



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM QUÍMICA

VANESSA KALINY SILVA SANTOS

TECNOLOGIAS EMERGENTES PARA A CAPTURA DE CO₂: BENEFÍCIOS
ECONÔMICOS E AMBIENTAIS

FORTALEZA

2024

VANESSA KALINY SILVA SANTOS

TECNOLOGIAS EMERGENTES PARA A CAPTURA DE CO₂: BENEFÍCIOS
ECONÔMICOS E AMBIENTAIS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Graduação em Química do Centro de Ciências da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel com habilitação industrial em Química.

Orientador: Prof.^a Dra. Carla Bastos Vidal.
Coorientador: Dr. Ari Clecius Alves de Lima.

FORTALEZA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S239t Santos, Vanessa Kaliny Silva.
Tecnologias emergentes para a captura de CO₂: benefícios econômicos e ambientais / Vanessa Kaliny Silva Santos. – 2024.
55 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Curso de Química, Fortaleza, 2024.
Orientação: Profa. Dra. Carla Bastos Vidal.
Coorientação: Prof. Dr. Ari Clecius Alves de Lima.
1. Efeito estufa. 2. Mudanças climáticas. 3. Armazenamento. 4. Captura de CO₂. 5. Utilização. I. Título.
CDD 540
-

VANESSA KALINY SILVA SANTOS

TECNOLOGIAS EMERGENTES PARA A CAPTURA DE CO₂: BENEFÍCIOS
ECONÔMICOS E AMBIENTAIS

Trabalho de conclusão de curso apresentada ao
Curso de Graduação em Química da
Universidade Federal do Ceará, como requisito
parcial à obtenção do grau de bacharel com
habilitação industrial em Química.

Aprovada em: __/__/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dra. Carla Bastos Vidal (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Ari Clecius de Lima Alves
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof^a. Dr^a. Antônia Fádria Valentim de Amorim
Universidade Estadual do Ceará (UECE)

Me. Francisco Leomar da Silva
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, avós, irmãos e amigos.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof^ª. Dra. Carla Bastos Vidal, pela excelente orientação, paciência e profissionalismo.

Ao Dr. Ari Clecius de Lima Alves pela orientação exemplar e vivências no âmbito industrial.

Aos professores participantes da banca examinadora Prof^ª. Dra. Antônia Fádía Valentim de Amorim e ao mestre Francisco Leomar da Silva pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, porque dEle, por Ele e para Ele são todas as coisas. Indubitavelmente, se suas mãos não tivessem me amparado, eu não teria chagado até aqui. Minha gratidão ao Deus que não muda, em quem deposito toda minha confiança e me é como Âncora para alma.

Agradeço ao meu pai Francisco Gadelha e a minha mãe Andréa Serêjo, por me permitirem construir na sombra o que eles construíram sob um sol abrasador. Em especial dedico este trabalho de conclusão a minha mãe, que não está mais entre nós, no entanto, sempre me apoio e me impulsionou a acreditar nos sonhos e propósito de Deus para mim.

Agradeço aos meus avós, Benedito Nascimento e Maria Vitória por sempre me acreditarem nos meus sonhos e cuidarem de mim com tanto zelo e carinho.

Aos meus irmãos Lucas Silva e Marcelo Augusto por estarem presentes nessa trajetória me defendendo e impulsionando.

Aos meus Pastores Renato Alves e Talita Alves por estenderem seu manto sobre mim e me encorajarem em amor a alcançar o destino profético designado por Deus para mim. Minha gratidão a toda a família Manancial Fortaleza por todo apoio, amor e irmandade derramados sobre mim.

A minha tia Silvaneide Gadelha por cuidar de mim como filha.

Aos colegas da turma de graduação, em especial Maria Daiane, Rebeca Felipe, José Vitor, Marília Marques por toda cumplicidade e aprendizado mútuo.

Aos meus amigos de longas datas Lídia Lacerda, Késsia Lima, João Neto, Aélío Rubens por toda alegria e palavras de encorajamento durante todos esses anos.

Aos colegas de estágio por tornarem o trabalho leve, Carlos Henrique, Patrícia Mendes e Odjackson Pires

Agradeço aos amigos próximos, que lutaram muitas batalhas ao meu lado, em especial Amanda Abreu, Ana Gabrielly, Emilly Teixeira, Roberth Teixeira, Lussandra Vale, Sarah Santos, Samara Martins, Débora Keren, Ludmila Bastos, Solano Bastos, Elizete Bastos, Rafael Bastos, Roberto Cleiber, Josilene Vidal.

Minha gratidão a todos, essa vitória é nossa!

“Sonhar custa caro demais? Desistir custa um sonho.” (Guilherme de Sá , 2018).

RESUMO

O Efeito Estufa é um fenômeno natural que possibilita a vida no planeta Terra. Este efeito é resultado da presença de gases estufa que interagem com a radiação emitida pela Terra, destacando-se o dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O). No entanto, o aquecimento global, está elevando a temperatura do planeta Terra e ocasionando inúmeros impactos ambientais, econômicos e na saúde pública. As ações antrópicas são as principais responsáveis pelos efeitos adversos provocados pelas mudanças climáticas, devido às emissões crescentes de CO₂ que, por sua vez, já é o gás estufa mais abundante na atmosfera. Tendo em vista a dificuldade de redução de emissões de CO₂, estudos estão sendo realizados para encontrar e aperfeiçoar formas de mitigação. Com base no levantamento realizado na plataforma *Web of Science*, presente no sítio do site de periódicos da CAPES, dentre as formas de redução de emissão de gás carbônico na atmosfera, destacam-se os métodos de captura de CO₂. Este trabalho discorre sobre tecnologias que já estão sendo amplamente utilizadas como a pós-combustão e pré-combustão, e tecnologias emergentes como a oxi-combustão e *looping* químico, além de evidenciar brevemente vantagens e desvantagens destes processos. O investimento em estudo e melhoramento dessas tecnologias é essencial para que rotas eficientes e sustentáveis sejam utilizadas, principalmente pelo corpo industrial.

Palavras-chave: efeito estufa; mudanças climáticas; armazenamento; captura de CO₂; utilização.

ABSTRACT

The Greenhouse Effect is a natural phenomenon that makes life possible on planet Earth. This effect results from the presence of greenhouse gases that interact with radiation emitted by the Earth, with carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄), and nitrous oxide (N₂O) being the most prominent. However, the intensification of this effect, known as global warming, is raising the temperature of planet Earth and causing numerous environmental, economic, and public health impacts. Human activities are the main contributors to the adverse effects of climate change, due to the increasing emissions of CO₂, which is already the most abundant greenhouse gas in the atmosphere. Given the difficulty in reducing CO₂ emissions, studies are being conducted to find and improve mitigation strategies. Based on the research conducted on the Web of Science platform, available on the CAPES journal website, among the ways to reduce carbon dioxide emissions into the atmosphere, CO₂ capture methods stand out. This work discusses technologies that are already widely used, such as post-combustion and pre-combustion, as well as emerging technologies such as oxy-fuel combustion and chemical looping, while briefly highlighting the advantages and disadvantages of these processes. Investment in the study and improvement of these technologies is essential so that efficient and sustainable routes are adopted, particularly by the industrial sector.

Keywords: greenhouse effect; climate change; CO₂ capture, utilization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Dinâmica energética da Terra.....	19
Figura 2	– Modos vibracionais do dióxido de carbono.....	20
Figura 3	– Relação da concentração de CO ₂ e temperatura ao longo do tempo.....	20
Figura 4	– Registro histórico das temperaturas globais.....	22
Figura 5	– Aumento das concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera	22
Figura 6	– Etapas do Sistema de Captura, Transporte e Armazenamento de CO ₂	24
Figura 7	– Visão geral sobre captura e estocagem de CO ₂	25
Figura 8	– Diagrama de blocos para a captura de CO ₂ por pré-combustão.....	27
Figura 9	– Diagrama de captura por pré-combustão utilizando absorção química.....	28
Figura 10	– Diagrama de blocos para pós-combustão.....	28
Figura 11	– Diagrama de blocos para tecnologia de oxi-combustão.....	30
Figura 12	– Representação de reatores de leito fixo para técnica de CLC.....	31
Figura 13	– Diagrama de absorção química do CO ₂ , utilizando amina.....	33
Figura 14	– Comparação da capacidade de absorção dos solventes a base de aminas.....	35
Figura 15	– Absorventes utilizados em absorção física.....	36
Figura 16	– Diagrama de blocos para processo de adsorção.....	38
Figura 17	– Representação das zeólitas absorvendo a molécula de CO ₂	39
Figura 18	– Esquematização do processo de separação por membrana.....	40
Figura 19	– Separação de CO ₂ por membrana de absorção de gás.....	41
Figura 20	– Separação do CO ₂ por membrana sólida porosa.....	41
Figura 21	– Conversão do CO ₂ em combustíveis.....	43
Figura 22	– Gráfico do número de publicações e citações de trabalhos relacionados a captura de CO ₂ dos anos de 2014 a 2024.....	46
Figura 23	– Breve comparação das tecnologias de separação.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados planetários	18
Tabela 2 – Potencial de Aquecimento Global de gases de efeito estufa.....	21
Tabela 3 – Mudanças nas concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa.....	23

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

GEE	Gases de Efeito Estufa
NASA	National Aeronautics and Space Administration
SEEG	Sistema de estimativas de Emissões e remoções dos Gases de efeito Estufa
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima
PAG	Potencial de Aquecimento Global
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe
CCUS	Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono
IBP	Instituto Brasileiro de Petróleo
CCU	Captura e Utilização de Carbono
CCS	Captura e Armazenamento de Carbono
AIE	Agência internacional de Energia
MEA	Dietanolamina
DEA	Dietanolamina (DEA)
MDEA	Metildietanolamina
CLC	Chemical Looping Combustion

LISTA DE SÍMBOLOS

CO ₂	Dióxido de Carbono
CH ₄	Metano
CO	Monóxido de carbono
Me	Metal
Mn	Manganês
Fe	Ferro
N ₂ O	Óxido nitroso
O ₃	Ozônio
S	Fluxo de energia emitido pela Terra
S _o	Fluxo de energia solar recebida pela Terra
CFC	Clorofluoretocarbonetos
K	Stefan-Boltzmann
T	Temperatura
σ	Albedo do planeta
SO _x	Óxido de enxofre
NO _x	Óxido de Nitrogênio

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS	16
2.1 Objetivo Geral.....	16
2.2 Objetivos Específicos.....	16
3 REFERENCIAL TEÓRICO	17
3.1 Efeito estufa natural e antropogênico	17
3.2 Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS)	23
3.3 Tecnologias de Captura de CO ₂	26
3.3.1 Pré-combustão.....	26
3.3.2 Pós-combustão	28
3.3.3 Oxi-combustão	29
3.3.4 Looping químico	30
3.3.4 Tecnologias de separação de CO ₂	32
3.3.4.1 Absorção.....	32
3.3.4.1.1 Absorção química.....	32
3.3.4.1.2 Absorção física.....	35
3.3.4.2 Adsorção.....	37
3.3.4.3 Separação por membrana.....	39
3.3.5 Armazenamento e utilização de CO ₂	41
3.3.5.1 Armazenamento do CO ₂	42
3.3.5.2 Utilização de CO ₂	42
4 METODOLOGIA	43
5 DISCUSSÃO DAS DIFERENTES TECNOLOGIA	46
5.1.1 Pré-combustão	46
5.1.2 Pós-combustão	46
5.1.3 Oxi combustão.....	47
5.1.4 Looping químico	47
5.2 COMPARAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE CAPTURA DE CO ₂	48
5.2.1 Absorção.....	48
5.2.2 Adsorção.....	48
5.2.3 Separação por membrana	48
6 CONSIDERAÇÃO FINAIS	50
REFERÊNCIAS	51

1 INTRODUÇÃO

A Terra recebe energia do Sol, que aquece o planeta e proporciona a energia necessária para manter o sistema climático. Parte da energia emitida pelo Sol é refletida e retorna para o espaço, no entanto uma grande porcentagem chega ao solo, aquecendo-o e emitindo radiação térmica, na forma de infravermelho. Essa radiação é absorvida por gases e nuvens presentes na atmosfera, que por sua vez aquecem-se e emitem radiação térmica tanto para o espaço como para a superfície terrestre, elevando, dessa forma, a superfície terrestre. Este é um fenômeno natural denominado Efeito Estufa (Zhong; Dorothy, 2013).

O Efeito Estufa é um fator muito importante para o desenvolvimento e manutenção de vida na Terra, uma vez que, sem ele, a temperatura efetiva esperada, apenas com a radiação direta do sol, seria de 19°C negativos dessa forma, o ciclo de vida na Terra não seria possível. O Efeito Estufa consiste na interação da energia solar com GEE. Os principais gases presentes na atmosfera que desempenham essa função de absorver a radiação infravermelho (IV) emitida pela superfície terrestre são: vapor d'água, dióxido de carbono, (CO₂), óxido nitroso (N₂O) e metano (CH₄) (Kweku *et al.*, 2018). Logo, são indubitáveis os benefícios que esse fenômeno natural propicia para o planeta Terra, todavia o problema está naintensificação do Efeito Estufa.

As alterações nas concentrações de GEE na atmosfera se tornaram uma das principais causas das mudanças climáticas. Entre esses gases-estufa notabiliza-se o CO₂, haja vista que 57% das emissões de gases que suscitam o EEsão atribuídas a este. Apesar do dióxido de carbono não ser o gás mais eficaz para reter o calor, como o CH₄, que pode absorver duas vezes mais energia do que o CO₂, ele é mais abundante e permanece na atmosfera por períodos maiores. (Sousa, 2021).

Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, ou IPCC) (2022), a temperatura média da superfície terrestre teve um aumento de 1,09 °C, este dado mostra que o aumento da temperatura global é diretamente proporcional ao aumento da concentração de CO₂, posto que a concentração deste gás teve um salto de 280 µg/m³ para 418 µg/m³, em termos de médias anuais no período de 1750 a 2019, sendo que dados recentes, mostram que sua concentração é de 419 µg/m³ (GLOBAL MONITORING LABORATORY, 2022).

O aumento considerável da concentração de CO₂ é causado, principalmente, por atividades antropogênicas, em especial, a queima de combustíveis fósseis (LIU *et al.*, 2021).

Segundo o Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), só o Brasil, em 2019, emitiu cerca de 2,2 bilhões de toneladas de gases de efeito estufa.

Face ao exposto, para mitigar as emissões de CO₂, várias tecnologias têm sido estudadas e utilizadas. Dentre as tecnologias emergentes e promissoras, destaca-se as tecnologias de captura de CO₂ para o armazenamento deste gás ou para utilização em outros fins. A captura e o armazenamento de CO₂ consiste em um conjunto de tecnologias que possibilitam a captura do dióxido de carbono produzido na combustão de combustíveis fósseis em fontes estacionárias, como indústrias e usinas de energia. O deslocamento deste através de tubulações e o armazenamento ou utilização em processos químicos (Spigarelli; Kawatra, 2013). Esta é uma forma viável, uma vez que são tecnologias economicamente favoráveis para diminuição de emissões de gás carbônico em larga escala (Agência Internacional de Energia, 2022).

Dentre os métodos clássicos, já aplicados atualmente, destacam-se os de absorção e adsorção. Na absorção química, a mistura de gases a ser tratada entra em contato com uma corrente líquida em que os componentes de interesse se dissolvem. Neste método utiliza-se geralmente aminas ou compostos alcalinos, como o hidróxido de sódio (NaOH) ou hidróxido de potássio (KOH) (Salmón, 2018). Esta tecnologia é eficiente e economicamente viável, além disso atingiu escala comercial para a separação do CO₂ do gás natural (Pereira, 2022).

Já no método de adsorção o gás é arrastado para um maquinário contendo um sólido sorvente. Desta forma, o CO₂ é retido seletivamente na superfície ou nos poros deste sólido (Pereira, 2022). Neste processo alguns sorventes são comumente utilizados, como o carvão ativado, nanotubos de carbono e as zeólitas, estes últimos compõem métodos emergentes e rebuscados. As zeólitas, no entanto, se sobressaem, uma vez que são microporosas e com poros regulares, o que aumenta a seletividade, tornando-se, assim, uma perspectiva promissora em aplicações relacionadas a captura de CO₂ (Pant, 2021).

O presente trabalho tem como objetivo apresentar informações sobre as rotas propostas para controlar as emissões de dióxido de carbono e comparar as tecnologias emergentes para a captura de CO₂, abordando as vantagens e desvantagens de cada uma e os benefícios econômicos e ambientais

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Compilar, analisar e comparar os principais métodos para captura de CO₂ disponíveis na literatura científica, destacando suas vantagens, desvantagens e aplicações, principalmente no âmbito industrial, a fim de apresentar uma visão atualizada das tecnologias emergentes e promissoras para a mitigação eficaz das emissões de CO₂ na atmosfera.

2.2 Objetivos Específicos

- Identificar as principais tecnologias e métodos disponíveis para a captura de CO₂ presentes na literatura científica;
- Comparar a eficácia, aplicabilidade e eficiência de cada tecnologia de captura de CO₂;
- Avaliar os impactos ambientais e econômicos das tecnologias de captura, destacando seus benefícios e limitações em larga escala.
- Explorar as perspectivas de desenvolvimento e melhorias nas tecnologias emergentes para a captura de CO₂.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Efeito estufa natural e antropogênico

A principal fonte de energia para o planeta Terra é a radiação emitida pelo Sol, cuja transferência ocorre na forma de ondas eletromagnéticas. A intensidade da energia, por sua vez, depende dos raios luminosos do Sol e da distância dos planetas ao Sol (Luis; *et al.*, 2018).

JeanBaptiste Fourier (1768-1830), o qual foi um cientista francês pioneiro no estudo de temperaturas planetárias, estipulou a estrutura do equilíbrio energético para um planeta, afirmando que existe uma temperatura de equilíbrio (T_e) na qual a quantidade de energia absorvida por um planeta é igual a quantidade de energia emitida (Pierrehumbert, 2004).

É importante ressaltar que a Terra absorve apenas 70% da radiação emitida sobre ela (51% pela superfície e 19% pela atmosfera) e 30% é refletida e espalhada diretamente para o espaço, essa porcentagem chama-se *albedo* do planeta (FERNANDES; PINA; TRINDADE, 2010). Ao se conhecer o albedo, pode-se determinar a energia absorvida pelo planeta. O albedo da Terra é 0.3, segundo dados da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA, 2024). O fluxo de energia solar recebido pela Terra (S_0), é de aproximadamente 1.370 watts/m², ao obter-se essa informação, pode-se igualar a taxa de energia recebida e emitida pela Terra (S) para encontrar a temperatura de equilíbrio do planeta em questão. Sabendo que o fluxo de energia atinge a Terra como se fosse um disco de área $\pi.r^2$, em que r é o raio, no entanto como a Terra irradia energia em toda superfície, com área correspondente a $4.\pi.r^2$, dividindo por 4, têm-se:

$$S = (1 - a)S_0/4 = 240 \text{ watts/ m}^2 \quad (1)$$

Essa taxa pode ser utilizada para calcular a temperatura de acordo com a lei de Stefan-Boltzmann, na qual a taxa de S com que um corpo negro irradia é proporcional à quarta potência de sua temperatura absoluta. Logo, têm-se:

$$S = kT^4 \quad (2)$$

Em que k é a constante de Stefan-Boltzmann, $5,67 \times 10^{-8}$ watts/m². Aplicando a equação 2, obtém-se a temperatura de equilíbrio de 255 K (Spiro; Stigliani, 2010). A Tabela 1 apresenta as temperaturas da Terra e de planetas vizinhos a ela, além de dados planetários necessários para calcular tais temperaturas:

Tabela 1 – Dados planetários

Planeta	Fluxo (W/m ²)	Albedo	Temperatura de equilíbrio (K)	Temperatura de superfície (K)
Terra	1370	0.3	255	288
Vênus	2600	0.77	226	737
Marte	586	0.25	209	210

Fonte: Elaborada pela autora com base em: [Planetary Fact Sheet \(nasa.gov\)](https://planetaryfactsheet.nasa.gov/)

A Tabela 1 mostra que a temperatura de equilíbrio para a Terra é 255 K, ou seja, -18 °C. Caso essa fosse a temperatura de superfície da Terra, a vida não seria possível, uma vez que toda a água do planeta seria congelada e camadas espessas de gelo cobririam os continentes (Junges; Santos; Massoni; Costa, 2018). A temperatura calculada acima, de 255 K é aproximadamente 33 K abaixo do observado, 288 K (15 °C). Torna-se notório que o equilíbrio radiativo Terra-Sol não é suficiente para explicar a temperatura média terrestre (Xavier; Kerr, 2004).

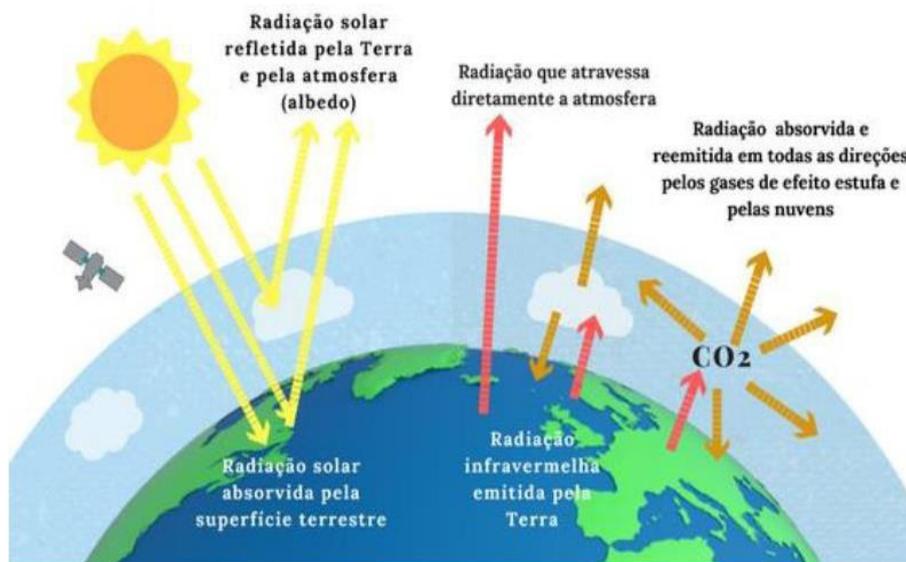
A temperatura agradável e propícia para a manutenção da vida no planeta Terra não é resultante apenas de sua distância do Sol ou da radiação emitida por ele, a atmosfera terrestre possui um papel especial na conservação da temperatura de superfície da Terra. Marte possui uma atmosfera muito rarefeita, o que resulta em uma temperatura de superfície baixa, cerca de -63,15 °C. Vênus, por sua vez, tem uma atmosfera densa, em consequência disso, a temperatura de superfície deste planeta é elevada, aproximadamente 463,15 °C. O planeta Terra possui o tipo preciso de atmosfera (Kweku, 2017).

A atmosfera é composta por inúmeros gases, entretanto os mais abundantes são o nitrogênio (78%) e o oxigênio (21%), esses gases não absorvem radiação em ordem de ligação emitida pela Terra, mas estes últimos são importantes, uma vez que eles proveem a estrutura física dentro da qual gases absorventes podem interagir com a radiação infravermelho (Lacis *et al*, 2010).

Gases como vapor de água, metano (CH₄), ozônio (O₃), óxido nitroso (N₂O), gases da família do clorofluoretocarbonetos (CFC's) e o dióxido de carbono (CO₂) estão presentes em menor quantidade. Tais gases possuem a propriedade de serem ativos radiotivamente na faixa de comprimento de ondas longas, como o infravermelho. A radiação absorvida por esses gases é reemitida em todas as direções, inclusive para a superfície, sendo novamente absorvida e emitida para a atmosfera, onde o processo se repete. Esse fenômeno natural é chamado de Efeito Estufa, que impede que a radiação emitida pela Terra seja perdida

e o clima favorável seja mantido (Fernandes: Pina; Trindade, 2010). A Figura 1 mostra a dinâmica energética da Terra

Figura 1- Dinâmica energética da Terra

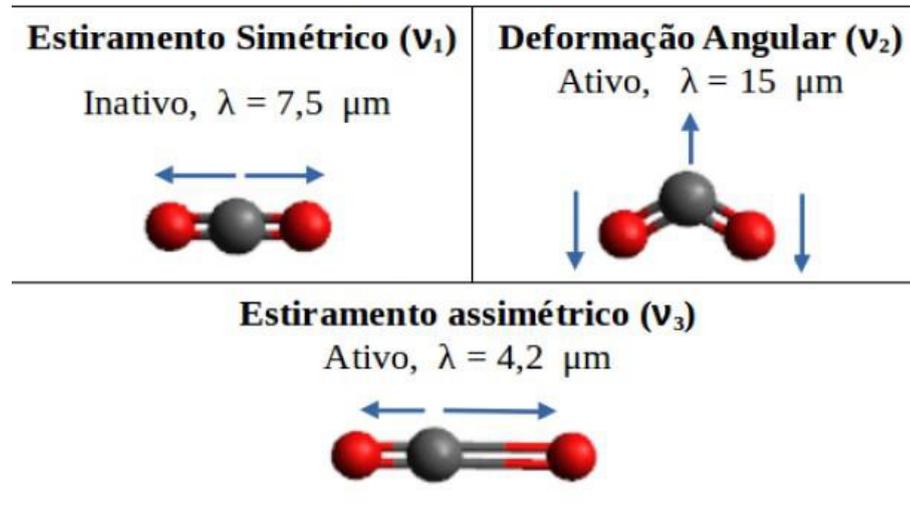


Fonte: Junges *et. al* (2018).

Os gases que contribuem para o efeito estufa possuem a capacidade de interagir como radiação infravermelha terrestre (Kweku *et al*, 2018).

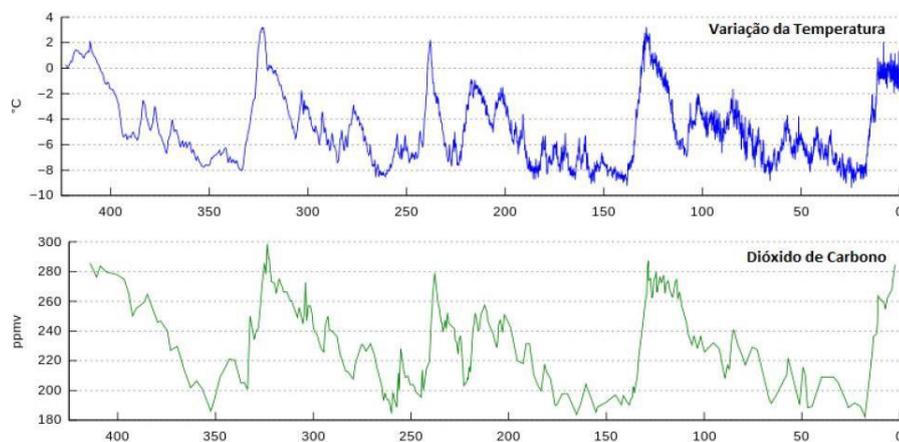
Sabe-se que o CO_2 é uma molécula triatômica, linear e apolar, ou seja, não possui momento de dipolo. Todavia, quando essa molécula entra em contato com a radiação infravermelha ela vibra, essas vibrações podem ser de quatro tipos: estiramento simétrico, estiramento assimétrico e dois modos de deformação angular que ocorrem em comprimentos de ondas específicos. Em dois desses modos, o estiramento assimétrico e a deformação angular, ocorrem em $4,2 \mu\text{m}$ e $15,0 \mu\text{m}$ respectivamente, justamente na faixa de comprimento de onda do infravermelho, a molécula de CO_2 passa a apresentar um momento de dipolo, é esse momento de dipolo que faz com que a molécula interaja com a radiação infravermelha. A Figura 2 ilustra as variações de vibrações apresentadas pela molécula de CO_2 .

Figura 2 - Modos vibracionais do dióxido de carbono



Fonte: Jungs *et al.*, 2018.

Antes de salientar o quanto o aumento das concentrações de CO_2 são preocupantes, é necessário destacar que este gás desempenha um papel importante na atmosfera terrestre. As eras do gelo estão fortemente ligadas a quantidade de CO_2 presente na atmosfera. Ou seja, altas concentrações de CO_2 estão relacionadas a altas temperaturas (períodos interglaciais) e baixas concentrações de CO_2 estão relacionadas a temperaturas baixas (períodos glaciais). A remoção dos gases não condensáveis da atmosfera, dos quais o dióxido de carbono é o mais abundante, levaria o efeito estufa a um colapso, tais condições levariam o planeta a uma glaciação descontrolada (Lacis; Redy; Schmidt, 2010). A Figura 3 ilustra a relação entre as concentrações de gás carbônico e a temperatura ao longo dos anos

Figura 3- Relação da concentração de CO_2 e temperatura ao longo do tempo.

Fonte: Jungs *et al.*, 2018.

Além disso, ainda que o CO₂ seja o gás em destaque quando se fala de efeito estufa, uma vez que é o mais abundante e seu tempo de permanência na atmosfera é mais longo, este não é o gás com maior eficiência na absorção de radiação infravermelha. O CH₄, por exemplo, tem um PAG (Potencial de Aquecimento Global) de cerca de 23, isso significa dizer que, em termos de impacto sobre o aquecimento global, uma tonelada de metano tem o mesmo efeito que 23 toneladas de dióxido de carbono (Spiro; Stigliani, 2010; IPCC, 2014). A Tabela 2 explana os potenciais de aquecimento global dos gases de efeito estufa mais importantes na atmosfera terrestre em relação ao CO₂.

Tabela 2 – Potencial de Aquecimento Global de gases de efeito estufa

Gás estufa	PAG
CO ₂	1
CH ₄	23
N ₂ O	296
CFC-11	4.000
HCF-23	11.700

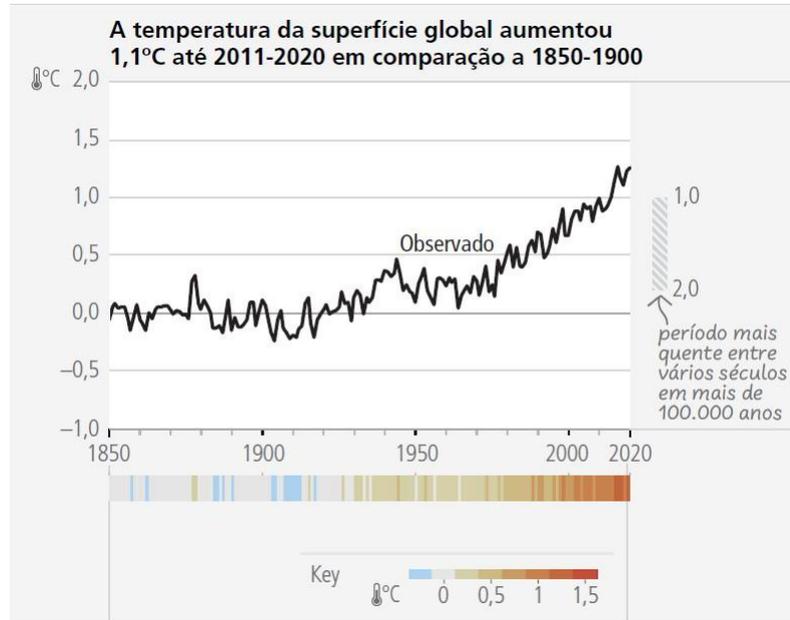
Fonte: Criado pela autora com base em Spiro e Stigliani, 2010.

É incontestável a relevância do CO₂ para a manutenção da temperatura propícia do planeta Terra, todavia o aumento da concentração deste gás na atmosfera é a principal causa da intensificação do efeito estufa, processo também denominado de Aquecimento Global (Trindade; Pina; Fernandes, 2011). Segundo o relatório de síntese mais recente do IPCC (2023), as ações antrópicas são responsáveis pelo aquecimento global, preponderantemente através das emissões de gases de efeito estufa em queima de combustíveis fósseis, processos industriais, fornecimento de energia, transporte, agricultura e edificações.

O aumento nas concentrações de CO₂ ocorre desde cerca 1750, com a Revolução Industrial, em que surgiram as primeiras máquinas a vapor e ao longo dos anos continuaram a crescer. A temperatura de superfície global foi cerca de 1,1°C mais alta entre 2011-2020 do que entre 1850-1900. A temperatura de superfície global aumentou rapidamente desde 1970 do que qualquer período de 50 anos durante pelo menos os últimos 200 anos. Em 2019, estima-se que as emissões antropogênicas globais de gases de efeito estufa foram $59 \pm 6,6$ GtCO₂, consequentemente as equações atmosféricas são alteradas. Dados recentes do IPCC revelam que a concentração de CO₂ foi de

415 ppm. A Figura 4 ilustra o aumento da temperatura de superfície ao longo dos anos e a Figura 4 faz uma relação com a concentração de CO₂.

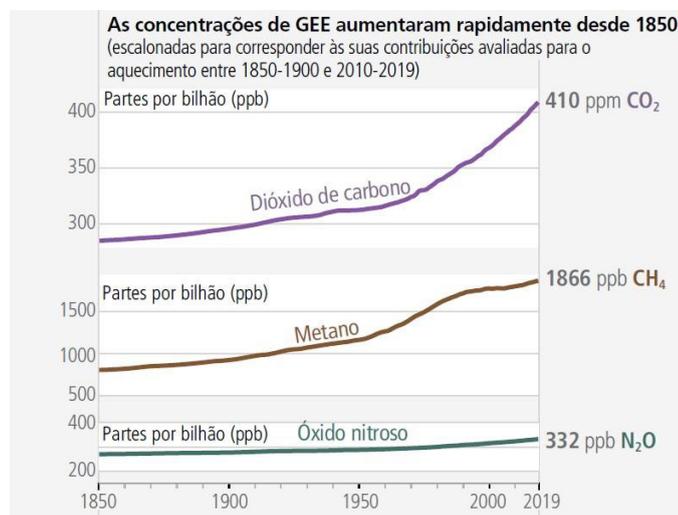
Figura 4 – Registro histórico das temperaturas globais.



Fonte: Relatório de síntese IPCC, 2023.

A Figura 5 ilustra a relação entre as temperaturas globais de superfície com as concentrações de CO₂ ao longo do tempo.

Figura 5 – Aumento das concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera



Fonte: Relatório de síntese do IPCC, 2023.

É importante enfatizar que também houve alteração nas concentrações atmosféricas dos demais gases de efeito estufa. A tabela 2 faz uma breve comparação das concentrações de tais gases em um espaço de tempo:

Tabela 3 – Mudanças nas concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa.

	1750	2021
CO ₂	280 ppm	415 ppm
CH ₄	722 ppb	1896 ppb
N ₂ O	270 ppb	335 ppb

Fonte: Criado pela autora com base em relatórios IPCC 2014 e 2023.

O aumento das concentrações de gases estufa na atmosfera estão gerando danos substanciais e, alguns, irreversíveis. Dentre estes podem-se destacar o aumento das secas agrícolas ecológicas em regiões devido ao aumento da evapotranspiração na Terra, acidificação dos oceanos, elevação do nível do mar ou a diminuição regional da precipitação, problemas de saúde pública, alterações na gama de espécies além de mudanças no calendário sazonal. Medidas para mitigar as emissões de dióxido estão sendo estudadas e aplicadas, principalmente em polos industriais, dentre elas destacam-se os métodos de captura de CO₂.

3.2 Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS)

Segundo a UNECE (United Nations Economic Commission for Europe), 80% da matriz energética ainda é apoiada em combustíveis fósseis. O carvão, petróleo e gás são cruciais para segurança energética e bem-estar econômico de muitos países e a tendência é de que continuem a desempenhar esse papel importante a curto e médio prazo. Com isso, os formuladores de políticas em todo o mundo precisam adotar tecnologias que possibilitem o cumprimento da meta *Net Zero*, que tem por objetivo equilibrar ou zerar as emissões líquidas de CO₂ até 2050, a fim de limitar o aquecimento global a 1,5°C - 2 °C das temperaturas pré-industriais, combatendo, dessa forma, as mudanças climáticas (International Energy Agency, 2023).

As tecnologias de Captura, Uso e Armazenamento de Carbono (CCUS) são apontadas como uma das ferramentas necessárias entre as opções tecnológicas disponíveis para

atingir as metas de redução de emissões de GEE até 2050. As tecnologias de CCUS são um conjunto de mecanismos utilizados para capturar CO₂, armazená-lo de forma segura em reservatórios geológicos ou em tanques para ser utilizado diretamente ou indiretamente em vários produtos (Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP, 2024). Essas três etapas compõem o chamado sequestro de carbono, em que a captura de CO₂ é apenas uma das etapas. Capturar o gás carbônico significa removê-lo seletivamente de uma mistura gasosa ou efluente gasoso que pode variar do próprio ar até o gás natural (composto principalmente por CH₄, CO₂ e H₂S), efluentes gasosos provenientes de processos industriais e termoelétricas. (Miranda *et al.*, 2019). A Figura 6 ilustra o sistema CCUS.

Figura 6 – Etapas do Sistema de Captura, Transporte e Armazenamento de CO₂.



Fonte: Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, 2024.

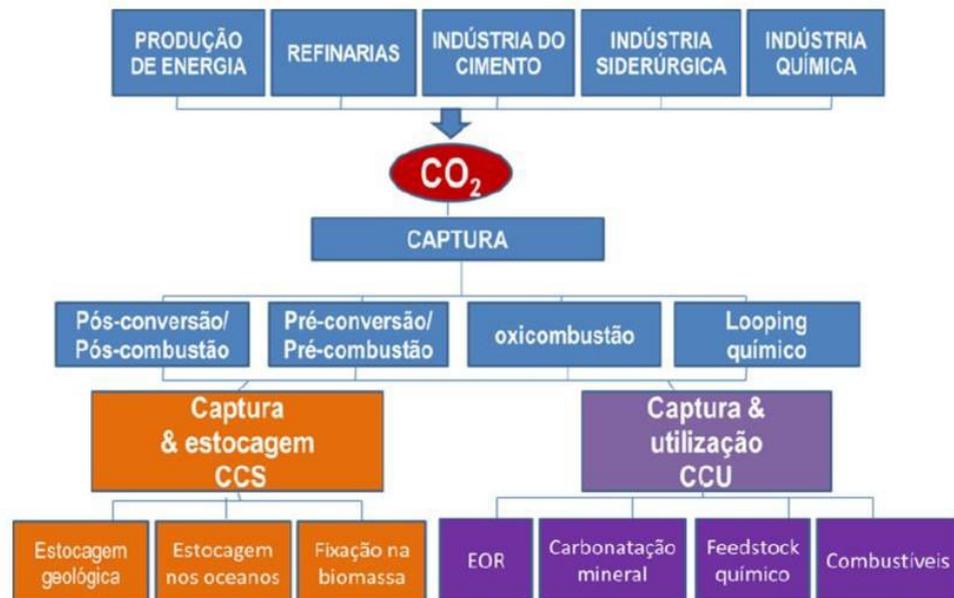
O conceito de CCUS abrange duas vertentes para lidar com o dióxido de carbono capturado de fontes industriais e energéticas, que são: Captura e Armazenamento de Carbono (CCS) e Captura e Utilização de Carbono (CCU) que, embora possuam o mesmo ponto de partida que é a captura de CO₂, apresentam impactos ambientais e econômicos diferentes.

Aos métodos de CCS, denota-se a captura e armazenamento de dióxido de carbono a longo prazo. Esse armazenamento é realizado em formações geológicas subterrâneas, visando a não liberação deste gás na atmosfera. Este processo consiste em capturar o gás em questão, comprimi-lo e injetá-lo em formações geológicas profundas, que podem ser reservatórios de petróleo e gás esgotados e aquíferos salinos (Nagireddi; Agarwal; Vadapuri, 2023). De acordo com o IPCC, este método é a melhor estratégia para limitar o aumento da temperatura global e cumprir a agenda *Net Zero* até 2050. Segundo a Agência Internacional de Energia (AIE), com

a implantação global de tecnologias de CCUS, 115 bilhões de toneladas de CO₂ será capturado até 2060, sendo 93% deste valor armazenado permanentemente no subsolo (Yang *et al.*, 2023).

Em contrapartida, CCU refere-se a captura do CO₂ e a aplicação, que pode ser direta, em que a molécula não é alterada quimicamente e indireta em que a molécula passa por processos químicos, biológicos e eletroquímicos (AIE, 2023). As tecnologias de CCU, visam converter o CO₂ em produtos de valor agregado, como produtos químicos, combustíveis e materiais de construção, por meio de processos químicos, biológicos e eletroquímicos. Embora essas tecnologias de utilização não removam permanentemente o CO₂ da atmosfera, elas podem oferecer uma alternativa aos materiais baseados em combustíveis fósseis e reduzir a dependências de energias não renováveis. Segundo a AIE (2023), cerca de 230 Mt de CO₂ já são utilizados por ano, principalmente na recuperação de aprimorada de petróleo. O esperado é que até 2030, cerca de 8 Mt de CO₂ sejam capturados e utilizados para aplicação de combustíveis sintéticos, que é uma aplicação emergente. A figura 7 ilustra um panorama geral das fontes de captura, as possíveis tecnologias a serem utilizadas e as diferentes destinações para este gás, considerando a estocagem ou o armazenamento.

Figura 7 -Visão geral sobre captura e estocagem de CO₂



Fonte: Miranda, J. L. *et al.*, 2018.

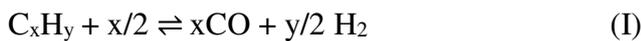
3.3 Tecnologias de Captura de CO₂

Os diferentes modos de capturar CO₂ são: pré-combustão, pós-combustão, oxicomustão que são atualmente mais utilizados, no entanto tecnologias emergentes como *looping* químico está ganhando força.

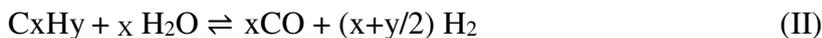
3.3.1 Pré-combustão

A captura de CO₂ por pré-combustão é uma das principais tecnologias de captura de carbono em meio aos processos de CCUS. A pré-combustão consiste em remover o CO₂ do gás combustível antes que a queima e a produção de energia aconteçam (Jiang *et al.*, 2015). Nesta tecnologia o combustível não é completamente queimado no reator, mas transformado em uma mistura de CO e H₂ no processo de gaseificação (Madejski *et al.*, 2022).

Segundo Spigarelli e Kawatra (2013), o combustível primário a ser utilizado neste processo pode ser carvão natural, gás natural, petróleo bruto e biomassa. Estes serão gaseificados, processo que formará o gás de síntese, composto por CO e H₂. Este gás é o produto da reação incompleta do combustível com o oxigênio, como representa a reação genérica de conversão a seguir:



O procedimento descrito acima é aplicado para combustíveis líquidos e gasosos, para sólidos, ao invés de oxigênio utiliza-se vapor de água, como explana a seguinte reação:



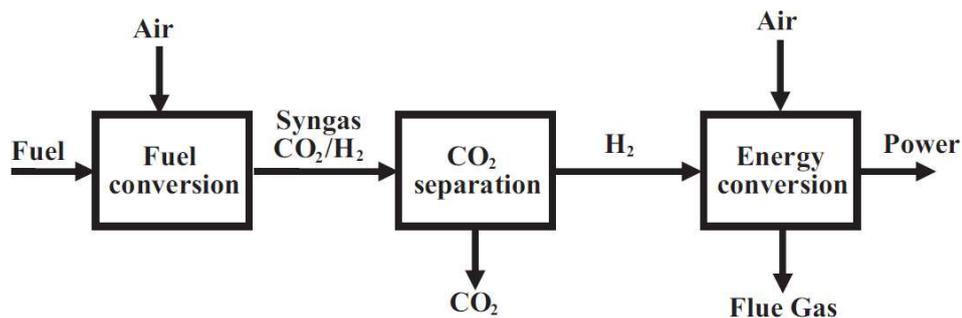
Em seguida o gás de síntese reage com vapor de água, formando o dióxido de carbono como produto final, juntamente com o hidrogênio, segundo a reação química:



As reações envolvidas neste processo ocorrem a altas temperaturas (cerca de 1400

°C) e pressão (500-800 psi). O CO₂ é capturado no separador de CO₂ e enviado para armazenamento e utilização e o gás H₂ é liberado para a turbina a gás como combustível (Madejski *et al.*, 2022) A Figura 8 ilustra um diagrama de blocos simplificados para a captura de CO₂ utilizando pré-combustão.

Figura 8- Diagrama de blocos para a captura de CO₂ por pré-combustão.

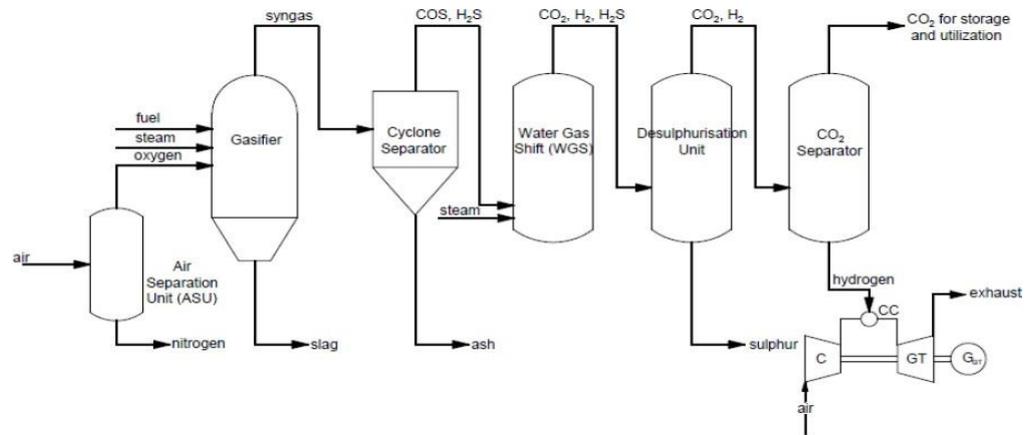


Fonte: Spigarelli; Kawatra, 2013

A tecnologia de pré-combustão utiliza mais comumente solventes químicos, físicos, membranas ou fracionamento criogênico. No entanto, o mais viável é a aplicação de solventes físicos, uma vez que estes são favorecidos quando a concentração de gases ácidos é elevada e estão sob condições de alta pressão, que é o caso dos processos de pré-combustão. Além disso, os solventes físicos não são corrosivos e não precisam de um tratamento rebuscado para regeneração do solvente, pois apenas com a redução da pressão eles são despojados de impurezas, ao contrário de solventes químicos que necessitam de calor para regeneração. Os reagentes mais utilizados para esta tecnologia são o selexol, metanol ou carbonato de propileno (Burr e Bryan, 2010).

Se aplicada de forma eficaz, este método pode atingir até 90% de captura de CO₂ (Madejski *et al.*, 2022). A figura 9 ilustra um esquema do método de captura pré-combustão utilizando absorção química.

Figura 9 - Diagrama de captura por pré-combustão utilizando absorção química

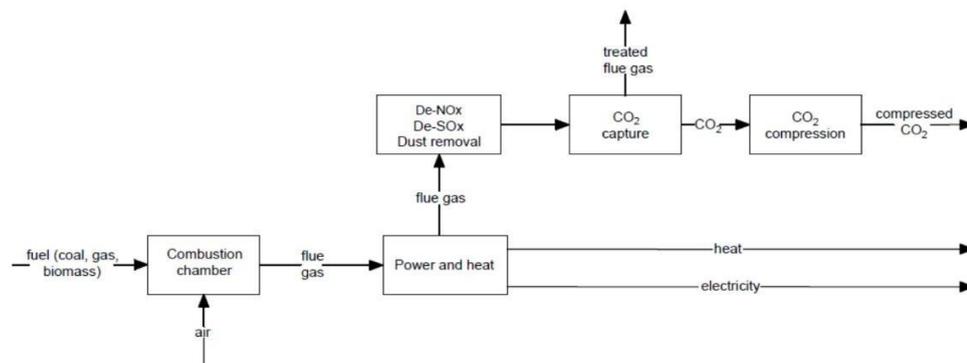


Fonte: Madejski *et al.*, 2022

3.3.2 Pós-combustão

A captura de CO₂ pela tecnologia de pós-combustão é a mais consolidada e implantada em vários projetos e utilizada em larga escala industrial (Nagireddi; Vedapuri, 2023). Essa tecnologia consiste em capturar o CO₂ na exaustão do sistema de combustão, na faixa de temperatura de 120°C-180°C e absorvê-lo com o auxílio de um solvente, em seguida é separado e comprimido. (IBP, 2024). A Figura 10 ilustra um diagrama de blocos da tecnologia de pós-combustão.

Figura 10 - Diagrama de blocos para pós-combustão



Fonte: Madejski *et al.*, 2022

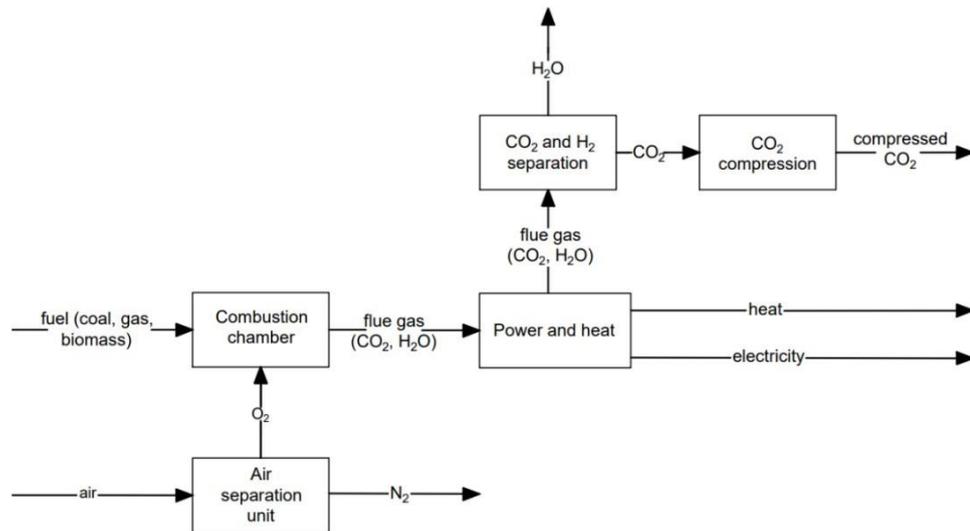
A tecnologia de pós-combustão pode ser aplicada de inúmeras maneiras, como empregando absorção química, adsorção física, separação por membrana, entre outras. A pós-combustão utilizando absorção é a mais aplicada e seu processo industrial é dividido em duas etapas. Na primeira etapa, o gás proveniente da combustão irá reagir com o solvente no absorvedor para capturar o dióxido de carbono. Em seguida, a solução rica em CO₂ é levada para um stripper, ou seja, para uma coluna de dessorção onde o CO₂ será regenerado a temperaturas elevadas. Os solventes mais utilizados são as alcanaminas, em especial a monoetanolamina (MEA), dietanolamina (DEA) e a metildietanolamina (MDEA) (Madejski et al., 2022).

Embora a absorção química seja a mais utilizada nos processos de pós-combustão, a adsorção química também é uma técnica eficaz. Neste procedimento usa-se materiais porosos, como o carvão ativado, alumina, óxidos metálicos e zeólitas. Geralmente o carvão ativado é mais utilizado, visto que apresenta carbono amorfo, vasta área de superfície e a possibilidade de modificação na estrutura de poros, no entanto esse material possui limitações como a fraca energia de ligação com o CO₂, por isso outros insumos estão ganhando força, como as zeólitas, que por sua vez possui boas propriedades de adsorção, além do uso de estruturas metal-orgânicas. Outras técnicas menos comuns são a utilização de membranas e criogenia. (Madejski et al., 2022).

3.3.3 Oxi-combustão

Segundo a IEA (2020), a tecnologia de oxicomcombustão está no estágio de grande protótipo e pré-demonstração, no entanto por suas inúmeras vantagens, entre elas a elevada concentração de CO₂ obtida no processo (cerca de 75%-80%), é considerada uma tecnologia promissora. Esta promove a queima do combustível junto com o oxigênio no lugar do ar, dessa forma, o gás resultante é composto apenas por vapor de água e dióxido de carbono (IBP, 2024). A figura 11 ilustra o diagrama de blocos do processo de oxi-combustão.

Figura 11 - Diagrama de blocos para tecnologia de oxi-combustão.



Fonte: Madejski, 2022.

Como observado na figura 11 o O_2 é separado do N_2 , após esta etapa pode ser utilizado para a combustão na presença de vapor de água e CO_2 , tendo como produto majoritário CO_2 em altas concentrações e vapor de água, que pode ser facilmente removido através de condensação, seguida o gás carbônico é comprimido e armazenado. É válido ressaltar que, devido a combustão do oxigênio puro elevar muito a temperatura, cerca de $3500^\circ C$, e esta temperatura ser alta para certos materiais utilizados no processo, é necessário diluir o oxigênio de 30% a 35%, a fim de diminuir a temperatura e mantê-la na faixa de $1500^\circ C$. Embora apresente vantagens de obtenção de CO_2 em elevadas concentrações e a possibilidade de utilizar métodos simples e economicamente viáveis, o grande desafio desta tecnologia emergente é o processo de separação do O_2 do ar, feito geralmente por destilação criogênica, de alto valor agregado em equipamentos e gasto considerável de energia no processo de separação (Sousa, 2021).

Projetos envolvendo a oxi-combustão foram concluídos, em destaque o projeto Callide, na Austrália, que foram realizados na geração de energia a partir do carvão e na produção de cimento, na Instalação Cement Innovation for Climate na Alemanha (IEA, 2020).

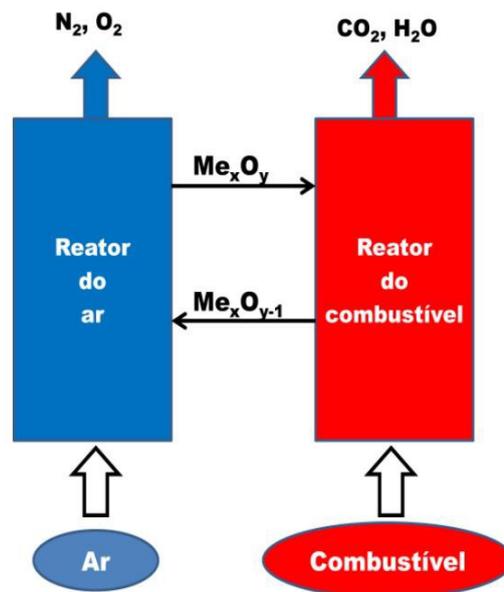
3.3.4 Looping químico

Originário da sigla CLC (Chemical Looping Combustion), e introduzido em 1954 por Lewis e Gilliland, o looping químico só ganhou notoriedade em 1987 pela pesquisa de Ishida.

Embora pesquisas sobre esta técnica tenham iniciado no século passado, é a tecnologia mais nova, dentre as já citadas, na qual o corpo científico considera vantajosa (Alalwan; Alminshid, 2021). Esta tecnologia envolve a transferência de oxigênio do ar de combustão para o combustível. (Miranda *et al.*, 2018).

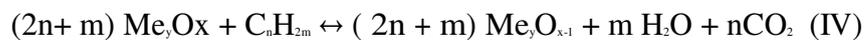
A combustão em *looping* químico utiliza para queimar combustíveis fósseis materiais transportadores de oxigênio em estado sólido, como os óxidos, geralmente de Ferro (Fe), Manganês (Mn) e Cobre (Co). Para que não haja contato direto do ar com o combustível, dois reatores de leito fluidizados são acoplados, como a figura 10 ilustra.

Figura 12 - Representação de reatores de leito fixo para técnica de CLC.

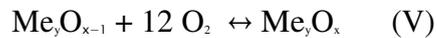


Fonte: Mirante *et al.*, 2018.

A primeira etapa do processo ocorre no reator de combustível, em que os combustíveis fósseis são oxidados pelo oxigênio reticular no óxido metálico, obtendo como produto CO₂ e vapor de água, que descarta a necessidade de separação de gases, haja vista que para separar o dióxido de carbono do vapor de água, um processo de condensação é suficiente, como mostra a reação IV.



Dentro do reator de ar acontece a segunda etapa do processo, na qual o transportador de oxigênio sólido que havia sido reduzido é reoxidado, regenerando dessa forma, o óxido metálico, conforme mostra a reação (V):



Os efluentes gasosos nos processos de CLC possuem teores de gases poluentes insignificantes, possibilitando a liberação na atmosfera (Alalwan; Alminshid, 2021).

3.3.4 Tecnologias de separação de CO₂

3.3.4.1 Absorção

Segundo Leite, Bertoli e Barros (2005), a absorção de gases é um muito empregado em processos químicos, principalmente em plantas industriais, que pode ser utilizado tanto na preparação da matéria prima, para a transformação de insumos em produtos finais quanto para a refinação dos produtos finais obtidos. Este processo consiste na transferência do composto desejado de uma mistura gasosa para um líquido absorvente devido a diferença de solubilidade e concentração entre as fases. A absorção pode ser exclusivamente física ou química, em que reações acontecem (Leite; Bertoli; Barros, 2005).

3.3.4.1.1 Absorção química

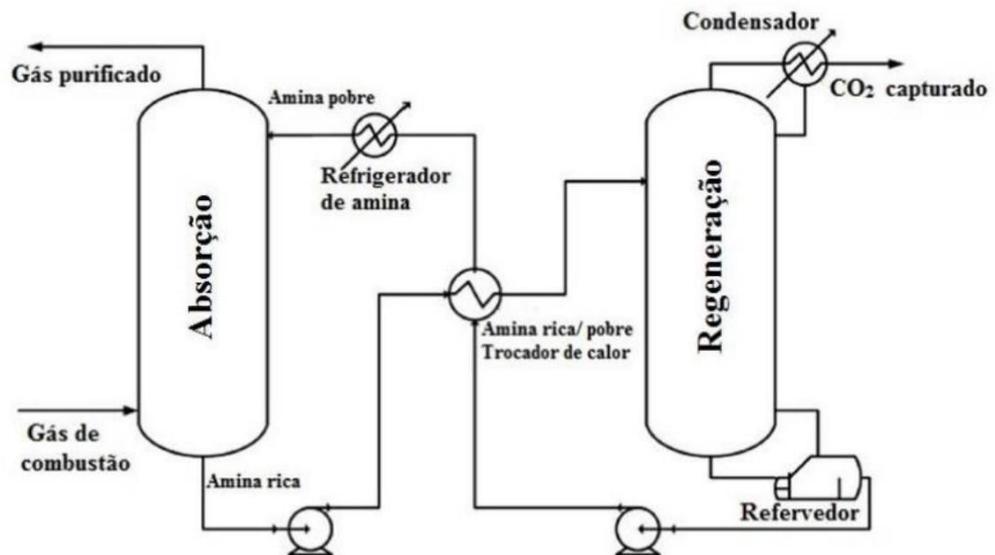
A absorção química fundamenta-se na afinidade de um solvente químico com um determinado soluto da mistura ou solução. No caso da absorção de CO₂, o solvente químico irá dissolver apenas o dióxido de carbono, separando-o dos demais gases de exaustão. Como o CO₂ é um gás ácido, a absorção deste ocorre por meio de uma reação de neutralização com solventes alcalinos que, por sua vez, o separa dos demais gases envolvidos no processo, como O₂, N₂, CO, entre outros (Sousa, 2021). Esta técnica de captura é a mais tradicional para processos de pré-combustão e pós-combustão. (Pereira, 2022).

Os gases de combustão presentes na exaustão irão depender da fonte de carbono utilizada para a queima, mas o ideal para aplicação desta técnica é que antes da absorção um

pré-tratamento feita nesta mistura de gases, isso porque alguns gases como SO_x degradam o solvente utilizado, formando produtos indesejados (Spigarelli; Kawatra, 2013).

Após a realização deste pré tratamento, o gás é resfriado a 40-60 °C e só então exposto ao solvente a ser utilizado em uma coluna de absorção, na qual formará compostos intermediários e fracos. Em seguida, a solução rica em CO₂ é direcionada para uma coluna de *stripping*, local em que a temperatura será elevada a fim de promover a quebra de compostos intermediários, processo que regenera o absorvente utilizado (Spigarelli; Kawatra, 2013). A Figura 13 ilustra como ocorre este processo em escala industrial.

Figura 13 - Diagrama de absorção química do CO₂, utilizando amina.



Fonte: Sousa, 2021.

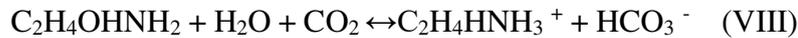
De acordo com a IEA (2020), a absorção química empregando solventes à base de amina, é a técnica de separação de CO₂ mais avançada. a absorção utilizando aminas vem sendo utilizada por décadas em projetos de pequeno e grande porte em escala mundial em geração de energia, exemplos disso Boundary Dam no Canadá e Petra Nova nos Estados Unidos.

Os absorventes à base de amina possuem átomos de nitrogênio (N) reativos, além disso apresentam maior capacidade de absorção em menor pressão parcial do que os absorventes físicos (Dubey; Arora, 2022). A reações a seguir ocorrem durante o processo:





As aminas são classificadas com base no número de hidrogênios substituídos, ou seja, quando uma têm-se um hidrogênio substituído, por exemplo, por grupos alquila ou arila, esta amina é classificada como primária, se dois hidrogênios forem substituídos, esta é uma amina secundária e, por fim, ao substituir-se os três hidrogênios, uma amina terciária é formada. As aminas primárias e secundárias apresentam absorvidade molar de 0,5 mol de CO₂/mol de amina. A monoetanolamina (MEA), a dietanolamina (DEA) e metildietanolamina (MDEA), são os solventes mais utilizados devido ao seu baixo custo, no entanto, dentre os três, destaca-se a MEA (Dubey; Arora, 2022). A reação específica para MEA na absorção está a seguir:



$$\Delta H_{\text{rx}} = 20 \text{ Kcal/mol}$$

A regeneração rica em CO₂ é encaminhada para um desabsorvedor em que será submetida a altas temperaturas para que o CO₂ seja liberado, regenerando, dessa forma a amina, que após este processo será resfriada e recirculada novamente ao processo de captura de CO₂ (Spigarelli e Kawatra, 2013). A reação mostra o processo de regeneração da amina



Apesar de ser amplamente aplicado, o uso de aminas apresenta limitações, como quantidade de energia elevada para a regeneração de 3,7 GJ/tCO₂ com a utilização de 1,4 Kg MEA/tCO₂. Com o intuito de melhorar a absorvidade, realizaram misturas de várias aminas, incluindo aminas terciárias, que possuem maior absorvidade (Spigarelli; Kawatra 2013).

Os processos disponíveis comercialmente são: o processo *Kerr-MCGee/AGG Lummus Crest* (KMALC), o *Fluor Econamine FG PlusSM* (EFG+) e o processo KM-CDR. O processo KMALC utiliza a solução de MEA de 15% a 20% em peso para absorção de CO₂, esta demonstrou uma capacidade de absorção máxima de 800 t/dia. Já a tecnologia EFG+ utiliza uma solução de amina 35% em peso de MEA misturada com um inibidor penteado, o que aumenta a concentração de MEA, este inibidor também reduz a corrosividade do solvente MEA, o que reduz os custos dos equipamentos utilizados no processo. Outra tecnologia já disponível é a KM-CDR, que é licenciada pela *Mitsubishi Heavy Industries*. Estes empregam

aminas estericamente impedidas, ou seja, possuem um grupo substitutivo volumoso, para a absorção. Estas últimas apresentam baixa corrosividade e menor degradação de O₂. A aplicação da técnica usando este tipo de solvente alcançou a capacidade de 500 t/dia de CO₂. Para uma melhor comparação dos solventes utilizados na absorção química, segue a figura 14 com uma tabela apresentando a taxa de absorção de cada solvente (Spigarelli; Kawatra, 2013).

Figura 14 - Comparação da capacidade de absorção dos solventes a base de aminas.

Solvent	Absorption capacity (mol CO ₂ /kg solvent)	Absorption rates (mol/s.Pa.m ²)
MEA	0.47	4.3×10 ⁻⁷
Piperazine (PZ)	0.79	8.5×10 ⁻⁷
N-methyl Piperazine	0.83	8.39×10 ⁻⁷
2-methyl Piperazine	0.93	5.91×10 ⁻⁷
AMP	0.96	2.4 ×10 ⁻⁷
EDA	0.72	2.1×10 ⁻⁷
MEA+PZ	> MEA	~2.5 times more than MEA
MEA+MDEA	> MEA	-----
MDEA+ Piperazine	0.98	8.30 ×10 ⁻⁷
Aq. Ammonia (NH ₃)	1.19	1.5 to 2 times less than MEA

Fonte: Dubey; Arora, 2022.

As utilizações de outros solventes alcalinos estão sendo analisados, como hidróxido de sódio (NaOH) e hidróxido de potássio (KOH), tendo como produtos sais carbonatos e bicarbonatos (Na₂CO₃, K₂CO₃) (Pereira, 2022).

3.3.4.1.2 Absorção física

A absorção física, semelhantemente a absorção química consiste na separação de um componente gasoso através de um solvente líquido, entretanto, na absorção física a dissolução do componente gasoso no solvente empregado ocorre sem que haja uma reação química, as interações das moléculas são eletrostática, mais precisamente atração por forças de Van der Waals, logo a interação entre solvente e soluto são fracas, o que é vantajoso se comparado com a absorção química, haja vista que solvente e soluto são facilmente regenerados.

Neste processo, em que não ocorre reação química, o que possibilita a transferência de massa gás-líquido é o gradiente de concentração do CO₂ entre a corrente gasosa e a solução absorvente. Desta forma, a elevada pressão parcial do dióxido de carbono na mistura gasosa, aumenta o gradiente de concentração entre a fase líquida e gasosa, o que contribui para a maior absorção do CO₂ pelo absorvente. Este processo segue a lei de Henry (Oliveira, 2016).

Esta técnica já vem sendo implementada há mais de 60 anos no ramo industrial de petróleo e gás natural, e na indústria química, mais especificamente na remoção de gases ácidos como CO₂ e H₂S e na produção de H₂ (Sousa, 2021). Os solventes físicos mais utilizados na absorção física estão listados na figura 15.

Figura 15 - Absorventes utilizados em absorção física

Absorvente	Marca comercial	Empresa (s)	Condições de operação	Aplicações
Metanol (CH ₃ OH)	RECTISOL®	Linde AG (www.linde-engineering.com) Air Liquide (www.airliquide.com)	Pressão: 27 – 68 atm (2,76 a 6,89 MPa) Temperatura: -70°C a -10°C, tipicamente -45°C a -57°C Caudais de operação: 235 a 1,1×10 ⁵ Nm ³ /h Regeneração do absorvente: despressurização ou lavagem com azoto	Remoção de H ₂ S e de CO ₂ de misturas de hidrocarbonetos: 1. Processamento de gás natural; 2. Purificação de gás de síntese obtido por gasificação ou por re formação de metano do gás natural. Adequado se a concentração de CO ₂ e a pressão da mistura gasosa forem elevadas
	Ifpexol™	Prosernat (http://www.prosernat.com)	Produto final: concentração CO ₂ >98,5 % (molar); 1,6 a 3,4 atm	
DPEG – éter dimetilico de polietilenoglicol (CH ₃ O(C ₂ H ₄ O) _n CH ₃) n varia entre 3 e 9	Selexol™	Dow Chemical Company (http://www.dow.com) UOP – Universal Oil Products (http://www.uop.com)	Pressão: 20 – 60 atm (2 a 6 MPa) Temperatura: -18°C a 40°C, tipicamente -1,1°C (temperatura máxima de operação 175°C) Caudal de processamento: 250 Nm ³ /h a 6×10 ⁵ Nm ³ /h. Regeneração do absorvente: despressurização ou lavagem com vapor de água	Absorvente seletivo para separação de CO ₂ , H ₂ S, COS, mercaptanos de misturas de hidrocarbonetos: 1. Processamento de gás natural; 2. Purificação de gás de síntese produzido a partir de hidrocarbonetos pesados ou de carvão. Adequado se a concentração de CO ₂ (>20 %) e a pressão da mistura gasosa forem elevadas. Hidrocarbonetos líquidos < 1%.
	Coastal AGR	Coastal Chemical Company (http://www.coastalchem.com)		
	Genosorb®	Clariant GmbH (http://www.clariant.com) Uhde GmbH (https://procurement.uhde-web.de)		
NMP (n-metil-2 pirrolidona) (CH ₃ N(CH ₂)CO)	Lurgi Purisol®	Air Liquide (www.airliquide.com)	Temperatura: -20°C a 40°C, tipicamente temperatura ambiente: 20°C Regeneração do absorvente: lavagem com vapor de água Concentração e pressão de CO ₂ elevadas > 2 MPa	Separação de H ₂ S de CO ₂ porque é muito seletivo ao H ₂ S face ao CO ₂ , assim, é bastante adequado para sistemas de IGCC
PC (carbonato de propileno) (COOCH ₂ CHOCH ₃)	Fluor Solvent SM JEFFSOL® PC	Fluor (www.fluor.com) Huntsman (www.huntsman.com)	Pressão: 30 – 70 atm (3,1 a 6,9 MPa) Temperatura: -20°C a 30°C (instável a temperatura >65°C e decomposição a 93°C) Regeneração do absorvente: lavagem com um gás inerte (N ₂)	Separação de CO ₂ / CH ₄ porque é muito seletivo ao CO ₂ face ao CH ₄ . O processo de regeneração do absorvente faz-se por despressurização (flash) em etapas e por isso os custos de operação são menores. Não recomendável na presença de H ₂ S em concentrações superiores às vestigiais

Fonte: Oliveira, 2016.

Dos solventes utilizados na absorção física listados na figura acima, destacam-se o metanol e o DEPG. O metanol é pode ser empregado em inúmeros processos de separação de gases ácidos, incluindo o Rectisol (licenciando pela Lurgi AG) que foi o primeiro a ser comercializado, e Ifpexol® (Prosernat). No caso do processo de Rectisol, sua maior aplicação é a purificação de gás de síntese provenientes da gaseificação do gás de síntese de carvão e óleo pesado. O metanol apresenta alta pressão de vapor, o que requer condições especiais de refrigeração, para que não haja perda considerável do produto e uma lavagem com água de dois

fluxos é suficiente para recuperá-lo. O processo geralmente ocorre em temperaturas abaixo de 0 °C. A maior vantagem desta tecnologia é a alta seletividade do metanol para H₂S em relação ao CO₂ combinados com a capacidade de remover COS (Oliveira, 2016).

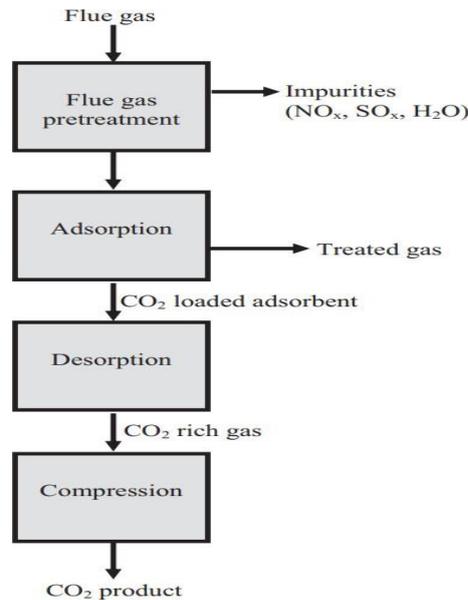
DEPG, por sua vez, é uma mistura de éteres dimetílicos de polietilenoglicol, estes também são usados para absorver fisicamente CO₂ e H₂S. Esta mistura de éteres possui alta viscosidade o que reduz a transferências de massa, o que pode ser uma desvantagem. A remoção seletiva de H₂S com a remoção de CO₂ ocorre em duas etapas, utilizando duas colunas de absorção, a terceira é designada para a regeneração. Na primeira coluna o H₂S é removido com a utilização de um solvente tratado com vapor, e o CO₂ é removido no segundo absorvedor. (Burr; Bryan).

3.3.4.2 Adsorção

A adsorção baseia-se em propriedades termodinâmicas de uma substância em se deslocar de uma fase gasosa e aderir-se a um material sólido, a fixação do gás no material sólido ocorre por meio de forças intermoleculares. Este processo pode ser físico, fisiossorção, em que a fixação ocorre apenas por meio de forças intermoleculares, e pode ocorrer um processo químico, a quimiossorção, na qual ocorre a alteração das substâncias envolvidas (Sousa, 2021). Neste trabalho fará menção apenas a fisiossorção, uma vez que é mais utilizado para a captura de CO₂ do que a quimiossorção.

No processo de fisiossorção apenas forças fracas de van der Waals estão presentes. Para tal é o mecanismo de Adsorção por Oscilação de Pressão (*Pressure Swing Adsorption*) é empregado, neste a corrente gasosa entra pressurizada na torre de captura, logo após a pressão é reduzida até chegar em níveis atmosféricos, com o objetivo de dissolver o CO₂ que será armazenado. Este processo ocorre à temperatura ambiente e é uma grande vantagem em relação às outras técnicas. É importante destacar que antes do processo de adsorção de fato ocorrer, é necessário um tratamento para remover a água do gás, uma vez que esta compete por sítios de adsorção e degrada a estrutura cristalina de alguns adsorventes (Spigarelli e Kawatra, 2013). A Figura 16 retrata o diagrama de blocos para o processo de adsorção.

Figura 16 - Diagrama de blocos para processo de adsorção.

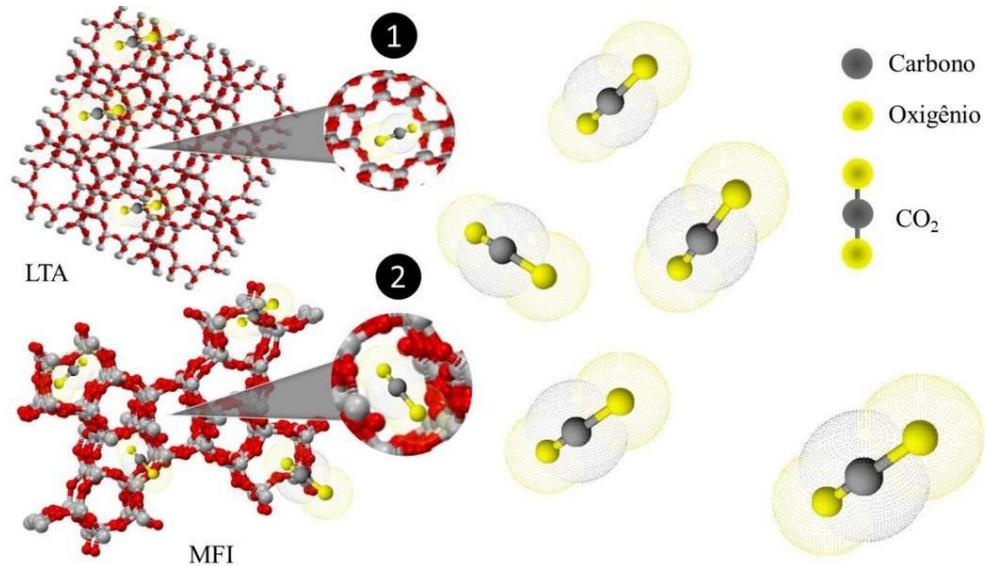


Fonte: Spigarelli; Kawatra, 2013.

O carvão ativado é amplamente usado neste processo por seu baixo custo e estabilidade a altas temperaturas. Este pode ser obtido a partir de materiais como carvão, madeira e biomassa (Sousa, 2021). O carvão ativado possui microporos em maioria, no entanto também apresenta mesoporos, o que faz com que alguns poros não sejam eficazes para a adsorção do gás. Ainda que apresente essa desvantagem, este material é muito utilizado nos métodos de pré e pós-combustão. (Pereira, 2022).

As zeólitas fazem parte de outra alternativa para a adsorção física. As zeólitas podem ser definidas como aluminossilicatos formados por uma rede aniônica, esta é balanceada por cátions localizados nas cavidades ou nos canais destes sólidos microporosos, conhecidos também por peneiras moleculares (Sousa, 2021). Estes aluminossilicatos destacam-se por sua composição química e tamanho de poros e também podem ser empregadas no processo PSA. As zeólitas podem ser consideradas adsorventes de baixo custo e possuem sorção reversível. A dessorção do CO₂ da zeólita pode ser controlada pela aplicação de temperatura ou pressão adequadas. Esta técnica é adequada para ser utilizada em sistemas de pós-combustão (De Longe, 2023). A Figura 17 apresenta o processo adsortivo utilizando zeólitas.

Figura 17 - Representação das zeólitas absorvendo a molécula de CO₂.



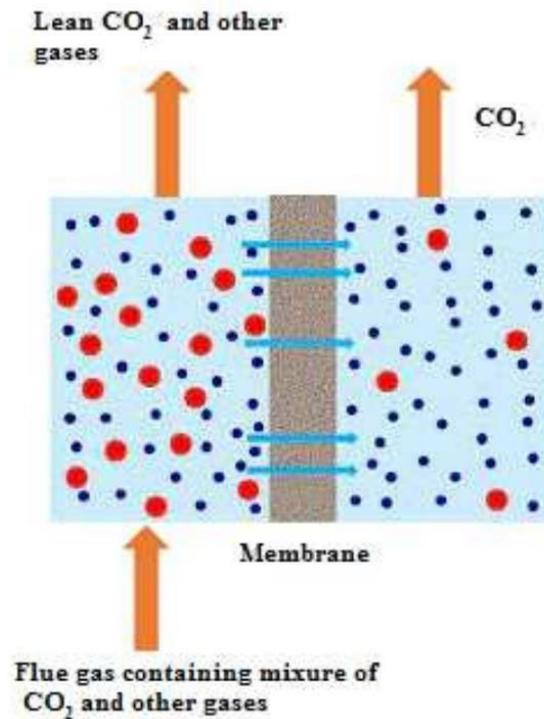
Fonte: De Longe, 2023.

3.3.4.3 Separação por membrana

As membranas são materiais sólidos e permeáveis, capazes de remover seletivamente um ou mais componentes da mistura que por ela atravessa. As separações por membrana podem ocorrer com base no tamanho molecular, no caso de membranas porosas, ou na solubilidade e difusividade das espécies, no caso de membranas assimétricas. (Pereira, 2022).

As membranas podem ser inorgânicas, geralmente de Al₂O₃, TiO₂, ZrO₂, no entanto são de alto valor agregado, embora sejam capazes de atuar a altas temperaturas, por isso não são usadas comercialmente. As mais utilizadas são as membranas poliméricas, uma vez que possuem custo-benefício viável, seletividade a CO₂ e N₂ e permeabilidade ao CO₂ (Dubey; Arora, 2022). A Figura 18 ilustra um esquema do processo de separação por membrana.

Figura 18 - Esquemática do processo de separação por membrana.

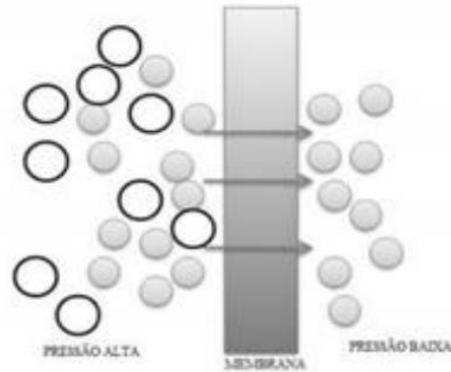


Fonte: Dubey; Arora, 2022.

O processo de separação por membrana pode ser subdividido em dois tipos: Membrana de separação de gás e Membrana de absorção de gás. Os dois métodos podem ser usados para capturar CO₂.

Na utilização de membrana de absorção de gás para captura de gás carbônico, o fluxo de gás que passa pela membrana densa, que tem como parâmetros seletividade e permeabilidade, é impulsionado pela diferença de pressão na membrana. Membranas deste porte são utilizadas para separar H₂ de combustíveis, CO₂ de processos com alta vazão e O₂ do ar, obtendo CO₂ em alta concentração. (Sousa, 2021). O processo descrito é ilustrado na Figura 19.

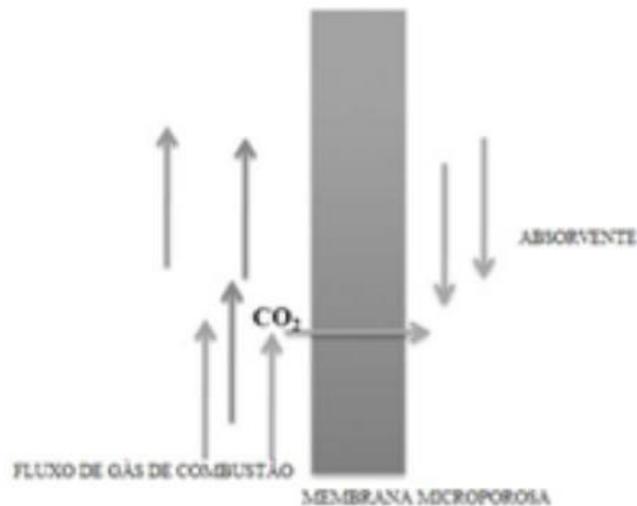
Figura 19 - Separação de CO₂ por membrana de absorção de gás.



Fonte: Sousa, 2021.

Já no uso de membranas de absorção de gás, uma membrana sólida microporosa e hidrofóbica (para evitar mistura entre as correntes) é empregada separando o gás e um solvente líquido. O CO₂ é difundido na membrana sendo recuperado com o auxílio de um solvente líquido, como representado na Figura 20.

Figura 20 - Separação do CO₂ por membrana sólida porosa.



Fonte: Sousa, 2021.

3.3.5 Armazenamento e utilização de CO₂

3.3.5.1 Armazenamento do CO₂

A captura e Armazenamento de carbono (CCS) refere-se a armazenar o CO₂ de longo prazo, ou permanentemente em formações geológicas para que este não seja lançado na atmosfera. O gás carbônico é capturado em centrais elétricas e instalações industriais, este em seguida é comprimido para o transporte e, então, armazenado. Esta última etapa pode ser realizada de várias formas.

Uma das formas mais comuns é o armazenamento geológico, nesta técnica o CO₂ é injetado em formações geológicas, como formações salinas, camadas de carvão não exploradas e, a mais utilizada, que é o armazenamento em reservatórios de petróleo e gás esgotados (Nagireddi; Vedapuri, 2023). A injeção de CO₂ em reservatórios de petróleo e gás é chamada de *Enhanced Oil Recovery* (EOR) ou Recuperação Avançada de Petróleo, tecnologia já utilizada pela Petrobras. Esta técnica além de evitar que emissões de CO₂ sejam lançadas na atmosfera, também aumenta a eficiência da produção, uma vez que a reinjeção do dióxido de carbono ajuda a manter a pressão dentro do reservatório, aumentando a quantidade de óleo (Petrobras, 2023).

Este aprisionamento do gás pode ser feito de três maneiras: O aprisionamento estrutural, no qual o CO₂ é confinado fisicamente dentro de uma formação geológica. A captura estratigráfica, em que o CO₂ é imobilizado dentro de camadas de rocha devido às diferenças de permeabilidade e porosidade. Por fim, a captura residual, que acontece quando o gás carbônico está preso em pequenos espaços dentro da rocha, mantido por forças capilares. (Nagireddi; Vedapuri, 2023).

Outras formas de armazenar o CO₂ estão sendo estudadas como o armazenamento oceânico, que consistem em dissolver este gás nas águas do oceano, no entanto é necessário estudar os possíveis efeitos nos ecossistemas marinhos e ambientais como um todo. O armazenamento em minerais também é uma abordagem potencial. Ele consiste na reação do CO₂ com minerais naturais como silicatos de magnésio e cálcio para formar carbonatos estáveis, todavia há desafios nesta técnica como a disponibilidade de reservas minerais adequadas e o custo energético necessário (Nagireddi; Vedapuri, 2023).

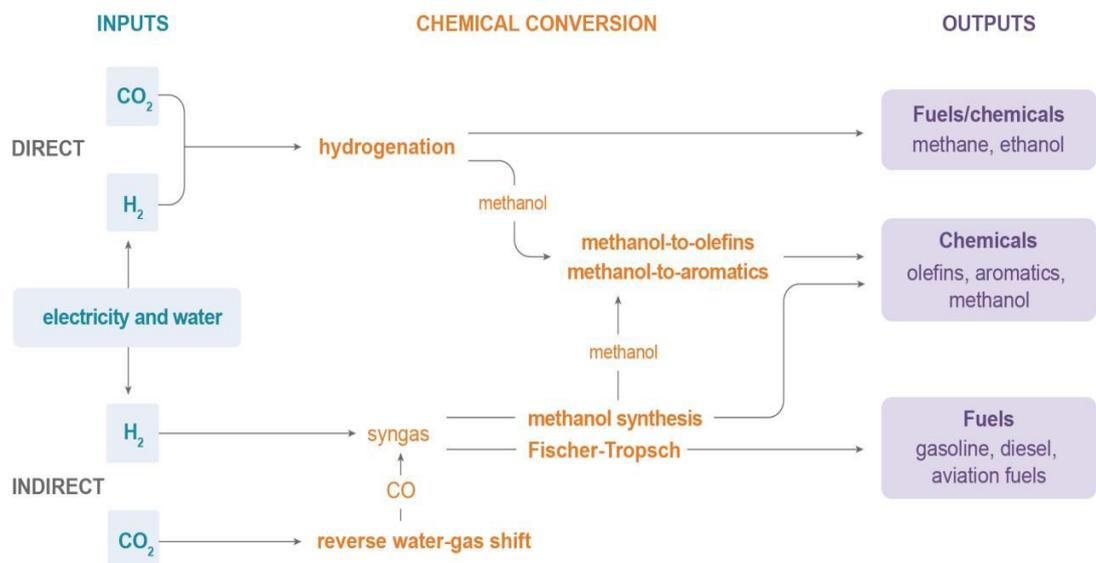
3.3.5.2 Utilização de CO₂

O CCU foi definido como a utilização de CO₂ como matéria-prima para produto ou serviço com um valor comercial. Este gás pode ser utilizado de inúmeras formas no ramo industrial, principalmente o uso direto do CO₂, ou seja, sem que precise passar por alterações

químicas exemplos são a utilização na produção de comidas, resfriamento, lavagem a seco, entre outros. Já no uso indireto, em que há conversão, estudos estão sendo realizados para que derivados de gás carbônico sejam utilizados na produção de combustíveis sintéticos, materiais de construção e produtos químicos (IEA, 2019).

Dentre as tecnologias emergentes para o uso de carbono, destaca-se a produção de combustível, como o metano, a gasolina e combustíveis de aviação, a partir de derivados de CO₂. As rotas mais desenvolvidas para tal são a conversão direta de CO₂ por hidrogenação e a conversão indireta, em que primeiramente o CO₂ é convertido em monóxido de carbono por meio de mudança reversa de água para gás ou processo de *Fischer-Tropsch*. A Figura 21 ilustra a planta industrial do processo descrito (IEA, 2019).

Figura 21 - Conversão do CO₂ em combustíveis.



Fonte: IEA, 2019.

Os processos de FT, síntese de metanol e hidrogenação são tecnologias maduras e aplicadas em vários lugares do mundo, principalmente na conversão direta de CO₂ em metano e metanol, já a mudança reversa de água está em escala laboratorial. A maior usina de combustível baseada em CO₂, metanol renovável, atualmente é a instalação George Olah localizada na Islândia (IEA, 2019).

4 METODOLOGIA

Este trabalho consiste em uma revisão bibliográfica, realizada por meio de um levantamento e análise de trabalhos científicos principalmente com a utilização de artigos científicos e documentos técnicos. A avaliação, síntese e análise foram realizados em trabalhos acadêmicos publicados no período de 2013 a 2024 sobre estudos relacionados a temperaturas planetárias, efeito estufa, alterações climáticas e seus efeitos adversos e, principalmente, métodos de captura de gás carbônico, tecnologias emergentes para captura e armazenamento do gás em questão.

A seleção e análise dos artigos foi realizada no período de maio a agosto de 2024, para isso foram utilizados as páginas de busca Google Acadêmico e o portal de periódicos da CAPES, em especial a plataforma *Web of Science*, uma base multidisciplinar que indexa apenas os trabalhos mais citados em suas respectivas áreas. Para mais, buscas foram realizadas em sites de fontes de alta credibilidade e de reconhecimento global, sendo estas: NASA, Agências Internacional de Energia (AIE) e o Painel Intergovernamental sobre mudanças Climáticas (IPCC). Estas fontes são referência mundial no que diz respeito ao estudo de temperaturas planetárias, Efeito Estufa e a relação das ações antrópicas e mudanças climáticas e métodos de mitigação.

A pesquisa foi dividida em duas etapas. Primeiramente buscou-se por fontes que contextualizassem as a importância do efeito estufa para o planeta terra, a intensificação deste e impactos causados pelas mudanças climáticas. Para tal, utilizaram-se palavras-chaves *greenhouse effect; global warming; atmosphere*. Após a busca por informações atuais sobre o cenário global em termos de alterações climáticas, buscou-se por trabalhos acadêmicos que explanassem os métodos mais utilizados para captura de CO₂ e tecnologias que ainda estão sendo estudadas e em projetos piloto, com esse objetivo utilizou-se as palavras chaves *CO₂ capture; storage; carbon capture and utilization*.

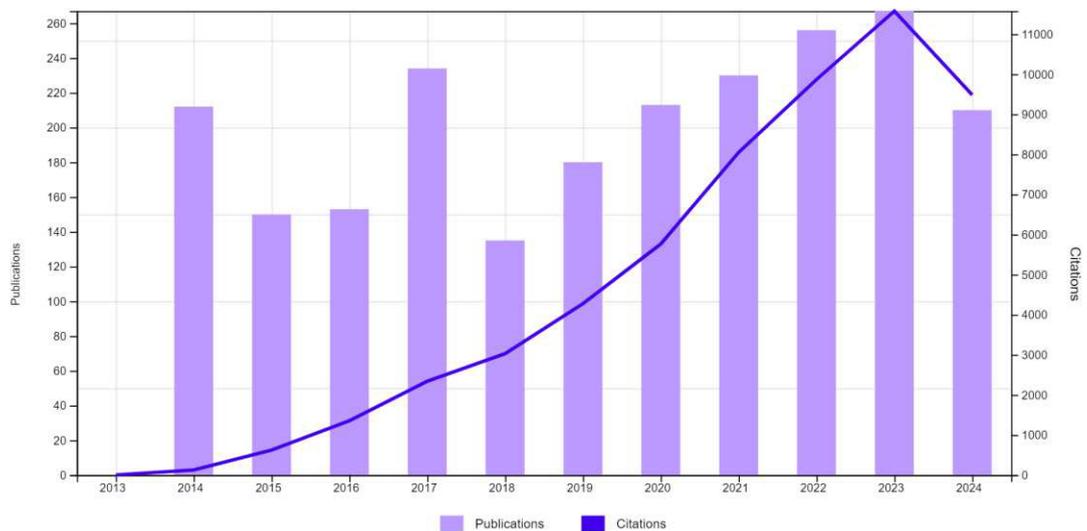
Foram aceitos, inicialmente, artigos publicados em revistas e jornais com fator de impacto acima de 10. No entanto os métodos de captura de dióxido de carbono são considerados novos, por isso artigos publicados em jornais e revistas científicas com fator de impacto acima de 5 também foram utilizados. Além disso, embora não tenha sido usado como métrica, a quantidade de citações e referências presentes nos artigos tornaram-se relevantes na escolha destes. Trabalhos de conclusão de curso, teses e relatórios também foram levados em consideração.

A metodologia utilizada para esta revisão possibilitou uma análise detalhada e atualizada sobre os métodos de captura, utilização e armazenamento do CO₂, contendo um embasamento teórico confiável sobre os desafios enfrentados pelo corpo social para combater as alterações climáticas e novas técnicas de captura de gás carbônico, a fim de mitigar as recorrentes emissões.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O banco mais utilizado para esta revisão bibliográfica foi a base multidisciplinar *Web of Science* presente no sítio da plataforma de periódicos da CAPES. Neste, foram encontradas 2.240 publicações nos últimos 10 anos, utilizando as palavras-chave previamente descritas, com base nesses resultados, que cresceram exponencialmente de 2019 a 2024. Isto indica que as crises ambientais, impulsionadas por atividades antrópicas, principalmente a queima de combustíveis fósseis, estão levando à necessidade de desenvolver soluções para reduzir as emissões de gases de efeito estufa, em especial o dióxido de carbono. Ademais, segundo a UNECE, a expectativa para os próximos anos tende a manter a utilização de combustíveis fósseis como principal fonte de energia. Logo, o estudo e desenvolvimento de métodos de mitigação ao excesso de CO₂ atmosférico têm se tornado cada vez mais presentes. A imagem 24 ilustra o gráfico que relaciona o número de publicações e citações desses trabalhos ao longo de 10 anos.

Figura 22 – Gráfico do número de publicações e citações de trabalhos relacionados a captura de CO₂ dos anos de 2014 a 2024.



Fonte: Web of Science

Dentre esses dados encontrados, foram utilizados para esta revisão 25 fontes compostas por artigos e trabalhos acadêmicos, além de relatórios de instituições de pesquisa internacionais como o IPCC, AIE, Global Monitoring Laboratory, NASA, IPB, e UNECE totalizando 11 relatórios.

Todas as tecnologias citadas no presente trabalho possuem vantagens e desvantagens. As desvantagens precisam ser superadas. A escolha das tecnologias a serem aplicadas irão depender do tipo de fonte de carbono, do produto final esperado, do destino que se dará ao gás capturado, a pressão do CO₂, além do custo do processo, entre outros fatores que devem ser avaliados (Sousa, 2021).

5.1.1 Pré-combustão

Neste procedimento, o CO₂ é capturado antes da queima e formação de energia. Primeiramente um gás de síntese é formado, constituído por CO e H₂, em seguida há a reação do gás de síntese com o vapor de água, produzindo H₂ e CO₂ em altas concentrações, o que diminui os gastos energéticos dos processos realizados. (Oliveira, 2016).

A pré-combustão é vantajosa devido a sua eficiência e baixa perda de energia, em comparação com a pós combustão que necessita de uma demanda alta de energia para regenerar os solventes utilizados. Todavia, esta técnica possui algumas desvantagens como a exigência de insumos de alta pureza, custos elevados em equipamentos da planta e complexidade na formação do gás de síntese. (NAGIREDDI; AGARWAL; VEDAPURI, 2023).

5.1.2 Pós-combustão

Na pós-combustão o CO₂ é separado dos gases de exaustão provenientes da combustão de qualquer tipo de combustível. Geralmente, neste processo, utiliza-se solventes químicos a base aminas para separar o CO₂ dos demais gases. (IBP, 2014).

Esta tecnologia é promissora e está em processo de aprimoramento. Ela continua sendo a mais utilizada devido a fácil adaptação das usinas existentes na maioria das estações de energia e indústrias.

A maior desvantagem deste método é a baixa concentração de CO₂ no gás de combustão. Além disso, é necessário a utilização de um solvente forte, o que demanda um alto valor energético para regenerá-lo. Usinas de carvão que aderiram a pós-combustão podem capturar até 800 tCO₂/dia, porém com um aumento elevado nos custos de eletricidade, cerca de 65%.

Embora apresente desafios, está é a técnica mais madura e é mais adequada para usinas a carvão e a gás. Embora seja economicamente mais viável do que a tecnologia de pré-combustão, mas menos eficiente (Dubey; Arora, 2022).

5.1.3 Oxi combustão

A oxi combustão a combustão ocorre em uma mistura de oxigênio e gás de combustão reciclado, em vez ar, o fluxo resultante é rico em CO_2 e vapor de água. Este método é mais adequado para usinas a carvão e gás. Esta tecnologia possui inúmeras vantagens em relação aos métodos aplicados comumente, em primeiro lugar pode-se destacar o uso de gás de combustão reciclado que pode reduzir a necessidade de maquinários adicionais de separação de ar e baixas emissões de NO_x (Nagireddi; Agarwal; Vedapuri, 2023).

Ademais, também há a redução de dimensão da caldeira, o método é mais simples em comparação aos demais e menor fluxo de massa de exaustão (cerca de 75%) (Madejski et al., 2022). As desvantagens apresentadas neste processo são: a produção de oxigênio comercial por meio de separação de ar a baixa temperatura, necessitando de temperaturas elevadas, além materiais requisitados devido as altas temperaturas (AIE, 2020).

5.1.4 *Looping* químico

Na captura por *looping* químico o oxigênio utilizado na combustão é fornecido por óxidos metálicos (Sousa, 2021). Ao aplicar-se esta tecnologia, não há custos elevados com separação de solventes, uma vez que esta é realizada por meio de condensação da água. Não há perda de energia com a separação do CO_2 , o fluxo de CO_2 não é diluído em N_2 , além disso há redução nas emissões de NO_x haja vista que não há contato entre o ar e o combustível e o processo pode ser aplicado a qualquer fonte de carbono.

Contudo, há desvantagem como o difícil manuseio dos reatores de leito fluidizado, visto que as pressões dos dois leitos devem ser iguais para que não haja vazamentos e deve haver um contato sustentado entre o combustível e o MeO , além do combustível precisar de um pré-tratamento antes de entrar no reator de combustível. O *looping* químico é uma tecnologia emergente e ainda está em fase de desenvolvimento (Spigarelli; Kawatra, 2013).

5.2 COMPARAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE CAPTURA DE CO_2

5.2.1 Absorção

A absorção é a técnica mais avançada e utilizada na captura de CO_2 por pós-combustão, sendo a mais aplicada em estações elétricas a base de carvão e os solventes mais empregados

são os a base de amina, especificamente o MEA. DEA e MDEA, que apresentam baixo custo e alta cinética de reação.

Embora seja a tecnologia mais madura, possui muitos desafios a serem superados como o alto valor energético empregado na regeneração do solvente, o solvente não pode ser regenerado completamente, degradação da amina em NO_x , SO_x e O_2 , além disso os resíduos podem ser perigosos. (Spigarelli; Kawatra, 2013).

5.2.2 Adsorção

A adsorção de um gás em um sólido, consiste no deslocamento da fase gasosa e e aderência em um material sólido por meio de forças intermoleculares. Processos de captura de CO_2 com a utilização de carvão ativado, zeólitas e outros materiais porosos estão ficando cada vez mais comum no meio científico. Esta metodologia é ideal para captura de CO_2 pós-combustão. No caso das zeólitas, as maiores vantagens são a adsorção favorável e a alta capacidade de adsorção, no entanto as desvantagens também são notórias, como a necessidade do gás estar seco, uma vez que a água compete pelos sítios do adsorvente, além da presença de impurezas, como NO_x e SO_x . O carvão ativado, por sua vez, leva a menores custos, uma vez que inúmeros materiais de partida podem ser empregados para a produção do carvão ativado, este também consegue adsorver a pressões elevadas e possui cinética favorável. Uma das principais desvantagens do carvão ativado é a variedade das características dos poros, devido a variedade de matérias de partida, semelhantemente as zeólitas também emite compostos NO_x , SO_x e H_2O . Além disso, possui baixa capacidade de adsorção em condições amenas (Spigarelli e Kawatra, 2013).

5.2.3 Separação por membrana

A utilização de membranas para separação de CO_2 é um método promissor e simples, podendo ser utilizado após-combustão, pré-combustão e oxicombustão. Esta técnica possui muitas vantagens, como não necessitar de produtos químicos ou regeneração de solvente, economicamente viável, design compacto. As desvantagens mais notáveis desta aplicação são a baixa força motriz para separação na membrana, necessitando de compressão para que a separação seja eficiente e pressão inicial no fluxo de gás ser baixa.

A seguir a Figura 23 ilustra uma tabela com as tecnologias de separação evidenciando as vantagens e desvantagens de cada uma de forma objetiva.

Figura 23- Breve comparação das tecnologias de separação.

Tecnologia	Vantagens	Desvantagens
Absorção	<ul style="list-style-type: none"> - Alta eficiência de absorção (>90 %) - Regeneração dos solventes por aquecimento e/ou despressurização. - Processo mais maduro para separação de CO₂. 	<ul style="list-style-type: none"> - A eficiência da absorção depende da concentração de CO₂. - Necessidade de quantidade muito grande de calor para a regeneração do solvente. - Toxicidade e danos ambientais dos compostos da degradação do solvente (nitrosaminas).
Adsorção	<ul style="list-style-type: none"> - Processo reversível - Reciclagem do adsorvente - Alta eficiência de adsorção (>85 %) 	<ul style="list-style-type: none"> - Requer alta estabilidade térmica do adsorvente. - Alta energia para dessorção de CO₂.
Separação por Membranas	<ul style="list-style-type: none"> - Adaptável para separação de outros gases; - Alta eficiência de separação alcançada (>80 %). 	<ul style="list-style-type: none"> - A operação em larga escala é restrita.

Fonte: Adaptado de Sousa, 2021.

6 CONSIDERAÇÃO FINAIS

O Efeito estufa é um fenômeno natural que proporciona ao planeta Terra uma temperatura favorável e propícia para o desenvolvimento da vida no planeta. Se a atmosfera terrestre não possuísse gases de efeito estufa presentes nela, provavelmente o planeta estaria coberto por espessas camadas de gelo. No entanto, a intensificação do Efeito estufa, chamado de aquecimento global, gerado principalmente por ações antrópicas, em especial, pela queima de combustíveis fósseis e desmatamento estão causando grandes consequências a níveis mundiais e, estas podem ser irreversíveis.

Dentre as formas de mitigação, a mais promissora e eficaz é a CCUS, em que o CO₂ proveniente de queimas é capturado, transportado e armazenado permanentemente ou temporariamente para ser utilizado diretamente ou indiretamente. A captura e armazenamento de CO₂ é o mais adequado para o benefício do meio ambiente, uma vez que o CO₂ pode ficar preso por até milhões de anos, no caso da utilização do CO₂ este fica é capturado por no máximo 10 anos, segundo a AIE e pode retornar para a atmosfera. No entanto a captura e utilização de carbono são importantes para que outras fontes de energias, que não sejam a partir de combustíveis fósseis, ganhem mais força, a fim de cumprir o calendário *Net Zero* até 2050, de emissões líquidas zero de carbono.

As tecnologias descritas no presente trabalho, embora algumas já estejam sendo utilizadas em larga escala, ainda estão em período de teste e desenvolvimento. Todas elas possuem vantagens e desvantagens, porém estão seguindo para o mesmo objetivo, amenizar as alterações climáticas e suas consequências.

REFERÊNCIAS

Alalwan HA, Alminshid AH. **CO₂ capturing methods: Chemical looping combustion (CLC) as a promising technique.** *Sci Total Environ.* 2021 Sep 20;788:147850. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147850. Epub 2021 May 19. PMID: 34134392.

BURR, Barry; LYDDON, Lili. Comparison of physical solvents for acid gas removal. *Bryan Research & Engineering, Inc.*, Bryan, Texas, U.S.A., 2010.

DE LONGE, Clenildo. **Desenvolvimento de materiais para captura de CO₂ com estrutura zeolítica empregando fonte de sílica alternativa.** 2023. 113 f. Tese (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, 2023.

DUBEY, A.; ARORA, A. Advancements in carbon capture technologies: A review. *Journal of Cleaner Production*, v. 373, p. 133932, nov. 2022.

GLOBAL MONITORING LABORATORY. Trends in Atmospheric Carbon Dioxide. *Earth System Research Laboratories*, 2022a. Disponível em: <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/monthly.html>. Acesso em: 10 jun. 2024

IPCC. **Mudanças climáticas 2022: impactos, adaptação e vulnerabilidade.** Relatório de Trabalho do Grupo II do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. Genebra: IPCC, 2022. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/>. Acesso em: 23 mai. 2024.

IBP, **Tecnologias de Captura e Armazenamento de Carbono (CCUS) e sua Importância para a Transição Energética no Brasil.** jan. 2024, p. 1-4.

IEA. **Transforming Industry through CCUS.** International Energy Agency (IEA), 2019. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/transforming-industry-through-ccus>. Acesso em: 10 jun. 2024.

IEA. **“Putting CO₂ to Use – Analysis.”** IEA, Sept. 2019, www.iea.org/reports/putting-co2-to-use. Accessed 10 Sept. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Energy technology perspectives 2020: special report on carbon capture, utilisation and storage (CCUS) in clean energy transitions.** Paris: IEA, 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions>. Acesso em: 14 agost. 2024.

IPCC. **Climate Change 2014: Synthesis Report.** Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland: IPCC, 2014.

IPCC. **Relatório de Síntese 2023.** Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf. Acesso em: 11 jun. 2024.

Jiang, Guodong, et al. “A New Mesoporous Amine-TiO₂ Based Pre-Combustion CO₂ Capture Technology.” *Applied Energy*, vol. 147, June 2015, pp. 214–223, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.081>. Accessed 10 Sept. 2024.

JUNGES, A. L. et al. EFEITO ESTUFA E AQUECIMENTO GLOBAL: UMA ABORDAGEM CONCEITUAL A PARTIR DA FÍSICA PARA EDUCAÇÃO BÁSICA. **Experiências em Ensino de Ciências**, v. 13, n. 5, p. 126–151, 3 dez. 2018. Disponível em: <https://fisica.ufmt.br/eenciojs/index.php/eenci/article/view/94>. Acesso: 15 ago. 2024.

KWEKU, D. W. et al. Greenhouse Effect: Greenhouse Gases and Their Impact on Global Warming. **Journal of Scientific Research and Reports**, v. 17, n. 6, p. 1–9, 15 fev. 2018. Disponível em: <<http://eprints.go4mailburst.com/id/eprint/731/>>. Acesso em 19 ago. 2024.

LACIS, A. et al. **Atmospheric CO₂: Principal Control Knob Governing Earth’s Temperature** | **Science**. Disponível em: <<https://www.science.org/doi/10.1126/science.1190653>>. Acesso em: 10 set. 2024.

LEITE, André Búrriço; BERTOLI, Sávio Leandro; BARROS, António André Chivanga. **Absorção química de dióxido de nitrogênio (NO₂)**. p. 1-9. Aceito em: 26 jan. 2005.

LI, Yang & WANG, Rui & ZHAO, Qingmin & XUE, Zhaojie & ZHOU, Yinbang. (2023). **CO₂ storage potential evaluation method for saline aquifers in a petroliferous basin**. *Petroleum Exploration and Development*. 50. 484-491. 10.1016/S1876-3804(23)60403-3.

LIU, R.-S. et al. Advances in Post-Combustion CO₂ Capture by Physical Adsorption: From Materials Innovation to Separation Practice. **ChemSusChem**, v. 14, n. 6, p. 1428–1471, 22 mar. 2021. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33403787/>. Acesso em: 8 jun. 2024.

LUIS, E. W.; MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B. Analysis of intra-day solar irradiance variability in different Brazilian climate zones. *Solar Energy*, 167, 210–218. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X18303505>. Acesso em: 18 ago. 2024.

Madejski, P.; Chmiel, K.; Subramanian, N.; Kuś, T. **Methods and Techniques for CO₂ Capture: Review of Potential Solutions and Applications in Modern Energy Technologies**. *Energies* 2022, 15, 887. <https://doi.org/10.3390/en15030887>

MARTA, Gisela. “**Roteiro Tecnológico (Roadmap) Da Captação, Utilização E Armazenamento de Dióxido de Carbono (CCUS) Em Portugal**.” *Bdigital.ufp.pt*, 2016, [bdigital.ufp.pt/handle/10284/5636](http://hdl.handle.net/10284/5636), <http://hdl.handle.net/10284/5636>. Accessed 10 Sept. 2024.

MIRANDA, J. L. DE. O Antropoceno e o CO₂: Processos de Captura e Conversão. **Revista Virtual de Química**, v. 10, n. 6, 2018. Disponível em: <<https://rvq-sub.sbq.org.br/index.php/rvq/article/view/3026>>. Acesso 08 jun. 2024.

NAGIREDDI, Srinu; AGARWAL, Jatin R.; VEDAPURI, Damodaran. **Carbon capture, utilization and sequestration: current status, challenges and future prospects for global decarbonization**. *ACS Engineering*, 1 dez. 2023.

NASA. Página da NASA, **NASA**, 2024. Disponível em: <https://www.nasa.gov/>. Acesso em: 11 jun. 2024.

PEREIRA, João Paulo Duarte. **Tecnologias de captura de dióxido de carbono: Estudo de caso da produção de barrilha por carbonatação**. 2022. 76 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Química) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

PETROBRAS. **Transição Energética: CCUS**. Petrobras, 2023. Disponível em: <https://petrobras.com.br/web/nossa-energia/w/transicao-energetica/ccus> . Acesso em: 3 set. 2024.

PINA, A.; SILVA, L. F.; OLIVEIRA JÚNIOR, Z. T. **Mudanças climáticas: reflexões para subsidiar esta discussão em aulas de Física**. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 27, n. 3, p. 449-472, 2010. Disponível em: <http://www.journal.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/2175-7941.2010v27n3p449/17182>. Acesso em: 5 jun. 2024.

PANT, D. et al. **Advances in Carbon Capture and Utilization**. Springer Singapore. Disponível em: <<https://www.springerprofessional.de/en/advances-in-carbon-capture-and-utilization/19393146>>. Acesso em: 20 jun. 2024.

PIERREHUMBERT, R. T. Warming the world: Greenhouse Effect: Fourier's Concept of Planetary Energy Balance Is Still Relevant Today. **Nature**, v. 432, n. 7018, p. 677–677, dez. 2004. Disponível em: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1533357>. Acesso em: 18 ago. 2024.

SALMÓN, I. R.; CAMBIER, N.; LUIS P. CO₂ capture by alkaline solution for carbonate production: A comparison between a packed column and a membrane contactor. *Applied Sciences (Switzerland)*, v. 8, n. 6, jun. 2018

SPIRO, T. G.; STIGLIANI, W. M. **Química ambiental**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009

SPIGARELLI, B. P.; KAWATRA, S. K. Opportunities and challenges in carbon dioxide capture. **Journal of CO₂ Utilization**, v. 1, p. 69–87, 1 jun. 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S221298201300005X>. Acesso em: 10 ago. 2024.

UNECE. Carbon Capture, Use and Storage. **United Nations Economic Commission for Europe**. Disponível em: <https://unece.org/sustainable-energy/cleaner-electricity-systems/carbon-capture-use-and-storage-ccus>. Acesso em: 13 agost. 2024.

XAVIER, M. E. R.; KERR, A. S. A análise do efeito estufa em textos paradidáticos e periódicos jornalísticos. *Caderno Brasileiro de ensino de Física*, v. 21, n. 3, p. 325-349, 2004. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/6423>. Acesso em 15 ago. 2024.

YANG, E. et al. **Using Space-Based CO₂ and NO₂ Observations to Estimate Urban CO₂ Emissions** - Yang -. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2022JD037736>>. Acesso em: 06 set. 2024.

ZHONG, W.; HAIGH, J. The greenhouse effect and carbon dioxide. **Weather**, v. 68, p. 100–105, 1 abr. 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/258816506_The_greenhouse_effect_and_carbon_dioxide. Acesso em: 9 jun. 2024