

**INSTITUTO FEDERAL**

Goiano

Campus Rio Verde

**BACHARELADO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**TÉCNICAS PARA A CAPTURA E CONVERSÃO DO DIÓXIDO DE CARBONO**

**THIAGO RODRIGUES SANTOS**

**Rio Verde - GO**

**2025**

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO**  
**CAMPUS DE RIO VERDE - GO**

**BACHARELADO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**TÉCNICAS PARA A CAPTURA E CONVERSÃO DO DIÓXIDO DE CARBONO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Federal Goiano – Campus de Rio Verde – GO, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientadora: Prof. Dr. Eloíza da Silva Nunes Viali

Rio Verde – GO

Março, 2025.

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do  
Programa de Geração Automática do Sistema Integrado de Bibliotecas do IF Goiano - SIBi**

S237 Rodrigues Santos, Thiago  
Técnicas de Captura e Conversão do Dióxido de Carbono /  
Thiago Rodrigues Santos. Rio Verde 2025.  
36f. il.  
Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dra. Eloiza da Silva Nunes Viali.  
Tcc (Bacharel) - Instituto Federal Goiano, curso de 0220354 -  
Bacharelado em Engenharia Química - Integral - Rio Verde  
(Campus Rio Verde).  
1. Looping Químico. 2. Membranas Zeolíticas. 3.  
Pré-combustão. 4. Pós-combustão. 5. Absorção e adsorção. I.  
Título.

## TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

### Identificação da Produção Técnico-Científica

Tese  
 Dissertação  
 Monografia – Especialização  
 TCC - Graduação  
 Produto Técnico e Educacional - Tipo:

Artigo Científico  
 Capítulo de Livro  
 Livro  
 Trabalho Apresentado em Evento

Nome Completo do Autor: Thiago Rodrigues Santos

Matrícula: 2020102203540120

Título do Trabalho: Técnicas de captura e conversão do dióxido de carbono

### Restrições de Acesso ao Documento

Documento confidencial:  Não  Sim, justifique: \_\_\_\_\_

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 23/04/2025

O documento está sujeito a registro de patente?  Sim  Não

O documento pode vir a ser publicado como livro?  Sim  Não

### DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O referido autor declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.



Documento assinado digitalmente  
**THIAGO RODRIGUES SANTOS**  
 Data: 21/04/2025 14:23:49-0300  
 Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Rio Verde, 18 / 04 / 2025.  
 Local Data

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Ciente e de acordo:



Documento assinado digitalmente  
**ELOIZA DA SILVA NUNES VIALI**  
 Data: 23/04/2025 16:00:49-0300  
 Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura do(a) orientador(a)



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Documentos 33/2025 - GGRAD-RV/DE-RV/CMPRV/IFGOIANO

**THIAGO RODRIGUES SANTOS**

**TÉCNICAS PARA A CAPTURA E CONVERSÃO DO DIÓXIDO DE CARBONO**

Trabalho de Curso DEFENDIDO e APROVADO em 13 de março de 2025, pela Banca Examinadora constituída pelos membros:

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Eloiza da Silva Nunes Viali  
Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde  
Orientadora  
*(assinado eletronicamente)*

Prof. Dr. Rogério Favareto  
Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde  
Membro Interno  
*(assinado eletronicamente)*

Prof. Dr. Wesley Renato Viali  
Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde  
Membro Interno  
*(assinado eletronicamente)*

Documento assinado eletronicamente por:

- **Eloiza da Silva Nunes Viali**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 13/03/2025 15:41:21.
- **Rogério Favareto**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 13/03/2025 15:43:12.
- **Wesley Renato Viali**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 13/03/2025 15:44:19.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 14/02/2025. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 676400

Código de Autenticação: d053998249



INSTITUTO FEDERAL GOIANO

Campus Rio Verde

Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, 01, Zona Rural, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970

(64) 3624-1000

## DEDICATÓRIA

Aos meus pais, pelo incansável incentivo, que com amor e renúncia, me guiaram e apoiaram, em cada passo, em cada instante. Agradeço por terem me dado asas, para voar alto e desbravar o mundo da química, da ciência. Ao meu irmão Erick, companheiro de jornada, amigo de todas as horas, e crítico ferrenho nos momentos necessários. Seu incentivo e apoio foram combustíveis para minha perseverança. À minha esposa Ana Clara, musa inspiradora, amor que me completa. Seu sorriso ilumina meus dias e me motiva a seguir em frente, sempre. A vocês, minha família, dedico este trabalho, fruto de muito esforço e estudo. Que ele seja um testemunho de minha gratidão e amor, eternamente.

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, que me ensinaram a beleza da química não nos tubos de ensaio, mas na alquimia do afeto, na mistura única de seus olhares e sorrisos. Que me mostraram que a vida, como um experimento complexo, exige doses precisas de perseverança, cuidado e amor. A eles, que me deram a fórmula da felicidade, dedico este trabalho. Aos amigos, catalisadores de alegrias, bases de apoio nos momentos de acidez, cada um com sua valência única, formando ligações que desafiam o tempo e a distância. A eles, que me ensinaram a compartilhar elétrons e a celebrar a diversidade, dedico este trabalho.

A Deus, a energia que impulsiona o universo, à ordem que emerge do caos, a essa incógnita que a ciência busca desvendar, dedico este trabalho. Que ele seja mais um passo na busca por compreender o mundo, por desvendar os mistérios da matéria e da existência.

Este trabalho, como uma molécula complexa, é formado por átomos de conhecimento, unidos por ligações de esforço e paixão. Que ele possa contribuir para a ciência, para a sociedade, e para a minha própria evolução. Que ele seja um testemunho da minha busca por conhecimento, um reflexo da minha gratidão e um tributo àqueles que me ajudaram a construir esta estrutura.

## RESUMO

SANTOS, Thiago Rodrigues. **Técnicas para Captura e Conversão de Dióxido de Carbono**. 2025. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Química) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Rio Verde, 2025.

Este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sobre técnicas de captura e conversão do dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), um dos principais gases de efeito estufa. A pesquisa aborda diferentes processos de remoção e reutilização do  $\text{CO}_2$ , avaliando aspectos como custo-benefício, eficiência, sustentabilidade e impactos econômicos. A concentração atmosférica de  $\text{CO}_2$  tem aumentado significativamente desde a Revolução Industrial, impulsionando a busca por soluções tecnológicas para mitigar seus efeitos no aquecimento global. As principais estratégias de captura analisadas incluem os processos de adsorção e absorção, que podem ser físicos ou químicos, além de métodos baseados em oxidação, pré-combustão, pós-combustão e looping químico. A conversão do  $\text{CO}_2$  capturado também é explorada, destacando-se alternativas como a produção de combustíveis sintéticos, carbonatação mineral e síntese de produtos químicos de valor agregado. Apesar dos avanços na captura e conversão de  $\text{CO}_2$ , desafios tecnológicos e econômicos ainda limitam sua implementação em larga escala. A pesquisa ressalta a importância do desenvolvimento de catalisadores mais eficientes e da adoção de políticas públicas que incentivem a aplicação dessas tecnologias. O estudo contribui para o entendimento das possibilidades de mitigação das emissões de carbono e sua inserção em um modelo de economia sustentável.

**Palavras-chave:** captação de  $\text{CO}_2$ , efeito estufa, aquecimento global

## ABSTRACT

This paper presents a bibliographic review of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) capture and conversion techniques, addressing one of the primary greenhouse gases. The research examines various CO<sub>2</sub> removal and reuse processes, evaluating aspects such as cost-benefit ratios, efficiency, sustainability, and economic impacts. The atmospheric concentration of CO<sub>2</sub> has increased significantly since the Industrial Revolution, driving the search for technological solutions to mitigate its effects on global warming. The main capture strategies analyzed include adsorption and absorption processes, which can be physical or chemical, as well as methods based on oxy-combustion, pre-combustion, post-combustion, and chemical looping combustion. The conversion of captured CO<sub>2</sub> is also explored, highlighting alternatives such as synthetic fuel production, mineral carbonation, and the synthesis of value-added chemicals. Despite advancements in CO<sub>2</sub> capture and conversion, technological and economic challenges still limit their large-scale implementation. The research emphasizes the importance of developing more efficient catalysts and adopting public policies that incentivize the application of these technologies. This study contributes to the understanding of carbon emission mitigation possibilities and their integration into a sustainable economic model.

**Keywords:** CO<sub>2</sub> capture, greenhouse effect, global warming.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|      |                                       |
|------|---------------------------------------|
| CCS  | <i>Carbon Capture and Storage</i>     |
| CCU  | <i>Carbon Capture and Utilization</i> |
| CLC  | Combustão por Looping Químico         |
| DEA  | Dietanolamina                         |
| DGA  | Diglicolamina                         |
| DMF  | Dimetilformamida                      |
| GEE  | Gases de Efeito Estufa                |
| MDEA | Metildietonolamina                    |
| MEA  | Monoetanolamina                       |
| MOFs | <i>Metal-Organic Frameworks</i>       |
| MW   | Megawatts                             |
| PZ   | Piperazina                            |
| TEA  | Trietanolamina                        |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|             |                                   |
|-------------|-----------------------------------|
| $K_{CO_2}$  | Solubilidade específica do $CO_2$ |
| $C_{CO_2}$  | Concentração de $CO_2$            |
| $P_{CO_2}$  | Pressão parcial de $CO_2$         |
| $K_{HCO_2}$ | Constante de Henry para o $CO_2$  |

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Concentração de gases do Efeito Estufa

Figura 2 Fluxograma de captura de CO<sub>2</sub> por oxidação

Figura 3 Relação entre oxidação, eletrólise e metanação

## SUMÁRIO

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | INTRODUÇÃO.....   | 15 |
| 2     | OBJETIVOS.....  | 16 |
| 2.1   | OBJETIVO GERAL.....   | 16 |
| 2.2   | OBJETIVO ESPECÍFICO.....  | 16 |
| 3     | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....                                      | 16 |
| 3.1   | O ACÚMULO DE CO <sub>2</sub> NA ATMOSFERA.....                  | 16 |
| 3.2   | TÉCNICAS DE CAPTURA DE CO <sub>2</sub> .....                    | 18 |
| 3.2.1 | Classificações das técnicas de captura de CO <sub>2</sub> ..... | 18 |
| 3.2.2 | Oxicombustão.....   | 19 |
| 3.2.3 | Pré-combustão.....  | 21 |
| 3.2.4 | Pós-combustão.....  | 22 |
| 3.2.5 | Looping Químico.....  | 23 |
| 3.3   | MECANISMOS DE CAPTURA DE CO <sub>2</sub> .....                  | 23 |
| 3.3.1 | Captura por absorção.....                                       | 24 |
| 3.3.2 | Captura por Adsorção.....                                       | 26 |
| 3.4   | TECNOLOGIAS DE CAPTURA.....                                     | 27 |
| 3.4.1 | Membranas zeolíticas.....                                       | 27 |
| 3.4.2 | Líquidos iônicos aplicados a estruturas organometálicas.....    | 28 |
| 3.5   | TÉCNICAS DE CONVERSÃO.....                                      | 28 |
| 4     | CONCLUSÃO.....  | 29 |
|       | REFERÊNCIAS.....  | 31 |

## 1 INTRODUÇÃO

O crescente aumento das emissões de dióxido de carbono e  $\text{CO}_2$  (g) seus impactos ambientais têm impulsionado a busca por tecnologias capazes de capturar esse gás e transformá-lo em produtos de valor agregado. Este trabalho de revisão bibliográfica analisa as principais técnicas de captura e conversão de  $\text{CO}_2$ , destacando suas vantagens, limitações e potencial para a mitigação das mudanças climáticas.

Inicialmente, as tecnologias de captura de  $\text{CO}_2$  podem ser classificadas conforme o estágio do processo de combustão em pré-combustão, pós-combustão e oxicomustão (CUÉLLAR-FRANCA; AZAPAGIC, 2015). Na pré-combustão, a captura ocorre antes da combustão, por meio da gaseificação da matéria orgânica e da subsequente reação de deslocamento gás-água, que converte o monóxido de carbono em  $\text{CO}_2$  e hidrogênio (DINCER et al., 2018; MOSCA et al., 2020). Em contrapartida, a pós-combustão realiza a captura de  $\text{CO}_2$  dos gases de exaustão, utilizando técnicas como a absorção química com solventes (MEA) e a adsorção em materiais sólidos, embora estas apresentem desafios relacionados ao consumo energético e à seletividade (PETRAKOPOULOU et al., 2012; REYNOLDS et al., 2012). Já a oxicomustão, ao substituir o ar por oxigênio puro ou enriquecido, possibilita uma combustão mais limpa, resultando em uma corrente de gases composta predominantemente por  $\text{CO}_2$  e vapor d'água, o que facilita sua separação e posterior uso (HUA et al., 2023; FILHO, 2021).

No campo da captura por absorção, a técnica pode ser dividida em absorção física e química. A absorção física baseia-se na utilização de um solvente inerte, regida pela Lei de Henry, que estabelece uma relação linear entre a solubilidade do  $\text{CO}_2$  e sua pressão parcial (PLAZA et al., 2016; DZIEJARSKI et al., 2023). Já a absorção química utiliza solventes à base de aminas – como MEA, DGA, DEA, TEA, MDEA e piperazina –, promovendo reações que resultam na formação de intermediários como os zwitterions, e que possibilitam a captura de  $\text{CO}_2$  com alta seletividade, embora requeiram custos energéticos elevados para regeneração (HE et al., 2023; AHMED et al., 2020; LUIS, 2016).

Adicionalmente, técnicas de adsorção, tanto física quanto química, empregam materiais como carvões ativados, Zeólitas e estruturas organometálicas (MOFs). No caso da adsorção física, as interações baseadas em forças de Van der Waals e London são as responsáveis pela retenção do  $\text{CO}_2$  na superfície do adsorvente, permitindo regeneração com baixo consumo energético, embora a seletividade, especialmente em relação ao nitrogênio, possa ser limitada (RAGANATI et al., 2021; ABD et al., 2020). Outras abordagens, como a separação por membranas e a separação criogênica, também oferecem soluções interessantes para a captura

de CO<sub>2</sub>, cada uma com suas particularidades em termos de eficiência, seletividade e custos operacionais (SHEN et al., 2022; EBNER et al, 2009).

No que diz respeito à conversão do, a CO<sub>2</sub> elevada estabilidade, estrutura linear e inércia cinética da molécula impõem desafios significativos (LUO et al, 2024). Entretanto, avanços em catalisadores têm permitido a transformação do CO<sub>2</sub> em produtos de maior valor, como combustíveis sintéticos (por meio da hidrogenação catalítica), carbonatos cíclicos (através da cicloadição com epóxidos ou dióis), e carbonatação mineral, que converte o CO<sub>2</sub> em carbonatos estáveis (TEIXEIRA, 2022; TYAGI et al., 2023; ROMANOV et al., 2015).

Portanto, a integração das diversas técnicas de captura e conversão de CO<sub>2</sub> oferece uma abordagem abrangente para a mitigação das mudanças climáticas, transformando um gás de efeito estufa em um recurso valioso para a indústria e a geração de energia. Este trabalho revisa criticamente essas tecnologias, avaliando seus desafios técnicos e econômicos, e discutindo o potencial de cada abordagem para contribuir com uma economia de baixo carbono e sustentável.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Explicar as técnicas de captura e conversão do dióxido de carbono.

### 2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Analisar e comparar as principais tecnologias de captura e conversão do dióxido de carbono, avaliando seus mecanismos, eficiência e aplicabilidade industrial.

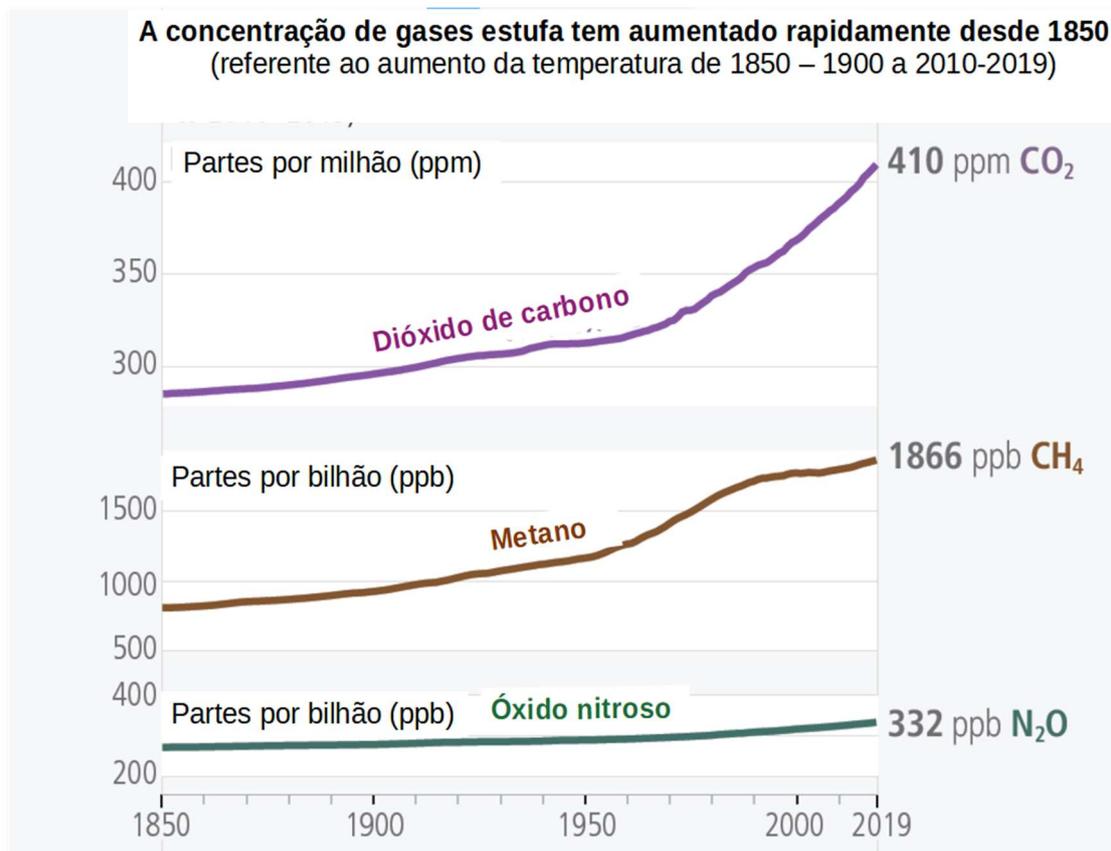
## 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1 O ACÚMULO DE CO<sub>2</sub> NA ATMOSFERA

Muito se discute a respeito dos impactos gerados pela utilização crescente de combustíveis fósseis não renováveis como o petróleo, sobretudo ao que se refere ao aumento da temperatura global em decorrência da progressiva emissão de poluentes atmosféricos. O desequilíbrio do ciclo de carbono culminou em um aumento de 35% em concentração de CO<sub>2</sub> (g) desde a revolução industrial (FOLGER, 2009). Estima-se que a concentração média de dióxido de carbono se manteve constante na faixa de 260-280 ppm por 10 mil anos anteriores

a 1850. No entanto, uma variação expressiva de cerca de 130 ppm elevou a concentração deste gás na atmosfera para 410 ppm, tal como pode ser observado na Figura 1 (IPCC, 2023; FOLGER, 2009).

**Figura 1** - Concentração de gases de efeito estufa



**Fonte:** Adaptado de IPCC (2023).

Além disso, o início das emissões de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera está fortemente relacionado ao avanço da Revolução industrial que se iniciou no século XVIII e intensificou-se no XIX (BROSE, 2010; MEHMOOD et al., 2024). Este período é marcado pelo uso massivo de combustíveis fósseis como o carvão, petróleo e gás natural que foram responsáveis pelo incremento na energia térmica global.

Neste contexto deve ser enfatizado o desequilíbrio do estado dos ecossistemas causados pelo agravamento do efeito estufa. Dentre estes ambientes são identificadas regiões polares como áreas de mudanças climáticas extremas afetadas pelo crescente aquecimento. Ademais, dados indicam que o aquecimento dos oceanos corresponde a 91% da variação de temperatura que acometeu o sistema climático, enquanto o aquecimento de superfícies, camadas de gelo e da atmosfera corresponderam a 5%, 3% e 1% respectivamente. Além disso, estima-se que a superfície global expressou um aumento de 1,1°C entre 1850-1900 (IPCC, 2023). Em decorrência do supracitado, fica evidente as consequências provenientes do desequilíbrio do ciclo de carbono (GADZHIEV et al., 2023). Nesse contexto, é sabido que a atividade

foto-sintética tornou possível a sustentação do ciclo de carbono ao longo de 10.000 anos devido a autorregulação das concentrações de CO<sub>2</sub> (g) na atmosfera promovidas pelas plantas. Este mesmo mecanismo regulador foi abordado por pesquisas que indicaram que durante o verão no hemisfério norte a concentração deste CO<sub>2</sub> (g) é reduzida em decorrência da elevação da demanda vegetal por dióxido de carbono que promove seu decaimento na faixa de 5 a 15 ppm. No entanto, durante o outono a quantidade assimilada é novamente emitida em decorrência do ciclo natural do carbono (DALY, 1989). Portanto fica evidente que a regulação natural não é suficiente para corrigir o aumento da concentração deste óxido ácido na atmosfera gerada pela intervenção humana. Para contrabalançar esta desordem ambiental e climática faz-se necessária a implementação de técnicas de captura de CO<sub>2</sub> (g). No entanto, apenas capturar este gás não é suficiente para mitigar os impactos ambientais explicados anteriormente. Em decorrência da discussão a respeito do destino adequado para este gás duas soluções foram propostas: Capturar o dióxido de carbono e armazená-lo em reservatórios geológicos ou convertê-lo em produtos. A ideia de removê-lo da atmosfera possibilita reduzir os impactos causados pela combustão de combustíveis fósseis, no entanto os riscos associados a vazamentos são preocupantes. Desta forma, pesquisas foram desenvolvidas para possibilitar a implementação de técnicas de utilização do gás capturado que apliquem a sua conversão em produtos com valor agregado de forma a promover o fechamento do ciclo de consumo e emissão de dióxido de carbono.

## 3.2 TÉCNICAS DE CAPTURA DE CO<sub>2</sub>

### 3.2.1 Classificações das técnicas de captura de CO<sub>2</sub>

A etapa de conversão deve ser precedida pela de captura do dióxido de carbono para que esta possa servir de matéria prima para os processos que irão se suceder. Embora o dióxido de carbono possa ser capturado diretamente do ar atmosférico este processo demanda de mais energia em comparação a captura realizada em gases de exaustão referentes a atividade industrial de termelétricas e plantas químicas. Esta divergência de custos energéticos ocorre em decorrência da menor concentração de dióxido de carbono atmosférico em relação a corrente gasosa proveniente da atividade industrial (LINZENICH et al, 2019), tal como afirma BABAR (2020) “as principais tecnologias de captura de carbono que têm sido usadas para capturar CO<sub>2</sub>

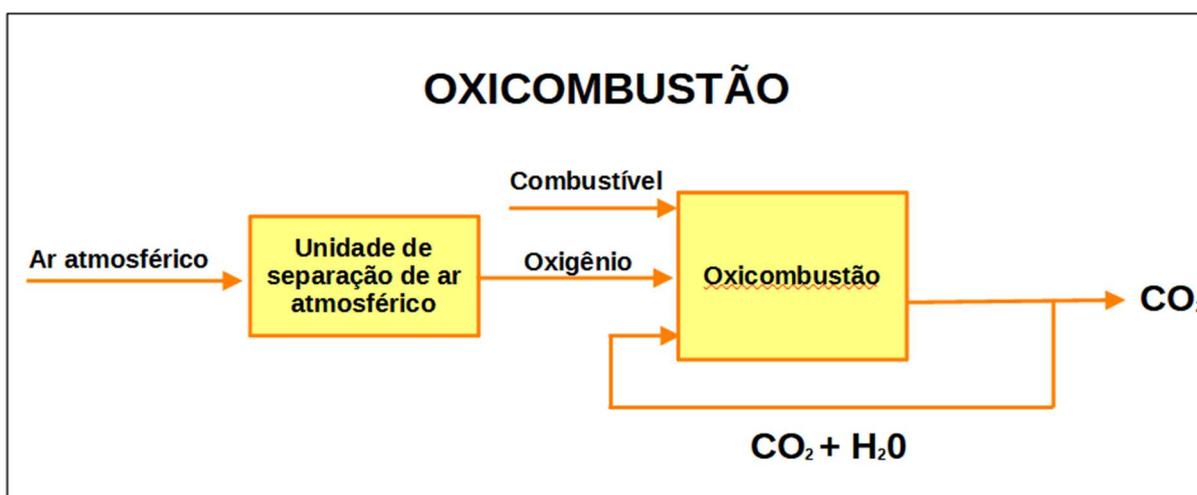
são injeção de água, Monoetanolamina (MEA) ou Dimetilformamida (DMF), absorção, adsorção, separação por membrana e captura criogênica de CO<sub>2</sub>".<sup>1</sup>

Além disso, estas mesmas tecnologias de captura podem ser classificadas em pré-combustão, pós-combustão e oxicombustão (CUÉLLAR-FRANCA; AZAPAGIC, 2015).

### 3.2.2 Oxicombustão

A oxicombustão pode ser entendida como uma modificação derivada do método de pós-combustão, que promove a combustão em uma atmosfera concentrada com o comburente em vez de ar (OLAJIRE, 2010), como observado na Figura 2.

Figura 2 – Fluxograma de captura de CO<sub>2</sub> por oxicombustão.



Fonte: Adaptado de CUÉLLAR-FRANCA; AZAPAGIC, (2015)

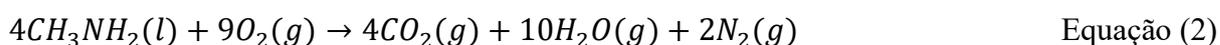
O processo de oxicombustão é uma das técnicas que promovem a redução das emissões do CO<sub>2</sub> a partir da utilização de oxigênio puro como agente oxidante para produzir uma maior concentração deste óxido nos gases de exaustão. Dentre as possíveis aplicações a oxicombustão pode ser aplicada em turbinas a gás e por isso é considerada uma das soluções mais promissoras para a captura do CO<sub>2</sub> em usinas termelétricas. Isto porque os ciclos de oxicombustão auxiliam no desenvolvimento de turbinas com baixa emissão de dióxido de carbono (DARABKHANI et al. 2023). Além disso, embora a viabilidade econômica do processo ainda seja incerta, a literatura sugere que há a possibilidade de implementação desta técnica na indústria cimenteira (PORTILLO, E. et al. 2021).

<sup>1</sup> The leading Carbon capture technologies that have been used for capturing CO<sub>2</sub> are water injection, MonoEthnaolAmine (MEA) or DiMethylForm (DMF), absorption, adsorption, membrane separation, and cryogenic CO<sub>2</sub> capture.

Nesse contexto, a combustão completa do combustível possibilita a geração de uma maior quantidade de dióxido de carbono e ao mesmo tempo a redução dos óxidos de nitrogênio na massa gasosa resultante, tal como pode ser observado na Equação 1 que descreve a oxidação de hidrocarbonetos (VALLERO, 2020):

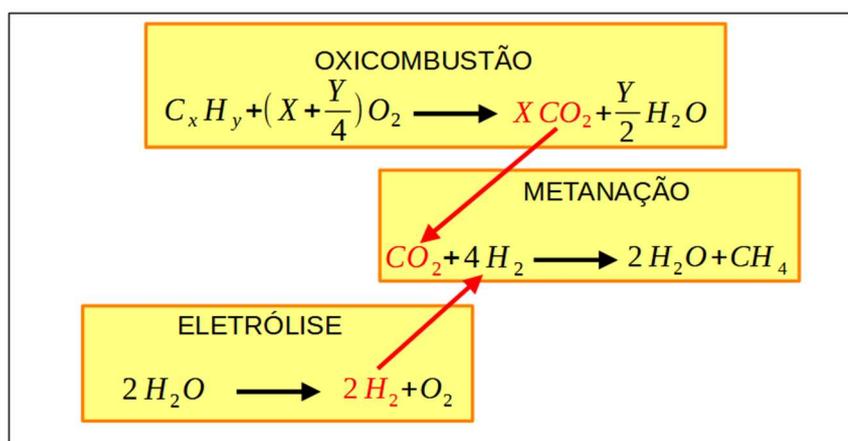


No entanto, a combustão de hidrocarbonetos com nitrogênio em sua composição pode produzir gás nitrogênio como subproduto da oxidação da matéria orgânica como observado na Equação 2 (VALLERO, 2020).



Devido a este fato, o  $N_2$  do ar destinado a usos industriais é removido de forma a promover uma combustão que produza majoritariamente subprodutos contendo 90% de  $CO_2$ . (BOATENG, 2016). Ao contornar o problema da geração de compostos indesejáveis e tóxicos provenientes da combustão incompleta, tais como o monóxido de carbono e óxidos de nitrogênio, a oxicombustão permite produzir gases que apresentem baixos custos em processos de purificação e separação tais como o referido  $CO_2$  (g) (ADAMS, 2014). As principais desvantagens associadas a oxicombustão são o alto custo relacionado a produção de oxigênio puro e as altas temperaturas geradas pela queima (ADAMS, 2014). Nesse contexto, em decorrência da dependência por oxigênio puro para gerar a combustão eficiente, esta técnica necessita de meios para suprir esta demanda. Dessa forma a eletrólise e a oxicombustão surgem como alternativas viáveis pois permitem uma complementação interessante com o processo de metanação. Isto porque a reação de metanação necessita de gás hidrogênio e dióxido de carbono, ambos fornecidos pelo processo de eletrólise e oxicombustão respectivamente, como demonstrado na Figura 3 (GARCÍA-LUNA; ORTIZ, 2023).

Figura 3 – Relação entre oxicombustão, eletrólise e metanação.



.Fonte: Autoria própria.

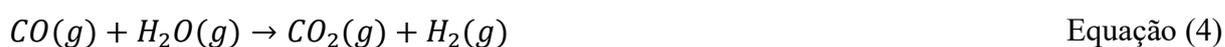
Após a combustão em atmosfera com alta concentração em  $O_2(g)$  a captura do dióxido de carbono pode ser sucedida pela condensação da água acompanhada da compressão e armazenamento do gás (MUSTAFA et al., 2020).

### 3.2.3 Pré-combustão

O processo de gaseificação é aplicado em usinas elétricas para a produção de energia a partir da combustão do gás hidrogênio, produto do processamento do gás de síntese. No entanto, este processo apresentou impactos ambientais alarmantes em decorrência da geração de gases de efeito estufa. Para solucionar este problema a referida técnica oferece uma solução pela captura do dióxido de carbono anteriormente a combustão, caracterizada pela conversão do combustível no gás de síntese e na captura do  $CO_2(g)$  produzido após a etapa de reforma a vapor. Além disso, a vazão de gás de exaustão descarbonizado constituído pela mistura de  $CO_2(g)$  e  $H_2(g)$  são então aplicadas na geração de energia elétrica por turbinas (MUKHERJEE et al., 2019; RAMESH et al., 2021). Este processo recebe essa denominação devido à remoção do  $CO_2$  e à posterior combustão limpa do hidrogênio no fluido descarbonizado. (CAPODAGLIO et al. 2019). O processo pode ser dividido em duas etapas principais, a reforma a vapor e o deslocamento gás-água (HUA et al., 2023). Esta primeira etapa é aplicada em usinas elétricas e se baseia na gaseificação de compostos carbonáceos. A oxidação parcial destes combustíveis na presença de uma proporção estequiométrica baixa de oxigênio a altas pressões (de 30 a 70 atm) promove a produção do gás de síntese constituído principalmente por gás hidrogênio e monóxido de carbono. Esta reação é representada pela equação 3 abaixo (TIAN et al., 2022):



Após a produção do gás de síntese a corrente gasosa é direcionada a um ciclone que realiza a separação de partículas sólidas, tais como cinzas e demais impurezas, para então ser direcionado ao reator de deslocamento gás-água (VAZIRI et al., 2024). Dessa forma a reação se procede em um reator adiabático de leito fixo que converte monóxido de carbono obtido na etapa antecedente em dióxido de carbono e gás hidrogênio, visualizado na Equação 4 (MOSCA et al., 2020). A etapa de deslocamento gás-água tem como função aumentar a extração de  $CO_2$  a partir da conversão do monóxido de carbono contido no gás de síntese (RAMESH et al., 2021).



Em seguida o gás de síntese é tratado por um dessulfurizador que realiza a remoção de óxidos de enxofre para evitar futuras contaminações (VAZIRI et al., 2024). Tendo em vista que a concentração de CO<sub>2</sub> produzida pelo reator equivale de 15 a 60% em volume de base seca, esta alta proporção aliada as pressões elevadas favorecem a captura do gás (IPCC, 2023). Mediante ao supracitado a pré-combustão é considerada uma tecnologia que consome baixa energia e apresenta uma eficiência de separação equivalente a 90% do CO<sub>2</sub>(g) (HUA et al., 2023). Ao final do processo, a separação do CO<sub>2</sub> é procedida por solventes como o Selexol (absorção física) ou por metanolamina (absorção química) (CUÉLLAR-FRANCA; AZAPAGIC, 2015).

#### 3.2.4 Pós-combustão

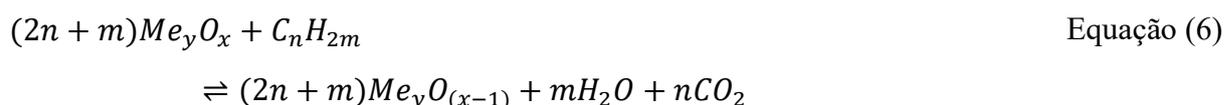
A pós-combustão difere da pré-combustão pela retirada do dióxido de carbono da corrente de gases após a oxidação do combustível. Após a geração dos gases de combustão a captura do CO<sub>2</sub> (g) é efetuada pela ação de solventes, e em alguns casos complementada com a separação por membranas (ALMARAZ; AZZARO-PANTEL, 2017). Dentre as vantagens deste sistema de captura de CO<sub>2</sub> (g), a mais importante está relacionada ao fato de muitas das fontes emissoras poderem ser equipadas com sistemas de separação, No entanto, este processo apresenta uma alta demanda energética o que culmina na redução da eficiência dos ciclos de geração de energia em usinas elétricas. O requerimento de uma quantidade maior de energia se deve ao calor necessário a regeneração do solvente e a geração de vapor para o processo de *Stripping* (IPCC, 2023). Tendo isto em vista, a escolha do solvente é de fundamental importância para o processo de captura e depende de fatores como composição, concentração de CO<sub>2</sub> (g) e pressão do gás de combustão (PAKZAD et al., 2020). A etapa de absorção por solventes é realizada em complemento ao aquecimento e despressurização para liberar a corrente com alta concentração de CO<sub>2</sub> (HADI MOLESH et al., 2019). As impurezas geradas pela oxidação de combustíveis - dentre elas estão óxidos de enxofre e de nitrogênio, ácido clorídrico e fluorídrico, mercúrio e demais metais e contaminantes tanto orgânicos como inorgânicos - são de extrema importância para o dimensionamento e orçamento de plantas que implementam esta tecnologia (IPCC, 2023). Tendo em vista a estratégia de tratamento aplicada a corrente gasosa resultante da separação de gases, RACKLEY (2010) afirma que a pós-combustão é, portanto, uma extensão do tratamento para óxidos de nitrogênio e enxofre.

### 3.2.5 Looping Químico

O Looping químico pode ser classificado como sendo uma técnica que se enquadra no contexto de pré-combustão, oxicomustão ou mesmo como uma quarta classificação dentre as citadas neste trabalho (DUBEY; ARORA, 2022). Nesse contexto, a tecnologia de looping químico é composto por leitos fluidizados conectados entre si cuja base de funcionamento consiste na utilização de um óxido metálico para a oxidação do combustível (FINNEY et al., 2019). A função deste óxido que preenche o leito do reator é fornecer o oxigênio necessário à reação (THAKUR, I. S. et al., 2018). No que se refere a viabilidade energética e econômica do processo, MATZEN (2017) acrescenta que:

A combustão por loop químico (CLC) tem ganhado considerável espaço na produção de energia devido à sua captura inerente de carbono com uma penalidade mínima de energia. A escolha do óxido metálico utilizado como transportador de oxigênio (OC) no CLC tem um impacto substancial na eficiência geral da produção de energia, bem como no custo final por MW.<sup>2</sup>

Isto porque a eficiência da combustão está ligada ao tipo de transportador de oxigênio escolhido para o processo. As reações de oxidação (Equação 5) e redução (Equação 6), sendo esta última ligada a etapa de recuperação, são apresentadas a seguir (DUBEY; ARORA, 2022).



Ao se comparar a técnica de pré-combustão com a de looping químico quanto a eficiência de captura de dióxido de carbono em usinas termelétricas a gás, foi constatado que esta última demonstrou uma vantagem de 2,8% em comparação a primeira. (LEUNG et al., 2014) e (DUBEY; ARORA, 2022).

## 3.3 MECANISMOS DE CAPTURA DE CO<sub>2</sub>

---

<sup>2</sup> Chemical looping combustion (CLC) has gained considerable ground in energy production due to its inherent carbon capture with a minimal energy penalty. The choice of metal oxide used as an oxygen carrier (OC) in CLC has a substantial weight on the overall efficiency of energy production as well as the ultimate cost per MW.

### 3.3.1 Captura por absorção

#### 3.3.1.1 Absorção física

A técnica de absorção física se fundamenta na utilização de um solvente inerte que não promova uma reação química com o dióxido de carbono diluído em seu conteúdo. Este processo é descrito pela Lei de Henry, que estabelece uma relação linear entre a solubilidade em solvente líquido e a pressão parcial (PLAZA et al., 2016).

De acordo com esta lei a concentração de gás dissolvido no líquido absorvente é diretamente proporcional a pressão parcial do gás acima do líquido em condições de equilíbrio gás-líquido (DZIEJARSKI et al., 2023). A exemplo de um dos solventes mais amplamente aplicados no processo de absorção física podemos citar o selexol, composto por polietileno glicol dimetil éter. Este solvente é amplamente aplicado a pré-combustão para a captura do CO<sub>2</sub>. A equação física que descreve o processo pode ser observada abaixo juntamente à constante de equilíbrio associada (TOHID; MEIHONG, 2019).



$$K_{eq} = \frac{[CO_2(Selexol)]}{CO_2(g)} \quad \text{Equação (8)}$$

$$K_H = \frac{C_{CO_2}}{P_{CO_2}} \quad \text{Equação (9)}$$

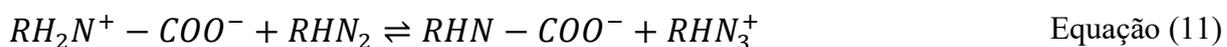
Desta forma, de acordo com a equação 8 descrita acima, observa-se que a constante de Henry (  $K_H$  ) expressa a proporção direta entre a concentração de dióxido de carbono (  $C_{CO}$  ) que se solubiliza por unidade de pressão parcial de CO<sub>2</sub> (  $P_{CO_2}$  ) à temperatura e pressão contante em solventes que não proporcionem uma interação química com o gás, como é o caso do Selexol anteriormente descrito. Em outras palavras a capacidade do solvente é diretamente proporcional a pressão aplicada (VALLERO, 2014).

A exemplo da influência da pressão parcial do dióxido de carbono, pesquisas indicam que a absorção física é economicamente inviável para pressões parciais de abaixo de 15% vol em gases de exaustão (WANG et al., 2011).

### 3.3.1.2 Absorção química

A absorção química é o processo no qual um gás é absorvido por um solvente a partir de reações químicas e pelo transporte de massa (KORONAKI et al., 2015). Este mecanismo é baseado na reação de neutralização entre o CO<sub>2</sub> considerado um óxido ácido, e um solvente líquido básico (HE et al., 2023). Nesse contexto as alcanoaminas são solventes comumente empregadas pelo processo de absorção e incluem a monoetanolamina (MEA), a diglicolamina (DGA), dietanolamina (DEA), trietanolamina (TEA), metildietanolamina (MDEA) e a piperazina (PZ) (ABU-ZAHRA et al., 2007; BAHRUN et al., 2022). Estes solventes à base de amina são conhecidos por sua alta seletividade e cinética de reação rápida que possibilitam capturas com até 90% de eficiência e pureza acima de 99,95% para frações mássicas de MEA equivalentes a 30% (HE et al., 2023). Além disso, o processo de absorção química por Monoetanolamina é o mais aplicado para a captura de dióxido de carbono e gases de exaustão na etapa de pós-combustão mesmo exigindo altas energias para a regeneração do solvente (LUIS, 2016).

Dentre os diferentes mecanismos de reação, o mais aceito e que descreve melhor o processo de absorção química por Monoetanolamina é o dos Zwitterions. (AHMED et al., 2020). De acordo com a literatura os Zwitterions são sais compostos por moléculas que apresentam grupos funcionais com cargas elétricas, positivas e negativas, equivalentes, o que consequentemente implica em uma carga resultante nula (HADJESFANDIARI; PARAMBATH, 2018). O mecanismo proposto produz Zwitterions e carbamatos como compostos intermediários, tais como pode ser observado nas reações que se procedem, visualizado nas Equações 8 e 9 (AHMED et al., 2020).



Esta técnica de captura é baseada na transferência de massa em sistemas gás-líquido e inclui um sistema de leito empacotado conectado uma coluna de regeneração que promove a recuperação do solvente por intermédio de seu aquecimento a altas temperaturas (LAÇIN et al., 2023). O processo de captura de dióxido de carbono é normalmente procedido em condições de baixa pressão, 1bar, apresentando uma proporção de dióxido de carbono de 3-20% na corrente gasosa a altas temperaturas que variam de 120° C a 180°C (SPIGARELLI; KAWATRA, 2013).

### 3.3.2 Captura por Adsorção

Este fenômeno é caracterizado pela transferência de uma molécula presente em um fluido em movimento para uma superfície adsorvente sólida. Além disso, a aderência das partículas ocorre por interações físicas ou químicas com o substrato (ARTIOLI, 2008). O fenômeno adsorsivo é regido por fatores relacionados a termodinâmica do solvente e as características do substrato e podem ser divididos em adsorção física e química (ROBB, 1989).

#### 3.3.2.1 Adsorção física

A teoria da adsorção física estabelece que, na presença de contato entre a superfície adsorvente e a fase fluida, surgem forças interatômicas e intermoleculares que governam o processo de interação entre ambas as fases (PARBHOO et al., 2002). Devido à natureza das interações físicas, a regeneração do adsorvente ocorre com baixo consumo energético, pois a fisissorção consiste na captura de moléculas de dióxido de carbono por meio das forças de Van der Waals, caracterizadas por sua baixa intensidade. Além do baixo custo energético associado à regeneração do adsorvente, a redução nos investimentos para a captura de CO<sub>2</sub> também está relacionada à escolha do substrato adequado. O motivo está relacionado à cinética química do material que influencia diretamente a duração dos ciclos de adsorção e dessorção (RAGANATI et al., 2021). Dentre estes adsorventes, alguns utilizados são materiais carbonáceos, como o carvão ativado, e materiais inorgânicos porosos como Zeólitas e estruturas organometálicas (MOFs). Apesar de suas vantagens, a fisissorção apresenta limitações, especialmente no quesito seletividade entre dióxido de carbono e outros gases, como o nitrogênio, uma desvantagem evidente na aplicação de carvão ativado para captura de CO<sub>2</sub> (ABD et al., 2020). Materiais como Zeólitas podem ser empregados como soluções que contornam o problema da seletividade, no entanto estes demonstraram baixa capacidade adsorsiva para o dióxido de carbono. Alternativas como separação por membranas se mostraram energeticamente eficientes, no entanto ainda são limitadas pela barreira imposta pela seletividade. (LI et al., 2011). Dessa forma é evidente a demanda por tecnologias que apresentem um equilíbrio entre parâmetros como a seletividade e a capacidade adsorsiva. Nesse contexto, as tecnologias de adsorção física podem ser classificadas em adsorção por variação de pressão, temperatura, umidade, campo elétrico e até mesmo a combinação entre as duas primeiras variáveis. Entre essas, a adsorção por variação de pressão se destaca como a mais economicamente viável, pois oferece maior flexibilidade operacional em diferentes condições de temperatura e pressão, além de exigir

menor consumo energético. (ABD et al., 2020). Além disso estudos indicaram que o fenômeno de quadrupolo associado a estrutura do CO<sub>2</sub> favorece a sua adsorção por microporos com dimensões menores que 2 nm. Dessa forma, os microporos promovem uma melhor seletividade para o dióxido de carbono em relação ao gás metano aumentando a eficiência de captura. (NGU, 2024).

### 3.3.2.2 Adsorção química

O processo de quimissorção ao contrário do de fisissorção, é um processo adsorvivo que é caracterizado pela formação de ligações químicas entre a substância adsorvente e o substrato (ATIF et al., 2022). Este processo adsorvivo envolve a formação de ligações covalentes, iônicas ou de hidrogênio em que forças de valência ligam as moléculas adsorvidas a grupos funcionais específicos localizados na superfície adsorvente. Além disso este processo demanda de uma alta energia de ativação, temperatura e pressão e é diretamente proporcional a área superficial disponível do substrato (BALLANTINE et al., 1997). Em decorrência da maior estabilidade das ligações as espécies adsorvidas tendem a se localizar na superfície em comparação ao processo de fisissorção (ERKEY, 2011).

## 3.4 TECNOLOGIAS DE CAPTURA

### 3.4.1 Membranas zeolíticas

As Zeólitas são estruturas microporosas constituídas por aluminossilicatos organizados em estruturas cristalinas tridimensionais que apresentam poros uniformes de dimensão molecular (INDIRA; ABHITHA, 2022). Estes materiais são aplicados na indústria petroquímica e de refinarias como catalisadores devido suas propriedades que envolvem alta área superficial, estabilidade térmica e seletividade proveniente das dimensões de seus microporos menores que 2 nanômetros (NOERMA et al., 2022). Estes materiais são caracterizados por suas propriedades adsorvivas e alta estabilidade térmica e química. Em decorrência de suas características estes materiais são aplicados a membranas destinadas a separação misturas gasosas e líquidas e são substitutos promissores de membranas poliméricas (ALGIERI; DRIOLI, 2021; HASSAN et al., 2023). O processo adsorvivo se baseia na porosidade do material que adsorve partículas de tamanhos específicos (INDIRA, 2022).

### 3.4.2 Líquidos iônicos aplicados a estruturas organometálicas

Os líquidos iônicos são fluidos compostos completamente por íons com ponto de fusão inferior a 100°C e que podem ter sua composição iônica ajustada para permitir a extração de determinados analitos (LLAVER et al., 2021). O termo em inglês “*Designer solvents*” é uma alcunha destes compostos que descreve a possibilidade de alteração dos pares de ânions-cátions do aglomerado iônico de forma a promover a variação de suas propriedades físico-químicas. Dessa forma, este *design* envolve aplicar reações químicas que promovam a adição de grupos funcionais à estrutura iônica de forma a alterar sua seletividade e afinidade em relação ao dióxido de carbono (FAISAL ELMOBARAK et al., 2023). Uma das maneiras de aumentar a absorção química do CO<sub>2</sub> é adicionar grupos funcionais que reagem quimicamente com este gás, como, por exemplo, as aminas. Dentre suas características podemos citar sua baixa inflamabilidade e volatilidade que permite aplicá-los em processos a vácuo (PANDYA et al., 2024). Estes sais líquidos são constituídos por íons orgânicos e inorgânicos que apresentam interações eletrostáticas e dispersivas em diferentes escalas de comprimento do líquido, o que os classificam como não isotrópicos (SHAMSHINA et al., 2018). Muitos líquidos iônicos demonstraram grande capacidade de captura de dióxido de carbono em decorrência de sua interação química com os ânions presentes no líquido. Além disso foi observado que a formação de interações coulômbicas auxiliaram no estabelecimento de uma rede que influenciou no aumento da dissolução do dióxido de carbono e da eficiência de captura (FAISAL ELMOBARAK et al., 2023). Embora os líquidos iônicos apresentem excelentes qualidades físico-químicas sua aplicação é restrita a fase líquida. Além disso, eles apresentaram problemas relacionados a alta viscosidade, baixa difusão. Nesse contexto o encapsulamento do líquido iônico em estruturas organometálicas demonstrou-se uma alternativa promissora para suprir as deficiências citadas anteriormente (PANDYA et al., 2024). Isto porque um dos benefícios destas estruturas organometálicas está na efetividade dos sítios de adsorção de bases de Lewis.

### 3.5 TÉCNICAS DE CONVERSÃO

Embora o processo de captura e armazenamento de carbono (CCS) e o de captura e utilização de carbono (CCU) compartilhem dos mesmos mecanismos de captura citados anteriormente, estes diferem em despeito ao fim do gás assimilado. Para o CCS o dióxido de carbono é destinado ao armazenamento em estruturas geológicas e em águas oceânicas profundas enquanto o CCU compreende a conversão deste gás em produtos úteis (GHIAT; AL-ANSARI, 2021). No entanto, o processo de conversão do CO<sub>2</sub> não é considerado energeticamente

viável em decorrência da baixa energia associada a moléculas de dióxido de carbono (BRUHN et al., 2016). Dessa forma, em decorrência das propriedades termodinâmicas deste gás, as tecnologias de conversão demandam do desenvolvimento de catalisadores eficientes para redução da barreira energética de reações químicas (MARCINIAK et al., 2020). Além disso boa parte das tecnologias de conversão do dióxido de carbono geram produtos que o armazenam por tempo limitado o que implica em seu retorno à atmosfera. Nesse contexto, estimativas indicaram que o CO<sub>2</sub> assimilado pelas diferentes técnicas de conversão não gerarão muito impacto no dióxido de carbono emitido pela ação antropogênica. Isto fica evidente pela comparação do total emitido em 2014, equivalente a 34 gigatoneladas, com as técnicas de conversão responsáveis por assimilar apenas 180 megatoneladas em químicos e 2 gigatoneladas em combustíveis (BRUHN et al., 2016). Estudos demonstraram que o impacto de fatores políticos e da aceitação popular referente as tecnologias de captura e armazenamento culminaram no interrompimento de projetos pilotos na Alemanha. Esta aceitação e percepção relacionada a tecnologia de armazenagem demonstrou baixa aceitação popular em decorrência dos perigos voltados a vazamentos de reservatórios de dióxido de carbono o que causou insegurança na população alemã (LINZENICH et al., 2019b). Dessa forma fica evidente a importância destes indicativos para o estabelecimento e investimento em novas tecnologias de captura e conversão. Nesse contexto, pesquisas relacionadas a percepção de risco e aceitação da utilização do dióxido de carbono demonstraram resultados positivos com relação ao benefício e utilidade dos produtos derivados do CO<sub>2</sub> (HUIJTS et al, 2007). Dentre os possíveis produtos gerados a partir deste óxido ácido estão o ácido fórmico, ureia, ácido salicílico, carbonatos cíclicos, carbonato de etileno, dimetil carbamato, formaldeído e co-polímeros. Em meio a estes compostos a síntese de metanol é considerada uma das melhores tecnologias de conversão devido a sua demanda como um químico industrial (BISWAL et al., 2022).

#### 4 CONCLUSÃO

As técnicas de captura e conversão de dióxido de carbono representam uma abordagem crucial para mitigar as mudanças climáticas e reduzir a dependência de combustíveis fósseis. Ao longo deste trabalho, foram analisadas as principais tecnologias de captura, incluindo pré-combustão, pós-combustão, oxicomustão, absorção física e química, além da adsorção em materiais como Zeólitas e estruturas organometálicas (MOFs). Essas tecnologias demonstram diferentes níveis de eficiência e aplicabilidade, dependendo das condições operacionais e dos requisitos específicos de cada processo industrial.

A conversão do CO<sub>2</sub> capturado em produtos úteis, como combustíveis sintéticos, polímeros e materiais de construção, oferece uma solução promissora para transformar um resíduo indesejado em um recurso valioso. Processos como a hidrogenação catalítica e a produção de carbonatos cíclicos exemplificam o potencial de integração de CO<sub>2</sub> em cadeias produtivas sustentáveis, promovendo uma economia de baixo carbono.

Entretanto, desafios técnicos e econômicos ainda limitam a ampla implementação dessas tecnologias. A necessidade de desenvolver catalisadores mais eficientes, reduzir os custos operacionais e melhorar a eficiência energética dos processos são aspectos fundamentais para viabilizar a captura e conversão de CO<sub>2</sub> em escala industrial. Além disso, políticas públicas e incentivos econômicos desempenham um papel crucial na aceleração da adoção dessas tecnologias.

## REFERÊNCIAS

- ABD, A. A., et al. Carbon dioxide removal through physical adsorption using carbonaceous and non-carbonaceous adsorbents: A review. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, 2020. DOI 10.1016 /j.jece. 2020.104142.
- ABU-ZHARA, M. R. M., et al. CO<sub>2</sub> capture from power plants. International. **Journal of Greenhouse Gas Control**, 2007. DOI 10.1016/S1750-5836(07)00032-1.
- ADAMS, T. A. (2014). Challenges and Opportunities in the Design of New Energy Conversion Systems, **Computer Aided Chemical Engineering**. DOI 10.1016/B978-0-444-63433-7.50002-X.
- AHMED, R., et al. Recent advances in carbon-based renewable adsorbent for selective carbon dioxide capture and separation-A review. **Journal of Cleaner Production**, 2020. DOI 10.1016/j.jclepro.2019.118409.
- ALGIERI, C., DRIOLI, E. Zeolite membranes: Synthesis and applications. **Separation and Purification Technology**, 2021. DOI 10.1016/j.seppur.2021.119295.
- ARTIOLI, Y. (2008). Adsorption. **Encyclopedia of Ecology**, 2008. Elsevier. DOI 10.1016/B978-008045405-4.00252-4.
- ALMARAZ, S.D., AZZARO-PANTEL, C. Design and Optimization of Hydrogen Supply Chains for a Sustainable Future. **Hydrogen Economy**, 2017. Elsevier. DOI 10.1016/B978-0-12-811132-1.00004-3.
- ATIF, M., et al. Physisorption and chemisorption trends in surface modification of carbon black. **Surfaces and Interfaces**, 2022. DOI 10.1016/j.surfin.2022.102080.
- BABAR, M., et al. Enhanced cryogenic packed bed with optimal CO<sub>2</sub> removal from natural gas; a joint computational and experimental approach. **Cryogenics**, 2020. DOI 10.1016/j.cryogenics.2019.103010.
- BAHRUN, M. H. V., et al. Carbon dioxide removal from biogas through pressure swing adsorption – A review. **Chemical Engineering Research and Design**, 2022. DOI 10.1016/j.cherd.2022.05.012.
- BALLANTINE, D. S., et al. Materials Characterization. **Acoustic Wave Sensors**, 1997. Elsevier. DOI 10.1016/B978-012077460-9/50004-6.
- BISWAL, T., et al. Conversion of carbon dioxide to methanol: A comprehensive review. **Chemosphere**, 2022. DOI 10.1016/j.chemosphere.2022.134299.
- BOATENG, A. A. Rotary Kiln Environmental Applications. **Rotary Kilns**, 2016. Elsevier. DOI 10.1016/B978-0-12-803780-5.00012-5.
- BROSE, E. D. The Political Economy of Early Industrialization in German Europe, 1800–1840. **Reconceptualizing the Industrial Revolution**, 2010. The MIT Press. DOI 10.7551/mitpress/8585.003.0008.

BRUHN, T., NAIMS, H., OLFE-KRÄUTLEIN, B. Separating the debate on CO<sub>2</sub> utilisation from carbon capture and storage. **Environmental Science & Policy**, 2016. DOI 10.1016/j.envsci.2016.03.001.

CUÉLLAR-FRANCA, R. M., AZAPAGIC, A. Carbon capture, storage and utilisation technologies: A critical analysis and comparison of their life cycle environmental impacts. **Journal of CO<sub>2</sub> Utilization**, 2015. DOI 10.1016/J.JCOU.2014.12.001.

DALY, Herman., **Fossil Fuels**, World Bank Economist Science, v. 240, p. 1611-1631, 1989.

DARABKHANI, H. G.;VARASTEHE, H.; BAZOOYAR, B. 3 - Oxyturbine power cycles and gas-CCS technologies. **Carbon Capture Technologies for Gas-Turbine-Based Power Plants**, Elsevier, 2023. DOI 10.1016/B978-0-12-818868-2.00006-0.

DINCER, I., ROSEN, M. A., AL-ZAREER, M., 3.11 Chemical Energy Production, **Comprehensive Energy Systems**, Elsevier, 2018. DOI 10.1016/B978-0-12-809597-3.00326-6.

DUBEY, A., ARORA, A. Advancements in carbon capture technologies: A review. **Journal of Cleaner Production**, 2022. DOI 10.1016/j.jclepro.2022.133932.

DZIEJARSKI, B., KRZYZYNSKA, R., ANDERSSON, K. Current status of carbon capture, utilization, and storage technologies in the global economy: A survey of technical assessment. **Fuel**, 2023. DOI 10.1016/j.fuel.2023.127776..

ERKEY, C. Thermodynamics and Dynamics of Adsorption of Metal Complexes on Surfaces from Supercritical Solutions. **Supercritical Fluid Science and Technology**, 2011. DOI 10.1016/B978-0-08-045329-3.00004-4.

FAISAL ELMOBARAK, et al. Current status of CO<sub>2</sub> capture with ionic liquids: Development and progress. **Fuel**, 2023. DOI 10.1016/j.fuel.2023.128102.

FILHO, Renato. Oxi-combustão - uma alternativa para a indústria. **REVISTA IPT TECNOLOGIA E INOVAÇÃO**. v. 17, p. 63-76, Ago. 2021.

FINNEY, K. N., et al. Carbon capture technologies. **Bioenergy with Carbon Capture and Storage**. Elsevier, 2019. DOI 10.1016/B978-0-12-816229-3.00002-8.

FOLGER, P. **Congress CRS REPORT FOR CONGRESS. Carbon Cycle: Implications for Climate Change and 2007**. Washington. Disponível em: <https://nationalaglawcenter.org/wp-content/uploads/assets/crs/RL34059.pdf>. Acesso em 14 mar. 2024.

GADZHIEV, N., VAGAPOVA, A., YAUMIEVA, E. (2023). Climate change and global warming: the global carbon cycle. **BIO Web of Conferences**, 2023. DOI 10.1051/bioconf/20237606002.

GARCÍA-LUNA, S., ORTIZ, C. Conceptual assessment of sustainable methane production from oxycombustion CO<sub>2</sub> capture in waste-to-energy power plants. **Energy Conversion and Management**, 2023. DOI 10.1016/j.enconman.2023.117348.

- GHIAT, I., AL-ANSARI, T. A review of carbon capture and utilisation as a CO<sub>2</sub> abatement opportunity within the EWF nexus. **Journal of CO<sub>2</sub> Utilization**, 2021. DOI 10.1016/j.jcou.2020.101432.
- HADI MOLESH, M., et al. Geological sequestration of carbon dioxide. **Managing Global Warming**. Elsevier, 2019. DOI 10.1016/B978-0-12-814104-5.00016-8.
- HADJESFANDIARI, N., PARAMBATH, A. Stealth coatings for nanoparticles. **Engineering of Biomaterials for Drug Delivery Systems**. Elsevier, 2018. DOI 10.1016/B978-0-08-101750-0.00013-1.
- HASSAN, N. S., et al. A comprehensive review on zeolite-based mixed matrix membranes for CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> separation. **Chemosphere**, 2023. DOI 10.1016/j.chemosphere.2022.137709.
- HE, V., GAFFURI, M., VAN HERLE, J., SCHIFFMANN, J. Readiness evaluation of SOFC-MGT hybrid systems with carbon capture for distributed combined heat and power. **Energy Conversion and Management**, 2023. DOI 10.1016/j.enconman.2023.116728..
- HUA, W., SHA, Y., ZHANG, X., CAO, H.; Research progress of carbon capture and storage (CCS) technology based on the shipping industry, **Ocean Engineering**, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801823013136>. Acesso em: 4 mar. 2024.
- HUIJTS, N. M. A., MIDDEN, C. J. H., MEIJNDERS, A. L. Social acceptance of carbon dioxide storage. **Energy Policy**, 2007. DOI 10.1016/j.enpol.2006.12.007.
- INDIRA, V., ABHITHA, K. A review on recent developments in Zeolite A synthesis for improved carbon dioxide capture: Implications for the water-energy nexus. **Energy Nexus**, 2022. DOI 10.1016/j.nexus.2022.100095.
- IPCC. **IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage**. Metz, B.; Davidson, O.; Coninck, H. C. de; Loos, M.; Meyer, L. (eds.). Cambridge: Cambridge University Press, 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: 12 mai. 2024.
- KORONAKI, I. P., PRENTZA, L., PAPAETHIMIOU, V. Modeling of CO<sub>2</sub> capture via chemical absorption processes – An extensive literature review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2015. DOI 10.1016/j.rser.2015.04.124.
- LAÇIN, K., ÇALOĞLU, B., BINAY, B. Anaerobic digestion methods for the production of fuels. **Bioenergy Engineering**. Elsevier, 2023. DOI 10.1016/B978-0-323-98363-1.00004-1.
- LEUNG, D. Y. C., CARAMANNA, G., MAROTO-VALER, M. M. An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2014. DOI 10.1016/j.rser.2014.07.093.
- LI, J.-R., et al. Carbon dioxide capture-related gas adsorption and separation in metal-organic frameworks. **Coordination Chemistry Reviews**, 2011. DOI 10.1016/j.ccr.2011.02.012.
- LINZENICH, A., et al. Uncovering attitudes towards carbon capture storage and utilization technologies in Germany: Insights into affective-cognitive evaluations of benefits and risks.

**Energy Research & Social Science**,2019. 10.1016/j.erss.2018.09.017. Acesso em: 24 mai. 2024.

LLAVER, M., et al. **Ionic liquids. Analytical Sample Preparation With Nano- and Other High-Performance Materials**. Elsevier, 2021. DOI 10.1016/B978-0-12-822139-6.00012-2.

LUIS, P. Use of monoethanolamine (MEA) for CO<sub>2</sub> capture in a global scenario: Consequences and alternatives. **Desalination**, 2016. DOI 10.1016/j.desal.2015.08.004.

MATZEN, M., et al. Use of natural ores as oxygen carriers in chemical looping combustion: A review. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, 2017. DOI 10.1016/j.ijggc.2017.08.008.

MEHMOOD, S., et al. The role of green industrial transformation in mitigating carbon emissions: Exploring the channels of technological innovation and environmental regulation. **Energy and Built Environment**, 2024. DOI 10.1016/j.enbenv.2023.03.001.

MOSCA, L. et al, 17 - Hydrogen in chemical and petrochemical industry, **Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes**. Elsevier, 2020. DOI 10.1016/B978-0-12-817384-8.00017-0.

MUKHERJEE, S., KUMAR, A., ZAWOROTKO, M. J. Metal-organic framework based carbon capture and purification technologies for clean environment. **Metal-Organic Frameworks (MOFs) for Environmental Applications**. Elsevier, 2019. DOI 10.1016/B978-0-12-814633-0.00003-X.

MUSTAFA, A., et al. (2020). Current technology development for CO<sub>2</sub> utilization into solar fuels and chemicals: A review. **Journal of Energy Chemistry**, 2020. DOI 10.1016/j.jechem.2020.01.023.

NOERMA, J. A., et al, **Zeolite-based catalyst for direct conversion of CO<sub>2</sub> to C<sub>2</sub>+ hydrocarbon: A review**. Journal of CO<sub>2</sub> Utilization, Disponível em: <https://www.science-direct.com/science/article/pii/S2212982022000889>). Acesso em 24 mar. 2025.

NGU, L. H. Carbon Capture Technologies. **Encyclopedia of Sustainable Technologies**. Elsevier, 2024. DOI 10.1016/B978-0-323-90386-8.00028-0.

OLAJIRE, A. A. CO<sub>2</sub> capture and separation technologies for end-of-pipe applications – A review. **Energy**, 2010. DOI 10.1016/j.energy.2010.02.030.

PAKZAD, P., et al. CO<sub>2</sub> absorption by common solvents. Advances. **Carbon Capture**. Elsevier, 2020. DOI 10.1016/B978-0-12-819657-1.00003-7.

PANDYA, I., et al. Ionic liquid/metal organic framework composites as a new class of materials for CO<sub>2</sub> capture: Present scenario and future perspective. **Journal of Molecular Liquids**, 2024. DOI 10.1016/j.molliq.2023.123907.

PARBHOO, B., O'HARE, L.-A., LEADLEY, S. R. Fundamental aspects of adhesion technology in silicones. **Adhesion Science and Engineering**. Elsevier, 2002. DOI 10.1016/B978-044451140-9/50014-7.

PLAZA, M. G., PEVIDA, C., RUBIERA, F. Ongoing Activity on CO<sub>2</sub> Capture in the Power Sector: Review of the Demonstration Projects Worldwide. **Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering**. Elsevier, 2016. DOI 10.1016/B978-0-12-409547-2.11129-1.

PORTILLO, E. et al. Oxygen transport membrane unit applied to oxy-combustion coal power plants: A thermodynamic assessment. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, 2021. DOI 10.1016/j.jece.2021.105266.

RACKLEY, S. A. Carbon Capture from Power Generation. **Carbon Capture and Storage**. Elsevier, 2010. DOI 10.1016/B978-1-85617-636-1.00004-3.

RAGANATI, F., MICCIO, F., AMMENDOLA, P. Adsorption of Carbon Dioxide for Post-combustion Capture: A Review. **Energy and Fuels**. 2021. DOI 10.1021/acs.energyfuels.1c01618.

RAMESH, M., MUTHUKRISHNAN, M., KHAN, A. Metal-organic frameworks and permeable natural polymers for reasonable carbon dioxide fixation. **Metal-Organic Frameworks for Chemical Reactions**. Elsevier, 2021. DOI 10.1016/B978-0-12-822099-3.00017-4.

ROBB, I. D. Adsorption. **Comprehensive Polymer Science and Supplements**. Elsevier, 1989. DOI 10.1016/B978-0-08-096701-1.00061-6.

SHAMSHINA, J. L., ZAVGORODNYA, O., ROGERS, R. D. Ionic Liquids. **Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering**. Elsevier, 2018. DOI 10.1016/B978-0-12-409547-2.13931-9.

SPIGARELLI, B. P., KAWATRA, S. K. Opportunities and challenges in carbon dioxide capture. **Journal of CO<sub>2</sub> Utilization**, 2013. 10.1016/j.jcou.2013.03.002. Acesso em: 27 abr. 2024.

THAKUR, I. S., et al. Sequestration and utilization of carbon dioxide by chemical and biological methods for biofuels and biomaterials by chemoautotrophs: Opportunities and challenges. **Bioresource Technology**, 2018. DOI 10.1016/j.biortech.2018.02.039.

TIAN, T., et al. **The effect of methanol production and application in internal combustion engines on emissions in the context of carbon neutrality: A review**. *Fuel*, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001623612200761X>. Acesso em: 8 out. 2025.

TOHID N. B., MEIHONG W., Role of solvents in CO<sub>2</sub> capture processes: The review of selection and design methods, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2019. DOI 10.1016/j.rser.2019.109299.

VALLERO, D., **Chapter 18 - Air Pollutant Kinetics and Equilibrium**, Academic Press, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124017337000189>. Acesso em: 20 mar. 2025.

VALLERO, D. A. Energy and the Environment. **Future Energy**. Elsevier, 2020. DOI 10.1016/B978-0-08-102886-5.00027-X.

VAZIRI, P., et al. Advancing carbon capture technologies in CCS: A comprehensive review of pre-combustion processes, **Gas Science and Engineering**, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2949908924002772>. Acesso em: 14 out. 2024.

WANG, M., et al. Post-combustion CO<sub>2</sub> capture with chemical absorption: A state-of-the-art review. **Chemical Engineering Research and Design**, 2011. DOI 10.1016/j.cherd.2010.11.005.