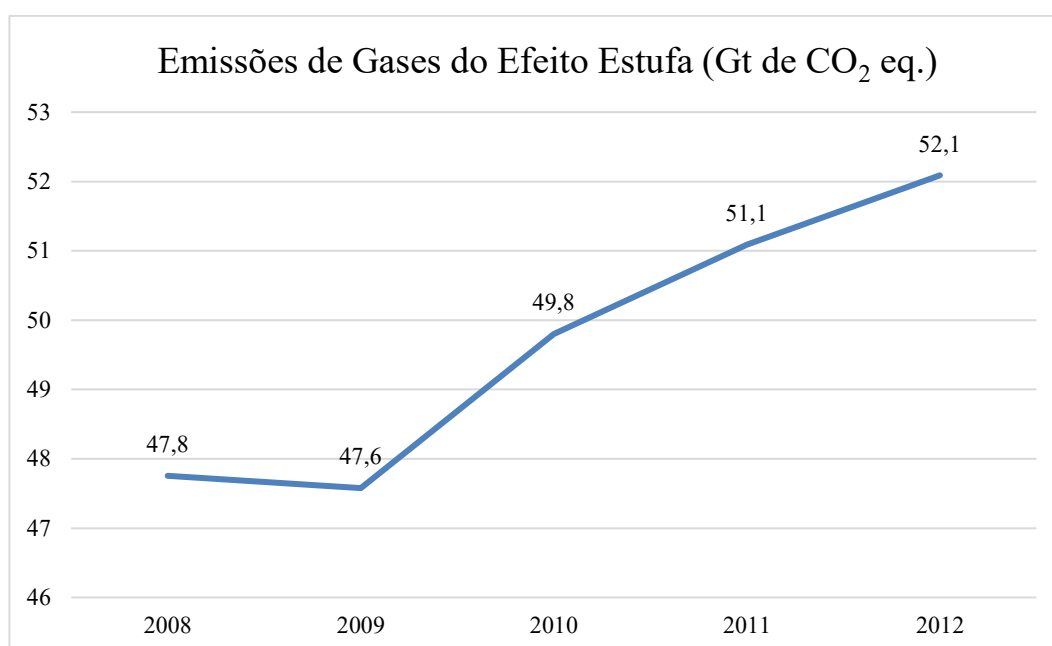
Fonte: Adaptado de ROTHENBERG, G. (2023).

Associada ao aumento excessivo de gás carbônico na atmosfera, está uma série de consequências climáticas: aquecimento global, que ocasiona o derretimento das calotas polares, aquecimento da água dos oceanos, ciclones e alagamentos, além da acidificação dos oceanos. Diante desse cenário, e preocupados com o futuro do meio-ambiente, diversos países uniram esforços ao longo dos anos para discutir a problemática das emissões de CO<sub>2</sub> (Fu et al., 2022; Olabi et al., 2022).

Nesse sentido, em 1997 foi assinado o Protocolo de Kyoto, ratificado em 2005, que contou com a assinatura de 192 países membros da ONU. Esse acordo estabeleceu metas de redução de CO<sub>2</sub>, entre outros poluentes provenientes da queima de combustíveis fósseis, que foram divididas em diferentes fases ao longo dos anos. As metas estabelecidas foram diferentes para cada país signatário, enquanto países em desenvolvimento não possuíam nenhuma meta específica, mas precisavam reportar suas emissões anuais. De forma geral, o Protocolo de Kyoto determinou um objetivo de redução total das emissões de gases do efeito estufa em 5,2% no período de 2008 a 2012. Essa redução poderia se dar de algumas maneiras: através da redução da emissão interna; investimento em projetos de redução de emissão em outros países; compra de créditos de carbono. Entretanto, com a falta de metas específicas para países emergentes, como China e Índia, e com a saída do acordo de países como os EUA e o Canadá, tem-se que o Protocolo de Kyoto não atingiu sua meta de redução de emissões de gases do efeito estufa (Figura 2) e outros acordos internacionais foram criados (Cary; Stephens, 2024; Deutsche

Welle, 2020; Lau; Lee; Mohamed, 2012). Na Figura 2, são apresentadas as emissões de gases do efeito estufa no período de 2008 a 2012. É possível observar uma queda nas emissões de 2008 a 2009, que se deve à crise econômica mundial (GFC, do inglês “*Global Financial Crisis*”) que ocorreu nesses anos, impactando tanto o número de emissões domésticas quanto o número de emissões relacionadas ao comércio internacional. Já de 2009 a 2012, as emissões de gases do efeito estufa voltam a crescer, seguindo a tendência de aumento na quantidade de emissões que caracterizava o início do século XXI (Peters et al., 2012).

**Figura 2 – Emissões de gases do efeito estufa de 2008 a 2012 em bilhões de tonelada.**



Fonte: Elaboração própria.

Outra política adotada internacionalmente foi o Acordo de Paris. Assinado em 2015 pela maioria dos países, esse acordo estabelece os seguintes objetivos: “manter o aumento da temperatura média mundial bem abaixo dos 2°C em relação aos níveis pré-industriais e em envidar esforços para limitar o aumento a 1,5°C”. Para isso, estima-se que as emissões de CO<sub>2</sub> devam ser reduzidas à metade até 2030 e que as emissões líquidas de gás carbônico sejam zero até 2050 (De Kleijne et al., 2022). Ao passo que, tecnicamente falando, seria possível atingir essas metas, uma análise da indústria pesada mostra que esse cenário é duvidoso, por demandar muita energia e ser altamente sensível ao custo, entre outros fatores. Logo, é improvável que as empresas realizem grandes investimentos em tecnologias de descarbonização sem a garantia de um bom retorno financeiro.

Além disso, as emissões de CO<sub>2</sub>, por estarem atreladas à geração de energia, impactam diretamente na qualidade de vida da população como um todo. Setores de transporte, construção, energia elétrica, medicina, alimentação, entre outros, ainda dependem muito da indústria que utiliza fontes fósseis como matriz energética para suprir a demanda populacional. Não apenas isso, o número de pessoas na Terra aumenta a cada ano e, conseqüentemente, a demanda por energia também (Bataille et al., 2018; Rothenberg, 2023).

Assim, é possível compreender as dificuldades e nuances envolvendo as emissões globais de gás carbônico, englobando seus impactos para a população e para o meio ambiente.

## 2.2 CAPTURA DE CO<sub>2</sub>

A captura de CO<sub>2</sub> trata do conjunto de métodos que têm como objetivo a retirada do gás carbônico de diversas misturas gasosas. Essa retirada pode ser feita de forma física ou via rotas químicas. O sequestro de CO<sub>2</sub> envolve também seu armazenamento a longo prazo em diferentes tipos de reservatórios, incluindo formações geológicas, oceanos, aquíferos e florestas ou sua utilização (Fu et al., 2022).

Por se tratar de um tema que tem recebido cada vez mais atenção, dois tipos de tecnologia vêm sendo desenvolvidas: a Captura e Armazenamento de Carbono, também chamada de CCS (do inglês “*Carbon Capture and Storage*”), e a Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono, conhecida como CCUS (do inglês “*Carbon Capture, Utilization and Storage*”). O processo da CCS consiste no isolamento do CO<sub>2</sub> de sua fonte emissora, seguido de seu transporte e armazenamento, de modo que ele não retorne à atmosfera. Entre as principais vantagens dessa tecnologia está sua capacidade de remover grandes quantidades de gás carbônico das emissões e da atmosfera. Entretanto, os principais desafios envolvendo a CCS estão ligados ao seu alto custo e ao risco de escape desse CO<sub>2</sub> quando armazenado (Fu et al., 2022).

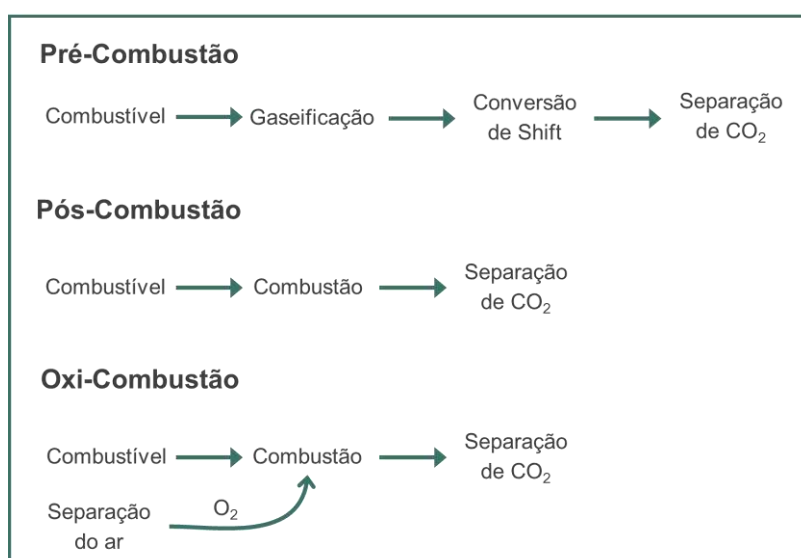
Nesse contexto, pesquisadores passaram a investir mais em tecnologias de CCUS que, por englobar a utilização do gás carbônico em sua cadeia produtiva, fazem com que os riscos de vazamento do gás à atmosfera sejam consideravelmente menores. Além disso, com o uso e conversão do dióxido de carbono capturado, tem-se um processo de reciclagem do gás, de modo a gerar benefícios econômicos além dos ambientais.

Diferentes processos de captura de CO<sub>2</sub> são utilizados na indústria e muitos ainda estão sendo estudados e desenvolvidos para futura implementação em larga escala. Dentre esses

métodos, o mais bem estabelecido é a absorção por monoetanolamina (MEA), seguido pela adsorção física usando adsorventes sólidos, separação criogênica em baixas temperaturas e a separação por membranas (Fu et al., 2022; Olabi et al., 2022).

De forma geral, os métodos de captura de gás carbônico podem ser divididos em 3 grandes categorias: captura de pré-combustão, captura de pós-combustão e tecnologia de combustão oxi-combustível. As diferentes tecnologias de captura de carbono, apresentadas na Figura 3, são brevemente descritas a seguir.

**Figura 3 – Tecnologias de captura de carbono.**



Fonte: Elaboração própria.

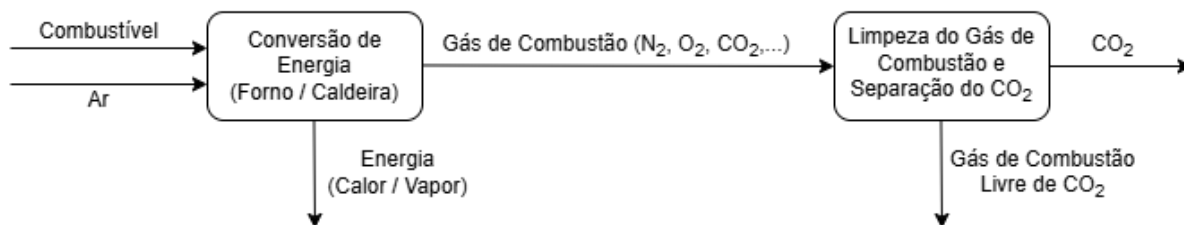
Tecnologias de pós-combustão: o CO<sub>2</sub> é separado dos gases de combustão após a combustão. Combustíveis fósseis como carvão, petróleo, gás natural, etc., são queimados na presença de ar. Portanto, os gases de combustão são ricos em N<sub>2</sub> e a porcentagem de CO<sub>2</sub> normalmente varia entre 3 e 15%. Como a pressão parcial de CO<sub>2</sub> nos gases de combustão é bastante baixa, é necessária a captura e separação dos gases, tornando as tecnologias de pós-combustão intensivas em termos de energia e custos (Allangawi et al., 2023).

Tecnologias de pré-combustão: envolvem a remoção de CO<sub>2</sub> por meio do tratamento a montante dos combustíveis fósseis antes da combustão. A principal diferença entre pré-combustão e pós-combustão é que a primeira é favorecida nos casos em que o fluxo de gás tem uma pressão parcial de CO<sub>2</sub> maior, como na gaseificação de combustíveis fósseis para produção de H<sub>2</sub> a partir de gás natural (Mukherjee et al., 2019).

Tecnologias de oxi-combustão: embora as tecnologias de captura de carbono pós e pré-combustão estejam comercialmente estabelecidas, as tecnologias de oxi-combustão ainda estão em fase de desenvolvimento. A oxi-combustão representa uma nova abordagem emergente para emissões quase zero. Ela é realizada pela queima do combustível em oxigênio puro ( $O_2$ ) em vez de ar. O fluxo de gases de combustão seria composto principalmente de água e  $CO_2$  (Fu et al., 2022; Olabi et al., 2022).

Os processos de captura de carbono pré-combustão, embora bem desenvolvidos, são menos utilizados. Já o processo oxi-combustível ainda está em fase de desenvolvimento. Com isso, o investimento e o número de pesquisas dedicadas a esses métodos são menos extensos, principalmente quando comparados aos métodos de pós-combustão que, por sua vez, são mais maduros e firmemente estabelecidos. A Figura 4 mostra um esquema das tecnologias de pós-combustão.

**Figura 4 – Esquema dos métodos de captura de carbono pós-combustão.**



Fonte: Adaptado de OLABI et al. (2022).

Uma das principais vantagens dos métodos de captura de carbono pós-combustão é a facilidade de instalação quando comparada aos demais métodos. Por ser inserida após a combustão, essa tecnologia apresenta menor custo que as demais, que requerem alterações profundas nas plantas industriais, sendo um processo consequentemente mais caro. Outra vantagem é que os processos de pós-combustão têm, em geral, boa seletividade para o  $CO_2$  e alta eficiência. Entretanto, uma desvantagem desse método é a baixa concentração de gás carbônico no gás de combustão, que faz com que sejam necessários equipamentos grandes e resistentes a altas temperaturas, além de um alto consumo de energia a fim de se obter uma boa eficiência de separação do  $CO_2$ . Esses desafios acarretam um aumento no custo de

implementação dos processos de pós-combustão (Fu et al., 2022; Mondal; Balsora; Varshney, 2012; Olabi et al., 2022).

Desse modo, dois diferentes métodos de captura de CO<sub>2</sub> pós-combustão serão explorados nesse trabalho: a absorção química e a adsorção física. O processo de captura por absorção-dessorção baseado em aminas é considerado a tecnologia mais madura e econômica devido ao seu amplo uso em aplicações industriais relacionadas, como a remoção de gases ácidos do gás natural.

### **2.2.1 Absorção Química**

A absorção química é um dos processos mais bem estabelecidos industrialmente para remoção de CO<sub>2</sub> de correntes gasosas, e consiste no uso de solventes, geralmente bases fracas, para que reajam com o CO<sub>2</sub>, de modo a formar outros compostos. Estes, por sua vez, são submetidos a uma série de condições que visam à quebra da ligação solução-CO<sub>2</sub>, regenerando os solventes utilizados e recuperando o CO<sub>2</sub> (Fu et al., 2022).

#### **2.2.1.1 Solventes à base de amina**

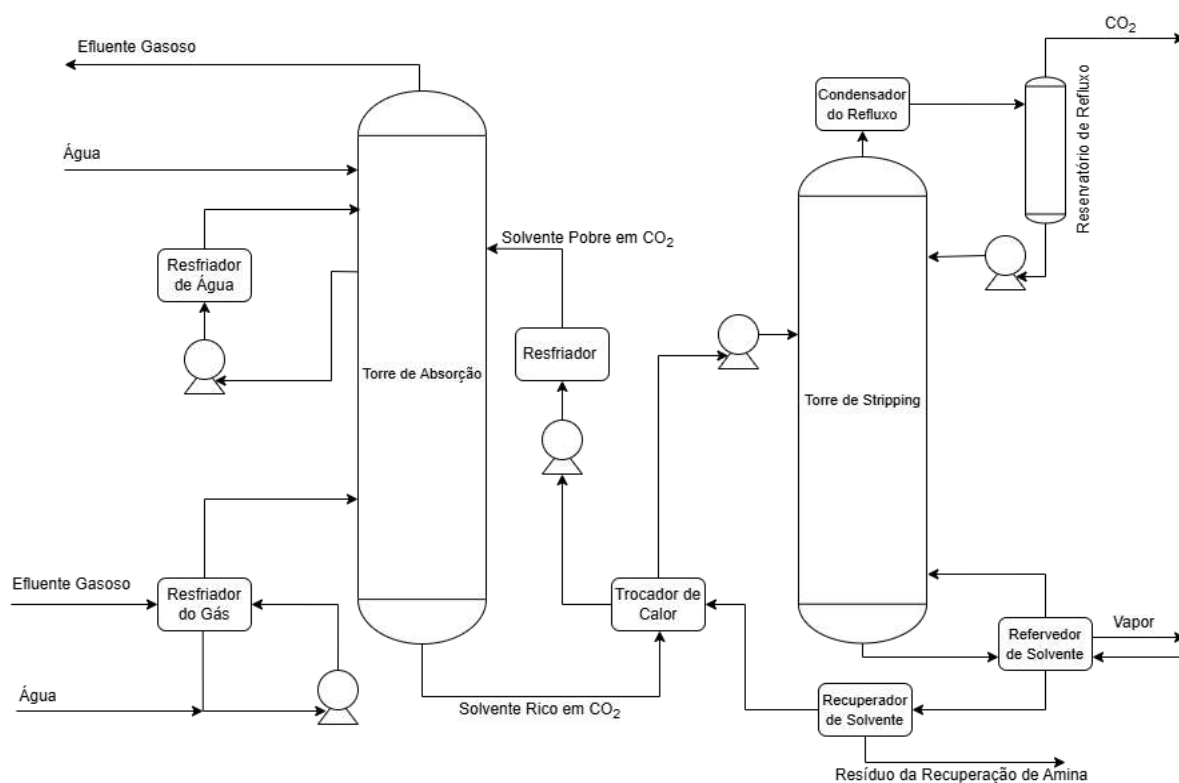
Um dos métodos mais utilizados pela indústria é o de absorção química via solventes à base de amina, sendo as aminas mais comumente utilizadas a monoetanolamina (MEA), a dietanolamina (DEA) e a metildietanolamina (MDEA) devido ao seu custo benefício. O processo de absorção em si é bem similar para esses 3 solventes e suas principais diferenças são a eficiência e a seletividade (Orozco-Agamez et al., 2022).

De modo geral, a técnica de separação de CO<sub>2</sub> através da absorção por aminas tem início com o resfriamento do gás a ser tratado até 40-60°C (um efluente gasoso industrial, por exemplo). Esse resfriamento pode ser realizado em contato direto com água que, além de trocar calor com o gás, ajuda na remoção de partículas finas que, porventura, estejam presentes na corrente gasosa. Em seguida, essa corrente gasosa rica em CO<sub>2</sub> é direcionada a uma torre de absorção, que também recebe uma corrente contendo água e uma corrente contendo a solução de amina. Nela, ocorre a reação entre a solução de amina e o gás contendo CO<sub>2</sub>, que é então lavado com água e sai pelo topo da torre, podendo ser liberado na atmosfera ou seguir para outro tratamento ou processo. A lavagem com água é feita para reduzir o arraste de gotículas de solvente e de vapor do gás liberado no topo da coluna. No fundo da torre de absorção, a

corrente de saída é a solução de amina rica em  $\text{CO}_2$  absorvido, que é então encaminhada a um trocador de calor. Esta solução rica é aquecida até 100-140°C e segue para a torre de *stripping*, também chamada de torre de arraste.

Nessa torre de *stripping*, o solvente à base de amina é recuperado no fundo e segue ou para reciclo, sendo usado na torre de absorção, ou para tratamento de efluentes. Já o gás que sai no topo da torre junto com o vapor é, então, separado deste por um condensador, podendo ser liberado na atmosfera ou ser reaproveitado na indústria (Rackley, 2017). A Figura 5 mostra um esquema da separação de  $\text{CO}_2$  por solventes à base de amina.

**Figura 5 - Fluxograma da extração do  $\text{CO}_2$  por solventes à base de amina.**



Fonte: Adaptado de Stephen Rackley (2017).

Como apresentado anteriormente, para a quebra da ligação amina- $\text{CO}_2$ , é necessário calor. Logo, além do trocador de calor, é usado também um refeedor (Rackley, 2017). Isso faz com que o consumo energético desse método seja muito grande, sendo responsável por

cerca de 70-80% de toda energia gasta no processo. Dessa forma, até hoje alternativas são estudadas para reduzir esse consumo, que é considerado como a maior desvantagem desse método. Dentre as alternativas encontradas, descobriu-se que a adição de solventes orgânicos, como etanol, ao solvente à base de aminas e a mistura de diferentes aminas ajudam na redução do consumo energético e na diminuição da temperatura de dessorção (Fu et al., 2022; Meng et al., 2022).

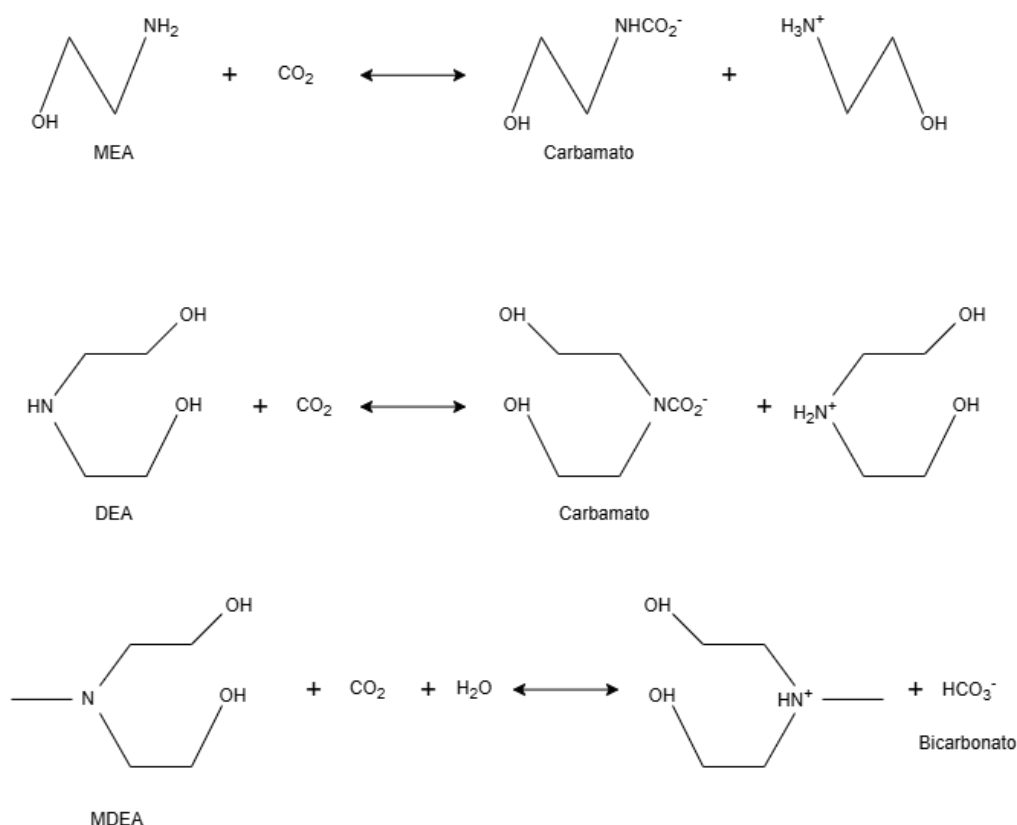
Outro obstáculo da captura de carbono através do uso de aminas é a degradação das aminas. Essa degradação pode ser dividida em duas categorias: térmica e oxidativa. A degradação térmica se dá majoritariamente na torre de *stripping* e acontece devido à alta temperatura do equipamento e à alta pressão parcial de CO<sub>2</sub>. Já a degradação oxidativa ocorre quando há grandes quantidades de O<sub>2</sub>, condições essas que costumam se dar na torre de absorção, que recebe o efluente gasoso (muitas vezes sendo gás de combustão). O problema desses dois tipos de degradação está na formação de uma série de compostos indesejados que podem prejudicar o processo por diversos motivos, incluindo formação de substâncias voláteis e potencialmente cancerígenas, formação de substâncias prejudiciais ao meio ambiente, formação de espuma, corrosão e incrustações, além de perda de solvente. A dissolução e a reação do CO<sub>2</sub> com a solução de amina tornam a solução corrosiva. Esse fenômeno é indesejado, já que causa problemas de corrosão na coluna de absorção, normalmente construída em aço carbono (Gouedard et al., 2012; Meng et al., 2022; Ooi et al., 2020).

Por outro lado, tem-se que a captura de CO<sub>2</sub> por absorção por aminas é um método muito bem estabelecido na indústria e que também apresenta muitas vantagens. Entre elas estão a alta taxa e habilidade de absorção, alta seletividade ao CO<sub>2</sub>, boa eficiência e capacidade de regeneração e reciclo (Gouedard et al., 2012; Meng et al., 2022).

Nesse contexto, diversas aminas podem ser usadas na separação do gás carbônico, sendo MEA, DEA e MDEA as mais frequentemente utilizadas. Na Figura 6 são apresentadas as reações entre as aminas e o CO<sub>2</sub>. Em se tratando das diferenças entre elas, a reatividade e a seletividade são os principais pontos de diferenciação. Tanto a MEA quanto a DEA são muito reativas com o CO<sub>2</sub> e, conseqüentemente, possuem um baixo tempo de reação. Porém, a eventual formação de produtos corrosivos e carbamatos estáveis é uma das desvantagens do uso desses dois reagentes. Já a MDEA, apesar de ser mais cara, não apresenta esse problema, uma vez que não forma carbamatos, porém demanda um maior tempo de reação. Assim, tem-se que a melhor solução de amina a ser utilizada depende da corrente da qual o gás será extraído

e das prioridades (sejam elas financeiras ou ambientais, por exemplo) de quem está realizando a remoção (Du et al., 2024).

**Figura 6 – Reações entre MEA, DEA e MDEA com CO<sub>2</sub>.**



Fonte: Adaptado de Stephen Rackley (2017) e PIRES DA MATA COSTA et al. (2021).

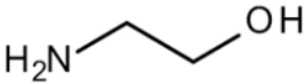
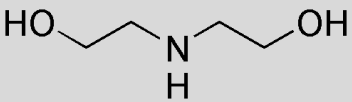
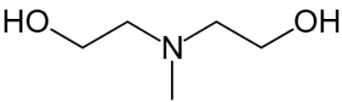
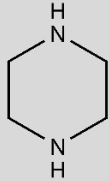
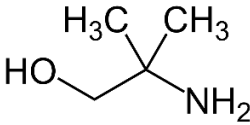
Além de MEA, DEA e MDEA, que são as principais aminas usadas no processo industrial de captura de carbono, a piperazina (PZ) e a 2-amino-2-metilpropan-1-ol (AMP) também são comuns. A PZ especificamente não costuma ser utilizada sozinha, já que atua como uma promotora para aumentar a taxa de absorção do CO<sub>2</sub> (Du et al., 2024; Gouedard et al., 2012). Na Tabela 1 são apresentadas as principais aminas utilizadas para captura de CO<sub>2</sub>.

Nesse sentido, e visando superar as limitações das soluções de aminas monocomponente na captura de CO<sub>2</sub>, soluções mistas de aminas vêm sendo testadas, combinando aminas primárias/secundárias com aminas terciárias ou estericamente impedidas. Essa abordagem

busca unir a alta capacidade de absorção das aminas primárias/secundárias à eficiência regenerativa das aminas terciárias ou impedidas, melhorando assim o desempenho global do sistema. O objetivo é desenvolver absorventes mais eficazes, com maior capacidade de captura e menor consumo energético na regeneração, além de melhorar o desempenho de captura de CO<sub>2</sub> (Meng et al., 2022).

Assim, é possível compreender que, apesar de ser um método bem estabelecido na indústria, a captura de carbono por meio da absorção por aminas ainda apresenta diversos desafios a serem resolvidos e, por isso, continua sendo objeto de estudo de pesquisadores que buscam aprimorar cada vez mais o processo.

**Tabela 1 – Principais aminas utilizadas no método de captura de CO<sub>2</sub> através de absorção por aminas.**

Amina	Abreviatura	Estrutura
Monoetanolamina	MEA	
Dietanolamina	DEA	
Metildietanolamina	MDEA	
Piperazina	PZ	
2-amino-2-metilpropan-1-ol	AMP	

Fonte: Elaboração própria.

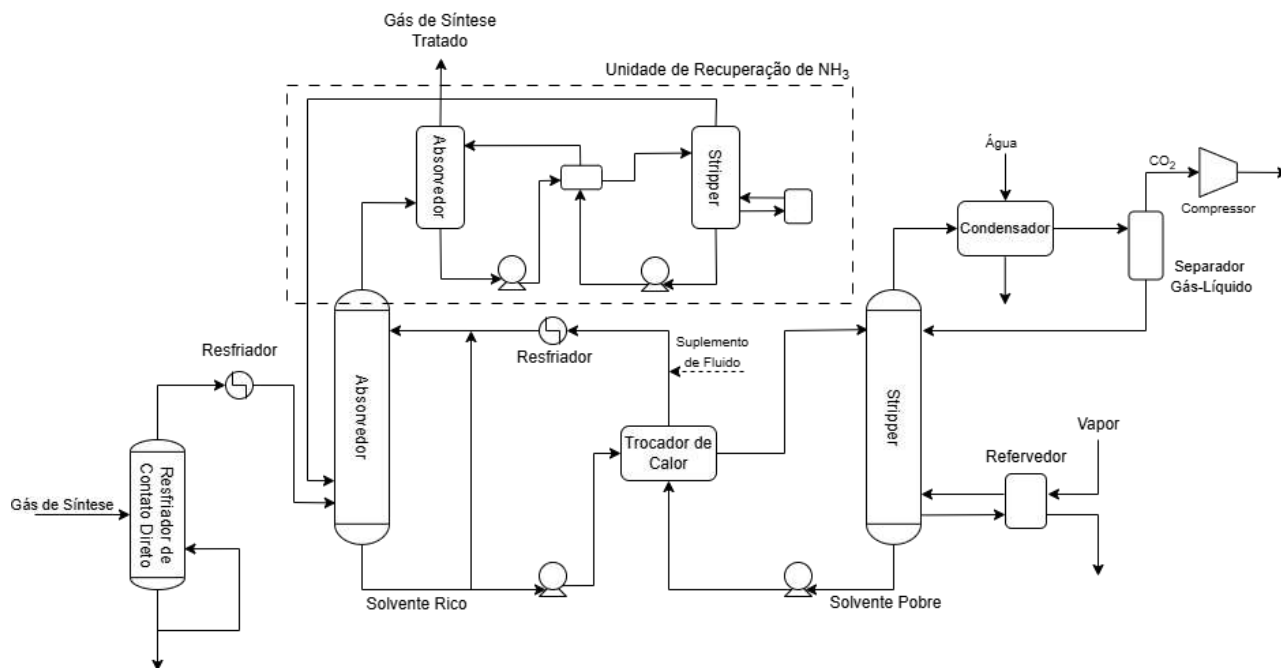
### 2.2.1.2 Amônia

O processo de absorção química com amônia ( $\text{NH}_3$ ) é relativamente similar ao processo com o solvente à base de aminas. Apesar de apresentar uma capacidade de absorção menor que o método com as aminas, a absorção com  $\text{NH}_3$  apresenta um menor consumo energético, menor corrosão e menor custo. Entretanto, devido à alta volatilidade da  $\text{NH}_3$ , as perdas constituem o maior obstáculo a ser enfrentado (Fu et al., 2022).

Uma alternativa para esse problema é a adição de uma etapa de lavagem de amônia, que ajuda na diminuição do escape de amônia. Dependendo da temperatura de absorção, esse processo de lavagem pode ser dividido em duas categorias: o sistema convencional de amônia e o sistema de amônia resfriada. No método convencional, a absorção se dá em temperatura ambiente e baixas concentrações de amônia. Já no método resfriado, a corrente gasosa é resfriada e segue para a torre de absorção e, uma vez que o  $\text{CO}_2$  é absorvido, passa por um trocador de calor e a ligação amônia- $\text{CO}_2$  é quebrada na torre de *stripping* a 100-150 °C e 20-40 bar, sendo então purificado.

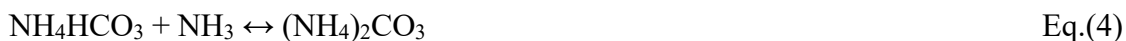
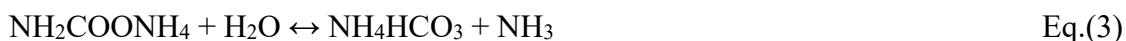
Como o uso de temperaturas baixas reduz o escape de amônia, ela costuma ser usada em concentrações maiores do que no método convencional. Por outro lado, essa redução na temperatura também reduz a taxa de absorção do gás carbônico, exigindo equipamentos de maior tamanho. Além disso, a combinação de  $\text{CO}_2$  com alta concentração de amônia pode formar uma lama com precipitados que, ao longo do tempo, danifica o trocador de calor e as bombas do processo (Du et al., 2024). A Figura 7 apresenta um esquema da separação do  $\text{CO}_2$  por meio da amônia resfriada.

**Figura 7 – Fluxograma do sistema de amônia resfriada.**



Fonte: Adaptado de DU et al. (2024).

O processo de captura de CO<sub>2</sub> por amônia aquosa é complexo e envolve uma série de reações (Fu et al., 2022):



Além disso, a recuperação da amônia a partir do bicarbonato de amônio também pode ser obstáculo, já que envolveria uma decomposição térmica e, consequentemente, um maior gasto energético, pois o regenerador costuma operar a temperaturas superiores a 120°C e pressões superiores a 20 bar (Rackley, 2017). Assim, tem-se que o método de captura de CO<sub>2</sub> por amônia ainda apresenta desafios que dificultam sua implementação em larga escala na indústria. Entretanto, a possibilidade de comercialização do carbamato de amônio e do

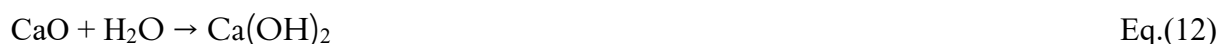
bicarbonato de amônio, que podem ser utilizados nas indústrias de fertilizantes e alimentícias respectivamente, aumenta a viabilidade econômica da captura de carbono através da amônia, uma vez que compensa parte dos custos associadas a ela (Al-Hamed; Dincer, 2021; Du et al., 2024; Fu et al., 2022).

### 2.2.1.3 Hidróxido de Sódio

Um outro método de captura de carbono que vem recebendo atenção é o da absorção através do hidróxido de sódio. Esse processo se dá em meio aquoso, conforme as reações apresentadas nas Eq. 7-11 (Fu et al., 2022; Rackley, 2017):



A proporção de carbonato e bicarbonato produzidos pode ser controlada por meio de um ajuste no pH, que pode ser feito, por exemplo, com a adição de HCl (Rackley, 2017). Para a recuperação do absorvente, isto é, para separar o  $\text{CO}_2$  dos carbonatos, seria necessário um gasto muito alto de energia, aumentando o custo do projeto (Fu et al., 2022). Então, para contornar esse obstáculo, é muito comum a adição de cal, de modo que as reações a seguir aconteçam:



O carbonato de cálcio é então separado da lama resultante e passa pelo processo de calcinação a aproximadamente  $900^\circ\text{C}$ , regenerando a cal e liberando gás carbônico.



A principal vantagem desse método está no baixo custo e alta disponibilidade de seus reagentes. Entretanto, a maior desvantagem é o custo para a regeneração da cal na etapa de calcinação (Rackley, 2017).

## 2.2.2 Absorção Física

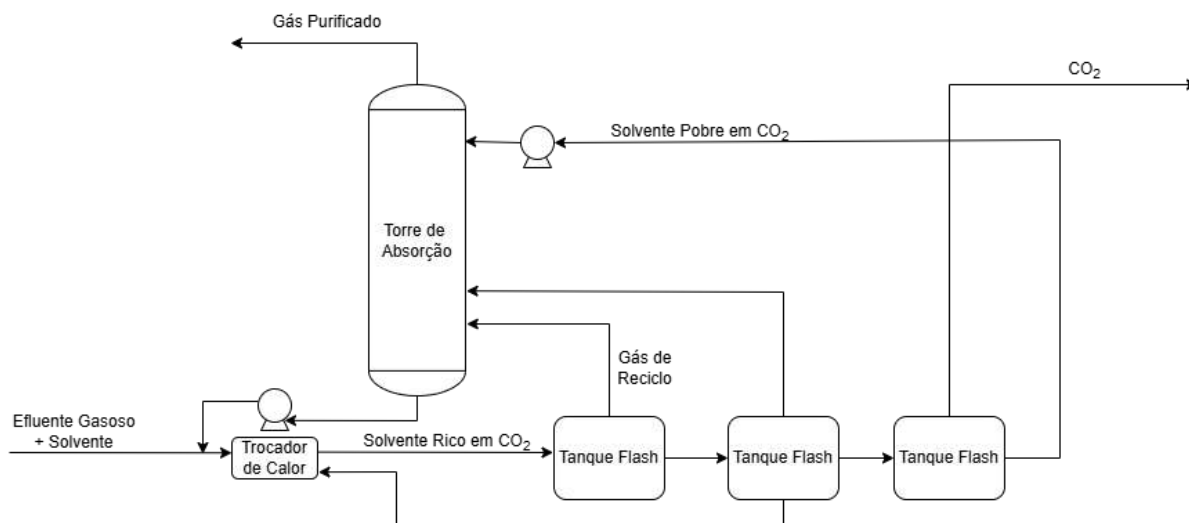
### 2.2.2.1 Dimetil éter de polietilenoglicol (processo Selexol)

O processo Selexol consiste no uso do solvente Selexol como via de remoção de CO<sub>2</sub> de uma corrente gasosa. Esse é um solvente físico líquido composto pela fórmula CH<sub>3</sub>(CH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>O)<sub>*n*</sub>CH<sub>3</sub>, onde o *n* varia de 3 a 9 (Rackley, 2017).

Uma das características do processo é a alta solubilidade de água no solvente, o que faz com que a pressão de vapor seja altamente controlada em suas plantas para que a absorção do CO<sub>2</sub> não seja prejudicada e/ou impedida. Outro ponto importante a ser analisado é a alta seletividade ao H<sub>2</sub>S nesse processo, o que faz com que seja comum (a depender da corrente a ser purificada) ter uma planta de remoção desse composto antes da recuperação do gás carbônico. Além disso, outros hidrocarbonetos, como o propano, têm maior solubilidade que o CO<sub>2</sub>. Porém, no geral, esse aspecto não afeta muito o processo, uma vez que sua remoção depende de uma série de parâmetros de operação.

O processo Selexol é utilizado principalmente em plantas de gaseificação de carvão, coque de petróleo e biomassa. Isso porque, por ser um solvente físico, ele usa forças intermoleculares de Van der Waals para capturar o gás carbônico, o que é favorecido em condições de alta pressão e maiores concentrações de CO<sub>2</sub>. Entretanto, os custos associados à regeneração do solvente ainda são um desafio a ser superado (Kearns; Liu; Consoli, 2021; Rana; Andino, 2025). Um fluxograma do processo Selexol é apresentado na Figura 8.

**Figura 8 - Fluxograma da extração do CO<sub>2</sub> por Selexol.**

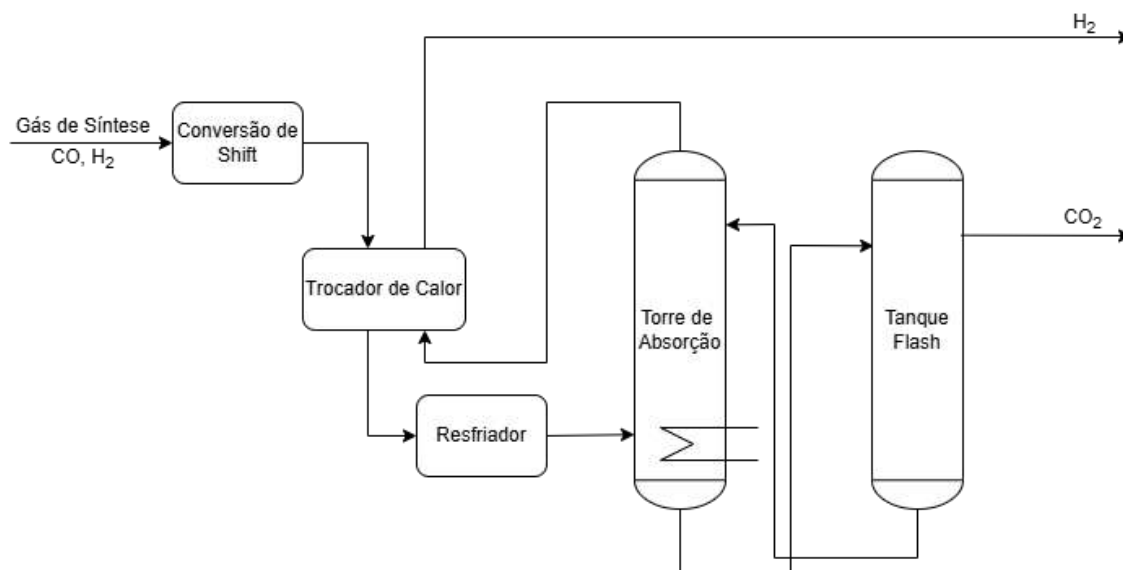


Fonte: Adaptado de Stephen Rackley (2017).

#### 2.2.2.2 Metanol (processo Rectisol)

Assim como no processo Selexol, o processo Rectisol, apresentado na Figura 9, também utiliza um solvente físico líquido, mas, neste caso, o solvente é o metanol em elevadas pressões e temperatura -60°C. Esse processo é tipicamente usado na purificação do gás de síntese e pode ser esquematizado de diferentes maneiras, dependendo da composição do gás. Similar ao Selexol, algumas das principais desvantagens desse método são o alto custo de recuperação do solvente e a necessidade de uma maior concentração de CO<sub>2</sub> na corrente a ser tratada. Apesar disso, o método de captura de carbono através do Rectisol é utilizado no tratamento de gás de combustão e emissões industriais como processamento de gás natural e plantas de gaseificação a base de carvão, além da purificação do gás de síntese (Kearns; Liu; Consoli, 2021; Rana; Andino, 2025).

**Figura 9 - Fluxograma da extração do CO<sub>2</sub> por Rectisol.**



Fonte: Adaptado de Stephen Rackley (2017).

### 2.2.3 Adsorção

A adsorção funciona com base na interação do CO<sub>2</sub> com uma superfície sólida, podendo envolver tanto a fisissorção quanto a quimissorção, dependendo da funcionalidade da superfície e das propriedades do adsorbato. A inspiração no uso de técnicas de adsorção para captura de CO<sub>2</sub> advém da experiência em processos de separação de gases usando adsorventes sólidos, como carvão ativado e zeólitas. Os materiais adsorventes são geralmente materiais porosos com grandes áreas específicas. Os adsorventes são escolhidos e/ou preparados/modificados visando otimizar o tamanho dos poros, porosidade, o grau e o tipo de funcionalização de modo a melhorar a capacidade e a taxa de captura de CO<sub>2</sub>. Alguns dos adsorventes mais promissores são apresentados na Figura 10.

No geral, os métodos de captura de carbono via adsorção têm como principais vantagens o baixo custo de regeneração, o baixo índice de corrosão e o baixo consumo de energia. Por outro lado, eles capturam menos CO<sub>2</sub> do que os métodos de absorção química (Fu et al., 2022).

No processo de adsorção, dependendo da temperatura, pressão parcial, área de superfície e tamanho dos poros do adsorvente, camadas únicas ou múltiplas de gases podem ser adsorvidas. Na tecnologia de separação de gases por adsorção, uma coluna compactada é preenchida principalmente por adsorvente esférico e uma corrente gasosa é passada através da

coluna. No caso da adsorção para captura de CO<sub>2</sub>, este é adsorvido, aderindo à superfície do adsorvente. Após atingir o equilíbrio, ocorre a dessorção para obter CO<sub>2</sub> puro e o adsorvente regenerado pode ser usado para o ciclo subsequente. As principais tecnologias para a adsorção de gases que podem ser aplicadas à captura de CO<sub>2</sub> são a adsorção por oscilação de pressão (PSA), a adsorção por oscilação de temperatura (TSA) e a adsorção por oscilação elétrica (ESA) (Mondal; Balsora; Varshney, 2012).

**Figura 10 – Adsorventes usados para a captura de CO<sub>2</sub>.**



Fonte: Adaptado de Lai; Ngu; Hashim (2021).

A PSA, do inglês *Pressure Swing Adsorption*, é uma tecnologia que consiste num processo cíclico onde a variação de pressão é usada para separar um componente, nesse caso o gás carbônico, de uma corrente. De maneira geral, a corrente gasosa contaminada passa por um leito composto por material adsorvente (zeólitas ou sílica, por exemplo) a alta pressão, de modo que o CO<sub>2</sub> fique retido nesse material até que seja alcançada uma condição de equilíbrio na saída do leito. Em seguida, é interrompida a entrada da corrente gasosa e diminui-se a pressão do sistema. Com o auxílio de um gás de baixa capacidade de adsorção, o CO<sub>2</sub> é dessorvido do leito, que fica, então, disponível para receber mais gás carbônico (Mondal; Balsora; Varshney, 2012; Rana; Andino, 2025; Sreenivasulu et al., 2015; Wiheeb et al., 2016).

A TSA, do inglês *Temperature Swing Adsorption*, atua de forma semelhante à PSA, mas, ao invés da variação de pressão, a variação de temperatura é usada para realizar a captura de carbono. A etapa de adsorção do CO<sub>2</sub> costuma ocorrer a 40°C e a dessorção a 120°C. Esse método é tipicamente utilizado quando se tem baixas concentrações de contaminante (Mondal; Balsora; Varshney, 2012; Rana; Andino, 2025; Sreenivasulu et al., 2015; Wiheeb et al., 2016).

Já a ESA, do inglês *Electric Swing Adsorption*, se utiliza do efeito Joule para fazer a captura de carbono. A corrente gasosa contaminada passa por um leito adsorvente, retendo o CO<sub>2</sub> em sua estrutura. Feito isso, é aplicada uma voltagem no adsorvente, de forma a esquentá-lo rapidamente e, conseqüentemente, promover a dessorção do CO<sub>2</sub>. É importante ressaltar que, por receber uma corrente elétrica, o material usado no leito adsorvente deve ser um bom condutor elétrico. Um dos materiais mais comumente usados nesse método é o carvão ativado (Mondal; Balsora; Varshney, 2012; Rana; Andino, 2025; Sreenivasulu et al., 2015; Wiheeb et al., 2016).

Por usar o efeito Joule para a etapa de aquecimento e não apresentar variações de pressão, a ETA é mais barata do que a TSA e a PSA. Entretanto, essa tecnologia ainda precisa ser explorada e testada com mais critério em escalas menores antes de ser comercialmente aplicada. A TSA tem um nível de prontidão tecnológica, chamado de TRL (do inglês “*Technology Readiness Level*”), entre 5 e 7. As principais desvantagens desse método em relação à PSA são o maior tempo de regeneração do leito adsorvente, maior demanda energética e uma desativação mais rápida do adsorvente proveniente da formação de coque a altas temperaturas. Por outro lado, a PSA é a mais madura dessas três tecnologias, tendo um TRL de 9. Além de ser economicamente mais viável do que a TSA, ela pode ser acomodada mais facilmente em uma planta industrial por demandar menos espaço. Por fim, é possível fazer uma combinação entre esses diferentes processos a fim de se obter os benefícios de cada um em um só processo. Uma dessas combinações utilizadas na indústria é a TPSA (do inglês “*Temperature and Pressure Swing Adsorption*”), que varia tanto a pressão quanto a temperatura no processo de adsorção do CO<sub>2</sub> (Mondal; Balsora; Varshney, 2012; Rana; Andino, 2025; Sreenivasulu et al., 2015; Wiheeb et al., 2016).

### 2.2.3.1 Carvão Ativado

O carvão ativado é um adsorvente conhecido por sua estrutura microporosa e de alta área específica. Entre as vantagens do uso deste material estão a alta capacidade de adsorção, o baixo custo de produção, a alta estabilidade e o bom índice de regeneração. Já algumas desvantagens são a sensibilidade à pressão parcial do CO<sub>2</sub> e a baixa resistência à água. Isso fez com que, ao longo do tempo, fossem procurados outros compostos que pudessem ser combinados com o carvão ativado para aumentar sua capacidade de adsorção. Entre as substâncias estudadas estão: KOH; KOH e ureia; biomassa; Zn; K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (Fu et al., 2022).

O carvão ativado é um dos principais adsorventes para a captura de carbono, sendo conhecido por sua estrutura porosa e sua alta área específica. Entre as principais vantagens do uso desse material estão um bom custo benefício, baixas temperaturas de dessorção, boa regeneração, baixo consumo energético, alta eficiência, alta capacidade de adsorção, alta estabilidade e boa condutividade térmica. O carvão ativado pode ser obtido através de diferentes precursores, geralmente resíduos industriais, biomassa, carvão ou polímeros, que passam por um processo de pirólise e ativação física ou química, a fim de formar esse material. É importante que o precursor usado tenha uma quantidade significativa de carbono e de substâncias voláteis, de modo a favorecer a criação de poros durante a queima do material. Essa grande disponibilidade de matéria-prima faz com que o carvão ativado seja um adsorvente bastante competitivo (Chuah; Laziz, 2022; Dziejarski et al., 2023; Fu et al., 2022; Mukherjee et al., 2019).

Apesar de o carvão ativado apresentar uma menor taxa de adsorção do que zeólitas e MOFs (do inglês “*metal organic frameworks*”), sua combinação com diferentes grupos funcionais e sua hidrofobicidade são outras vantagens de seu uso. Para se obter uma estrutura microporosa e com alta capacidade de adsorver o CO<sub>2</sub>, o modo como é feita a ativação do carvão é crucial, sendo dividida em duas grandes categorias: ativação física e ativação química (Chuah; Laziz, 2022; Dziejarski et al., 2023; Fu et al., 2022; Mukherjee et al., 2019).

Na ativação física, o precursor do carvão ativado deve passar por duas etapas. A primeira é a pirólise do material a 400-600°C com o auxílio de um gás inertizante, como nitrogênio ou argônio, de modo que o produto formado seja estável e mais resistente ao calor para seguir para a próxima etapa, a ativação. Nesta, o material é ativado por meio de agentes oxidantes, sendo os mais comuns o vapor, ar e CO<sub>2</sub>, a uma temperatura de 700-1000°C. Esse processo favorece a criação e expansão de micro e mesoporos para a adsorção de gás carbônico. Além disso, existem estudos que tentam combinar esse processo em um método de apenas uma

etapa com o objetivo de redução de custos e menor consumo energético (Chuah; Laziz, 2022; Dziejarski et al., 2023; Fu et al., 2022; Mukherjee et al., 2019).

Já na ativação química, o precursor reage com diferentes substâncias químicas e é submetido à pirólise, formando carvão ativado numa gama de temperaturas de 450-900°C. Os ativadores de carvão podem ser divididos em três categorias: alcalinos, ácidos e neutros. Os alcalinos são os mais comuns, sendo o hidróxido de potássio um dos ativadores mais usados. Além de formar um carvão ativado com microporosidade e com uma alta área específica, ele é um composto acessível e menos prejudicial ao meio ambiente do que outros ativadores como cloreto de zinco ou ácido fosfórico. Por outro lado, é possível que uma etapa adicional de lavagem seja necessária para remover resíduos de KOH no carvão ativado (uma lavagem com ácido para neutralização do hidróxido de potássio, por exemplo) (Chuah; Laziz, 2022; Dziejarski et al., 2023; Fu et al., 2022; Mukherjee et al., 2019).

De maneira geral, tem-se que a ativação química é mais utilizada do que a física por permitir um ajuste mais fino na distribuição e tamanho de poros desejados no carvão ativado, além de ter um menor consumo energético. Estudos variando os agentes ativadores são feitos a fim de aprimorar o processo da ativação física, porém a necessidade de altas temperaturas e maior tempo de ativação fazem com que essa abordagem seja uma tecnologia menos utilizada, apesar de suas vantagens do ponto de vista ambiental (Chuah; Laziz, 2022; Dziejarski et al., 2023; Fu et al., 2022; Mukherjee et al., 2019). A Tabela 2 apresenta uma comparação entre os dois métodos.

**Tabela 2 – Comparação entre os métodos de ativação física e química.**

Comparação	Ativação Física	Ativação Química
Descrição Geral	Processo de duas etapas: 1. Pirólise 2. Ativação física	Ativadores químicos são usados para fazer a pirólise e a ativação simultaneamente
Condições Operacionais	- Pirólise a 400-600°C e atmosfera inerte - Ativação física a 700-1000°C	Ativação química com pirólise a 450-900°C
Vantagens	- Menor impacto ambiental	- Ajuste mais fino da distribuição e tamanho dos poros - Menor consumo energético
Desvantagens	- Processo de duas etapas - Maior consumo energético	- Necessária uma remoção de reagentes residuais no carvão ativado - Possibilidade de liberação de gases tóxicos como Cl <sub>2</sub>

Fonte: Elaboração própria.

### 2.2.3.2 Zeólitas

Zeólitas são um grupo de materiais cristalinos porosos que se arranjam em tetraedros de TO<sub>4</sub>, onde T pode ser alumínio ou sílcio. Elas podem ser divididas em dois grupos: zeólitas naturais e zeólitas sintéticas. As sintéticas, apesar de serem mais caras que as disponíveis naturalmente, apresentam maior capacidade de adsorção de CO<sub>2</sub>, menor variação de composição e maior pureza (Dziejarski et al., 2023; Pardakhti et al., 2019).

A proporção de Al e Si em uma zeólita é um parâmetro de suma importância em se tratando da captura de carbono, que é favorecida por uma maior basicidade. Quando Si/Al < 2, ou seja, quando a zeólita tem uma forte presença de alumínio, ela apresenta estabilidade térmica, propriedades hidrofílicas e uma maior basicidade. Além disso, a adição de diferentes cátions, como lítio, sódio ou potássio, na estrutura das zeólitas compensa em parte a carga negativa do alumínio, aumentando ainda mais sua basicidade e, consequentemente, sua capacidade de adsorção de CO<sub>2</sub> (Dziejarski et al., 2023; Pardakhti et al., 2019).

Por causa de sua estrutura cristalina, as zeólitas possuem microporos que atuam como uma rede de peneira molecular, separando o gás carbônico de maneira eficiente. Além disso, algumas zeólitas catiônicas apresentam o chamado “*gating phenomenon*”, que consiste no bloqueio de alguns poros pequenos pela presença dos cátions. Esses poros geralmente estão conectando canais e cavidades, de modo que apenas o CO<sub>2</sub> consiga passar e se movimentar por elas, aumentando a capacidade de adsorção e seletividade do material (já que outros compostos

não têm essa mesma capacidade de difusão). Outro mecanismo de captura de carbono é a adsorção seletiva. Nele, as moléculas do gás carbônico interagem com o campo elétrico gerado pelos íons da zeólita, criando uma interação entre a natureza ácida do adsorbato e o adsorvente. Com isso, tem-se que a distribuição dos cátions na estrutura das zeólitas também é importante no processo de separação de CO<sub>2</sub>, uma vez que influencia no equilíbrio de adsorção e na difusão do gás (Dziejarski et al., 2023; Pardakhti et al., 2019).

Dentre as principais vantagens do uso das zeólitas estão a rápida taxa de adsorção de CO<sub>2</sub>, alta área específica, alta estabilidade e resistência à abrasão. Por outro lado, algumas das desvantagens de sua utilização são a sensibilidade a temperatura e umidade. A adsorção de gás carbônico mostra alta eficiência em condições moderadas, sendo sua temperatura ótima de adsorção cerca de 70°C. Entretanto, a temperatura típica de gases de combustão é de 90°C, fazendo com que seja necessária a adição de uma etapa de resfriamento do gás ou de tratamento do adsorvente para tolerar temperaturas maiores para que se tenha uma boa eficiência de captura de carbono. Já a presença de umidade pode criar um ambiente mais ácido proveniente do contato entre água e CO<sub>2</sub>, ocasionando danos na estrutura da zeólita e comprometendo sua eficiência de separação. Além disso, a presença de outros gases ou impurezas que possam competir com o gás carbônico por sítios de adsorção e sua interação com o vapor d'água também pode prejudicar a capacidade de adsorção e estabilidade das zeólitas (Dziejarski et al., 2023; Pardakhti et al., 2019).

Por fim, muitos estudos são conduzidos com o intuito de aumentar ainda mais a eficiência de captura de carbono das zeólitas. Elas são sintetizadas com metais de transição, polímeros, ureia e por meio de diferentes tipos de argila que potencializam sua capacidade de adsorção, tornando-as um material ainda mais interessante para a separação do CO<sub>2</sub> (Dziejarski et al., 2023; Kumar; Srivastava; Koh, 2020).

#### 2.2.3.3 MOFs

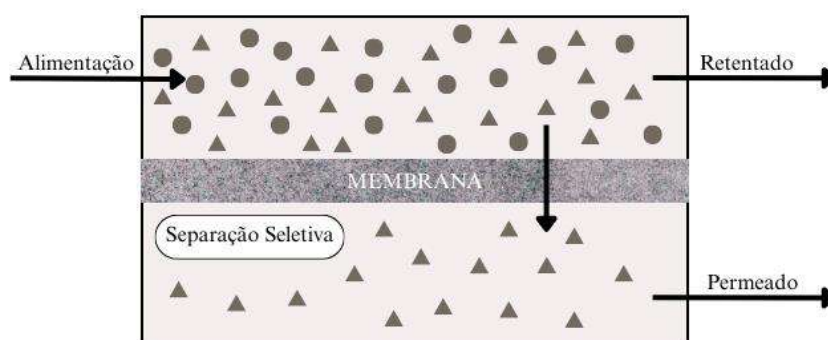
A sigla MOFs quer dizer *metal organic frameworks* e se refere às estruturas formadas por metais e compostos orgânicos que possuem uma alta área específica e capacidade de adsorção. Algumas de suas desvantagens são o alto custo, a baixa capacidade de adsorção a baixas pressões e a instabilidade. Por outro lado, esses materiais podem ser sintetizados a partir de diversos elementos, podendo ser moldados para objetivos específicos, aumentando sua capacidade de adsorção. No caso do CO<sub>2</sub>, foi encontrado que o uso de níquel e de zinco na estrutura do MOF potencializa a remoção do dióxido de carbono. Além disso, também se

estudou o uso de aminas para modificar os MOFs e melhorar sua capacidade adsorptiva a baixas pressões (Fu et al., 2022).

#### 2.2.3.4 Separação por Membranas

A técnica de captura de carbono via separação por membranas começou a ser desenvolvida nos anos 70. Desde então, ela começou a ser foco de pesquisa e investimento para aprimoramento do método. Este consiste em submeter a corrente a ser purificada a uma diferença de pressão, fazendo com que a membrana, dependendo de sua permeabilidade, separe o gás de interesse, ou seja, o CO<sub>2</sub>. Um esquema desse processo segue na Figura 11.

**Figura 11 – Esquema da técnica de separação de membranas.**



Fonte: Adaptado de FU et al. (2022).

As membranas utilizadas nesse método de captura de carbono podem ser feitas de uma variedade de materiais, sendo divididas em dois grandes grupos: as membranas orgânicas (ou poliméricas) e as membranas inorgânicas. As membranas poliméricas têm como principais vantagens uma boa solubilidade nos solventes mais comuns, menor custo e uma maior facilidade de serem transformadas em membranas com uma alta razão entre área e volume, fazendo com que elas sejam mais utilizadas industrialmente. Entretanto, a baixa seletividade dessas membranas para CO<sub>2</sub> é uma das principais desvantagens de seu uso (Fu et al., 2022; Hou et al., 2022).

Por outro lado, as membranas inorgânicas apresentam uma maior seletividade, estabilidade térmica e resistência à corrosão, sendo estas suas maiores vantagens. Porém, sua baixa reprodutibilidade, fragilidade e seu alto custo são as principais desvantagens das

membranas inorgânicas, fazendo com que elas não sejam tão utilizadas na indústria. Um exemplo desse tipo de membrana é a membrana cerâmica (Fu et al., 2022; Hou et al., 2022).

De maneira geral, o método de captura de carbono via separação por membranas é um processo simples, de baixo consumo energético, que requer pouco espaço para ser implantado e pouco poluente. Contudo, a baixa seletividade das membranas para CO<sub>2</sub> e a dificuldade de se obter uma membrana de baixo custo e alta eficiência são os maiores desafios a serem superados para que esse método seja plenamente inserido na indústria (Fu et al., 2022; Hou et al., 2022).

### 2.3 UTILIZAÇÃO DO CO<sub>2</sub>

O dióxido de carbono desempenha um papel essencial na fotossíntese das plantas, mas, desde a Revolução Industrial, no século XIX, suas emissões cresceram significativamente. Esse crescimento acelerado nas emissões de CO<sub>2</sub> fez com que os países se unissem para discutir essa questão, uma vez que, associada ao excesso de emissões de gás carbônico, está uma série de consequências climáticas (Soo et al., 2024). Nesse contexto, surgiram as tecnologias de CCUS que, além de tratarem do armazenamento de CO<sub>2</sub>, englobam seu uso na cadeia produtiva industrial, reduzindo, por exemplo, riscos de vazamento (Fu et al., 2022).

Com isso, é possível dizer que os métodos de CCUS atuam como uma estratégia para descarbonizar setores industriais e de energia baseados em combustíveis fósseis, servindo de ponte para atingir um futuro com emissões net zero. Entretanto, a implementação dessas tecnologias vem enfrentando diversos desafios, incluindo barreiras econômicas, tecnológicas, regulatórias e sociais. O custo associado à captura de CO<sub>2</sub>, que representa cerca de 70-80% do custo total de um projeto de CCUS, ainda é um dos principais obstáculos a ser enfrentado. Além disso, também existe o custo associado ao transporte e armazenamento do gás carbônico, que demandam altos investimentos, especialmente quando a fonte de CO<sub>2</sub> está distante do seu local de destino. Assim, a viabilidade econômica dessa abordagem depende, entre outros fatores, de incentivos governamentais, como incentivos fiscais e políticas de precificação de carbono, que ainda são insuficientes em muitos países. Ainda nesse sentido, o armazenamento correto de CO<sub>2</sub> capturado em formações geológicas (reservatórios esgotados de hidrocarbonetos, aquíferos salinos e camadas de carvão não exploráveis) requer constante monitoramento a fim de evitar vazamentos e garantir a integridade do local. Sob essa ótica, os aspectos sociais e regulatórios também se apresentam como um obstáculo à implementação de tecnologias de CCUS no que tange à responsabilidade a longo prazo e às questões de propriedade do solo do armazenamento (Soo et al., 2024; Wilberforce et al., 2021).

Alguns dos possíveis usos de CO<sub>2</sub> na indústria são: carbonatação de bebidas; congelamento de alimentos; recuperação de petróleo; soldagem; produção de ureia; produção de ácido fórmico; produção de metanol (Fu et al., 2022). Em suma, as tecnologias de CCUS têm um papel fundamental no contexto de transição para uma economia e cenário industrial de baixo carbono, mas enfrentam uma série de desafios econômicos, tecnológicos, regulatórios e sociais para que elas sejam adotadas em larga escala. Com isso, o investimento em pesquisa e desenvolvimento é chave para que se alcance um futuro de emissões líquidas zero de CO<sub>2</sub>.

## 2.4 MAIORES EMISSORES DE CO<sub>2</sub>

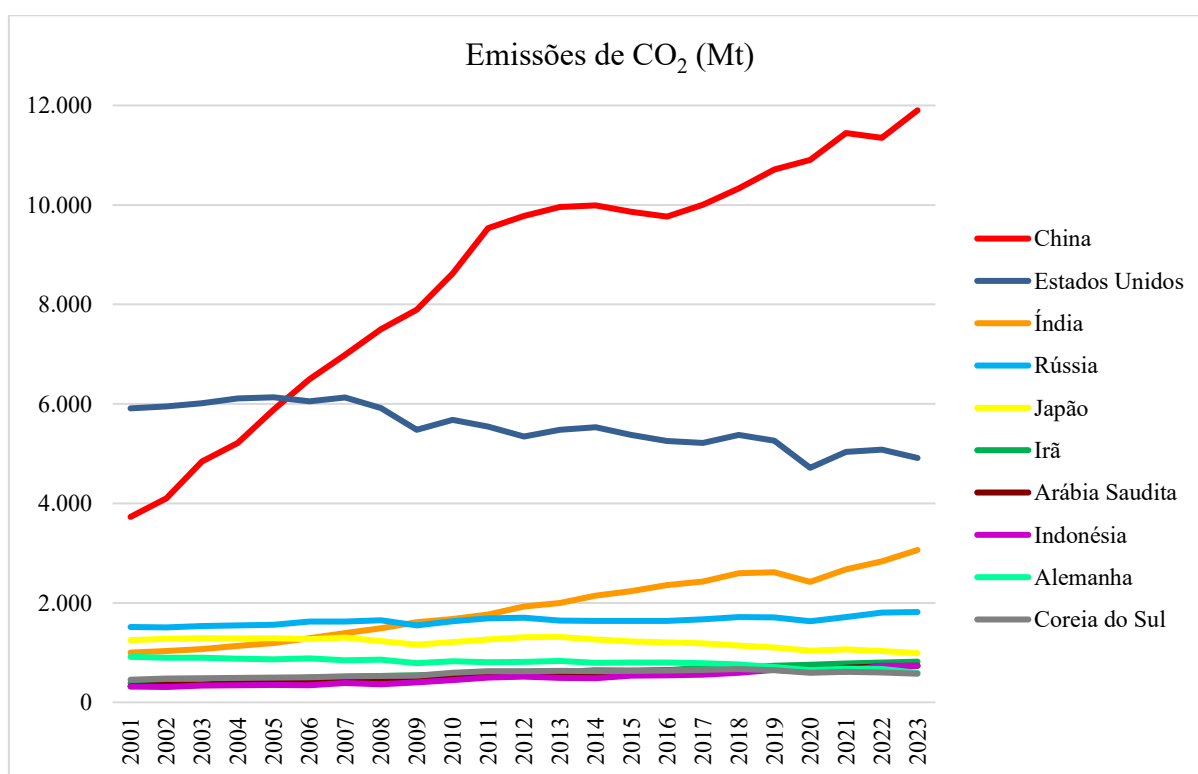
A criação de diferentes metodologias de captura de carbono nasceu da necessidade de redução de emissões de CO<sub>2</sub>, que aumentou expressivamente desde o século XIX com a implementação da Revolução Industrial (como mostra a Figura 1) (Rothenberg, 2023). A fim de realizar uma análise comparativa entre diferentes tecnologias de sequestro de gás carbônico, é importante compreender o contexto no qual elas se inserem.

Em 2023, os 10 maiores emissores de CO<sub>2</sub> foram, em ordem decrescente: China, Estados Unidos, Índia, Rússia, Japão, Irã, Arábia Saudita, Indonésia, Alemanha e Coreia do Sul, como mostra a Figura 12 (Global Carbon Budget, 2024a). Na Figura 12, também é possível observar o comportamento desses 10 países ao longo do século XXI. O crescimento da China, que a posiciona como líder nas emissões, está atrelado ao intenso uso de carvão mineral em sua indústria, fator que impulsiona o desenvolvimento econômico e industrial do país, ainda fortemente dependente de combustíveis fósseis. No 2º e 3º lugares estão EUA e Índia, respectivamente. Essas colocações refletem a relação direta entre as emissões de CO<sub>2</sub>, o desenvolvimento econômico e a população dos países. Embora a China e a Índia tenham populações semelhantes, a discrepância entre elas pode ser atribuída ao maior investimento industrial, à alta urbanização e à economia mais robusta da China (Liu; Bae, 2018; Zhang et al., 2024). Ao analisar o comportamento das emissões japonesas ao longo do tempo, é possível observar que, apesar de ser um país pequeno, ele é o 5º maior emissor de CO<sub>2</sub>, decorrente de sua industrialização e urbanização. Além disso, o Japão é um país que, cada vez mais, investe em políticas de redução de emissões de carbono, o que justifica a diminuição de suas emissões na última década. Um fato importante a ser ressaltado é que houve uma transição do investimento em fontes de energia nuclear, uma fonte renovável, para os combustíveis fósseis após o acidente da usina nuclear de Fukushima em 2011. Apesar disso, o Japão tem diminuído suas emissões de CO<sub>2</sub> devido a políticas governamentais (Chen et al., 2024; Ouyang; Lin,

2017). Por fim, a análise da Alemanha revela uma redução nas emissões de CO<sub>2</sub> ao longo do tempo, atribuída principalmente ao aumento dos custos, como o encarecimento dos combustíveis fósseis e o acréscimo de até 36% nos custos das usinas a carvão desde 2011, além dos altos custos de mão de obra no país (Irlam, 2017).

Ao considerar as emissões de CO<sub>2</sub> brasileiras, tem-se que o Brasil é o 12º maior emissor de gás carbônico atualmente, por isso ele não está presente na Figura 12 (Global Carbon Budget, 2024a). Apesar de ser um país que tem investido em políticas de redução de emissões de CO<sub>2</sub>, o Brasil é um país em desenvolvimento e que apresenta uma crescente nas emissões de gás carbônico (Martin, 2022).

**Figura 12 – 10 Principais Países Emissores de CO<sub>2</sub> em 2023.**



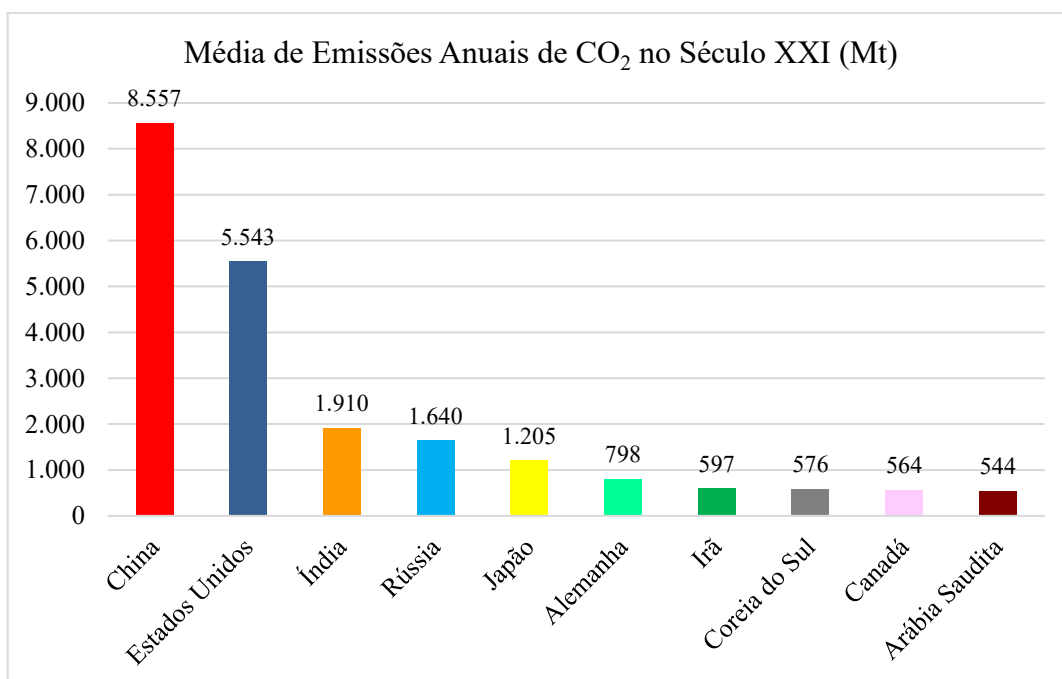
Fonte: Elaboração própria.

Por outro lado, ao se considerar uma média de emissões no século XXI, a ordem desses países muda ligeiramente, como mostra a Figura 13 (Global Carbon Budget, 2024a). O Canadá entra no ranking dos 10 principais emissores, em 9º lugar, e a Indonésia cai para 11º lugar. Isso se deve ao fato de que a Indonésia, apesar de apresentar um crescimento das emissões de CO<sub>2</sub> ao longo do século XXI (atrelado ao desenvolvimento econômico e industrial do país), até 2017 emitia menos carbono do que o Canadá. As emissões canadenses de gás carbônico foram mais constantes e têm apresentado uma diminuição em relação ao início do século XXI desde 2019,

fazendo com que o país ficasse de fora dos 10 maiores emissores em 2023, mas que apresentasse uma média maior do que a Indonésia (em 2000, as emissões do Canadá foram aproximadamente o dobro das indonésias). Além disso, ao se fazer uma análise de emissões de carbono per capita em 2023, os 10 maiores emissores mudam completamente, como mostra a Figura 14, sendo a Arábia Saudita o único país presente nos 3 rankings (Global Carbon Budget, 2024b). Isso acontece porque os maiores emissores em valores absolutos são países muito populosos, especialmente a Índia e a China, o que dilui o valor de emissões per capita. Na Tabela 3, é possível ver a posição ocupada pelos maiores emissores de CO<sub>2</sub> em cada uma dessas análises.

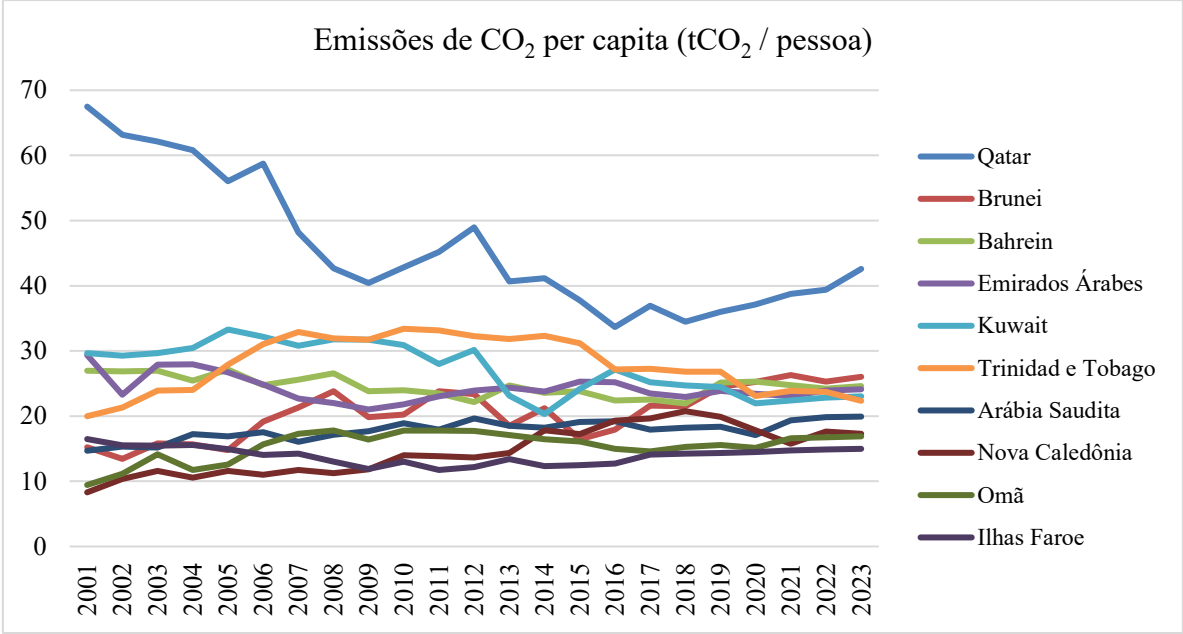
Com base na análise dos dados apresentados na Tabela 3, é possível observar a relevância do papel da China no cenário da captura de carbono, uma vez que ela é principal emissora de CO<sub>2</sub>. Além de ser a líder do ranking no ano de 2023 e do século XXI, as emissões dos 2º e 3º lugares (EUA e Índia) em 2023 foram apenas 41% e 26% do total das emissões chinesas, respectivamente. Além disso, tem-se que esse conjunto de maiores emissores foi responsável por 69% das emissões totais em 2023 e por 66% das emissões no século XXI. Dessa forma, é de suma importância a postura adotada por esses países no que tange às tecnologias de CCS e CCUS, uma vez que seu impacto nas questões ambientais é muito grande.

**Figura 13 – Média de emissões anuais de CO<sub>2</sub> no século XXI.**



Fonte: Elaboração própria.

Figura 14 – Emissões de CO<sub>2</sub> per capita em 2023.



Fonte: Elaboração própria.

Tabela 3 – 10 maiores emissores de CO<sub>2</sub> atualmente.

País	Emissões em 2023			Média de Emissões no Século XXI			Emissões per capita em 2023	
	Posição	Emissões (Mt)	Porcentagem em Relação às Emissões Totais	Posição	Emissões (Mt)	Porcentagem em Relação às Emissões Totais	Posição	Emissões per capita (t)
China	1º	11.902,50	31%	1º	8.556,85	26%	30º	8,35
Estados Unidos	2º	4.911,39	13%	2º	5.542,83	17%	12º	14,45
Índia	3º	3.062,32	8%	3º	1.910,32	6%	129º	2,14
Rússia	4º	1.815,92	5%	4º	1.640,46	5%	16º	12,57
Japão	5º	988,78	3%	5º	1.204,58	4%	36º	8,02
Irã	6º	817,88	2%	7º	597,45	2%	26º	9,17
Arábia Saudita	7º	736,21	2%	10º	543,68	2%	7º	19,93
Indonésia	8º	733,22	2%	11º	485,93	1%	117º	2,64
Alemanha	9º	596,15	2%	6º	797,82	2%	38º	7,16
Coreia do Sul	10º	577,42	2%	8º	576,02	2%	18º	11,15

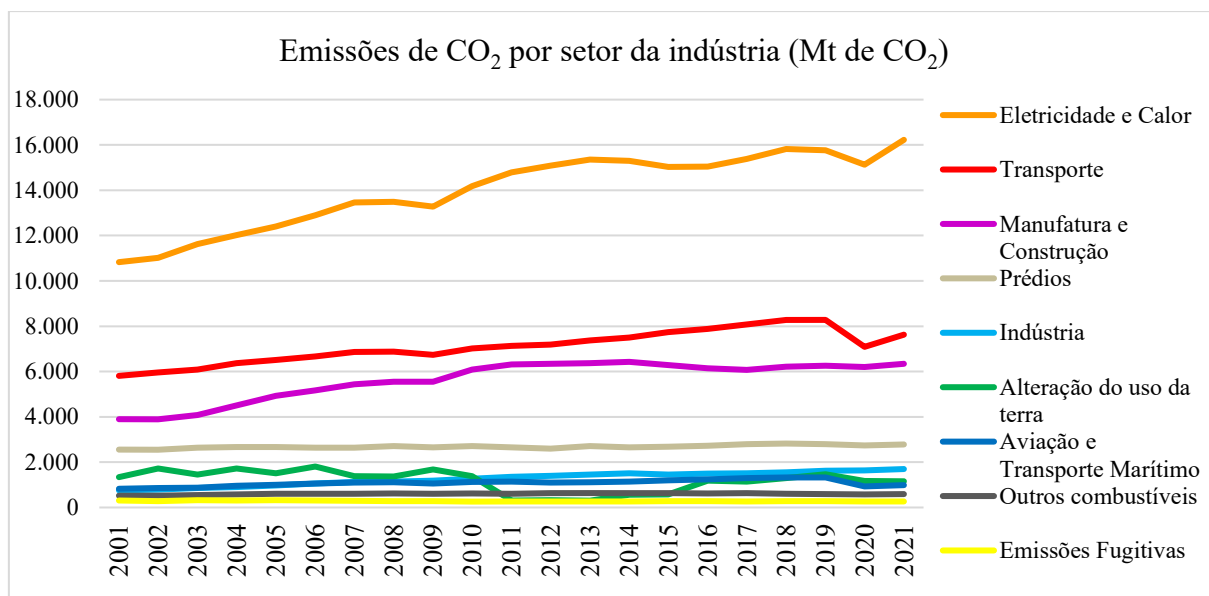
Fonte: Elaboração própria.

Numa perspectiva da indústria, o maior emissor de gás carbônico é o setor de energia, seguido pelos setores de transporte, manufatura e construção, prédios, indústria, alteração do uso da terra, aviação e transporte marítimo e outros combustíveis, como mostrado na Figura 15 e Tabela 4 (Climate Watch, 2024). No que tange às fontes de emissão, o setor de queima de carvão lidera, seguida pelos setores de petróleo, gás natural, produção de cimento, flare e de outras indústrias, como apresentado na Figura 16 e na Tabela 5. As emissões de flare, apesar de serem aquelas relacionadas à queima de gás natural em refinarias de petróleo, são

contabilizadas separadamente das outras emissões de CO<sub>2</sub> decorrentes do petróleo, que, ainda assim, é a 2ª maior fonte emissora (Global Carbon Budget, 2024c).

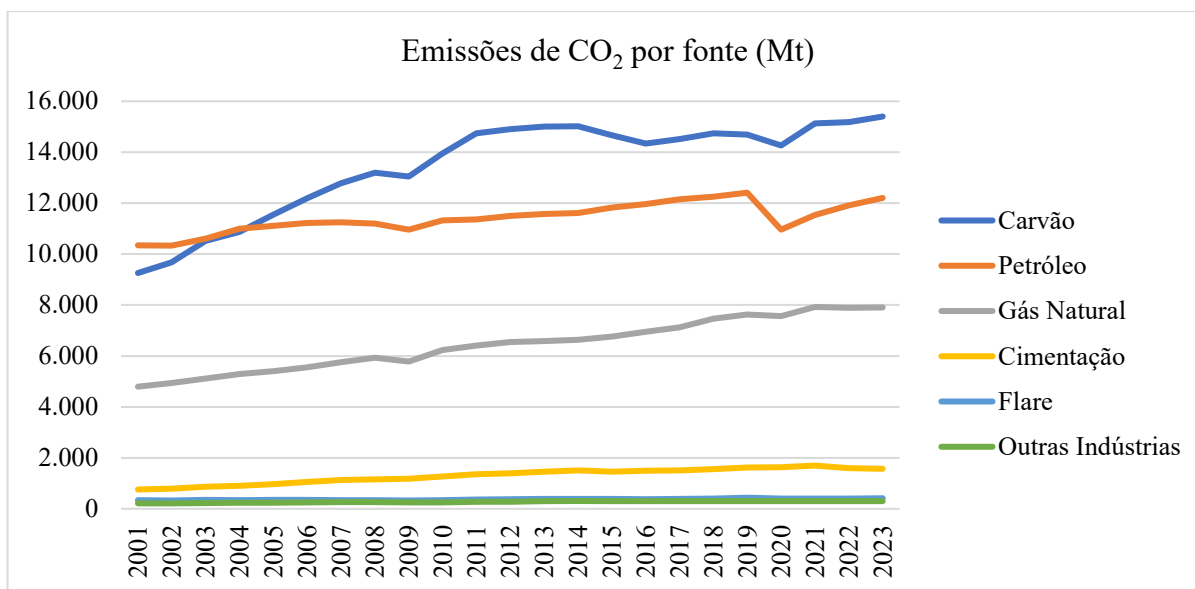
Com base nos dados apresentados nas Figuras 15 e 16 e nas Tabelas 4 e 5, infere-se que o setor de energia é o maior responsável pelas emissões de CO<sub>2</sub>, representando 43% das emissões totais; com especial destaque para a queima de carvão mineral, responsável por 41% das emissões. Como é possível notar, os principais setores emissores (energia, transporte, manufatura e construção e prédios) estão relacionados à industrialização e à urbanização de um determinado local. Isso mostra que o desenvolvimento econômico e industrial dos países está diretamente conectado à qualidade de vida da população e às emissões de CO<sub>2</sub> de dado país. De fato, países que estão em fase de desenvolvimento econômico apresentam um crescimento de emissões de gás carbônico. A China, por exemplo, além de ser a líder em emissões de CO<sub>2</sub>, é a líder em emissões relacionadas à queima de carvão. Além disso, o país demanda uma estrutura energética e industrial que atenda tanto à sua população – a segunda maior do mundo – quanto à sua base produtiva, garantindo o progresso econômico, industrial e social (Liu; Bae, 2018; Rothenberg, 2023). Assim como a China, a Índia tem como principal fonte de emissões de CO<sub>2</sub> a queima de carvão, o que contribui para que esse combustível seja o maior responsável pelas emissões globais.

Além disso, o petróleo lidera as emissões de CO<sub>2</sub> nos Estados Unidos, segundo maior emissor do mundo, e figura como a segunda principal fonte na China e na Índia, o que explica sua posição como a segunda maior fonte global de emissões (IEA, 2025; Rothenberg, 2023). Nesse sentido, maiores esforços, em termos de pesquisa e desenvolvimento, devem ser direcionados para a captura de carbono dessas fontes, visando reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> de plantas de geração de energia à base de carvão, petróleo e gás natural.

**Figura 15 – Emissões de CO<sub>2</sub> por setor da indústria.****Tabela 4 – Emissões de CO<sub>2</sub> por setor da indústria.**

Setor	Emissões em 2023			Média de Emissões no Século XXI		
	Posição	Emissões (Mt)	Porcentagem em Relação às Emissões Totais	Posição	Emissões (Mt)	Porcentagem em Relação às Emissões Totais
Eletricidade e Calor (Energia)	1º	16.225	43%	1º	14.005	41%
Transporte	2º	7.631	20%	2º	7.098	21%
Manufatura e Construção	3º	6.341	17%	3º	5.622	17%
Prédios	4º	2.787	7%	4º	2.686	8%
Indústria	5º	1.696	5%	5º	1.273	4%
Alteração do uso da terra	6º	1.153	3%	6º	1.183	3%
Aviação e Transporte Marítimo	7º	985	3%	7º	1.085	3%
Outros combustíveis	8º	587	2%	8º	600	2%
Emissões Fugitivas	9º	272	1%	9º	283	1%

Fonte: Elaboração própria.

**Figura 16 – Emissões de CO<sub>2</sub> por fonte.**

Fonte: Elaboração própria.

**Tabela 5 – Emissões de CO<sub>2</sub> por fonte.**

Setor	Emissões em 2023			Média de Emissões no Século XXI		
	Posição	Emissões (Mt)	Porcentagem em Relação às Emissões Totais	Posição	Emissões (Mt)	Porcentagem em Relação às Emissões Totais
Carvão	1º	15.401	41%	1º	13.464	40%
Petróleo	2º	12.209	32%	2º	11.417	34%
Gás Natural	3º	7.900	21%	3º	6.444	19%
Cimentação	4º	1.569	4%	4º	1.300	4%
Flare	5º	411	1%	5º	370	1%
Outras Indústrias	6º	301	1%	6º	272	1%

Fonte: Elaboração própria.

Nesse sentido e de acordo com o exposto, a escolha do melhor método de captura de carbono a ser adotado em cada planta industrial irá variar de acordo com a composição da corrente, com as condições de operação do processo (temperatura e pressão, por exemplo) e com a matriz energética utilizada (carvão ou gás natural, por exemplo). As tecnologias de captura de carbono de pré-combustão são mais favoráveis em correntes com altas concentrações (15-50%) e alta pressão parcial de CO<sub>2</sub>, onde a captura ocorre antes da combustão e tem como produto H<sub>2</sub> de alta pureza. Já as tecnologias de pós-combustão são mais adequadas em correntes com baixas concentrações (13-15%) e baixa pressão parcial de CO<sub>2</sub>, sendo a abordagem

adequada para plantas que operam à base de carvão. Os métodos de captura através de absorção por aminas são os mais maduros e mais usados em escala industrial, porém são mais sensíveis à temperatura (a corrente gasosa proveniente da combustão deve ser resfriada) e à pressão, além de serem potencialmente corrosivos. De toda forma, por serem mais facilmente implementados em plantas existentes e operarem de forma mais eficiente nas condições mencionadas, as tecnologias de CCS e CCUS mais bem estabelecidas comercialmente são as de pós-combustão (Allangawi et al., 2023; Madejski et al., 2022).

### 3 METODOLOGIA

Este trabalho tem como objetivo analisar e comparar dois métodos de captura de CO<sub>2</sub>: a absorção por aminas e a adsorção em carvão ativado. A metodologia adotada foi a teórica, sendo baseada em uma revisão bibliográfica e uma análise comparativa de dados científicos disponíveis na literatura. Essa pesquisa é qualitativa, exploratória e fundamentada em uma revisão da literatura científica, como artigos científicos, relatórios técnicos e patentes, e em uma análise comparativa dos processos de captura de carbono escolhidos, considerando eficiência, viabilidades técnica e econômica e os impactos ambientais.

A coleta de dados foi feita por meio do uso das seguintes bases de dados indexadas: Google Scholar, ScienceDirect e Web of Science. Os termos utilizados para realizar as buscas foram: “*Kyoto protocol*”; “*Paris agreement*”; “*carbon capture methods*”; “*amine carbon capture*”; “*activated carbon carbon capture*”; “*ammonia carbon capture*”; “*carbon application industry*”; “*carbon capture cost*”; “*refinery carbon capture cost*”; “*cement carbon capture cost*”; “*iron and steel carbon capture cost*”; “*amine carbon capture environment*”; “*activated carbon carbon capture environment*”; “*amine carbon capture efficiency*”.

Como critérios de seleção, foram considerados apenas os artigos de revisão. Em alguns casos, as referências destes artigos selecionados foram usadas também neste trabalho, não necessariamente atendendo aos critérios acima citados. Foi também realizada uma pesquisa por relatórios de emissão de CO<sub>2</sub> na plataforma Google, uma vez que os critérios de seleção previamente mencionados não continham essas informações em seus resultados.

Em seguida, foi feita a seleção de quais métodos de captura de carbono seriam utilizados para comparação neste trabalho. A absorção por aminas, um método baseado na absorção química, foi escolhida por ser o método mais bem estabelecido industrialmente. Já a tecnologia de adsorção por carvão ativado, baseada na adsorção física, foi escolhida por ser um método alternativo ao método de absorção. O carvão ativado foi selecionado como adsorvente por ser o mais pesquisado na literatura.

Feito isso, foram elaborados gráficos e tabelas com base nas informações e resultados encontrados na literatura, comparando as tecnologias de absorção por aminas e adsorção por carvão ativado sob diferentes parâmetros: adequabilidade à cada setor da indústria, eficiência, custos e aplicabilidade em diferentes escalas. Dessa forma, foi possível fazer uma avaliação de ambos os métodos, identificando suas vantagens e desvantagens e entendendo qual das tecnologias é mais apropriada para diferentes cenários de captura de carbono.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com o apresentado na revisão bibliográfica, os processos de captura de CO<sub>2</sub> baseados na absorção por aminas e na adsorção por carvão ativado representam duas abordagens distintas, cada um com vantagens e limitações específicas. De maneira geral, o uso de absorção por aminas se destaca pela alta eficiência em larga escala e boa regeneração de solvente, mas seu alto custo energético e corrosividade ainda são limitadores para algumas aplicações (Gouedard et al., 2012; Meng et al., 2022). Por outro lado, o carvão ativado oferece uma alternativa de baixo custo e alta estabilidade, porém com eficiência moderada e sensibilidade a umidade e impurezas (Fu et al., 2022).

Nesse sentido, a fim de analisar qual método melhor se adequa às diferentes indústrias emissoras de CO<sub>2</sub>, é preciso entender a composição e as variáveis associadas às emissões de cada processo, uma vez que as condições de operação e a composição das correntes são os fatores determinantes para identificar o método de captura mais eficiente para cada planta industrial. Na Tabela 6, estão apresentadas as principais características de corrente dos maiores emissores de CO<sub>2</sub> na indústria e a proposição de qual tecnologia de captura de CO<sub>2</sub> seria a melhor escolha, de acordo com as especificações de cada corrente gasosa. É válido destacar que a indicação de tecnologia de captura mais adequada foi feita com base nos dados de corrente obtidos na literatura, seguida de uma análise considerando essas informações e as vantagens e limitações de cada método de captura descritas acima.

**Tabela 6 – Condições de corrente dos principais emissores de CO<sub>2</sub> (continua).**

Fonte de CO <sub>2</sub>	Unidade de Processamento de CO <sub>2</sub>	Composição da Corrente	Concentração de CO <sub>2</sub>	T (°C)	Pressão	Ref.	Tecnologia de Captura
Usina de Carvão	Caldeira	CO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , SO <sub>x</sub> , CO, O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> , Hg, As, Se <sup>[1]</sup>	10-15% <sup>[1]</sup>	40-65°C <sup>[1]</sup>	1 bar <sup>[2]</sup>	[1] Bains; Psarras; Wilcox, 2017 [2] Kearns; Liu; Consoli, 2021	Absorção por Aminas

**Tabela 6 – Condições de corrente dos principais emissores de CO<sub>2</sub> (continuação).**

Fonte de CO <sub>2</sub>	Unidade de Processamento de CO <sub>2</sub>	Composição da Corrente	Concentração de CO <sub>2</sub>	T (°C)	Pressão	Ref.	Tecnologia de Captura
Refinaria de Petróleo	Aquecedores de Combustão	H <sub>2</sub> , C1, C2 * [1]	8-10% [1]	160-200°C [1]	1 bar [2]	[1] Bains; Psarras; Wilcox, 2017 [2] Kearns; Liu; Consoli, 2021	Absorção por Aminas
	Utilidades (Geração de Eletricidade e Vapor)	H <sub>2</sub> , C1, C2 *	4%	160-190°C	S.I.**	Bains; Psarras; Wilcox, 2017	Absorção por Aminas
	Craqueamento Catalítico de Fluidos	O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, N <sub>2</sub> , Ar, CO, NO <sub>x</sub> , SO <sub>x</sub> [1]	10-20% [1]	160-190°C [1]	1 bar [2]	[1] Bains; Psarras; Wilcox, 2017 [2] Kearns; Liu; Consoli, 2021	Absorção por Aminas
	Purificação de H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> , CO, CH <sub>4</sub>	30-45% (PSA)	20-40°C (PSA)	1 bar (PSA)	Bains; Psarras; Wilcox, 2017	Carvão Ativado (PSA)
			15-20% (Absorção Química)	340-400°C (Absorção Química)	25-35 bar (Absorção Química)	SOUZA, 2012	Absorção por Aminas (Absorção Química)
Produção de Cimento	Forno	CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, O <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , NO, CO [1]	14-30% [1,2]	85-180°C [1]	1 bar [1]	[1] Plaza; Martínez; Rubiera, 2020 [2] Bains; Psarras; Wilcox, 2017	Carvão Ativado

**Tabela 6 – Condições de corrente dos principais emissores de CO<sub>2</sub> (conclusão).**

Fonte de CO <sub>2</sub>	Unidade de Processamento de CO <sub>2</sub>	Composição da Corrente	Concentração de CO <sub>2</sub>	T (°C)	Pressão	Ref.	Tecnologia de Captura
Produção de Ferro e Aço	Alto-forno	CO, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> <sup>[1]</sup>	17-25% <sup>[1]</sup>	100°C <sup>[2]</sup>	2-3 bar <sup>[1]</sup>	[1] Kuramochi et. al., 2012 [2] Azadi et. al., 2020	Carvão Ativado
Processamento de Gás Natural	Removedor de Gases Ácidos	CH <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S	2-65%	S.I.**	9-80 bar	Zakkour, 2010	Absorção por Aminas
Produção de Etanol	Fermentador	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O, CH <sub>3</sub> OH, H <sub>2</sub> S, H <sub>2</sub> O, C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> S <sup>[1]</sup>	99% <sup>[1]</sup>	35°C <sup>[2]</sup>	1 bar <sup>[2]</sup>	[1] Xu et. al. [2] P Bains et. al.	-
Produção de Hidrogênio	Purificação de H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> , CO, CH <sub>4</sub>	30-45% (PSA)	20-40°C (PSA)	1 bar (PSA)	Bains; Psarras; Wilcox, 2017	Carvão Ativado (PSA)
			15-20% (Absorção Química)	340-400°C (Absorção Química)	25-35 bar (Absorção Química)	SOUZA, 2012	Absorção por Aminas (Absorção Química)

\*Considerando como combustível o RFG.

\*\* Sem informação.

Fonte: Elaboração própria.

#### 4.1 ADEQUABILIDADE DOS MÉTODOS DE CAPTURA

Como discutido anteriormente, a adequabilidade dos diferentes métodos de captura de carbono (absorção química por aminas e adsorção física em carvão ativado) vai depender de uma série de fatores, entre eles as condições da corrente a ser submetida à separação de CO<sub>2</sub>. Abaixo seguem as justificativas que levaram à classificação de “Tecnologia de Captura” da Tabela 6. Cabe ressaltar que, para determinar o método mais favorável nesta tabela, foram consideradas apenas as condições de corrente, ou seja, os custos, os aspectos ambientais e a viabilidade de aplicação em larga escala não foram parâmetros considerados para a proposição do método de captura, no entanto serão abordados ao longo deste trabalho.

#### 4.1.1 Usina de Carvão

Nas usinas à base de carvão, a corrente gasosa que vem da caldeira, isto é, a corrente que seria encaminhada à unidade de separação de carbono, possui uma pressão parcial de  $\text{CO}_2$  de 10-15%, um valor relativamente baixo (Bains; Psarras; Wilcox, 2017). Além disso, a corrente também tem muitas impurezas nela contidas, o que, junto à baixa pressão parcial de gás carbônico, faz com que o método de separação por aminas seja mais adequado do que o de carvão ativado, uma vez que este é mais sensível a contaminantes e tem uma eficiência maior com maiores concentrações de  $\text{CO}_2$  (Allangawi et al., 2023).

#### 4.1.2 Refinaria de Petróleo

Nas refinarias de petróleo, a composição da corrente gasosa vai variar de acordo com o combustível utilizado na combustão, sendo gás natural e combustível gasoso de refinaria (“RFG”, do inglês *Refinery Fuel Gas*) os mais frequentes. A composição do RFG pode variar um pouco de uma refinaria para outra, mas, de forma geral, sua composição é 30%  $\text{H}_2$ , 35%  $\text{C}_1$  (metano) e 35%  $\text{C}_2$  (etano). Além disso, as plantas de refinarias também são distintas entre si, algumas contendo unidades de purificação de  $\text{H}_2$  e outras não. Essa gama de variações entre as refinarias faz com que seja um desafio a elaboração de um único processo de captura de carbono que se adeque a todas as etapas do processo de uma refinaria e que se adeque a refinarias como um todo (Bains; Psarras; Wilcox, 2017).

Assim, considerando a baixa concentração de  $\text{CO}_2$  nas correntes dos aquecedores de combustão e das utilidades, tem-se que a absorção por aminas seria mais adequada do que a adsorção por carvão ativado, que é mais sensível às impurezas da corrente. Além disso, a absorção química também tem maior adequabilidade na etapa do craqueamento catalítico de fluidos, uma vez que, além do valor baixo de pressão parcial de  $\text{CO}_2$ , a corrente a ser tratada possui impurezas que podem comprometer a eficiência de separação através da adsorção física. Já a unidade de purificação de  $\text{H}_2$ , por não estar presente em todas as refinarias de petróleo, terá a adequabilidade do método de captura discutida no tópico 4.2.1.8, específico sobre a produção de hidrogênio.

#### 4.1.3 Produção de Cimento

Na indústria do cimento, as principais emissões de  $\text{CO}_2$  são provenientes dos fornos, tanto do combustível quanto da decomposição do carbonato. A corrente que deixa o forno tem uma pressão parcial que pode variar consideravelmente, podendo assumir valores de 14-30%

em volume após passar pelo pré-aquecedor (Bains; Psarras; Wilcox, 2017; Plaza; Martínez; Rubiera, 2020). Por ter uma concentração de gás carbônico elevada, é possível indicar que o método de captura mais adequado para esse caso seria a adsorção por carvão ativado. O uso de absorção por aminas é desfavorecido porque, devido à alta concentração de  $\text{CO}_2$ , mais calor de absorção seria liberado para um menor volume de gás, de modo a aumentar a temperatura na torre de absorção e, conseqüentemente, deslocar o equilíbrio da reação entre as aminas e o  $\text{CO}_2$  na direção oposta da desejada (Plaza; Martínez; Rubiera, 2020).

#### **4.1.4 Produção de Ferro e Aço**

Na produção de ferro e aço, a corrente proveniente do alto-forno é aquela que deve ser submetida ao processo de captura de carbono. Por conter uma concentração moderada de  $\text{CO}_2$ , sem muitos contaminantes e estar a uma pressão de 2-3 bar (Kuramochi et al., 2012), a adsorção com carvão ativado poderia ser uma escolha de separação de gás carbônico mais adequado quando comparado à absorção por aminas.

#### **4.1.5 Processamento de Gás Natural**

A corrente que chega ao removedor de gases ácidos varia muito tanto em pressão parcial de  $\text{CO}_2$  quanto em pressão, podendo assumir valores de 2% a 65% para a pressão parcial e de 9bar a 80bar para a pressão (Zakkour, 2010), de modo que a absorção por aminas é a tecnologia de captura de carbono mais adequada, a fim de englobar as correntes com baixa concentração de gás carbônico. Entretanto, caso alguma planta industrial lide sempre com correntes com valores de pressão parcial e pressão mais altos, a adsorção por carvão ativado seria um método mais adequado do que a absorção por aminas em virtude dessas características.

#### **4.1.6 Produção de Etanol**

Durante a produção de etanol, a corrente a ser submetida à separação de  $\text{CO}_2$  é aquela que sai do fermentador. Como essa corrente possui pressão parcial de  $\text{CO}_2$  de 99%, (Xu; Isom; Hanna, 2010), tem-se que ela pode ser considerada uma fonte de  $\text{CO}_2$  de alta pureza e não precisa ser submetida ao processo de separação de carbono.

#### **4.1.7 Produção de Hidrogênio**

Na produção de hidrogênio através da reforma a vapor de metano, a captura de carbono acontece no estágio de purificação do  $\text{H}_2$ . Esse processo pode ser feito de duas maneiras: PSA

ou absorção, sendo PSA o método mais adotado comercialmente (Bains; Psarras; Wilcox, 2017).

No PSA, a corrente proveniente do conversor de shift é tratada, de forma que o  $\text{CO}_2$  adquira uma pressão parcial de 30-45%. Como, pela natureza da planta, a tecnologia de PSA é utilizada, o carvão ativado é a escolha mais adequada para realizar a captura subsequente de carbono, uma vez que é através da variação de pressão que a separação do gás carbônico é feita. Além disso, a concentração mais expressiva de  $\text{CO}_2$  na corrente também favorece o uso desse método (Bains; Psarras; Wilcox, 2017).

Por outro lado, caso a planta opte pela purificação de  $\text{H}_2$  através da absorção, a corrente gasosa que vem do conversor de shift não passa por nenhum tratamento e tem pressão parcial de 15-20% de  $\text{CO}_2$ . Com isso, a absorção química por aminas seria o método mais indicado (Bains; Psarras; Wilcox, 2017; Souza, 2012).

## 4.2 EFICIÊNCIA DE CAPTURA

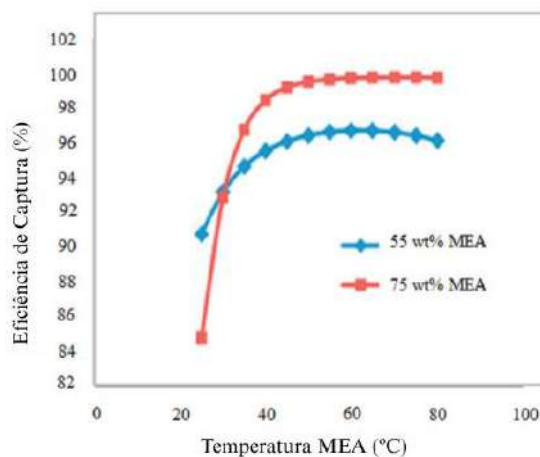
Um aspecto importante a ser considerado ao comparar as duas tecnologias de separação de  $\text{CO}_2$ , é a eficiência de captura. Existem alguns parâmetros, como temperatura, pressão e pressão parcial de  $\text{CO}_2$ , que influenciam tanto a separação via absorção quanto a separação via adsorção. Por outro lado, existem parâmetros que afetam apenas uma das tecnologias, como a concentração de solvente e a área específica, que afetam apenas a captura por aminas e carvão ativado, respectivamente (Orozco-Agamez et al., 2022; Xu et al., 2024).

### 4.2.1 Temperatura

Quando se trata de captura de carbono via absorção por aminas, o aumento da temperatura da solução é diretamente proporcional à eficiência de captura até certo ponto. Temperaturas mais altas aumentam a viscosidade do gás, mas diminuem a viscosidade da solução de aminas, o que contribui para uma melhor transferência de massa, ou seja, favorece a absorção do  $\text{CO}_2$ . Um estudo cujo objetivo era analisar a capacidade de absorção da MDEA em diferentes temperaturas concluiu que a eficiência de captura máxima (98,2%) se deu a 60°C, mas que, a partir dos 50°C, o aumento na eficiência não foi significativo, apesar de ter apresentado um aumento de custos de energia devido ao aumento na temperatura (Orozco-Agamez et al., 2022). Outro estudo analisando a MEA encontrou que o aumento de 25°C para 50°C contribuiu para uma maior eficiência de captura. Entretanto, a partir de 50°C não foi

observada uma maior capacidade de absorção de CO<sub>2</sub> (Ooi et al., 2020). A Figura 17 mostra essa relação entre temperatura das aminas e remoção de CO<sub>2</sub>.

**Figura 17 – Eficiência de captura de CO<sub>2</sub> para diferentes temperaturas de MEA.**



Fonte: Adaptado de Ooi et al. (2020).

Já a adsorção física via carvão ativado apresenta o comportamento contrário em relação à temperatura: as maiores eficiências de captura de carbono são encontradas em temperaturas menores. Isso porque a adsorção do CO<sub>2</sub> na superfície do carvão ativado se dá por meio das forças de Van der Waals que, com o aumento da temperatura, ficam mais fracas devido ao aumento da energia cinética das moléculas de gás carbônico. A Tabela 7 mostra os valores encontrados para capacidade de adsorção de CO<sub>2</sub> de diferentes tipos de carvão ativado em diferentes temperaturas, evidenciando esse comportamento da temperatura em relação à eficiência de captura, dado que os maiores valores são na temperatura de 0°C (Xu et al., 2024).

**Tabela 7 – Capacidade de adsorção de diferentes tipos de carvão ativado em diferentes temperaturas.**

Precursor	Ativador	Capacidade de Adsorção (mmol/g)	
		0°C	25°C
Pó de Café	KOH	4,80	3,00
Casca de Nogueira Brasileira	KOH	5,13	3,67
Casca de Castanha d'Água	KOH	5,23	3,61
Esterco de Vaca	KOH	4,61	3,26
Casca de Coco	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	5,12	3,71
Folhas de Samambaia	KOH + CO <sub>2</sub>	6,77	3,58
Casca de Amendoim	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	5,70	3,67

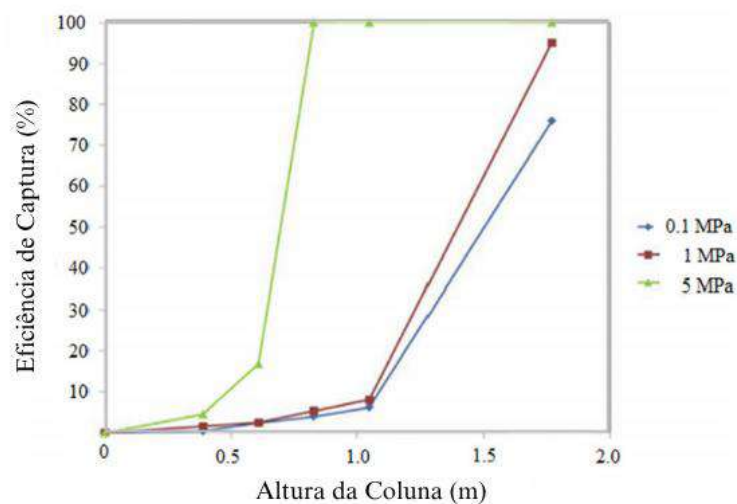
\*Adsorção a 1 bar

Fonte: Adaptado de Xu et al. (2024).

#### 4.2.2 Pressão

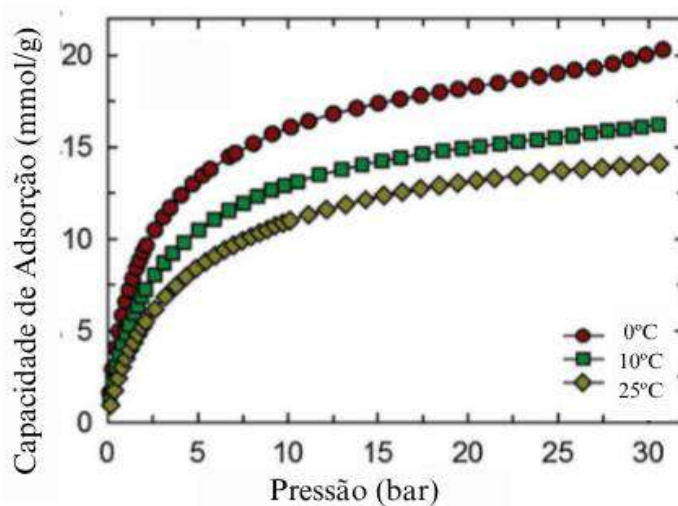
Ao contrário da temperatura, o efeito da pressão na absorção por aminas e na adsorção por carvão ativado é o mesmo: o aumento da pressão contribui para uma maior eficiência de captura de carbono em ambas tecnologias. Na absorção por aminas, esse fenômeno é atribuído ao efeito Marangoni, que determina que um aumento na pressão parcial aumenta a concentração de CO<sub>2</sub> na interface gás/líquido, favorecendo o processo de absorção. Um estudo utilizando uma solução de MEA mostrou um aumento de 19% na eficiência de captura com a mudança da pressão de 0,1MPa para 1MPa, como mostra a Figura 18 (Orozco-Agamez et al., 2022). Na adsorção com carvão ativado, um estudo mostrou um comportamento parecido, como é possível observar na Figura 19. Ao passar de 1bar para 10bar, a capacidade de adsorção de CO<sub>2</sub> aumenta significativamente em todas isothermas (Osman et al., 2021).

**Figura 18 – Eficiência de captura de CO<sub>2</sub> para uma solução de MEA em diferentes condições de pressão.**



Fonte: Adaptado de Ooi et al. (2020).

**Figura 19 – Capacidade de adsorção de CO<sub>2</sub> do carvão ativado em diferentes condições de temperatura e pressão.**



Fonte: Adaptado de Osman et al. (2021).

#### 4.2.3 Outros Parâmetros

Na absorção por aminas, outro parâmetro que influencia a eficiência de captura é a corrosão do aço carbono que, além de reduzir a eficiência de remoção do CO<sub>2</sub>, aumenta os custos do processo. Arelada a essa corrosão está a concentração de aminas em solução: quanto

maior a concentração de aminas, maior a taxa de corrosão (Meng et al., 2022). De maneira geral, concentrações acima de 30% podem apresentar altos riscos de corrosão em equipamentos industriais e, por isso, esse limite costuma ser adotado pela indústria (Ooi et al., 2020). Também associado à corrosão está o tipo de amina usada como absorvente: quanto maior o número de substituintes e quanto mais próxima as aminas ficam de aminas cíclicas e não de aminas lineares, menor é a taxa de corrosão e, consequentemente, maior é a eficiência de captura. Entretanto, essas aminas de estruturas mais complexas podem apresentar uma maior taxa de reação, de modo que a eficiência de remoção de CO<sub>2</sub> também é comprometida. Um estudo com 30 wt% de AMP e 30 wt% de MEA mostrou que a capacidade de absorção com essas duas soluções foi de 0,84 mol<sub>CO2</sub>/mol<sub>amina</sub> e 0,46 mol<sub>CO2</sub>/mol<sub>amina</sub> respectivamente, mas que, de maneira geral, a MEA separou melhor o CO<sub>2</sub> do que a AMP (Ooi et al., 2020).

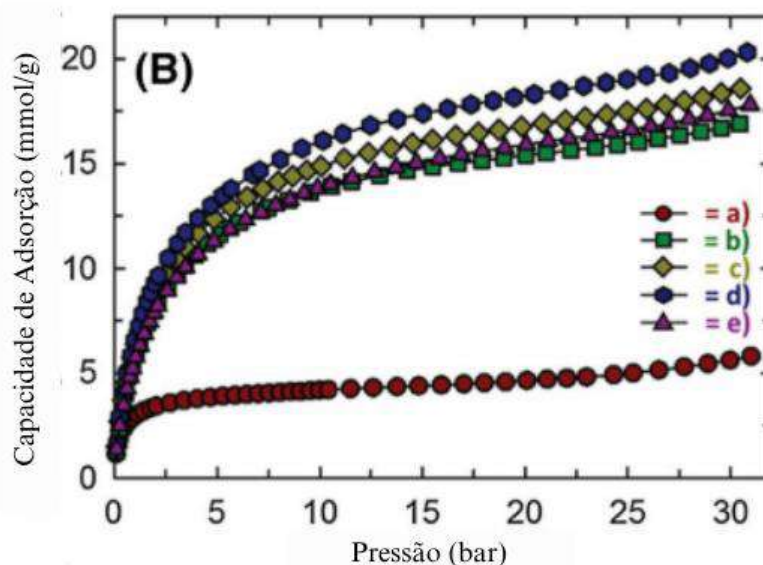
Já na adsorção com carvão ativado, parâmetros como tipo de ativação, dopagem do carvão com outras substâncias e área específica também afetam a eficiência de captura do material. Quando a ativação química é utilizada, a dopagem do carvão com outros materiais, como sais, metais e heteroátomos, pode aumentar a capacidade de adsorção do CO<sub>2</sub> e a seletividade do adsorvente (Kundu et al., 2024). Além disso, a quantidade de substância adicionada ao carvão também influencia sua eficiência de captura, como mostra a Figura 20. Na Figura 20, é possível observar que, quanto maior a quantidade de KOH adicionado ao carvão ativado, maior é sua capacidade de adsorção. Isso se deve ao fato de que a ativação com hidróxido de potássio contribui para a formação de poros, torna o carvão ativado altamente microporoso e também aumenta sua área específica, consequentemente melhorando sua eficiência de captura de CO<sub>2</sub> (Chuah; Laziz, 2022; Maia et al., 2024). A Tabela 8 abaixo mostra a composição de cada uma das amostras de carvão usadas para adsorção e apresentados na Figura 20.

**Tabela 8 – Composição das amostras do estudo da Figura 20.**

Amostra	Composição
a)	Esfera de Carvão Ativado
b)	Esfera de Carvão Ativado + 1g de Acetato de Potássio
c)	Esfera de Carvão Ativado + 2g de Acetato de Potássio
d)	Esfera de Carvão Ativado + 3g de Acetato de Potássio
e)	Esfera de Carvão Ativado + 4g de Acetato de Potássio

Fonte: Elaboração própria.

**Figura 20 – Capacidade de adsorção de CO<sub>2</sub> de diferentes amostras de carvão ativado.**

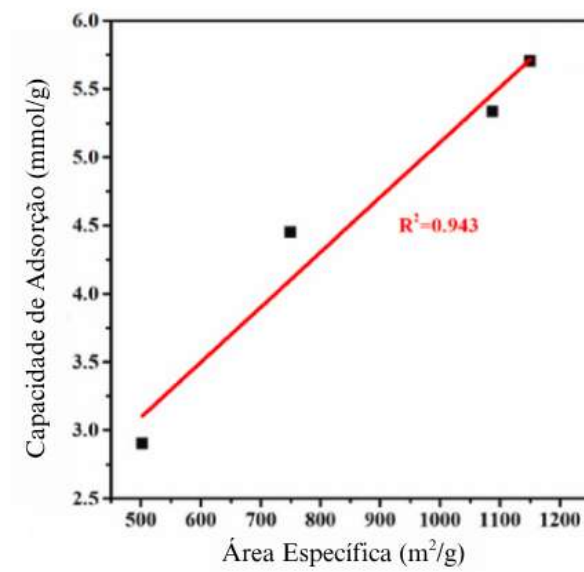


\*Análises de capacidade de adsorção conduzidas a 0°C.

Fonte: Adaptado de Osman et al., 2021.

A área específica do carvão ativado é uma das principais características que influenciam sua eficiência de captura de carbono. De maneira geral, quanto maior for a área específica, maior é a capacidade de adsorção de CO<sub>2</sub>, como mostra a Figura 21 (Xu et al., 2024). Entretanto, todos esses parâmetros mencionados devem ser considerados concomitantemente ao se comparar a eficiência de captura dos materiais. A Tabela 9 mostra a capacidade de adsorção de uma série de amostras de carvão ativado. Como é possível observar, o caroço de azeitona que, apesar de ter uma temperatura de adsorção maior e uma área específica geral menor, tem uma maior capacidade de adsorção do que a acácia negra, devido à influência de outros fatores como o material usado na dopagem. Já ao comparar o carvão ativado com KOH a partir do caule de tabaco e da casca de coco, nota-se que a capacidade de adsorção do carvão ativado produzido através do tabaco é menor que a do produzido através da casca de coco, mesmo possuindo uma área específica maior. Esse resultado pode se dever ao fato de que as temperaturas de ativação do hidróxido de potássio e os precursores são diferentes. Além disso, o carvão ativado com H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> a partir do pau-ferro persa e do caroço de azeitona, apesar de terem sido sintetizados em condições similares, apresentam uma significativa disparidade de eficiência de captura de carbono, o que pode ser decorrente do diferente tipo de precursor, que influencia na composição química e porosidade do carvão ativado, ou da concentração de ácido fosfórico. Esses exemplos mostram a importância de se considerar os diversos parâmetros que afetam a capacidade de adsorção do carvão ativado concomitantemente (Kundu et al., 2024).

**Figura 21 – Relação entre área específica e capacidade de adsorção de CO<sub>2</sub> do carvão ativado.**



Fonte: Adaptado de Xu et al., 2024.

**Tabela 9 – Capacidade de adsorção de diferentes carvões ativados.**

Precursor	Dopagem	Condições de Adsorção	Área Específica (m <sup>2</sup> /g)	Capacidade de Adsorção (mmol/g)
Caule de Tabaco	KOH (500°C 1h)	0°C, 1bar	786	4,76
	KOH (600°C 1h)		1.086	6,32
	KOH (700°C 1h)		1.922	7,98
	KOH (800°C 1h)		2.399	6,60
Casca de Coco	500°C 2h	0°C, 1bar	21	2,00
	(NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> CO (600°C 2h)		1.023	5,60
	KOH (650°C 1h)		1.535	7,00
Caroço de Azeitona	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	30°C, 1bar	1.178	10,90
	CO <sub>2</sub>		757	5,89
	H <sub>2</sub> O (g)		754	7,97
Acácia Negra	-	0°C, 1bar	1.175	2,79
	KOH		2.064	5,86
	NH <sub>3</sub>		2.511	7,19
Casca de Nozes	Ureia/carbono 1:3	25°C, 1bar	1.047	5,72
	Ureia/carbono 2:3		2.707	10,06
	Ureia/carbono 3:3		2.461	11,02
Pau-ferro Persa	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	30°C, 1bar	1.802	3,02
	NiO		1.945	6,48
	CuO		1.954	6,78
Grão de Café	-	35°C, 1bar	34	0,14
	Melamina		402	0,85
	Melamina, KOH		990	2,67

Fonte: Adaptado Kundu et al. (2024).

#### 4.3 CUSTOS ASSOCIADOS

Em se tratando dos custos associados à implementação de uma unidade de separação de CO<sub>2</sub>, é importante ressaltar que existem diversos fatores que irão influenciar o valor final. Entre eles estão: quantidade de energia consumida, quantidade e tamanho de equipamento necessário, custo de mão de obra e operação, custo associado ao tempo que a planta industrial tem sua produção reduzida (ou interrompida) para instalação de uma unidade de CCUS, o destino final do CO<sub>2</sub> capturado, método de captura escolhido, pressão parcial de CO<sub>2</sub> na corrente, custo da matéria-prima, existência ou não de incentivos fiscais, custos de transporte e armazenamento,

entre outros (Roussanaly et al., 2021; Wilberforce et al., 2021; Zakkour, 2010; Zhang et al., 2024).

Durante a pesquisa para a confecção deste trabalho, constatou-se que há uma vasta gama de artigos e pesquisa sobre os custos associados à captura de carbono nas indústrias de petróleo, cimento e ferro e aço. Entretanto, esses estudos, em sua grande maioria, analisam os custos da separação de CO<sub>2</sub> através do método de absorção química com aminas, havendo alguns que também falam sobre oxi-combustão e *looping* de cálcio, enquanto que os custos associados à captura de carbono por adsorção física, mais especificamente com carvão ativado, são escassos. Todas as informações encontradas sobre este método foram incluídas neste trabalho, mas é evidente que o foco da indústria está na absorção química e não na adsorção física. De fato, a TRL de absorção por aminas é, de forma geral, maior do que a da adsorção por carvão ativado, como mostra a Tabela 10 (Bastos de Santana et al., 2024).

**Tabela 10 – TRL da absorção química por aminas e adsorção física.**

Método de Captura	Material	TRL
Absorção Química	Aminas "tradicionais"	9
Absorção Química	Aminas estericamente impedidas	6-9
Adsorção Física	Indefinido	5-8

Fonte: Elaboração própria.

Como os custos estão diretamente relacionados às condições da corrente, diferentes setores da indústria terão diferentes custos associados à instalação de uma unidade de CCUS em suas respectivas plantas. Com isso, a Tabela 11 apresenta uma média dos custos associados à captura de carbono em diferentes setores industriais.

Como é possível observar, as áreas da indústria que apresentam correntes com as maiores pressões parciais de CO<sub>2</sub>, as chamadas fontes de CO<sub>2</sub> de alta pureza, como processamento de gás natural e produção de etanol, possuem seu custo significativamente menor, uma vez que, na maioria das vezes, a etapa de separação e captura de carbono das correntes não é necessária, o que reduz significativamente o custo desses setores, sendo relativos apenas ao armazenamento e transporte. Já os demais setores (usina de carvão, refinaria de petróleo, produção de cimento e produção de ferro e aço) demandam uma unidade de

separação de CO<sub>2</sub> e são, consequentemente, mais caros. Cabe frisar que os custos associados a transporte e armazenamento não foram considerados para estas áreas, uma vez que a literatura os analisa de forma separada.

**Tabela 11 – Custos de captura de carbono em diferentes setores da indústria.**

Setor da Indústria	Pressão Parcial de CO <sub>2</sub>	Custo Médio (\$/tCO <sub>2</sub> evitada)
Usina de Carvão	10-15%	54,32
Refinaria de Petróleo	4-20%	94,90
Produção de Cimento	14-30%	84,51
Produção de Ferro e Aço	17-25%	73,72
Processamento de Gás Natural	96-99%	22,14
Produção de Etileno	7-12%	51,00
Produção de Etanol	99%	10,67
Produção de Hidrogênio	15-45%	32,90

Fonte: Elaboração própria.

#### 4.3.1 Usina de Carvão

As usinas de carvão, geralmente, estão associadas a outros setores da indústria, sendo utilizadas no ramo petroquímico e na produção de cimento, por exemplo (Zhang et al., 2024). Por se tratar de uma fonte de energia empregada em diversos processos industriais, estudos que avaliam os custos de instalação de uma unidade de captura de carbono após a queima de carvão são mais escassos. A Tabela 12 apresenta alguns dos custos relacionados a essa tecnologia.

A partir de uma análise da Tabela 12, é possível observar que o custo do item 4 é significativamente mais alto que os demais e que há uma variação nos valores encontrados. É difícil determinar ao certo a origem dessa discrepância, uma vez que, com a exceção do item 5, todos os demais itens são de estudos que elaboraram estimativas de custo e podem, portanto, fazer considerações na metodologia que diferem da prática. O item 2 retrata as estimativas de custo das emissões de processos à base da queima de CO<sub>2</sub>, ou seja, as emissões decorrentes de mudanças químicas e físicas inerentes a um determinado processo, e não da queima do carvão

em si (Zhang et al., 2024). Esse pode ser um dos fatores que leva o item 2 a ter um menor custo que os demais itens.

Fazendo uma comparação entre os itens 4 e 5, que representam as duas únicas usinas de carvão que possuem uma unidade de CCS em escala comercial no mundo (Boundary Dam e Petra Nova, respectivamente) (Mantripragada; Zhai; Rubin, 2019), nota-se que, de fato, o custo da captura de carbono varia entre diferentes plantas industriais, de modo que os dados encontrados na literatura estão de acordo com o que é observado na prática.

**Tabela 12 – Custo da CCS em usinas de carvão.**

Item	Ano	Eficiência de Captura	Custo (\$/tCO <sub>2</sub> )	Referência
1	2017	S.I.*	41,00-51,00**	Bains; Psarras; Wilcox, 2017
2	2022	S.I.*	21,17-35,72**	Zhang et. al., 2022
3	2020	S.I.*	50,00-70,00**	Kearns; Liu; Consoli, 2021
4	2014	S.I.*	110,00	IEA, 2021
5	2017	S.I.*	65,00	IEA, 2021
6	2021	S.I.*	45,00**	IEA, 2021

<b>Média</b>	<b>54,32</b>
--------------	--------------

\*Sem informação.

\*\*Valores estimados.

Fonte: Elaboração própria.

#### 4.3.2 Refinaria de Petróleo

Como discutido previamente, as refinarias de petróleo possuem quatro etapas que consistem nas principais emissoras de CO<sub>2</sub>: aquecedores de combustão, utilidades, craqueamento catalítico de fluidos e purificação de H<sub>2</sub> (esta última nem sempre está presente em todas as refinarias). Devido a essa diversidade de fontes de emissão de gás carbônico, para que se alcance uma captura de carbono eficiente na refinaria, seria necessário encontrar um meio de combinar as diversas correntes de saída, a fim de que elas se destinassem à unidade de CCUS a ser instalada (Leeson et al., 2017). A Tabela 13 mostra os custos relacionados a essas instalações.

A partir da Tabela 13, é possível notar que os custos associados à captura de carbono na indústria do petróleo variam significativamente, assim como observado nas indústrias de

queima de carvão. Essa variação pode estar associada a uma série de fatores como: eficiência de captura, metodologia utilizada, arranjo físico da planta, entre outros. Outra questão importante a ser considerada é a possibilidade de se utilizar o CO<sub>2</sub> capturado para recuperação avançada de petróleo (EOR, do inglês “*Enhanced Oil Recovery*”). Essa tecnologia consiste na injeção do CO<sub>2</sub> capturado nos poços a fim de aumentar a produção de petróleo, o que contribui significativamente para a viabilidade econômica do projeto, uma vez que, apesar de não reduzir os custos associados à captura de carbono, proporciona um maior lucro decorrente da maior produção de petróleo (Wilberforce et al., 2021).

Os itens 2, 4 e 5 tratam de estudos que consideram nos custos apresentados a integração das diferentes correntes de saída e, por isso, são um pouco maiores. Entretanto, como os desafios relacionados a essa integração variam em cada refinaria e como essa prática não é ainda amplamente adotada industrialmente, é possível que esses custos sejam, na realidade, ainda maiores (Leeson et al., 2017). Sobre a heterogeneidade das plantas de produção de derivados de petróleo, essa é uma questão que dificulta o desenvolvimento de um único modelo de unidade de captura de carbono que se adeque a todas as refinarias, de modo que uma análise financeira deveria ser feita individualmente, dificultando a comparabilidade dos custos.

**Tabela 13 – Custo da CCS em refinarias de petróleo.**

Item	Ano	Eficiência de Captura	Custo (\$/tCO <sub>2</sub> )	Referência
1	2017	15%	40,70	Leeson et. al., 2017
2	2017	50%	121,80	Leeson et. al., 2017
3	2017	50%	68,70	Leeson et. al., 2017
4	2017	S.I.*	98,00	Leeson et. al., 2017
5	2017	50%	83,90	Leeson et. al., 2017
6	2018	62-71%	68,00-128,00	Yao et. al., 2018
7	2012	S.I.*	93,60	Kuramochi et. al., 2012
8	2012	S.I.*	137,80	Kuramochi et. al., 2012
9	2012	S.I.*	153,40	Kuramochi et. al., 2012
10	2020	90%	50,00-95,00**	Kearns; Liu; Consoli, 2021

<b>Média</b>	<b>94,90</b>
--------------	--------------

\*Sem informação.

\*\*Valor estimado.

Fonte: Elaboração própria.

### 4.3.3 Produção de Cimento

A produção de cimento, como visto na Figura 16, está entre as 5 maiores fontes de emissão de CO<sub>2</sub> no mundo no século XXI, fazendo com que esse setor seja frequentemente abordado em estudos sobre análise de custos de instalação de unidades de CCS em suas plantas. A Tabela 14 mostra alguns dos estudos encontrados na literatura.

Como é possível observar na Tabela 14, os custos de captura de carbono variam consideravelmente, podendo atingir valores desde \$27,67 / tCO<sub>2</sub> evitada até \$164,60 / tCO<sub>2</sub> evitada. Essas variações podem ser devido às diferentes eficiências de separação consideradas ou às diferentes metodologias adotadas em cada um desses estudos. De maneira geral, quando se busca maior eficiência, o custo costuma subir a fim de se obter uma corrente de saída mais pura,

como mostram os itens 3 e 7. Entretanto, ao se considerar uma integração energética na planta, como nos itens 5 e 8, os custos relacionados à energia podem cair consideravelmente. Isso mostra que, de um ponto de vista financeiro, o reaproveitamento de energia dentro da planta existente de produção de cimento pode ser um meio de tornar a instalação de uma unidade de CCS mais viável. O item 6 da Tabela 14 é o único que trata de uma análise de custos usando o método de adsorção física, mas esse estudo trata sobre os custos de uma tecnologia de captura de carbono que não está restrita a apenas um adsorvente, de modo que os custos encontrados não são sobre carvão ativado especificamente, mas sobre adsorção física como um todo (Kearns; Liu; Consoli, 2021; Plaza; Martínez; Rubiera, 2020).

**Tabela 14 – Custo da CCS na indústria do cimento.**

Item	Ano	Eficiência de Captura	Custo (\$/tCO <sub>2</sub> )	Referência
1	2006	60%	66,00	Leeson et. al., 2017
2	2012	60%	89,00	Leeson et. al., 2017
3	2009	77%	164,60	Leeson et. al., 2017
4	2020	S.I.	80,00	Plaza; Martínez; Rubiera, 2020
5	2019	S.I.	40,00**	Plaza; Martínez; Rubiera, 2020
6	2020	S.I.	50,00	Plaza; Martínez; Rubiera, 2020
7	2017	S.I.	161,00**	Bains; Psarras; Wilcox, 2017
8	2020	90%	45,00-65,00	Kearns; Liu; Consoli, 2021
9	2022	S.I.	27,67-124,16	Zhang et. al., 2024

<b>Média</b>	<b>84,51</b>
--------------	--------------

\*Sem informação.

\*\* Valor estimado.

Fonte: Elaboração própria.

#### 4.3.4 Produção de Ferro e Aço

Na indústria siderúrgica, um aspecto importante a se considerar é que existem 3 locais na planta que são os principais responsáveis pelas maiores emissões de CO<sub>2</sub>: o alto forno, a coqueria e a planta de sinterização, respectivamente. A fim de se obter uma captura maior em relação às emissões totais de gás carbônico, seria necessário encontrar um meio de combinar as correntes de saída de cada uma dessas etapas e enviá-las para a unidade de CCS a ser implementada ou instalar 3 unidades de CCS diferentes (Leeson et al., 2017). Na Tabela 15,

seguem alguns dos custos encontrados na literatura associados à separação de CO<sub>2</sub> na siderurgia.

Conforme mostra a Tabela 15, os valores de captura de carbono, assim como nos demais setores industriais, variam muito entre si. Essa variação pode estar associada aos diferentes parâmetros considerados ao elaborar modelos estimativos, a qual etapa do processo siderúrgico a unidade de CCUS foi instalada, à eficiência de captura, entre outros fatores. O item 9 é o único da lista que trata dos custos relacionados à separação de CO<sub>2</sub> via VPSA (do inglês “*Vacuum Pressure Swing Adsorption*”), isto é, que aborda a adsorção física como meio de sequestro do gás carbônico. Entretanto, não é especificado qual adsorvente foi usado para se estimar esses custos.

O item 7 é um estudo feito em euros, cujos valores de custos encontrados para captura de carbono via absorção por aminas foram de €54,00/tCO<sub>2</sub> evitada a €64,00/tCO<sub>2</sub> evitada. Para a conversão para o valor em dólar, foi considerado um câmbio de 1,3 (Banco Central do Brasil, 2012).

Os itens 3 e 4 são referentes ao mesmo estudo, mas seus custos divergem porque o item 3 considera o valor da instalação de uma unidade de CCS após o alto-forno, já o item 4 trata dos custos de instalação após a coqueria. Isso mostra que a etapa de maior emissão de CO<sub>2</sub> em uma planta de produção de ferro e aço também é aquela que tem o menor custo de captura de carbono associado (Leeson et al., 2017).

**Tabela 15 – Custo da CCS na indústria siderúrgica.**

Item	Ano	Eficiência de Captura	Custo (\$/tCO <sub>2</sub> )	Referência
1	2017	S.I.	65,10-119,20	Leeson et. al., 2017
2	2017	50%	68,70	Leeson et. al., 2017
3	2017	55%	78,50	Leeson et. al., 2017
4	2017	20%	85,60	Leeson et. al., 2017
5	2022	S.I.*	50,00-90,00	Olabi et. al., 2022
6	2017	S.I.*	31,00-35,00**	Bains; Psarras; Wilcox, 2017
7	2012	S.I.*	70,20-83,20	Kuramochi et. al., 2012
8	2022	S.I.*	40,23-135,16	Zhang et. al., 2024
9	2022	S.I.*	82,06-91,71	Zhang et. al., 2024
10	2020	90%	45,00-125,00	Kearns; Liu; Consoli, 2021

<b>Média</b>	<b>73,72</b>
--------------	--------------

\*Sem informação.

\*\*Valor estimado.

Fonte: Elaboração própria.

#### 4.3.5 Processamento de Gás Natural

O processamento de gás natural é um setor da indústria que faz parte das chamadas “fontes de CO<sub>2</sub> de alta pureza”, que possui correntes com alta concentração de gás carbônico. Uma das etapas do processamento de gás natural é a remoção de gases ácidos (AGR, do inglês “*acid gas removal*”), que é responsável por realizar a separação do CO<sub>2</sub> e do H<sub>2</sub>S do gás natural bruto. Normalmente, a AGR é feita utilizando a absorção à base de aminas, uma vez que esse método tem alta seletividade ao CO<sub>2</sub>, tornando-o mais favorável em um cenário em que há competição entre o gás carbônico e o H<sub>2</sub>S (Bains; Psarras; Wilcox, 2017).

A Tabela 16 mostra alguns dos custos encontrados na literatura para a captura de carbono do processamento de gás natural. Tais custos variam devido às diferentes metodologias adotadas para as estimativas e às particularidades das plantas analisadas. Como apenas os custos

relativos a transporte e armazenamento foram considerados, não há como determinar qual método de captura de carbono é mais aplicável, visto que essa etapa não é necessária devido à alta concentração de CO<sub>2</sub> na corrente (Leeson et al., 2017). De maneira geral, os custos maiores estão associados a plantas que estão mais longe do destino final de armazenamento do gás carbônico, como seu uso para EOR em plataformas *offshore*, por exemplo.

**Tabela 16 – Custo da CCS no processamento de gás natural.**

Item	Ano	Eficiência de Captura	Custo (\$/tCO <sub>2</sub> )	Referência
1	2013	S.I.*	10,25	Leeson et. al., 2017
2	2011	S.I.*	15,40-29,90	Leeson et. al., 2017
3	2008	S.I.*	19,00-39,00	Leeson et. al., 2017
4	2017	S.I.*	14,00**	Bains; Psarras; Wilcox, 2017
5	2017	S.I.*	5,00-70,00**	Bains; Psarras; Wilcox, 2017
6	2010	S.I.*	9,00	Zakkour, 2010
7	2010	S.I.*	31,00	Zakkour, 2010
8	2010	S.I.*	18,00-21,00	Zakkour, 2010
8	2010	S.I.*	16,00-19,00	Zakkour, 2010
9	2019	S.I.*	15,00-25,00	IEA, 2019
10	2017	S.I.*	21,50	Irlam, 2017
11	2017	S.I.*	20,40	Irlam, 2017

<b>Média</b>	<b>22,14</b>
--------------	--------------

\*Sem informação.

\*\*Valor estimado.

Fonte: Elaboração própria.

#### 4.3.6 Produção de Etanol

Os valores observados na Tabela 17 estão relacionados às condições da corrente de saída do fermentador, que tem uma pressão parcial de 99% de CO<sub>2</sub>. Consequentemente, nenhum gasto ou tecnologia são necessários para realizar a separação do gás carbônico, de modo que os custos apresentados estão associados aos custos de desidratação, compressão e transporte do gás (Xu; Isom; Hanna, 2010).

**Tabela 17 – Custo da CCS na produção de etanol.**

Item	Ano	Eficiência de Captura	Custo (\$/tCO <sub>2</sub> )	Referência
1	2010	S.I.*	6,00-12,00**	Xu et. al., 2010
2	2017	S.I.*	14,00**	Bains; Psarras; Wilcox, 2017

<b>Média</b>	<b>10,67</b>
--------------	--------------

\*Sem informação.

\*\*Valores estimados.

Fonte: Elaboração própria.

#### 4.3.7 Produção de Hidrogênio

Na produção de hidrogênio, a tecnologia de captura de CO<sub>2</sub> mais estabelecida industrialmente é a PSA, que usa o método da adsorção para realizar a separação de gás carbônico. Entretanto, não foi possível encontrar na literatura uma vasta gama de estudos que tratasse da análise de custos para esse setor da indústria via absorção por aminas ou via adsorção por carvão ativado especificamente.

Conforme é possível observar na Tabela 18, os valores relacionados à captura de carbono variam bastante. Essa variação pode se dever às diferentes pressões parciais de CO<sub>2</sub> em cada corrente, ao tamanho da unidade de CCS, ao método de separação, entre outros. Os itens 1 e 2 utilizam a técnica de separação via absorção por aminas, mas os itens 3 e 4 não especificaram o método considerado para estimativa dos custos.

**Tabela 18 – Custo da CCS na produção de H<sub>2</sub>.**

Item	Ano	Eficiência de Captura	Custo (\$/tCO <sub>2</sub> )	Referência
1	2005	87-95%	56,30	Metz et. al., 2005
2	2005	87-95%	24,10	Metz et. al., 2005
3	2017	S.I.*	14,00-28,00**	Bains; Psarras; Wilcox, 2017
4	2017	S.I.*	5,00-70,00**	Bains; Psarras; Wilcox, 2017

<b>Média</b>	<b>32,90</b>
--------------	--------------

\*Sem informação.

\*\*Valores estimados.

Fonte: Elaboração própria.

#### 4.3.8 Transporte e Armazenamento

Em se tratando dos custos de transporte e armazenamento de CO<sub>2</sub> capturado, é necessário que o gás passe por um processo de desidratação para, em seguida, ser transportado e destinado ao uso ou estocagem final. A remoção de água é importante para prevenir a formação de ácidos que possam corroer o material dos equipamentos e dutos utilizados no transporte do gás carbônico. Já o transporte pode se dar de duas maneiras: através de gasodutos ou de veículos como caminhões e navios. Para ser transportado em gasodutos, o gás carbônico deve passar por um processo de compressão a fim de que ele atinja pressões acima de 80bar. Já para o transporte em veículos, ele deve ser resfriado e comprimido até atingir seu estado líquido, geralmente -2°C e 20bar. Além disso, a distância e o volume de CO<sub>2</sub> a ser transportado também são fatores que irão influenciar o custo final. De maneira geral, tem-se que o transporte por gasodutos é a via mais barata, mas dependendo da distância, o uso de navios pode ser mais economicamente viável. Somado a isso está o fato de gasodutos offshore são 40-70% mais caros que aqueles usados em terra (Kearns; Liu; Consoli, 2021; Wilberforce et al., 2021).

Uma vez transportado, o CO<sub>2</sub> pode ser usado como insumo (CCUS) ou deve ser armazenado (CCS). As duas principais formas de armazenamento são injeção em poços de petróleo (tecnologia EOR) ou em estruturas geológicas. A injeção em plataformas offshore é, de maneira geral, mais cara, mas pode ser economicamente mais atrativa por aumentar a extração de petróleo, embora cada caso deva ser avaliado individualmente (Kearns; Liu; Consoli, 2021).

#### 4.3.9 Análise dos Custos

Ao realizar uma análise dos custos associados à captura de carbono, é possível observar que existem aspectos que são mais específicos a determinadas indústrias, mas existem parâmetros que são comuns a todas. No setor petroquímico, por exemplo, existe o desafio de combinar as correntes de saída das 4 principais etapas emissoras de CO<sub>2</sub> em uma plataforma (muitas vezes *offshore*), que encarece os custos de um projeto, mas é muito utilizada a EOR, que auxilia na viabilidade econômica (Wilberforce et al., 2021). Já a produção de etanol permeia questões relativas à captura de carbono de fontes de alta pureza de CO<sub>2</sub>, o que também contribui para menores custos (Xu; Isom; Hanna, 2010). A indústria do cimento explora questões de integração energética dentro das plantas (Kearns; Liu; Consoli, 2021). Todos esses parâmetros influenciam diretamente os custos da aplicação de tecnologias de CCS/CCUS, mas cada um de sua maneira em cada setor industrial.

Por outro lado, as diferentes metodologias utilizadas nos estudos de estimativas de custos e a escassez de dados relativa a esses custos são fatores comuns à maioria dos setores industriais, especialmente considerando a adsorção com carvão ativado. Apesar de isso se tornar repetitivo ao realizar uma análise econômica da captura de carbono, é um fator importante a ser ressaltado para que se tenha uma compreensão de qual é o cenário atual da absorção por aminas e da adsorção com carvão ativado sob o quesito econômico.

#### 4.4 ASPECTOS AMBIENTAIS

O aumento das emissões de CO<sub>2</sub> no mundo está diretamente relacionado ao avanço da tecnologia com o passar do tempo e ao crescimento populacional, como visto anteriormente neste trabalho. Associado a esse aumento, está uma série de consequências relacionadas ao meio ambiente, como aquecimento global e acidificação dos oceanos, por exemplo, de modo que os países se uniram e passaram a discutir formas de mitigar esse excesso de emissões de gás carbônico (Fu et al., 2022; Ge; Friedrich; Vigna, 2020; Olabi et al., 2022; Rothenberg, 2023). Com isso, surgiram os métodos de captura de carbono e, mais especificamente, os processos de absorção química por aminas e adsorção física com carvão ativado. Sob uma ótica dos aspectos ambientais relacionados a cada uma dessas tecnologias, tem-se que, de maneira geral, o impacto da adsorção com carvão ativado é menor do que o da absorção por aminas.

Entre as principais desvantagens do uso da absorção química por aminas estão sua degradação, que pode ser térmica ou oxidativa, e a corrosão. A degradação térmica acontece, de modo geral, na torre de *stripping* e ocorre devido à alta temperatura e alta pressão parcial de

CO<sub>2</sub> na corrente que entra na torre. Já a degradação oxidativa costuma se dar na torre de absorção quando há grandes concentrações de O<sub>2</sub> (Gouedard et al., 2012). Como produto dessa degradação está uma série de compostos, que irá variar de acordo com a amina usada no método de captura. Além desses compostos, a absorção por aminas pode ter em sua corrente de saída inibidores de corrosão e solução de amina descartada. Essas substâncias, apesar de apresentarem um potencial tóxico para o meio ambiente, não são o maior foco de preocupação quando se fala de impactos ambientais da absorção química por aminas. Os contaminantes mais alarmantes oriundos da degradação das aminas são os produtos voláteis, como a 2-butanamina, a amônia e a etilamina, e as nitrosaminas e nitraminas (Mazari et al., 2015).

As nitrosaminas e nitraminas, além de serem compostos tóxicos, mutagênicos e potencialmente cancerígenos, têm uma alta tendência de se aderir ao solo, podendo contaminar não somente a terra, como também os lençóis freáticos. Com isso, as normas de segurança estabelecem que a concentração de nitrosaminas e nitraminas não deve exceder 0,3ng/m<sup>3</sup> no ar e 4ng/L em fontes de água doce. Elas podem ser formadas indiretamente a partir de produtos da degradação de aminas primárias, como a MEA, e podem ser originadas diretamente como um dos produtos de degradação de aminas secundárias e terciárias, como DEA, MDEA e PZ. Dessa forma, o controle de formação desses compostos é de suma importância durante o processo de captura de carbono via absorção por aminas. Entretanto, esse controle não é possível quando se trata da formação de nitrosaminas e nitraminas na atmosfera. As aminas que, eventualmente, são liberadas na atmosfera podem interagir com radicais de hidroxila, nitrito e cloro e sofrer foto-oxidação, dando origem a esses poluentes (Mazari et al., 2015).

Já quando se fala sobre captura de carbono via adsorção física com carvão ativado, os impactos ambientais são bem menores. O carvão ativado pode ser produzido através de resíduos industriais ou biomassa (desde que sejam ricos em carbono), por exemplo, e requer menos energia para separação do CO<sub>2</sub> do que a absorção química por aminas. Por outro lado, caso ele seja ativado quimicamente, é necessária uma etapa extra para lavagem do efluente e remoção do ativador que, caso seja descartado incorretamente, pode contaminar o meio ambiente. Se for feita a ativação física, não existe risco de contaminação de ativadores, mas é necessária mais energia para o processo do que a ativação química. Além disso, é uma prática comum a adição de outros compostos à estrutura do carvão ativado a fim de aumentar sua eficiência de captura de carbono. Nesses casos, o potencial impacto ambiental estaria relacionado ao descarte do carvão ativado após inúmeros ciclos de adsorção-dessorção e estaria atrelado à presença de resquícios de contaminantes provenientes do processo de ativação (KOH é menos tóxico ao meio ambiente do que ZnCl<sub>2</sub> ou H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, por exemplo) (Dziejarski et al., 2023).

#### 4.5 VIABILIDADE DE APLICAÇÃO EM DIFERENTES ESCALAS

A fim de se observar uma mudança real nas emissões de CO<sub>2</sub>, para que se alcancem as metas estabelecidas por acordos mundiais, consequentemente evitando o agravamento do efeito estufa e de outras consequências climáticas, é imprescindível que as tecnologias de captura de carbono sejam aplicáveis em larga escala. Nesse contexto, torna-se necessário compreender como os métodos de separação de gás carbônico estudados nesse trabalho se comportam em pequena ou larga escalas e se é possível fazer seu uso comercial.

A absorção química por aminas é o método mais bem estabelecido e utilizado na indústria. Dentre as principais vantagens que tornaram essa tecnologia tão atrativa estão o baixo custo do solvente, a alta eficiência de captura de carbono e a maturidade tecnológica do método. Apesar de ser amplamente aceita, ela apresenta algumas desvantagens, como sensibilidade a altas pressões parciais de CO<sub>2</sub>, grande consumo de energia para regeneração da solução e problemas de corrosão (Meng et al., 2022; Soo et al., 2024).

Já a adsorção física via carvão ativado é uma tecnologia que ainda não foi amplamente testada em larga escala. Apesar de existirem diversos estudos que indicam que o carvão ativado é um eficiente adsorvente de CO<sub>2</sub> e que ele possui potencial para ser aplicado em larga escala, existe uma série de fatores que ainda precisa ser analisada antes desse adsorvente ser usado comercialmente na indústria. Um dos desafios a ser superado está atrelado à variação do precursor utilizado para produzir o carvão ativado, que, além de impactar em sua estrutura, porosidade e área específica, dificulta sua reprodutibilidade, essencial para o uso em larga escala. Outro obstáculo a ser considerado é a capacidade de adsorção de CO<sub>2</sub>, que comparada à do método de absorção por aminas, é menor. Isso faz com que seja necessária a adição de outros compostos na estrutura do carvão ativado que aumentem sua seletividade ao dióxido de carbono e, consequentemente, sua eficiência de captura. Essa dopagem do carvão ativado pode, por vezes, ser complexa e de difícil reprodução, tornando o adsorvente menos adequado para aplicações em larga escala. Além disso, a regeneração, a duração do ciclo de vida, a resistência a impurezas e umidade e a estabilidade térmica do adsorvente também são parâmetros a serem considerados para que se possa ter uma unidade de captura de carbono à base de carvão ativado. Esse conjunto de fatores faz com que a adsorção com carvão ativado seja uma tecnologia pouco aplicada industrialmente, apesar de ser foco de muitas pesquisas e apresentar potencial para tal (Dziejarski et al., 2023; Mukherjee et al., 2019; Soo et al., 2024).

Cabe ressaltar que o custo de um projeto de CCS é primordial no que tange à sua viabilidade de aplicação em larga escala. Nesse contexto, a utilização de aminas mais baratas,

como a MEA, e de métodos que são mais bem estabelecidos na indústria apresenta um risco menor do que investir em uma tecnologia mais nova que ainda não foi utilizada industrialmente, como a adsorção via carvão ativado. Apesar de a criação de plantas piloto ser o ideal para que se possa analisar a possibilidade de aplicação desse método em larga escala, o uso de softwares de simulação pode contribuir para que se entenda como vão se comportar os custos de determinada planta ao se variar diversos parâmetros, simulando a prática (Mukherjee et al., 2019; Soo et al., 2024). Um estudo fez uma análise comparativa entre a captura de carbono pós-combustão via adsorção com carvão ativado e absorção à base de aminas e encontrou que, apesar de a adsorção possuir maiores custos operacionais por ano do que a absorção, o investimento inicial é menor, de modo que o uso de carvão ativado para captura de carbono é competitivo com o uso de aminas (MEA, mais especificamente) (Jiang et al., 2019). Ainda nesse sentido, a criação de polos de CCS e incentivos fiscais são outras medidas que podem ser adotadas com o intuito de reduzir o custo total de projetos de captura de carbono e torná-los mais atrativos comercialmente (Zhang et al., 2024).

Por fim, tem-se que a absorção química por aminas é uma tecnologia que apresenta viabilidade para aplicação em larga, sendo de fato o método mais aplicado industrialmente, e que a adsorção física com carvão ativado tem potencial para ser aplicada em larga escala, mas ainda possui uma série de obstáculos que estão sendo estudados para que esse adsorvente seja adotado pela indústria no futuro.

#### **4.5.1 Unidades de Captura de Carbono em Operação**

A fim de entender o comportamento e as tendências do mercado, é importante analisar o cenário atual da captura de carbono na indústria. O relatório da Global CCS Institute de 2024 mostra que existem, em operação, apenas 50 unidades de CCS/CCUS no mundo (Global CCS Institute, 2024). A Tabela 19 contempla os 5 maiores projetos em relação à capacidade de captura de CO<sub>2</sub>. Por se tratarem de tecnologias utilizadas por diferentes empresas, não foi possível descobrir qual método de captura de carbono utilizado em todas elas, já que, em alguns casos, trata-se de segredo industrial.

A partir dos dados da Tabela 19, nota-se que, apesar de a absorção química por aminas ser o método de separação de CO<sub>2</sub> mais maduro e bem estabelecido industrialmente, pelo menos 2 das 5 maiores unidades de captura de carbono na indústria não o utilizam: a unidade Shute Creek usava o processo Selexol, mas migrou para a separação criogênica com o passar do tempo e a unidade Great Plains Synfuels Plant utiliza o método Rectisol (Lockwood, 2024; Riley, 2002; Robertson; Mousavian, 2022). Já a planta Gorgon da Chevron usa a tecnologia de

absorção química com aminas, mais especificamente a MDEA, sendo a única das cinco que não reincorpora o CO<sub>2</sub> separado na cadeia produtiva, armazenando-o em uma formação salina, ou seja, trata-se da única unidade de CCS e não de CCUS entre as cinco listadas (Marshall, 2022).

A Tabela 20 mostra os destinos dados ao CO<sub>2</sub> capturado pelas unidades de CCS/CCUS operacionais atualmente (Global CCS Institute, 2024). Como é possível observar, 68% dos projetos usa EOR, 24% armazena o dióxido de carbono em formações salinas, 6% destina o CO<sub>2</sub> à carbonatação mineral e 2% não é definido. A partir desses dados, infere-se que há uma tendência do mercado de adotar plantas de CCUS ao invés de CCS e que elas se destinam à recuperação de petróleo.

**Tabela 19 – As 5 maiores unidades de CCS/CCUS em operação atualmente.**

Nome da Unidade	Empresa	País	Início da Operação	Indústria	Método de Captura	Capacidade de Captura de CO <sub>2</sub> (Mt / ano)	Destino
Bacia de Santos - Pré Sal	Petrobras	Brasil	2008	Gás Natural / LNG	Não Encontrado	10,6	EOR
Shute Creek	ExxonMobil	E.U.A.	1986	Gás Natural / LNG	Selexol / Separação Criogênica	7	EOR
Longfellow WTO Century Plant	Occidental Petroleum	E.U.A.	2010	Gás Natural / LNG	Não Encontrado	5	EOR
Gorgon	Chevron	Austrália	2019	Gás Natural / LNG	Absorção por Aminas (MDEA)	4	Formação Salina
Great Plains Synfuels Plant and Weyburn-Midale	Cenovus Energy, Apache Canada, PTRC	E.U.A.	2000	Hidrogênio / Amônia / Fertilizante	Rectisol	3	EOR

Fonte: Adaptado de Global CCS Institute, 2024.

**Tabela 20 – Destinos do CO<sub>2</sub> capturado pelas plantas em operação atualmente.**

Destino	Número de Unidades
EOR	34
Formação Salina	12
Carbonatação Mineral	3
Não Definido	1

Fonte: Elaboração própria.

## 5 CONCLUSÕES

Ao longo do desenvolvimento desse trabalho, foi possível compreender as razões que levaram ao desenvolvimento de métodos de captura de carbono, assim como conhecer o panorama atual dessas tecnologias. O aumento das emissões de CO<sub>2</sub> está diretamente relacionado à industrialização e à urbanização dos países, acompanhando tanto o crescimento da população, quanto o da indústria e o aumento da qualidade de vida das populações. Nesse sentido, o desenvolvimento de tecnologias que reduzam as emissões de dióxido de carbono é fundamental a fim de se mitigar e diminuir as consequências climáticas relacionadas ao aumento da concentração de gases do efeito estufa na atmosfera (acidificação dos oceanos, aumento da temperatura da Terra, aumento do nível dos oceanos, perda de biodiversidade, etc.).

Nesse contexto, a indústria conta com o desenvolvimento científico, tecnológico e industrial de diversos processos de captura de carbono, destacando-se entre eles a absorção química por aminas e a adsorção física com carvão ativado. A absorção por aminas é a tecnologia mais madura e bem estabelecida na indústria. O uso do processo de adsorção via carvão ativado, por sua vez ainda demanda desenvolvimento tecnológico para seu emprego em larga escala.

Em relação à absorção por aminas, as principais vantagens que possibilitaram sua aplicação comercial são seu baixo custo, a alta taxa de regeneração e a elevada seletividade e eficiência na captura do CO<sub>2</sub>. Porém, algumas desvantagens acompanham essa tecnologia, como elevada demanda energética para regeneração das aminas, alta taxa de degradação e potencial corrosivo, além da toxicidade ao meio ambiente. Sob uma perspectiva industrial, essas limitações se refletem diretamente nos custos de uma planta e fazem com que métodos alternativos sejam amplamente discutidos e investigados. Ainda assim, apesar de possuir um maior impacto ambiental associado à formação de substâncias tóxicas e carcinogênicas e de ter um custo associado a reparos de corrosão e consumo de energia para regeneração das aminas, a tecnologia de absorção química por aminas se apresenta uma alternativa segura, conhecida e amplamente documentada em estudos e casos práticos, sendo considerada uma opção viável para a remoção de CO<sub>2</sub>.

Por outro lado, a adsorção com carvão ativado reúne características que a tornam uma tecnologia promissora para aplicações de captura de CO<sub>2</sub>, como elevada estabilidade térmica e química, alta taxa de regeneração do adsorvente e eficiência significativa na remoção do gás. Contudo, essa abordagem também apresenta grandes desafios, destacando-se a menor seletividade para CO<sub>2</sub> em correntes gasosas complexas, dificuldade de reprodutibilidade dos

materiais para adsorção e sensibilidade a contaminantes e impurezas. Apesar de diversos estudos relatarem desempenhos promissores em escalas laboratorial e piloto, esses desafios ainda configuram barreiras para a implementação comercial em grande escala, de modo que pesquisas contínuas são essenciais para otimizar as propriedades do carvão ativado e tornar a tecnologia mais competitiva.

Ao realizar uma comparação entre essas duas tecnologias de sequestro de dióxido de carbono, tem-se que diferentes parâmetros apresentam diferentes resultados. Como ambos métodos são sensíveis às condições da corrente a ser submetida à separação, é necessário fazer uma divisão entre os diferentes setores da indústria a fim de se estabelecer uma comparação mais coerente. Sob uma ótica de aplicabilidade do método considerando diferentes correntes, tem-se que a absorção por aminas é mais adequada nos casos em que há uma menor pressão parcial de  $\text{CO}_2$  e mais impurezas, uma vez que tem maior seletividade ao gás carbônico do que o carvão ativado. Por outro lado, a adsorção por carvão ativado é mais adequada em casos que a pressão parcial de  $\text{CO}_2$  é maior, como na indústria do etanol e da purificação de  $\text{H}_2$ .

Ao analisar a eficiência dessas duas tecnologias em diferentes condições de operação, tem-se que a absorção por aminas é favorecida em temperaturas mais altas, enquanto que a adsorção via carvão ativado não, uma vez que, por ser um processo exotérmico, é favorecida em temperaturas mais baixas. Em termos de pressão de operação, ambos métodos são bastante eficientes em pressões elevadas.

Outro fator essencial a ser considerado, e talvez o mais determinante sob a perspectiva comercial, refere-se aos custos envolvidos. Desde a construção da unidade de CCS/CCUS, até custos de transporte e armazenamento, mão de obra, manutenção, matéria-prima e tratamento de resíduos, todos esses aspectos devem ser considerados ao se realizar uma análise financeira de um projeto de captura de carbono. Nesse contexto, foi possível observar que existe muita pouca pesquisa acerca do custo associado ao uso da adsorção com carvão ativado industrialmente, o que mostra que essa tecnologia ainda está distante de ser aplicada em larga escala. Isso faz com que a empresa que, por ventura decida adotar esse método para uma planta, tenha que assumir um risco financeiro muito maior.

Considerando um viés de impactos ambientais, tem-se que a absorção por aminas é mais prejudicial do que a adsorção com carvão ativado, uma vez que sua degradação dá origem a substâncias como nitrosaminas que, além de tóxicas, são carcinogênicas e podem contaminar o solo e os lençóis freáticos. Nesse sentido, tem-se que a empresa que priorizar o impacto ambiental como fator determinante para escolha do método de captura de carbono a ser usado em sua planta de CCUS deve favorecer a adoção da adsorção via carvão ativado.

Por fim, conclui-se que, por serem afetadas por uma série de fatores, a escolha de qual tecnologia de separação de CO<sub>2</sub> deve ser aplicada na indústria, seja a absorção por aminas ou a adsorção por carvão ativado, não é uma escolha simples e deve ser avaliada caso a caso, uma vez que, mesmo dentro dos mesmos setores industriais, existem divergências de composição de corrente e de prioridades de cada empresa. Ainda assim, tem-se que, a fim de cumprir com os acordos mundiais estabelecidos e reduzir os impactos ambientais gerados pelo excesso de CO<sub>2</sub>, os métodos de captura de carbono devem continuar sendo alvo de pesquisa.

## 6 REFERÊNCIAS

AL-HAMED, Khaled H. M.; DINCER, Ibrahim. **A comparative review of potential ammonia-based carbon capture systems.** *Journal of Environmental Management* Academic Press, , 1 jun. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112357>. Acesso em: 6 jul. 25.

ALLANGAWI, Abdulrahman *et al.* **Carbon Capture Materials in Post-Combustion: Adsorption and Absorption-Based Processes.** *C-Journal of Carbon Research* Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), , 1 mar. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/c9010017>. Acesso em: 6 jul. 25.

ANDREW, Robbie M. A comparison of estimates of global carbon dioxide emissions from fossil carbon sources. **Earth System Science Data**, v. 12, n. 2, p. 1437–1465, 29 jun. 2020. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.5194/essd-12-1437-2020>. Acesso em: 6 jul. 25.

AZADI, Pourya *et al.* Nonlinear Prediction Model of Blast Furnace Operation Status. p. 217-222, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823377-1.50037-9>. Acesso em: 6 jul. 25.

BAINS, Praveen; PSARRAS, Peter; WILCOX, Jennifer. **CO<sub>2</sub> capture from the industry sector.** *Progress in Energy and Combustion Science* Elsevier Ltd, , 1 nov. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2017.07.001>. Acesso em: 6 jul. 25.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Conversor de Moedas.** Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/conversao>. Acesso em: 6 jul. 25.

BASTOS DE SANTANA, Milena *et al.* Captura de carbono: avanços e desafios das tecnologias no contexto energético. **Latin American Journal of Energy Research**, v. 11, n. 2, p. 264–282, 26 dez. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.21712/lajer.2024.v11.n2.p264-282>. Acesso em: 19 jun. 25.

BATAILLE, Chris *et al.* A review of technology and policy deep decarbonization pathway options for making energy-intensive industry production consistent with the Paris Agreement. **Journal of Cleaner Production**, v. 187, p. 960–973, jun. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.107>. Acesso em: 19 jun. 25.

CARY, Michael; STEPHENS, Heather M. Economic, environmental, and technical gains from the Kyoto Protocol: Evidence from cement manufacturing. **Resources Policy**, v. 91, p. 104926, abr. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.104926>. Acesso em: 19 jun. 25.

CHEN, Zhiheng *et al.* Extension of Japan's Prefectural Emission Accounting and Enrichment of Socioeconomic Data from 1990 to 2020. **Scientific Data**, v.11, n. 1, 1 dez. 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/s41597-024-03316-x>. Acesso em: 6 jul. 25.

CHUAH, Chong Yang; LAZIZ, Afiq Mohd. **Recent Progress in Synthesis and Application of Activated Carbon for CO<sub>2</sub> Capture**. **C-Journal of Carbon Research** Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), , 1 jun. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/c8020029>. Acesso em: 19 jun. 25.

CLIMATE WATCH. **Greenhouse gas emissions by sector**. Disponível em: <https://ourworldindata.org/grapher/ghg-emissions-by-sector>. Acesso em: 6 jul. 25.

DE KLEIJNE, Kiane *et al.* Limits to Paris compatibility of CO<sub>2</sub> capture and utilization. **One Earth**, v. 5, n. 2, p. 168–185, fev. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.01.006>. Acesso em: 20 jun. 25.

DEUTSCHE WELLE. Protocolo de Kyoto foi marco na proteção climática, mas insuficiente. **G1**, 16 fev. 2020. Disponível em: <https://g1.globo.com/mundo/noticia/2020/02/16/protocolo-de-kyoto-foi-marco-na-protecao-climatica-mas-insuficiente.ghtml>. Acesso em: 6 jul. 25.

DU, Jiaying *et al.* **Review on post-combustion CO<sub>2</sub> capture by amine blended solvents and aqueous ammonia**. **Chemical Engineering Journal** Elsevier B.V., , 15 maio 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.150954>. Acesso em: 20 jun. 25.

DZIEJARSKI, Bartosz *et al.* **CO<sub>2</sub> capture materials: a review of current trends and future challenges.** *Materials Today Sustainability* Elsevier Ltd, , 1 dez. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2023.100483>. Acesso em: 20 jun. 25.

FRIEDLINGSTEIN, Pierre *et al.* **Global Carbon Budget 2023.** , 11 out. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/essd-15-5301-2023>. Acesso em: 6 jul. 25.

FU, Lipei *et al.* **Research progress on CO<sub>2</sub> capture and utilization technology.** *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization* Elsevier Ltd, , 1 dez. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2022.102260>. Acesso em: 20 jun. 25.

GE, Mengpin; FRIEDRICH, Johannes; VIGNA, Leandro. **4 gráficos para entender as emissões de gases de efeito estufa por país e por setor.** Disponível em: <https://www.wribrasil.org.br/noticias/4-graficos-para-entender-emissoes-de-gases-de-efeito-estufa-por-pais-e-por-setor>. Acesso em: 6 jul. 25.

GLOBAL CARBON BUDGET. **Annual CO<sub>2</sub> Emissions - GCB.** Disponível em: <https://ourworldindata.org/grapher/annual-co2-emissions-per-country?time=2000..latest&country=USA~IND~CHN~DEU~BRA~RUS~IDN~JPN~IRN~KOR~SAU~CAN~MEX~TUR~ZAF>. Acesso em: 6 jul. 25.

GLOBAL CARBON BUDGET. **Annual CO<sub>2</sub> emissions (per capita) - GCB.** Disponível em: <https://ourworldindata.org/grapher/co-emissions-per-capita?time=2000..latest&country=USA~GBR~IND~CHN~ZAF~CAN~KEN~BRA~QAT~BHR~BRN~ARE~TTO~SAU~KWT>. Acesso em: 6 jul. 25.

GLOBAL CARBON BUDGET. **“Other Industry - GCB”.** Disponível em: <https://ourworldindata.org/grapher/co2-by-source?time=2000..latest>. Acesso em: 6 jul. 25.

GLOBAL CCS INSTITUTE. **Global Status of CCS 2024: Collaborating for a Net-Zero Future.** 2024. Disponível em: <https://www.globalccsinstitute.com/resources/global-status-report/>. Acesso em: 6 jul. 25.

GOUEDARD, C. *et al.* **Amine degradation in CO<sub>2</sub> capture. I. A review.** **International Journal of Greenhouse Gas Control** Elsevier Ltd, , 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2012.06.015>. Acesso em 20 jun. 25.

HOU, Rujing *et al.* Current status and advances in membrane technology for carbon capture. **Separation and Purification Technology**, v. 300, 1 nov. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121863>. Acesso em: 20 jun. 25.

IEA. **World Energy Statistics and Balances.** 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-statistics-and-balances>. Acesso em: 6 jul. 25.

IRLAM, Lawrence. **GLOBAL COSTS OF CARBON CAPTURE AND STORAGE 2017 Update.** 2017. Disponível em: <https://globalccsinstitute.com/archive/hub/publications/201688/global-ccs-cost-updatev4.pdf>. Acesso em: 6 jul. 25.

JIANG, L. *et al.* Post-combustion CO<sub>2</sub> capture from a natural gas combined cycle power plant using activated carbon adsorption. **Applied Energy**, v. 245, p. 1–15, 1 jul. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.006>. Acesso em: 6 jul. 25.

KEARNS, David; LIU, Harry; CONSOLI, Chris. **Technology Readiness and Costs of CCS.** 2021. Disponível em: <https://www.globalccsinstitute.com/resources/publications-reports-research/technology-readiness-and-costs-of-ccs/>. Acesso em: 6 jul. 25.

KUMAR, Santosh; SRIVASTAVA, Rohit; KOH, Joonseok. **Utilization of zeolites as CO<sub>2</sub> capturing agents: Advances and future perspectives.** **Journal of CO<sub>2</sub> Utilization** Elsevier Ltd, , 1 out. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2020.101251>. Acesso em: 20 ju. 25.

KUNDU, Shreyase *et al.* **A comprehensive review of enhanced CO<sub>2</sub> capture using activated carbon derived from biomass feedstock.** **RSC Advances** Royal Society of Chemistry, , 18 set. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/D4RA04537H>. Acesso em: 20 jun. 25.

KURAMOCHI, Takeshi *et al.* **Comparative assessment of CO<sub>2</sub> capture technologies for carbon-intensive industrial processes.** *Progress in Energy and Combustion Science*, fev. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2011.05.001>. Acesso em: 20 jun. 25.

LAI, Jia Yen; NGU, Lock Hei. HASHIM, Siti Salwa. A review of CO<sub>2</sub> adsorbents performance for diferente carbon capture technology processes conditions. **Greenhouse Gases: Science and Technology**, v. 11, n. 5, p. 1076-1117, 20 out. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ghg.2112>. Acesso em: 20 jun. 25.

LAU, Lee Chung; LEE, Keat Teong; MOHAMED, Abdul Rahman. Global warming mitigation and renewable energy policy development from the Kyoto Protocol to the Copenhagen Accord—A comment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 7, p. 5280–5284, set. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.04.006>. Acesso em: 20 jun.25.

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, p. 71–84, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2017.03.020>. Acesso em: 20 jun. 25.

LIU, Xuyi; BAE, Junghan. Urbanization and industrialization impact of CO<sub>2</sub> emissions in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 178–186, 20 jan. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.156>. Acesso em: 6 jul. 25.

LOCKWOOD, Toby. **Carbon capture and storage: What can we learn from the project track record?** 2024. Disponível em: <https://cdn.catf.us/wp-content/uploads/2024/07/16151022/CCS-Project-Track-Record-Report.pdf>. Acesso em: 6 jul. 25.

MADEJSKI, Paweł *et al.* **Methods and Techniques for CO<sub>2</sub> Capture: Review of Potential Solutions and Applications in Modern Energy Technologies.** *Energies*MDPI, , 1 fev. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en15030887>. Acesso em: 20 jun. 25.

MAIA, Roberto Gomes *et al.* Uso de ativadores com potássio para produção de carvão vegetal ativado: uma revisão. **CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES**, v. 17, n. 12, p. e12677, 13 nov. 2024. Disponível em: <https://ojs.revistacontribuciones.com/ojs/index.php/clcs/article/download/12677/7405/36585>. Acesso em: 6 jul. 25.

MANABE, Syukuro. **Role of greenhouse gas in climate change\*\***. **Tellus, Series A: Dynamic Meteorology and Oceanography** Taylor and Francis Ltd., , 1 jan. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/16000870.2019.1620078>. Acesso em: 6 jul. 25.

MANTRIPRAGADA, Hari C.; ZHAI, Haibo; RUBIN, Edward S. Boundary Dam or Petra Nova – Which is a better model for CCS energy supply? **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 82, p. 59–68, 1 mar. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2019.01.004>. Acesso em: 20 jun. 25.

MARCO BOSCOLO. Quais são os benefícios e os danos do dióxido de carbono? **National Geographic**, 3 jan. 2023. Disponível em: <https://www.nationalgeographicbrasil.com/meio-ambiente/2023/01/quais-sao-os-beneficios-e-os-danos-do-dioxido-de-carbono>. Acesso em: 6 jul. 25.

MARSHALL, Jonathan Paul. A Social Exploration of the West Australian Gorgon Gas, Carbon Capture and Storage Project. **Clean Technologies**, v. 4, n. 1, p. 67–90, 1 mar. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/cleantechnol4010006>. Acesso em: 6 jul. 25.

MARTIN, Risquez. CO2 emissions of all world countries JRC/IEA/PBL 2022 Report. 2022. Disponível em: [https://edgar.jrc.ec.europa.eu/booklet/CO2\\_emissions\\_of\\_all\\_world\\_countries\\_2022\\_report.pdf](https://edgar.jrc.ec.europa.eu/booklet/CO2_emissions_of_all_world_countries_2022_report.pdf). Acesso em: 6 jul. 25.

MAZARI, Shaukat A. *et al.* An overview of solvent management and emissions of amine-based CO2 capture technology. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 34, p. 129–140, 1 mar. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2014.12.017>. Acesso em: 20 jun. 25.

MENG, Fanzhi *et al.* **Research progress of aqueous amine solution for CO<sub>2</sub> capture: A review.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Elsevier Ltd, , 1 out. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112902>. Acesso em: 20 jun. 25.

METZ, Bert *et al.* **Chapter 3: Capture of CO<sub>2</sub>.** 2005. Disponível em: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs\\_wholereport-1.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs_wholereport-1.pdf). Acesso em: 6 jul. 25.

MONDAL, Monoj Kumar; BALSORA, Hemant Kumar; VARSHNEY, Prachi. Progress and trends in CO<sub>2</sub> capture/separation technologies: A review. *Energy*, v. 46, n. 1, p. 431–441, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.08.006>. Acesso em: 20 jun. 25.

MUKHERJEE, Alivia *et al.* **Review of post-combustion carbon dioxide capture technologies using activated carbon.** *Journal of Environmental Sciences (China)* Chinese Academy of Sciences, , 1 set. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2019.03.014>. Acesso em: 20 jun. 25.

OLABI, A. G. *et al.* **Large scale application of carbon capture to process industries – A review.** *Journal of Cleaner Production* Elsevier Ltd, , 15 ago. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132300>. Acesso em: 20 jun. 25.

OOI, Zhe Lun *et al.* Amine-based solvent for CO<sub>2</sub> absorption and its impact on carbon steel corrosion: A perspective review. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, v. 28, n. 5, p. 1357–1367, maio 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2020.02.029>. Acesso em: 20 jun. 25.

OROZCO-AGAMEZ, Juan *et al.* Effects of Composition, Structure of Amine, Pressure and Temperature on CO<sub>2</sub> Capture Efficiency and Corrosion of Carbon Steels using Amine-Based Solvents: a Review. *Chemical Engineering Transactions*, v. 96, p. 505–510, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3303/CET2296085>. Acesso em: 20 jun. 25.

OSMAN, Ahmed I. *et al.* **Recent advances in carbon capture storage and utilisation technologies: a review.** *Environmental Chemistry Letters* Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, , 1 abr. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01133-3>. Acesso em: 20 jun. 25.

OUYANG, Xiaoling; LIN, Boqiang. Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions during urbanization: A comparative study between China and Japan. *Journal of Cleaner Production*, v. 143, p. 356-368, fev. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.102>. Acesso em: 6 jul. 25.

PARDAKHTI, Maryam *et al.* Trends in Solid Adsorbent Materials Development for CO<sub>2</sub> Capture. *ACS Applied Materials and Interfaces*, v. 11, n. 38, p. 34533–34559, 25 set. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acsami.9b08487>. Acesso em: 20 jun. 25.

PETERS, Glen P. *et al.* Growth in emission transfers via international trade from 1990 to 2008. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 108, n. 21, p. 8903–8908, 24 maio 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1073/pnas.1006388108>. Acesso em: 6 jul. 25.

PETERS, Glen P. *et al.* **Rapid growth in CO<sub>2</sub> emissions after the 2008-2009 global financial crisis.** *Nature Climate Change*, jan. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nclimate1332>. Acesso em: 6 jul. 25.

PIRES DA MATA COSTA, Laura *et al.* **Capture and reuse of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) for a plastic circular economy: A review.** *Processes* MDPI AG. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/pr9050759>. Acesso em: 6 jul. 25.

PLAZA, Marta G.; MARTÍNEZ, Sergio; RUBIERA, Fernando. **Co<sub>2</sub> capture, use, and storage in the cement industry: State of the art and expectations.** *Energies* MDPI AG, , 1 nov. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en13215692>. Acesso em: 20 jun. 25.

RACKLEY, Stephen A. Absorption capture systems. *In: Carbon Capture and Storage.* [S.l.]: Elsevier, 2017. p. 115–149. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-812041-5.00006-4>. Acesso em: 20 jun. 25.

RAMOS, Pedro. **Fossil Fuels**. Disponível em: <https://depts.washington.edu/ps301a2019w/fossil-fuels/>. Acesso em: 6 jul. 25.

RANA, Ashish; ANDINO, Jean M. **A Review of Materials for Carbon Dioxide Capture**. *Catalysts* Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), , 1 mar. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/catal15030273>. Acesso em: 20 jun. 25.

REDAÇÃO NATIONAL GEOGRAPHIC BRASIL. O que é o Efeito Estufa e como ele ocorre? **National Geographic**, 22 jan. 2024. Disponível em: <https://www.nationalgeographicbrasil.com/meio-ambiente/2024/01/o-que-e-o-efeito-estufa-e-como-ele-ocorre>. Acesso em: 6 jul. 25.

RILEY, Nick. **The Weyburn CO<sub>2</sub> Monitoring Project-Economic modelling of CO<sub>2</sub> sequestration: Provisional report on the Great Plains Synfuels Plant (the CO<sub>2</sub> source)**. 26 sep. 2024. Disponível em: <https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/538087>. Acesso em: 6 jul. 25.

ROBERTSON, Bruce; MOUSAVIAN, Milad. **Carbon Capture to Serve Enhanced Oil Recovery: Overpromise and Underperformance**. 1 mar. 2022. Disponível em: <https://ieefa.org/resources/carbon-capture-serve-enhanced-oil-recovery-overpromise-and-underperformance>. Acesso em: 6 jul. 25.

ROTHENBERG, Gadi. A realistic look at CO<sub>2</sub> emissions, climate change and the role of sustainable chemistry. **Sustainable Chemistry for Climate Action**, v. 2, 1 jan. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scca.2023.100012>. Acesso em: 20 jun. 25.

ROUSSANALY, Simon *et al.* Towards improved cost evaluation of Carbon Capture and Storage from industry. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 106, 1 mar. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2021.103263>. Acesso em: 20 jun. 25.

SOO, Xiang Yun Debbie *et al.* **Advancements in CO<sub>2</sub> capture by absorption and adsorption: A comprehensive review**. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization* Elsevier Ltd, , 1 mar. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2024.102727>. Acesso em: 6 jul. 25.

SOUZA, Mariana de Mattos Viera Mello. **Processos Inorgânicos**. Rio de Janeiro: Synergia Editora, 2012.

SREENIVASULU, B. *et al.* **A journey into the process and engineering aspects of carbon capture technologies**. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** Elsevier Ltd, , 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.029>. Acesso em: 20 jun. 25.

WIHEEB, A. D. *et al.* Pressure Swing Adsorption Technologies for Carbon Dioxide Capture. **Separation and Purification Reviews**, v. 45, n. 2, p. 108–121, 2 abr. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/15422119.2015.1047958>. Acesso em: 20 jun. 25.

WILBERFORCE, Tabbi *et al.* Progress in carbon capture technologies. **Science of the Total Environment**, v. 761, 20 mar. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143203>. Acesso em: 20 jun. 25.

XU, Yixiang; ISOM, Loren; HANNA, Milford A. **Adding value to carbon dioxide from ethanol fermentations**. **Bioresource Technology**, maio 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.01.006>. Acesso em: 20 jun. 25.

XU, Yonghui *et al.* Enhancing CO<sub>2</sub> capture with K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>-activated carbon derived from peanut shell. **Biomass and Bioenergy**, v. 183, 1 abr. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107148>. Acesso em: 20 jun. 25.

YAO, Yuan *et al.* Quantifying carbon capture potential and cost of carbon capture technology application in the U.S. refining industry. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 74, p. 87-98, 1 jul. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2018.04.020>. Acesso em: 6 jul. 25.

ZAKKOUR, Paul. **CCS Roadmap for Industry - High-purity CO<sub>2</sub> sources**. 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.3717.8722>. Acesso em: 6 jul. 25.

ZHANG, Tongyao *et al.* **Advancing carbon capture in hard-to-abate industries: technology, cost, and policy insights.** **Clean Technologies and Environmental Policy** Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, , 1 jul. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10098-024-02810-5>. Acesso em: 20 jun. 25.