

# MÉTODOS DE CAPTURA DE CARBONO DIRETA, UMA ANÁLISE DA VIABILIDADE INDUSTRIAL

DOI: 10.5281/zenodo.10569814

Thiago Pereira de Lucena<sup>a\*</sup>

With the exponential increase in the amount of carbon emitted annually on the planet, various climatic changes can be observed at both the global and local levels. Therefore, it is necessary for the world to take actions to reduce the emission of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) from factories and commodity industries. To this end, this review aims to expose the techniques of direct carbon capture and sequestration pre-combustion, oxy-combustion, and post-combustion. Based on the environmental parameter results obtained from the article "Carbon capture, storage, and utilization technologies: A critical analysis and comparison of their life cycle environmental impacts," it is understood that these are techniques with merit, capable of achieving very high values of carbon emission reduction by factories, although they can still be improved.

Com o aumento exponencial da quantidade de carbono emitida anualmente no planeta, é possível observar diversas mudanças climáticas no nível global e local. Logo, faz-se necessário que o mundo tome atitudes para reduzir a emissão de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) em fábricas e indústrias de commodities. Para esse efeito, essa resenha tem o objetivo de expor as técnicas de captura e sequestro direta do carbono a pré-combustão, a oxi-combustão e a pós-combustão. A partir dos resultados para os parâmetros ambientais obtidos pelo artigo "Carbon capture, storage and utilization technologies: A critical analysis and comparison of their life cycle environmental impacts", entende-se que são técnicas com mérito, capazes de alcançar valores altíssimos de redução de geração de carbono pelas fábricas, porém ainda podem ser aprimoradas.

<sup>a</sup> Universidade de Brasília - UnB. Campus Darcy Ribeiro - Instituto de Química.

\* E-mail: thiago.lucena31@gmail.com

**Palavras-chave:** captura de carbono; análise ambiental; viabilidade industrial;

Recebido em 04 de dezembro de 2023,

Aceito em 19 de janeiro de 2024,

Publicado em 31 de janeiro de 2024.

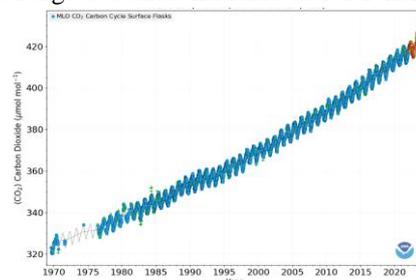
## Introdução

Nos anos de 2021 e 2022, o mundo apresentou níveis recordes de emissão de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), aproximadamente 90% proveniente da utilização de combustíveis fósseis. Dado preocupante, uma vez que esse gás liberado em quantidades exacerbadas pode contribuir para a mudança climática enfrentada pelo planeta. Nesse sentido, é vital serem consideradas estratégias para a descarbonização de setores da economia, como a reconstrução ou adaptações de indústrias existentes com processos que evitem essas grandes emissões de carbono.<sup>1</sup>

Gases de efeito estufa (GEE), são compostos, que quando encontrados em grande quantidade na atmosfera, previnem a saída do calor solar para o universo retendo esse calor no planeta. O dióxido de carbono é um dos contribuintes primários para esse efeito, e apresentou um crescimento chocante da sua produção e consumo a partir da 3ª Revolução industrial, previamente ao momento histórico, a concentração observada de CO<sub>2</sub> na atmosfera encontrava-se na faixa de 172-300 ppm, porém, com a sua popularização e disseminação, em 2020 apresentou a concentração atmosférica de 416.47 ppm. Para retornarmos ao nível próximo de 350 ppm de CO<sub>2</sub> na atmosfera até o final deste século, seria necessário retirar 550 gigas toneladas de dióxido de carbono, um desafio para a sociedade.<sup>2</sup>

O Observatório Mauna Loa é famoso por sua Estação de Monitoramento de Gases de Efeito Estufa, que foi estabelecida pela Administração Nacional Oceânica e Atmosférica dos Estados Unidos (NOAA). Localizado na ilha de Havaí, o observatório está situado em uma posição estratégica no topo do vulcão Mauna Loa, a uma altitude elevada, o que proporciona condições ideais para medir concentrações atmosféricas de dióxido de carbono e outros gases relacionados. Uma vez que as análises são vitais para o avanço da compreensão do problema, o Observatório divulga gratuitamente seus dados para a comunidade científica, e é possível ver, a partir da Figura 1, retirada do site da estação, o crescimento da concentração de CO<sub>2</sub> global ao longo dos anos, os dados apresentados em laranja são dados preliminares.<sup>3</sup>

**Figura 1.** Crescimento da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera ao longo dos anos. Extraído da referência 3.

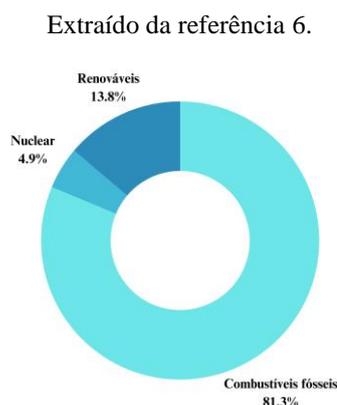


Algumas das consequências da acentuação do fenômeno do efeito estufa e conseqüentemente aquecimento global incluem o derretimento das calotas polares, crescimento do nível do mar, e mudanças drásticas climáticas, como furacões, secas e ondas de calor. De forma complementar, um ecossistema em especial que é extremamente afetado é o ambiente marinho, que com a absorção de CO<sub>2</sub> se torna mais ácido, ameaçando a vida principalmente de recifes de corais e animais filtrantes. Porém, não só os animais são afetados, o contato com essa poluição no ar pode afetar diretamente a saúde da população, propiciando casos de asma, bronquite, doenças cardiovasculares e pulmonares.<sup>4</sup>

Os problemas apresentados obrigaram a humanidade a pensar em soluções para a situação, como por exemplo, a idealização do “O Acordo de Paris”, determinação global aprovada por 195 países que participaram da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC), com o objetivo de reduzir a emissão de gases de efeito estufa para que até 2050, o aumento da temperatura global seja de até 1.5 °C acima do período pré-revolução industrial.<sup>5</sup>

Em função dessa mudança de paradigma, foram consideradas com maior dedicação a utilização de outras estratégias de geração de energia de forma sustentável, como a solar, a eólica, a hidroelétrica, a geotermal, a conversão de energia térmica do oceano (OTEC) e a utilização de fontes de biomassa. Porém, a utilização dessas outras técnicas enfrenta diversas barreiras para serem implementadas generalizadamente, como podemos ver na Figura 2.<sup>6</sup>

**Figura 2.** Divisão da rede energética global no ano de 2018.



Como é possível ver, a fração global que depende de combustíveis fósseis é muito maior que as outras estratégias, propiciando que os problemas destacados anteriormente sejam acentuados. Nesse sentido, é vital que a sociedade desenvolva

com maior empenho estratégias para reduzir o impacto que a emissão de CO<sub>2</sub> para geração de energia ocasiona.

Uma dessas estratégias é a captura do carbono, técnica que faz o maior sentido econômico para as indústrias, que a partir dos fluxos de exaustão, do próprio ar atmosférico, dos oceanos, entre outras fontes. Ocorre a recuperação do CO<sub>2</sub> e sua transformação em um recurso que pode ser utilizado novamente, para a produção de combustíveis e gases sintéticos, cultivo de algas, mineralização, fabricação de materiais de construção e o aprimoramento da recuperação de petróleo. Ao fazer uso dessa possibilidade, uma indústria pode ser considerada carbono neutra, em que as emissões de carbono em função do processo industrial são compensadas pelo seu sequestro e reutilização.<sup>24</sup>

Estratégias de captura e sequestro de carbono ou *carbon capture and sequestration* (CCS) são separadas em duas categorias gerais: captura de carbono direta (pré-combustão, pós-combustão, oxi-combustão e captura direta do ar atmosférico) e captura de carbono indireta (reflorestamento, aprimoramento da capacidade natural do ambiente de absorver o carbono, bioenergia com captura de carbono e estratégias agrícolas especializadas).<sup>4</sup>

A compreensão dessas estratégias de forma simplificada é que para a captura direta, existe a utilização de processos industriais ativos para a transformação do carbono. Já para a captura indireta, é feita uma ação que propicia o sequestro de carbono de forma natural.

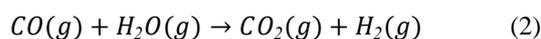
Os processos que são mais comumente utilizados nas indústrias para o sequestro de carbono, são os processos de captura direta. Portanto, é importante compreender em maiores detalhes seu funcionamento específico.<sup>4</sup>

A técnica de pré-combustão utiliza a estratégia de reduzir a concentração da molécula de CO<sub>2</sub> antes da queima do material, transformando o combustível para uma forma gasosa composta por H<sub>2</sub>, CO e CO<sub>2</sub>, e sua transformação final em hidrogênio e CO<sub>2</sub> para remoção. Possui 2 classificações gerais, “captura pré-combustão com gaseificação” (*Pre-combustion capture with gasification*) e “captura a pré-combustão com reforma” (*Pre-combustion capture with reforming*), o primeiro é utilizado quando o combustível está no estado sólido, como carvão ou biomassa, e a segunda é utilizada principalmente para gás natural. Para um processo utilizando gás natural, primariamente composto de metano (CH<sub>4</sub>), o combustível na presença de um catalisador de Nickel, normalmente, e de vapor

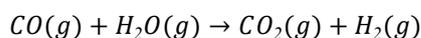
de água, passa pela seguinte transformação, explicitada na equação química (1).<sup>4</sup>



Em seguida, para dar continuidade à metodologia, o monóxido de carbono irá reagir com o vapor de água à alta temperatura (350 - 450 °C) e um catalisador de ferro ou cobre, e formar os produtos de interesse, pela equação química (2).<sup>4</sup>



Para aprimorar o processo e permitir uma maior eficiência, a temperatura é reduzida (perto de 200 - 250 °C) e ocorre a segunda etapa da técnica, de forma semelhante à equação química (2).<sup>4</sup>



Ao finalizar essas fases definidas, a concentração na vazão de combustível inicial irá ser composta principalmente por H<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>, além de algumas frações pequenas de CH<sub>4</sub> e outros gases como nitrogênio N<sub>2</sub>. Em função da sua composição, é possível facilmente capturar de forma seletiva o dióxido de carbono, como técnicas de adsorção, restando um fluido de H<sub>2</sub> concentrado para utilização no sistema de combustão.<sup>4</sup>

Pela característica do método necessitar que o combustível esteja na fase gasosa, é mais adequado para plantas industriais que já tenham esse processo previsto no seu sistema, uma vez que alterar as etapas de uma fábrica já estabelecida possui um custo agregado muito alto. Porém, uma vez que seja implementado, apresenta uma eficiência energética maior em comparação com as técnicas de oxidação e pós-combustão.<sup>4</sup>

Enquanto isso, a técnica da oxidação se baseia na ideia de efetuar a combustão em um ambiente com alta concentração de oxigênio (aproximadamente 98%) para atuar como oxidante, ao invés de utilizar o ar ambiente, que contém uma alta concentração (79.9%) de N<sub>2</sub>. Utilizando essa estratégia, é possível reduzir as impurezas geradas de derivados de nitrogênio e enxofre, como seus óxidos NO<sub>x</sub> e SO<sub>x</sub>, que são poluentes atmosféricos, além de possibilitar maior probabilidade de ocorrer uma combustão completa, de forma que as maiores frações dos produtos sejam H<sub>2</sub>O e CO<sub>2</sub>.<sup>47</sup>

Uma vez que não há uma concentração significativa de nitrogênio N<sub>2</sub>, a captura do CO<sub>2</sub> é extremamente simples, de

forma que um processo de condensação da água a partir da queda de temperatura, já possibilita a obtenção do fluxo de CO<sub>2</sub> concentrado para armazenamento e reutilização.<sup>4</sup>

Porém, devido a necessidade de uma tecnologia específica para o desenvolvimento do processo, o custo de instalação de uma unidade criogênica de separação de ar (ASU, *air separation unit*) e sua exigência energética constante, de um processo de destilação criogênica ou de um maquinário para a separação por membrana, a despesa necessária se torna um empecilho para a indústria que deseja adaptar essa metodologia.<sup>8</sup>

Outra opção, é a utilização da estratégia da captura de carbono na pós-combustão, após a produção de commodities a base de carbono em larga escala. Com a queima dos combustíveis em um ambiente composto de ar, são geradas moléculas de N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub>, óxidos (SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>), e metais pesados, podemos observar aproximadamente a composição dos fluidos de exaustão, para carvão e gás natural na Tabela 1.

**Tabela 1.** Componentes do fluido de exaustão de plantas de energias a base de carvão e gás natural. Tabela adaptada do artigo “Comprehensive review and assessment of carbon capturing methods and technologies: An environmental research”

| Componente do fluido de exaustão | Unidade | Carvão | Gás natural |
|----------------------------------|---------|--------|-------------|
| N <sub>2</sub>                   | (mol.%) | 67.93  | 74.32       |
| O <sub>2</sub>                   | (mol.%) | 2.38   | 12.09       |
| CO <sub>2</sub>                  | (mol.%) | 13.5   | 4.04        |
| H <sub>2</sub> O                 | (mol.%) | 15.37  | 8.67        |
| SO <sub>2</sub>                  | ppm     | 0      | 0           |
| NO <sub>x</sub>                  | ppm     | N/A    | 0           |
| H <sub>2</sub> S                 | ppm     | N/A    | 0           |
| Ar                               | (mol.%) | 0.81   | 0.89        |

Ao ser levado em consideração a composição comum dos fluidos, para o isolamento do CO<sub>2</sub>, várias estratégias são possíveis, como:

- a absorção química, faz-se uso de aminas, amônia ou líquidos iônicos;
- a adsorção física, faz-se uso de cal sodada, zeólitos, materiais metálicos e aminas sólidas;
- a separação por membrana, que utiliza membranas líquidas para a passagem do gás de interesse;

- o processo de *Calcium-looping*, que utiliza a reação entre o óxido de cálcio (CaO) e o CO<sub>2</sub>, com formação de carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>);<sup>9</sup>
- a separação criogênica, que utiliza a diferença de temperatura de condensação das moléculas.

Ademais, pela característica da técnica da pré-combustão e pós-combustão serem de simples adaptação à uma planta industrial, são métodos extremamente interessantes para reduzir a emissão de CO<sub>2</sub> de fábricas já estabelecidas. De forma distinta, para adicionar à uma indústria os processos de oxidação, faz-se necessário a reconstrução total da fábrica, para lidar com a mudança, e não somente uma adição e adaptação.<sup>8</sup>

A partir desses métodos, o dióxido de carbono capturado tem a opção de ser armazenado em formações geológicas, também conhecido como armazenamento geológico, ou nos oceanos. A primeira opção é mais viável, pois é possível armazenar em reservatórios esgotados de petróleo e gás, permitindo uma acumulação com propriedades mais definidas. Especificamente, não foi encontrada uma compreensão clara de como o descarte nos oceanos afeta a acidez e as espécies marinhas.

Visto que, os principais processos envolvidos na captura direta de carbono por resíduos industriais foram apresentados, é importante avaliar se realmente são eficientes para a resolução do problema apresentado. Para esse efeito, o artigo de referência da resenha “*Carbon capture, storage and utilisation technologies: A critical analysis and comparison of their life cycle environmental impacts*” faz uso dos parâmetros de impacto ambiental, definidos pelo Guia Operacional das Normas ISO para definir as abordagens da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) das técnicas de pré-combustão, oxidação e pós-combustão, em que:<sup>10</sup>

- *Global Warming Potential (GWP)*, mede a massa de dióxido de carbono por MWh de energia utilizada no processo que é liberado para a atmosfera;<sup>10</sup>
- *Acidification Potential (AP)*, mede a massa por MWh de energia utilizada no processo de dióxido de enxofre poluente que é liberado para recursos hídricos, solo ou organismos;<sup>10</sup>
- *Ozone Depletion Potential (ODP)*, mede a massa por MWh de energia utilizada no processo de ozônio que é destruída pelos compostos emitidos na técnica, em comparação com triclorofluorometano (R11), que possui o valor de ODP de 1;<sup>10</sup>

- *Eutrophication Potential (EP)*, mede a massa por MWh de energia utilizada no processo de fosfatos (PO<sub>4</sub>-3), que ocasionam eutrofização de ambientes aquáticos, que são gerados no processo.<sup>10</sup>

## Metodologia

O artigo em referência faz uso da técnica de pesquisa bibliográfica para alcançar diversos trabalhos que abordem estudos de processos de pré-combustão, oxidação e pós-combustão, em indústrias no mundo e classificou esses diversos estudos seguindo as classificações:<sup>10</sup>

- Foco;
- Método de captura de carbono utilizado;
- Opção de armazenamento;
- A utilização final do carbono após a captura;
- Medida de energia característica necessária para o processo;
- Parâmetros da Avaliação de Ciclo de Vida abordados.

Uma vez que foi efetuada essa seleção, os dados obtidos que tangem os mesmos parâmetros foram extraídos dos diferentes textos e comparados.

## Resultados e discussão

Os resultados médios obtidos para as técnicas da pré-combustão, oxidação e pós-combustão para os parâmetros de referência foram explicitados na Tabela 2.

**Tabela 2.** Parâmetros ambientais médios encontrados para metodologias de pré-combustão, oxidação e pós-combustão. Tabela adaptada do artigo “Comprehensive review and assessment of carbon capturing methods and technologies: An environmental research”<sup>4</sup>

| Método de captura | GWP<br>(kg<br>CO <sub>2</sub> /<br>MWh) | AP<br>(kg<br>SO <sub>2</sub> /<br>MWh) | ODP<br>(kg<br>R11/<br>MWh) | EP<br>(kg<br>PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> /<br>MWh) |
|-------------------|---|--|----------------------------|--|
| Pré-combustão     | 236.3                                   | 0.79                                   | 0.0003                     | 0.18   |
| Oxi-combustão     | 166.6                                   | 0.74                                   | 0.06                       | 0.35   |
| Pós-combustão     | 219.5                                   | 1.23                                   | 0.11                       | 0.25   |

A partir dos dados, percebe-se que a técnica da pré-combustão apresenta a maior emissão de CO<sub>2</sub> das metodologias analisadas, porém, para os outros indicadores ela

possui um ótimo desempenho. Enquanto que o processo da oxidação possui a menor emissão de carbono à atmosfera e o menor valor para a liberação de óxidos de enxofre/contaminantes. Assim sendo, podemos observar que o método com indicadores menos favoráveis no geral foi realmente o da pós-combustão, que seria o mais simples de implementar em usinas preestabelecidas.<sup>10</sup>

Outrossim, com a pesquisa efetuada foi possível determinar que o método empregado com maior frequência e variedade é a técnica da pós-combustão a partir da absorção química com Etanolamina (2-aminoetanol). Entretanto, o uso e recuperação desse composto é um grande contribuinte para a emissão de CO<sub>2</sub> da técnica, com valores de GWP altos.<sup>4</sup>

## Conclusões

Após a elucidação da pesquisa, percebe-se que a problemática do excesso de dióxido de carbono na atmosfera pode trazer consequências irreversíveis para o nosso planeta. Logo, existe um esforço mundial para a compreensão e atenuação dessa situação, como o Acordo de Paris.

Entretanto, como foi percebido, de todas as técnicas de captura de carbono direta, nenhuma apresentou facilidade de implementação, parâmetros ambientais favoráveis e custo de instalação reduzido ao mesmo tempo, para que consideremos a metodologia como ideal para a disseminação pelas indústrias. O processo de pré-combustão apresenta facilidade de implementação e baixo custo de desenvolvimento, mas, apresenta uma maior emissão de CO<sub>2</sub>. O processo da oxidação apresenta uma baixa geração de dióxido de carbono, porém seus outros indicadores não são interessantes ao processo, além de possuir dificuldade de implementação e alto custo de instalação. Já o processo de pós-combustão, exibe facilidade de implementação e baixo custo de instalação, todavia demonstra uma alta emissão de CO<sub>2</sub> e índices ambientais pouco favoráveis.

Dessa forma, para que o planeta alcance as metas definidas pelo acordo de Paris, e evite uma catástrofe ambiental, faz-se necessário estudos mais aprofundados no assunto, para a descoberta de uma metodologia que se aproxime do desempenho ideal para as indústrias.

## Contribuições por Autor

A resenha sobre o artigo em referência e a inclusão de algumas observações são de Thiago Pereira de Lucena.

## Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

## Agradecimentos

Ao grupo PET-Química/IQ/UnB, à Secretaria de Educação Superior do Ministério da Educação (SeSU/MEC) e ao Decanato de Ensino de Graduação (DEG/UnB) pelo apoio ao Programa de Educação Tutorial pela bolsa concedida. Ao Instituto de Química (IQ/UnB), à Universidade de Brasília pelo suporte e espaço fornecidos e a Rede Nacional de Ensino e Pesquisa (RNP).

## Notas e referências

- 1 Governos planejam produzir o dobro de combustíveis fósseis em 2030 do que o limite de aquecimento de 1,5°C permite | As Nações Unidas no Brasil, [https://brasil.un.org/pt-br/252205-governos-planejam-produzir-o-dobro-de-combust%C3%ADveis-f%C3%B3sseis-em-2030-do-que-o-limite-de](https://brasil.un.org/pt-br/252205-governos-planejam-produzir-o-dobro-de-combust%C3%ADveis-f%C3%B3sseis-em-2030-do-que-o-limite-de-https://brasil.un.org/pt-br/252205-governos-planejam-produzir-o-dobro-de-combust%C3%ADveis-f%C3%B3sseis-em-2030-do-que-o-limite-de), <https://brasil.un.org/pt-br/252205-governos-planejam-produzir-o-dobro-de-combust%C3%ADveis-f%C3%B3sseis-em-2030-do-que-o-limite-de>.
- 2 W. Gao, S. Liang, R. Wang, Q. Jiang, Y. Zhang, Q. Zheng, B. Xie, C. Y. Toe, X. Zhu, J. Wang, L. Huang, Y. Gao, Z. Wang, C. Jo, Q. Wang, L. Wang, Y. Liu, B. Louis, J. Scott, A.-C. Roger, R. Amal, H. He and S.-E. Park, Industrial carbon dioxide capture and utilization: state of the art and future challenges, *Chem. Soc. Rev.*, 2020, **49**, 8584–8686.
- 3 NOAA ESRL GML CCGG Group, 2019.
- 4 A. Yagmur Goren, D. Erdemir and I. Dincer, Comprehensive review and assessment of carbon capturing methods and technologies: An environmental research, *Environmental Research*, 2024, **240**, 117503.

- 5 A. G. Olabi, K. Obaideen, K. Elsaid, T. Wilberforce, E. T. Sayed, H. M. Maghrabie and M. A. Abdelkareem, Assessment of the pre-combustion carbon capture contribution into sustainable development goals SDGs using novel indicators, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, **153**, 111710.
- 6 H. Ishaq, I. Dincer and C. Crawford, A review on hydrogen production and utilization: Challenges and opportunities, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, **47**, 26238–26264.
- 7 C. W. Ong and C.-L. Chen, Intensification, optimization and economic evaluations of the CO<sub>2</sub>-capturing oxy-combustion CO<sub>2</sub> power system integrated with the utilization of liquefied natural gas cold energy, *Energy*, 2021, **234**, 121255.
- 8 D. Simbeck and W. Roekpooritat, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, 2009, pp. 87–98.
- 9 J. A. D. Silva, R. J. Chimentão and J. B. O. D. Santos, in *Impactos das Tecnologias na Engenharia Química* 3, Atena Editora, 1st edn., 2019, pp. 213–223.
- 10 R. M. Cuéllar-Franca and A. Azapagic, Carbon capture, storage and utilization technologies: A critical analysis and comparison of their life cycle environmental impacts, *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, 2015, **9**, 82–102.