

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE FILOSOFIA, LETRAS E CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA

MARLON MACHADO DOS SANTOS

Análise dos sistemas de captura de CO₂ em usinas termelétricas a carvão.

Analysis of CO₂ capture systems in coal-fired thermoelectric plants.

São Paulo

2024

MARLON MACHADO DOS SANTOS

Análise dos sistemas de captura de CO₂ em usinas termelétricas a carvão.

Trabalho de Graduação Integrado (TGI) apresentado ao Departamento de Geografia da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Geografia.

Área de Concentração: Geografia Física

Orientador: Prof. Dr. Luis Antonio Bittar Venturi

São Paulo

2024

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo na Publicação

Serviço de Biblioteca e Documentação

Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo

S237a Santos, Marlon Machado dos
Análise dos sistemas de captura de CO₂ em usinas termelétricas a carvão. / Marlon Machado dos Santos; orientador Luis Antonio Bittar Venturi - São Paulo, 2024.
43 f.

TGI (Trabalho de Graduação Individual) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo. Departamento de Geografia.

1. Dióxido de Carbono. 2. Clima. 3. Recursos Naturais. 4. Carvão. I. Venturi, Luis Antonio Bittar, orient. II. Título.

Dedico este trabalho aos meus pais que não tiveram a oportunidade de estudar em uma universidade e à minha esposa e filha, sem as quais eu não teria sonhado estar onde estou.

Eu sou o que me cerca. Se eu não preservar o que
me cerca, eu não me preservo.

(GASSET, José Ortega y, 1914)

RESUMO

SANTOS, Marlon Machado dos. **Análise dos sistemas de captura de CO₂ em usinas termelétricas a carvão.** 2024. Trabalho de Graduação Integrado (TGI) apresentado à Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Bacharel em Geografia. São Paulo, 2024.

A crescente preocupação com as mudanças climáticas impulsiona a busca por soluções eficientes e viáveis para mitigar a concentração de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera. Como parte do grupo dos gases do efeito estufa (GEE), o CO₂ se destaca por apresentar o maior crescimento nas emissões desses gases. Com a população mundial na casa dos 8 bilhões de habitantes, o consumo de combustíveis fósseis é inevitável, muito embora nos últimos anos tenha-se adotado a tendência dos veículos elétricos como alternativa aos com motor de combustão interna, além do uso e desenvolvimento de energia de fontes alternativas. Contudo, a alta demanda mundial por energia obriga que sejam utilizados combustíveis fósseis como fonte. Pensando nisso e inspirado nos 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável da ONU, o objetivo da pesquisa é analisar comparativamente três técnicas de captura de carbono em termelétricas a carvão, possíveis de serem implementadas nas usinas brasileiras. Como fonte para buscar artigos, periódicos e demais publicações científicas, utilizamos o banco de dados da Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), *Research Gate* e Biblioteca Florestan Fernandes, além de sites de indústrias, institutos e órgãos ligados aos setores de energia e mineração, tais como Ministério do Meio Ambiente (MAM), Companhia Riograndense de Mineração (CRM), *International Energy Agency* (IEA), *Global CCS Institute*, *Research Centre for Greenhouse Gas Innovation*, Carbfix, Raízen, dentre outros. Analisamos mais profundamente três processos principais e possíveis de serem aplicados nas termelétricas brasileiras, sendo eles a pré-combustão, pós-combustão e oxi-combustão. Combinado aos processos de combustão do carvão, existem tecnologias para fazer a separação do CO₂ presente nos gases gerados durante a queima do combustível, sendo elas a separação por absorção, separação por membranas e separação por adsorção. Posteriormente, o CO₂ é armazenado em locais apropriados, como formações geológicas subterrâneas. Ao longo do desenvolvimento da pesquisa, concluímos que para a realidade brasileira, o processo de pós-combustão seria mais adequado, devido a facilidade de implementação e custos

inferiores, quando comparado aos outros processos. Também concluímos que a tecnologia de separação de CO₂ mais interessante seria por adsorção.

A pesquisa seguirá com as próximas seções da seguinte maneira: Contextualizaremos o tema, sequestro de carbono e sua importância no advento das mudanças climáticas, abordaremos a questão da demanda mundial por energia. A seguir apresentaremos o objetivo, os processos metodológicos e fontes de dados. A próxima parte será a base conceitual a respeito de recursos naturais e o carvão mineral, especialmente. Por fim abordaremos os processos de captura, separação, transporte e armazenamento de CO₂ e apresentaremos as conclusões da pesquisa. Considerando a urgência da questão, toda a análise foi feita buscando contribuir para um futuro sustentável e a preservação do nosso planeta.

Palavras-chave: Mitigação das mudanças climáticas; Sequestro de carbono; CO₂; Pré-combustão; Pós-combustão; Oxi-combustão; Termelétricas.

ABSTRACT

SANTOS, Marlon Machado dos. **Analysis of CO₂ capture systems in coal-fired thermoelectric plants**. 2024. Trabalho de Graduação Integrado (TGI) apresentado à Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Bacharel em Geografia. São Paulo, 2024.

The growing concern about climate change drives the search for efficient and viable solutions to mitigate the concentration of carbon dioxide (CO₂) in the atmosphere. As part of the greenhouse gas (GHG) group, CO₂ stands out for having the highest growth in emissions of these gases. With the global population around 8 billion people, the consumption of fossil fuels is inevitable, although in recent years there has been a trend toward electric vehicles as an alternative to those with internal combustion engines, in addition to the use and development of energy from alternative sources. However, the high global demand for energy forces the continued use of fossil fuels as a source. With this in mind and inspired by the 17 United Nations Sustainable Development Goals, the aim of this research is to comparatively analyze three carbon capture techniques in coal-fired power plants that could be implemented in Brazilian plants. For sourcing articles, journals, and other scientific publications, we used the databases of the Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel (CAPES), ResearchGate, and the Florestan Fernandes Library, as well as websites of industries, institutes, and organizations linked to the energy and mining sectors, such as the Ministry of the Environment (MAM), Rio Grande Mining Company (CRM), International Energy Agency (IEA), Global CCS Institute, Research Centre for Greenhouse Gas Innovation, Carbfix, Raízen, among others. We analyzed in more depth three main processes that could be applied to Brazilian thermoelectric plants: pre-combustion, post-combustion, and oxy-combustion. Combined with the combustion processes of coal, there are technologies for separating CO₂ present in the gases generated during fuel combustion, including absorption separation, membrane separation, and adsorption separation. Subsequently, the CO₂ is stored in appropriate locations, such as underground geological formations. Throughout the development of the research, we concluded that, for the Brazilian context, the post-combustion process would be the most suitable due to its ease of implementation and lower costs compared to the other

processes. We also concluded that the most interesting CO₂ separation technology would be adsorption.

The research will proceed with the following sections: we will contextualize the topic of carbon sequestration and its importance in the advent of climate change, and address the issue of global energy demand. Next, we will present the objective, methodological processes, and data sources. The following section will cover the conceptual foundation regarding natural resources, with a special focus on coal. Finally, we will discuss the processes of CO₂ capture, separation, transport, and storage, and present the conclusions of the research. Given the urgency of the issue, the entire analysis was conducted with the aim of contributing to a sustainable future and the preservation of our planet.

Keywords: Mitigation of climate change; Carbon sequestration; CO₂ Pre-combustion; Post-combustion; Oxy-combustion; Thermal power plants.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

GRÁFICOS

Gráfico 1	Emissões Globais de CO ₂ por setores, 1990-2019	17
Gráfico 2	Emissões globais de CO ₂ da combustão de combustíveis fósseis por países	
(MtCO ₂)		18
Gráfico 3	Matriz Energética Brasileira	19
Gráfico 4	Matriz Elétrica Brasileira	20

FIGURAS

Figura 1	Desenho esquemático de uma termelétrica a carvão	28
Figura 2	Processo de pré-combustão	28
Figura 3	Processo de pós-combustão	29
Figura 4	Processo de oxi-combustão	30
Figura 5	Opções para armazenamento geológico de CO ₂	34

IMAGENS

Imagem 1	Usina Candiota III	26
Imagem 2	Jazida de carvão mineral de superfície no município de Candiota	26

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BAR	Unidade de pressão
CAPES	Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CCS	<i>Carbon Capture and Storage</i>
CE	Estado do Ceará
CFC	Clorofluorcarboneto
CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de Carbono
CO ₂ e	Dióxido de Carbono Equivalente
CRM	Companhia Riograndense de Mineração
EGR	<i>Enhanced Gas Recovery</i>
EOR	<i>Enhanced Oil Recovery</i>
GEE	Gases do Efeito Estufa
GtCO ₂	Gigatonelada de Dióxido de Carbono
H ₂	Hidrogênio
H ₂ O	Água
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IEE	Instituto de Eletrotécnica e Energia
IEMA	Instituto de Energia e Meio Ambiente
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
MA	Estado do Maranhão
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MtCO ₂	Milhões de toneladas de Dióxido de Carbono
N ₂ O	Óxido Nitroso
O ₃	Ozônio
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
RPPN	Reserva Privada do Patrimônio Natural
RS	Estado do Rio Grande do Sul
SC	Estado de Santa Catarina

SFB	Serviço Florestal Brasileiro
SGB	Serviço Geológico do Brasil
SIN	Sistema Integrado Nacional
UFMS	Universidade Federal do Mato Grosso do Sul
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
USP	Universidade de São Paulo
°C	Unidade de temperatura Graus Célsius

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. CONTEXTUALIZAÇÃO: A IMPORTÂNCIA DO SEQUESTRO DE CO ₂	16
3. OBJETIVOS.....	21
4. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS E FONTES DE DADOS	22
5. BASE CONCEITUAL	23
6. SISTEMAS DE CAPTURA DE CO ₂ EM TERMELÉTRICAS A CARVÃO	25
6.1 TRANSPORTE	32
6.1.1 <i>Armazenamento em reservatórios geológicos</i>	33
7. CONCLUSÃO.....	36
8. REFERÊNCIAS	37

1. INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com as mudanças climáticas e seus impactos ambientais, tem levado a uma busca cada vez maior por soluções eficientes e viáveis para mitigar a concentração de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera. O sequestro e armazenamento de CO₂ (CCS, na sigla em inglês) surgem como estratégias promissoras nesse contexto, com o objetivo de reduzir as emissões e contribuir para a estabilização do clima global. De acordo com o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), é provável que o planeta aumente em 1,5°C a temperatura média já nas próximas duas décadas (IPCC, 2021). A mitigação das mudanças climáticas e a redução do impacto do aquecimento global são questões urgentes que demandam a adoção de estratégias eficazes.

Nesse contexto, a escolha do tema se deu a partir da análise dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), que são um conjunto de 17 metas adotadas pelos Estados Membros das Nações Unidas em 2015, com o intuito erradicar a pobreza extrema, combater a fome e a injustiça e conter as mudanças climáticas até o ano 2030 (ONU, 2015).

A partir dos dezessete ODS, foram selecionados seis principais:

- 7: Energia Limpa e Acessível: visa assegurar o acesso a fontes de energia acessíveis, confiáveis, sustentáveis e modernas para todos.
- 9: Indústria, Inovação e Infraestrutura: incentiva a construção de infraestruturas resilientes, a promoção da industrialização inclusiva e sustentável, e a fomentação da inovação.
- 11: Cidades e Comunidades Sustentáveis: visa tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis.
- 12: Consumo e Produção Responsáveis: promove o consumo e a produção responsáveis, incluindo o uso eficiente de recursos naturais.
- 13: Ação Contra a Mudança Global do Clima: trata da ação climática, incluindo medidas para combater as mudanças climáticas e seus impactos.
- 15: Vida Terrestre: busca proteger, restaurar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres.

Partindo disso, selecionamos a questão das mudanças climáticas como elemento macro para análise. Portanto os seis Objetivos encaixam-se como elementos que impactam na questão

das mudanças climáticas e dentre eles, os ODS 7: Energia Limpa e Acessível e 13: Ação Contra a Mudança do Clima Global foram os objetivos que motivaram a escolha do tema para a pesquisa: Processos de captura e armazenamento de carbono aplicadas a usinas termelétricas a carvão mineral. Assim, realizamos uma análise bibliográfica acerca do tema utilizando artigos, periódicos e outras publicações de fontes relevantes, a partir de uma busca em bancos de dados da Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Biblioteca Florestan Fernandes e *Research Gate*.

O sequestro de carbono consiste no processo de captura e armazenamento do dióxido de carbono da atmosfera ou diretamente de fontes emissoras, evitando assim sua liberação para o ambiente. Essa prática é imprescindível para auxiliar na redução das concentrações de gases do efeito estufa na atmosfera, contribuindo para a estabilização do clima global.

Diversos métodos e tecnologias têm sido desenvolvidos para o sequestro de carbono. Entre eles, destacam-se o armazenamento em reservatórios geológicos, a captura de carbono em usinas termelétricas utilizando os processos de pré-combustão, pós-combustão e oxi-combustão combinados com tecnologias de separação de CO₂ do gás da combustão: Absorção por aminas¹, separação por membranas e adsorção por sólidos como zeólita e o carvão ativado, dentre outros. Esses processos e tecnologias são os objetos principais da análise da pesquisa.

O armazenamento em reservatórios geológicos envolve a injeção do CO₂ em formações rochosas profundas, onde ele fica retido por longos períodos. Já a captura e armazenamento de carbono em usinas termelétricas consiste na separação do CO₂ gerado durante a queima de combustíveis fósseis como o carvão mineral e seu posterior armazenamento subterrâneo.

As próximas seções apresentarão um panorama a respeito dos setores com maior consumo de energia, em escala mundial, além da matriz energética e elétrica nacional. Na sequência, será abordado o carvão mineral como recurso natural para a produção de energia em termelétricas. A seção seguinte irá tratar das tecnologias para sequestro de carbono: pré-combustão, pós-combustão e oxi-combustão aplicadas a termelétricas a carvão. Por fim, apresentaremos as conclusões da pesquisa.

¹ As aminas são compostos orgânicos nitrogenados derivados da amônia (NH₃), pela substituição de um, dois ou três hidrogênios. Fonte: www.soquimica.com.br

2. CONTEXTUALIZAÇÃO: A IMPORTÂNCIA DO SEQUESTRO DE CO₂

O sequestro de carbono desempenha um papel importante na redução do aquecimento global e das mudanças climáticas. Através da captura e armazenamento de dióxido de carbono da atmosfera, o sequestro de carbono contribui para a diminuição da concentração desse gás de efeito estufa, evitando assim o aumento da temperatura média do planeta. Essa redução é essencial para mitigar os impactos negativos das mudanças climáticas, como o derretimento das calotas polares, a elevação do nível do mar e a ocorrência de eventos climáticos extremos (REISCH, 2021).

Nesse contexto, é importante destacar que o efeito estufa se refere a um efeito natural e benéfico para a preservação da temperatura e da vida no planeta, gerado principalmente pela altíssima presença de vapor d'água na atmosfera, além de outros gases em quantidades inferiores. Apesar de o vapor d'água ser o principal gás causador do efeito estufa, as emissões antrópicas excessivas de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), CFCs e ozônio (O₃), são responsáveis por intensificar esse efeito, provocando alterações na temperatura global, podendo levar ao desequilíbrio ambiental e mudanças climáticas.

O sequestro de carbono também traz benefícios econômicos significativos. A implementação dessas práticas ambientais gera empregos na área ambiental, como a contratação de profissionais para realizar o reflorestamento e monitorar os projetos de sequestro de carbono. Além disso, o desenvolvimento de novas tecnologias verdes relacionadas ao sequestro de carbono impulsiona a inovação e cria oportunidades para empresas que atuam nesse setor (MELO, 2023).

No entanto, é importante destacar que o sequestro de carbono enfrenta desafios e limitações. Um dos principais obstáculos é a necessidade de investimentos financeiros e tecnológicos para implementar essas práticas em larga escala. Além disso, a mensuração precisa dos resultados obtidos pelo sequestro de carbono ainda é um desafio, pois existem dificuldades em quantificar com precisão a quantidade de CO₂ removido da atmosfera e armazenado nos diferentes reservatórios (DUARTE, FIGUEIREDO, NUNES, 2020).

A conscientização da sociedade sobre o sequestro de carbono é de suma importância para promover sua adoção generalizada. Cada indivíduo pode contribuir para essa prática através do consumo consciente, optando por produtos sustentáveis e reduzindo o desperdício. Além disso, o uso de transportes coletivos como o sistema de metrô, trens e ônibus, auxilia na redução da quantidade de automóveis com motores de combustão interna, ditos eficientes.

Também é benéfico apoiar projetos ambientais que visam ao sequestro de carbono e a redução das emissões dos GEE.

2.1 Setores emissores de CO₂ no mundo e no Brasil

Com o crescimento das economias e da população mundial, é inevitável que também aumentem as emissões de CO₂, especialmente as provenientes da queima de combustíveis fósseis. Portanto, é interessante entender quais os setores e indústrias são responsáveis pelas maiores emissões. Analisando a figura 1, notamos que o setor de energia elétrica e geração de calor representa mais de 40% das emissões de CO₂, seguido pelo setor de transportes e processos industriais.

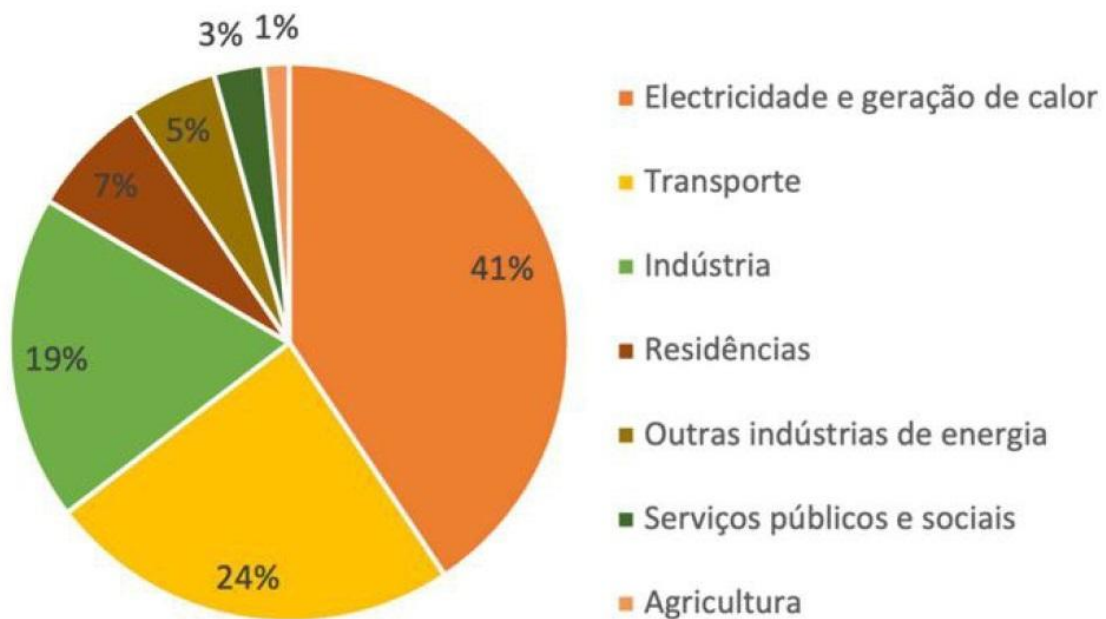


Gráfico 1: Emissões Globais de CO₂ por setores, 1990-2019

Fonte: International Energy Agency – IEA, 2024

É importante extrair da análise que as duas últimas fontes emissoras apresentam baixo volume e não são estacionárias, apresentando certa dificuldade em captura de carbono, transporte e armazenamento, devido ao processo se tornar muito custoso. Por outro lado, os outros setores contribuem com as maiores emissões, especialmente nos processos de geração de energia, produção de cimento, cal, produção de metais e uso de combustíveis em processos petroquímicos (IPCC, 2005).

Em nível global, a indústria do cimento é uma das maiores emissoras, sendo a China e a Índia responsáveis por cerca de 63% da produção mundial. Entre 2015 e 2020, a produção de cimento aumentou em 1,8% as emissões de CO₂ (International Energy Agency, 2021 – Cement Analysis).

Analisando comparativamente os dados que serão apresentados no gráfico 2, é possível observar que a China tem aumentado suas emissões, chegando a um crescimento de 1,7% no ano de 2019. Em contrapartida, os Estados Unidos demonstraram queda de 3,3%, União Europeia 4,9%, Rússia 5,2%, Brasil com redução de 6,2%, todos em 2019.

Em 2020 foi contabilizada queda global de 5,8%, o que representa aproximadamente 2000 milhões de toneladas de CO₂, muito disso devido aos impactos da pandemia do Covid 19, que atingiram a demanda mundial de petróleo e carvão. O setor petrolífero sofreu um declínio em 2020 inclusive por redução nas atividades de transporte rodoviário e no setor de aviação (International Energy Agency, 2021 – Global Energy Review).

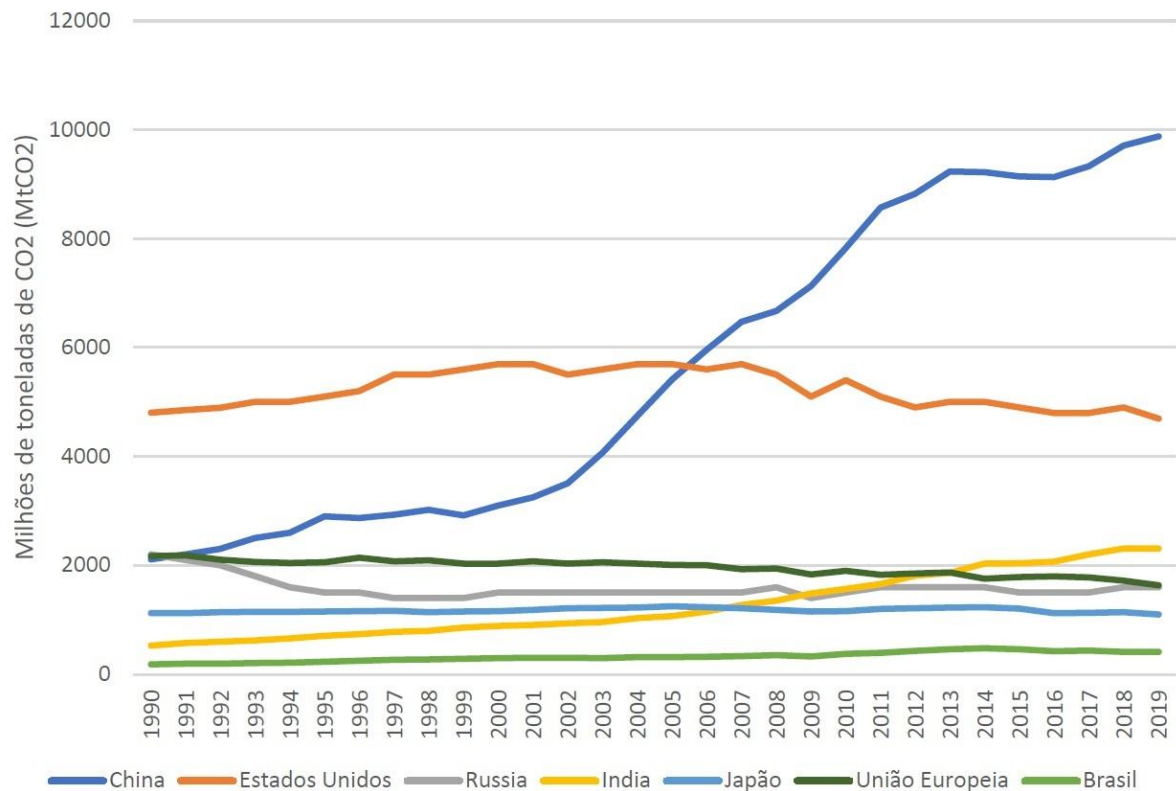
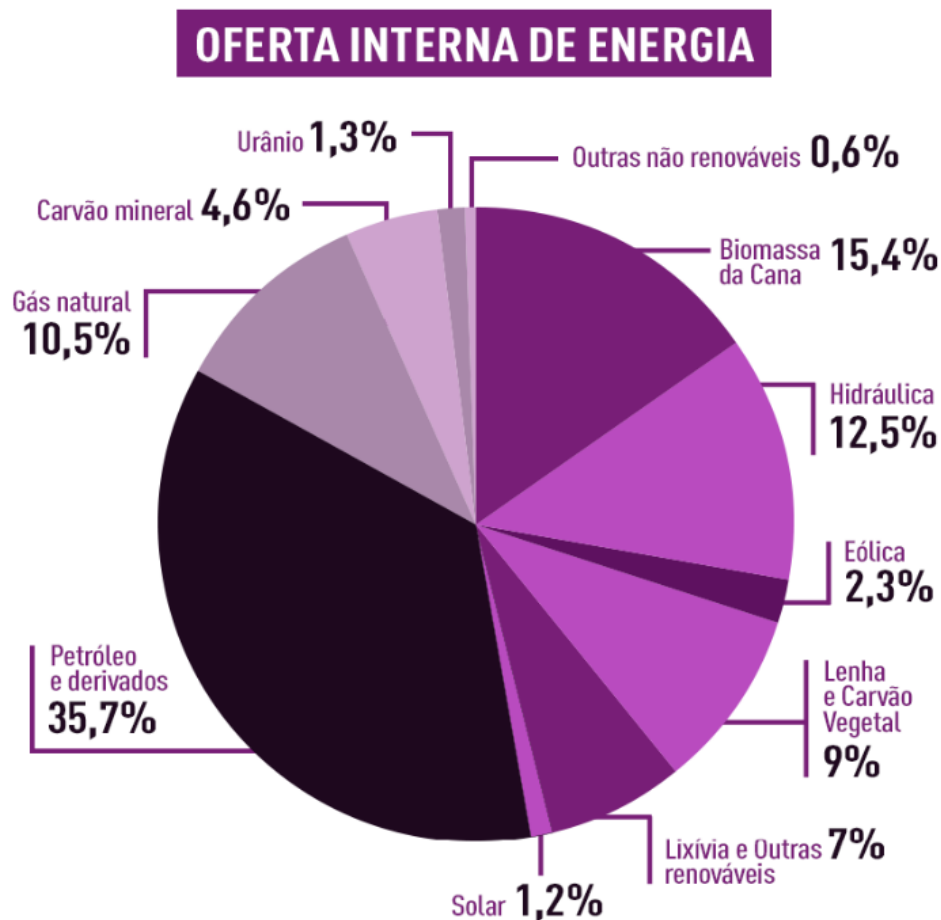


Gráfico 2: Emissões globais de CO₂ da combustão de combustíveis fósseis por países (MtCO₂). Fonte: International Energy Agency – IEA, 2024

No Brasil, tratando-se da matriz energética, aproximadamente 35% da energia utilizada tem o petróleo como fonte principal, especialmente devido ao uso de combustíveis como gasolina e diesel. Porém, a segunda principal fonte de energia é de origem durável e reprodutível: a biomassa de cana é fonte de 15,4% da energia ofertada no país, segundo dados da Raízen, maior produtora de etanol de cana-de-açúcar do país.



Fonte: Balanço Energético de 2023 - Ministério de Minas e Energia

Gráfico 3: Matriz Energética Brasileira

Com relação às políticas públicas planejadas para incentivar a transição energética no Brasil, foi elaborado Projeto de Lei do Senado, nº 712 de 2015 (PLS 712/2015), que busca aumentar a participação de fontes alternativas de energia na matriz energética nacional, devido ao diferencial que o país apresenta em termos de potencial hidrelétrico, eólico, incidência de luz solar ao longo do ano e grande capacidade de plantio e processamento de cana-de-açúcar, utilizada na produção de energia a partir da biomassa.

A partir da matriz energética, é possível separar a fração responsável pela produção de energia elétrica, sendo essa a matriz elétrica do país. Conforme pode-se observar no gráfico 4, a energia hidrelétrica responde por 61,9% da matriz elétrica nacional, seguida pelas energias de origem eólica (11,8%), de biomassa (8%) e solar (4,4%), todas fontes inesgotáveis e de baixíssimo impacto na emissão de CO₂, com exceção da biomassa, que é um recurso durável e reprodutível.

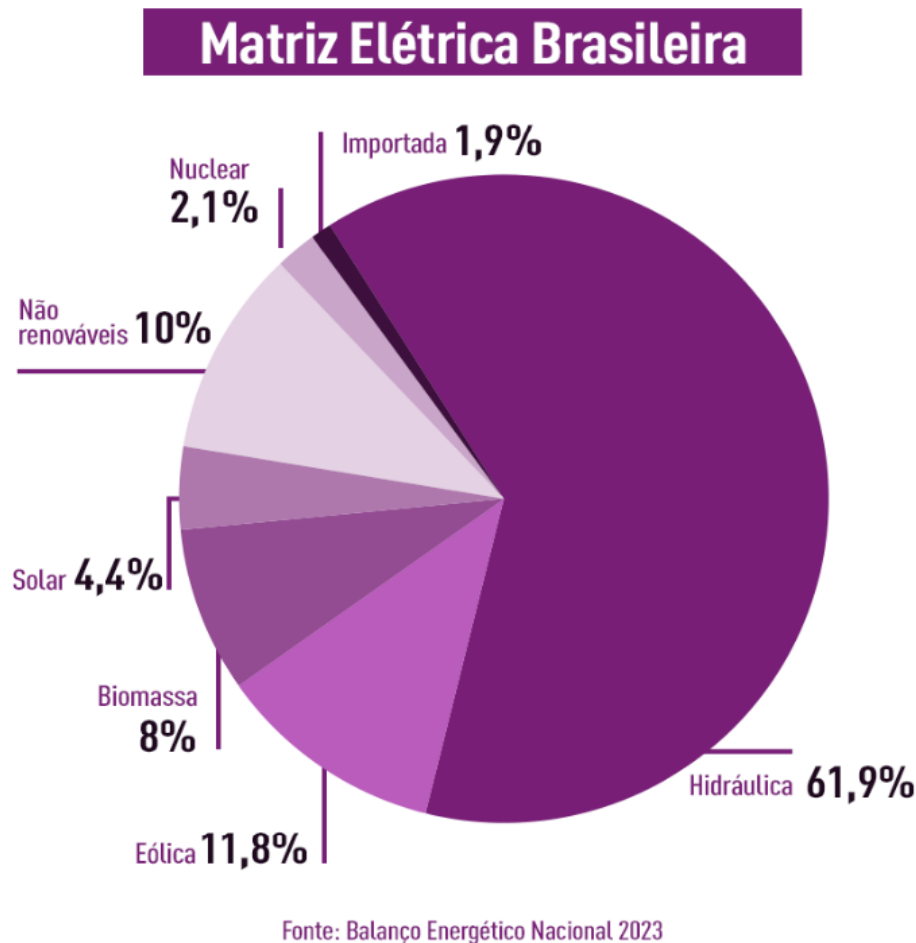


Gráfico 4: Matriz Elétrica Brasileira

Embora a geração de energia elétrica proveniente de fontes esgotáveis e finitas represente apenas 10%, é nesse percentual que está inclusa a produção a partir do carvão mineral. Em 2022, a produção de energia elétrica advinda da queima de carvão mineral obteve 22% de participação do total gerado a partir de combustíveis fósseis. Com relação às emissões de CO₂, apenas 5 usinas termelétricas a carvão foram responsáveis por 38,7% das emissões, acumulando um volume aproximado de 7,6 milhões de toneladas de CO₂e (Instituto de Energia e Meio Ambiente - IEMA, 2022).

3. OBJETIVO

A partir disso, o objetivo dessa pesquisa é realizar uma análise comparativa acerca de três tecnologias disponíveis para captura de CO₂ em usinas termelétricas a carvão: pré-combustão, pós-combustão e oxi-combustão, e o armazenamento do gás. Embora essas tecnologias sejam pouco difundidas na indústria, apresentam grande potencial. Buscamos, portanto, mostrar qual tecnologia seria mais interessante de ser aplicada nas termelétricas brasileiras, considerando fatores como custos e dificuldades de implementação nas usinas já em funcionamento e maneiras de se armazenar o CO₂ capturado. Utilizamos informações coletadas de vasta bibliografia especializada, com a intenção de servir como introdução ao tema sequestro de carbono, possibilitando que qualquer pessoa possa compreender o assunto, suas consequências e possíveis maneiras de auxiliar na mitigação das mudanças climáticas, contribuindo para um futuro sustentável.

4. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS E FONTES DE DADOS

A pesquisa foi direcionada aos três processos de combustão de carvão e separação de CO₂ considerados mais maduros, de acordo com as fontes consultadas: Pré-combustão, pós-combustão e oxi-combustão, levando em consideração fatores como custos e dificuldade de implementação. Realizamos a pesquisa a partir da gestão de informações coletadas de artigos, teses e periódicos científicos disponíveis no site da Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Biblioteca Florestan Fernandes, *Research Gate* dentre outras. Utilizamos sites de empresas e instituições especializadas, tais como o *International Panel on Climate Change* (IPCC), *International Energy Agency* (IEA), Carbfix, Companhia Riograndense de Mineração (CRM), Raízen, Ministério do Meio Ambiente (MAM), Serviço Geológico do Brasil (SGB) e Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA). Após a coleta dos artigos e dados, estes foram filtrados e analisados.

Portanto, para o desenvolvimento do trabalho, fizemos um mapeamento, avaliação e seleção de informações relacionadas à captura e armazenamento de carbono, através da busca e análise de artigos. Partindo do objetivo, obtivemos uma grande quantidade de informações as quais necessitavam de critérios para que pudessem integrar a pesquisa. Assim, uma vez que o foco estava em tecnologias desenvolvidas para o sequestro de carbono, selecionamos os artigos, teses e sites de empresas que atendiam à nossa necessidade.

Dessa forma, os artigos e teses que abordavam as tecnologias de captura de carbono: pré-combustão, pós-combustão e oxi-combustão, foram analisados e deles extraímos as informações pertinentes. Também foi necessário aprofundar a pesquisa sobre as tecnologias de separação do CO₂, pois os processos citados anteriormente, se referem ao ato de queimar o combustível, permanecendo a necessidade de separar o CO₂ do gás resultante da combustão.

Por fim, nos sites de empresas mineradoras e do Serviço Geológico do Brasil (SGB), pudemos obter detalhes a respeito da extração do carvão mineral e das minas exploradas no Brasil, principalmente na região sul. Ainda sobre o carvão, coletamos dados a respeito dos estados que mais consomem esse combustível para produção de energia elétrica, bem como os níveis de eficiência por usina.

5. BASE CONCEITUAL

Primeiramente, é importante esclarecer alguns aspectos sobre recursos naturais e o carvão mineral. De acordo com a nova classificação dos recursos naturais, proposta pelo Professor Doutor Luis Antonio Bittar Venturi, professor titular do Departamento de Geografia da Universidade de São Paulo (USP), os recursos naturais podem ser divididos em duráveis e esgotáveis. Duráveis pois são reprodutíveis (agricultura, pecuária, silvicultura etc.), naturalmente recicláveis (água, nitrogênio etc.), renováveis (florestas, população de animais, etc.) ou inesgotáveis (energia solar, geotérmica, eólica, matéria bruta etc.). Esgotáveis pois são finitos (petróleo, carvão, diversos minerais etc.), tendo ritmo de renovação muito além da escala do tempo humano ou são renováveis submetidos a mau uso.

Assim sendo, o carvão mineral é um recurso natural esgotável, de origem fóssil, formado a partir da decomposição de material orgânico, como plantas e árvores, ao longo de milhões de anos, sob condições específicas de pressão e temperatura. Embora se assemelhe a outros minerais, por não apresentar estrutura cristalina, é classificado como um mineralóide (VENTURI, 2021).

Partindo disso, existem quatro tipos de carvão mineral que serão descritos abaixo:

- **Antracito:** É o tipo mais avançado e mais maduro de carvão mineral, formado pela compressão e metamorfismo extremos da hulha ao longo de milhões de anos. Tem o maior teor de carbono entre os tipos de carvão mineral, 96%, tornando-o o mais denso e o mais energético. É muito valorizado como um combustível de alta qualidade devido ao seu alto poder calorífico e baixo teor de impurezas. É utilizado em aplicações em que é necessária uma fonte de energia muito eficiente, como em sistemas de aquecimento residencial e industrial e em filtros de água (Serviço Geológico do Brasil - SGB).
- **Hulha:** É um tipo de carvão formado a partir da compactação e do metamorfismo do linhito ao longo de milhões de anos. Possui um teor de carbono mais alto do que o linhito, 80% a 90%, tornando-o mais denso e mais energético. A hulha é amplamente utilizada na produção de energia elétrica, na indústria siderúrgica e em outras aplicações industriais devido ao seu alto teor de carbono e seu valor energético (Serviço Geológico do Brasil - SGB)
- **Linhito:** É um estágio mais avançado de carvão mineral do que a turfa, mas ainda é relativamente jovem em termos geológicos. É formado pela compactação e decomposição adicional de matéria orgânica, como musgos, madeira e plantas aquáticas, em áreas pantanosas. Possui um teor de carbono entre 67% e 78%, mas ainda é relativamente baixo em comparação

com outros tipos de carvão mineral. O linhito tem um teor de umidade moderado e pode ser utilizado para geração de energia elétrica e aquecimento, embora tenha um valor energético mais baixo do que outros tipos de carvão (Serviço Geológico do Brasil - SGB).

- **Turfa:** É o tipo mais primitivo de carvão mineral, formado pela acumulação parcialmente decomposta de matéria orgânica em pântanos, brejos e áreas úmidas. É composta principalmente por material vegetal parcialmente decomposto, como musgos, algas e outras plantas aquáticas. A turfa tem um baixo teor de carbono, 55% e um alto teor de umidade, o que a torna menos densa e menos energética em comparação com outros tipos de carvão mineral. É frequentemente utilizada como material combustível em algumas regiões, mas tem um valor energético mais baixo em comparação com outros tipos de carvão (Serviço Geológico do Brasil - SGB).

No cenário brasileiro, o linhito representa o tipo predominante de carvão mineral presente no território. Caracterizado como um estágio intermediário de carvão mineral, o linhito apresenta um grau de maturação superior à turfa, porém inferior à hulha e ao antracito. Tal tipo de carvão distingue-se pela sua composição, marcada por um teor de carbono relativamente inferior e, conseqüentemente, um valor energético mais modesto em relação à hulha e ao antracito, o que fica evidente na eficiência energética das usinas termelétricas alimentadas por este combustível, assunto que será abordado no próximo tópico.

A ocorrência do linhito concentra-se, sobretudo, em áreas específicas do Sul do Brasil, notadamente nos estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. Nessas regiões, são identificadas reservas significativas de linhito, cuja exploração visa atender às demandas energéticas do país.

Com relação às minas de carvão, elas são classificadas em minas de superfície, ou céu aberto, e minas de profundidade, sendo que no Brasil, o primeiro tipo é predominante. Para exploração das minas de carvão de superfície, é feita a remoção do solo e das camadas rochosas que cobrem o depósito de carvão, permitindo o acesso e a extração do mineral. Este método de mineração é comumente utilizado em áreas onde o carvão está localizado em camadas relativamente rasas, porém extensas, o que ocasiona maior impacto ambiental, em termos de extensão territorial afetada pela atividade mineradora.

Por outro lado, a exploração das minas de carvão de profundidade envolve a escavação de poços verticais ou inclinados visando acessar depósitos de carvão localizados em profundidades substanciais, podendo chegar a centenas de metros. Envolve uma série de recursos e seguranças que as minas de superfície não necessitam e são menos comuns no Brasil.

6. SISTEMAS DE CAPTURA DE CO₂ EM TERMELÉTRICAS A CARVÃO

O carvão mineral ainda possui um papel relevante na demanda mundial por fontes de produção de energia elétrica. Segundo dados da Agência Internacional de Energia (IEA na sigla em inglês), em 2023 o consumo desse combustível fóssil para produção de energia elétrica deve superar, pela primeira vez, 8,5 bilhões de toneladas, repercutindo um aumento de 1,5% em relação ao ano de 2022. Toda essa demanda atende principalmente a China, Índia e Estados Unidos. Os três países representam 72% do consumo mundial do mineral para o uso na produção de aço e geração de energia elétrica em usinas termelétricas.

No Brasil, o carvão mineral é utilizado na produção de energia elétrica em nove usinas termelétricas pertencentes ao Sistema Integrado Nacional (SIN), sendo elas Porto Itaquí (MA), Porto do Pecém I, Porto do Pecém II (CE), Figueira (PR), Jorge Lacerda I, Jorge Lacerda II, Jorge Lacerda III, Jorge Lacerda IV (SC), Candiota III e Pampa Sul (RS). A partir de dados extraídos e analisados do Terceiro Inventário de Emissões Atmosféricas em Usinas Termelétricas, publicado em 2023 pelo Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA), no ranking de eficiência energética, o carvão mineral fica abaixo de outros combustíveis fósseis como o óleo diesel e o gás natural, entregando uma média de 40% de eficiência.

No ano de 2022, usina Jorge Lacerda IV, localizada no município de Capivari Baixo, em Santa Catarina, apresentou a maior eficiência energética entre as termelétricas a carvão: 39%. Por outro lado, no município de Candiota, no Rio Grande do Sul, a usina Candiota III extraiu apenas 28% de eficiência do combustível e foi a maior emissora de CO₂ dentre as nove usinas a carvão do SIN. A usina pertencia à Eletrobrás e foi vendida em setembro de 2023 por R\$ 72 milhões, como parte da estratégia da empresa de reduzir as emissões de CO₂.

Ao longo de 2022, a usina Candiota III emitiu 2,4 milhões de toneladas de CO₂e, enquanto as 72 usinas termelétricas do SIN emitiram 19,5 milhões de toneladas, ou seja, apenas Candiota III representa mais de 12% das emissões totais de carbono. Para efeitos de comparação, segundo dados do Boletim Geográfico do Rio Grande do Sul, em 2018 o município de Porto Alegre emitiu 2,54 milhões de toneladas de CO₂e.²

² O CO₂e, ou dióxido de carbono equivalente, é uma medida que expressa a contribuição de diferentes gases de efeito estufa para o aquecimento global em termos comparáveis ao dióxido de carbono (CO₂). Ele permite que gases como metano, óxido nitroso e outros sejam traduzidos em uma única unidade de medida com base em sua capacidade relativa de reter calor na atmosfera ao longo do tempo, geralmente em um período de 100 anos. Isso facilita a avaliação e comparação das emissões de gases de efeito estufa provenientes de diversas fontes e atividades (MMA, 2024).



Imagem 1: Usina Candiota III – Município de Candiota, Rio Grande do Sul – Fonte: Eletrobrás, 2024.



Imagem 2: Jazida de carvão mineral superficial no município de Candiota, Rio Grande do Sul – Fonte: Companhia Riograndense de Mineração, 2024.

A partir disso, fica clara a necessidade da utilização de tecnologias de captura e armazenamento de carbono para reduzir as emissões desse gás, a fim de auxiliar na preservação do equilíbrio do clima. Portanto, a seguir falaremos brevemente sobre como a energia elétrica é produzida em uma termelétrica e em sequência, apresentaremos um comparativo de três sistemas de captura de CO₂ que podem ser utilizados em usinas termelétricas a carvão, sendo eles baseados em pré-combustão do combustível, pós-combustão do combustível e oxi-combustão, que utiliza oxigênio ao invés de ar durante a combustão.

Geração de energia em termelétrica:

1. **Pulverização do Carvão:** O carvão é pulverizado em pequenas partículas finas, aumentando sua área de superfície e facilitando sua queima.
2. **Combustão:** As partículas de carvão pulverizado são queimadas em caldeiras a altas temperaturas. Essa queima libera calor, que é usado para aquecer a água.
3. **Geração de Vapor:** A água é aquecida até se transformar em vapor de alta pressão. Esse vapor é direcionado para turbinas.
4. **Turbina:** O vapor em alta pressão é direcionado para girar as pás de uma turbina. À medida que as pás da turbina giram, elas acionam um gerador.
5. **Gerador:** O gerador é conectado à turbina e converte a energia mecânica gerada pela rotação da turbina em energia elétrica.
6. **Transformador:** A eletricidade gerada passa por um transformador, onde sua voltagem é ajustada para a adequada transmissão e distribuição pela rede elétrica.
7. **Condensação:** Após passar pela turbina, o vapor de água é resfriado em um condensador, onde se condensa em água novamente. Esta água é então reciclada de volta para a caldeira para ser aquecida, reiniciando o processo.
8. **Controle de Emissões:** As termelétricas a carvão frequentemente utilizam sistemas de controle de poluição para reduzir as emissões de gases poluentes, como dióxido de enxofre (SO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x), material particulado e dióxido de carbono (CO₂).

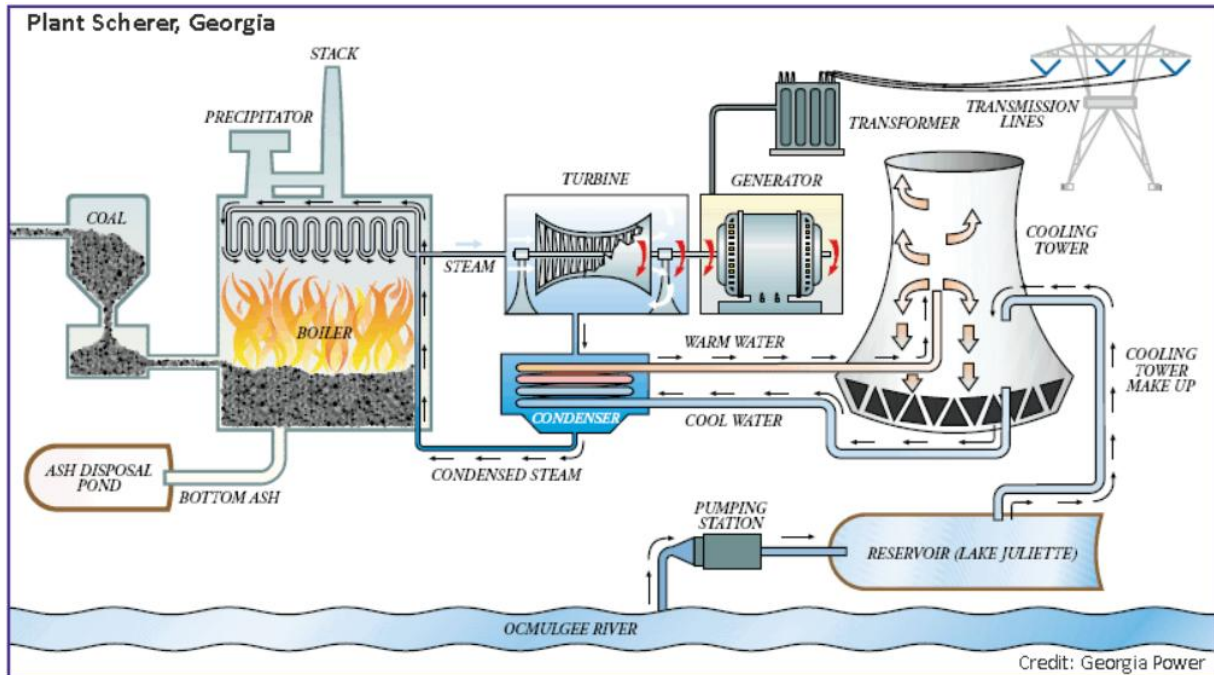


Figura 1: Desenho esquemático de uma termelétrica a carvão. Fonte: *United States Geological Survey*, 2024.

- **Pré-combustão:** O carvão reage com oxigênio e vapor a altas pressões e temperaturas, gerando um gás rico em monóxido de carbono e hidrogênio chamado gás síntese. Esse gás possui impurezas como o sulfeto de hidrogênio que é removido após nova reação com vapor. Essa reação produz mais hidrogênio e CO_2 , que serão separados, deixando o CO_2 pronto para ser comprimido e armazenado enquanto o hidrogênio poderá ser usado para a produção de calor/energia ou outros produtos como a amônia (IPCC, 2005). O esquema na figura 1 exemplifica o processo.

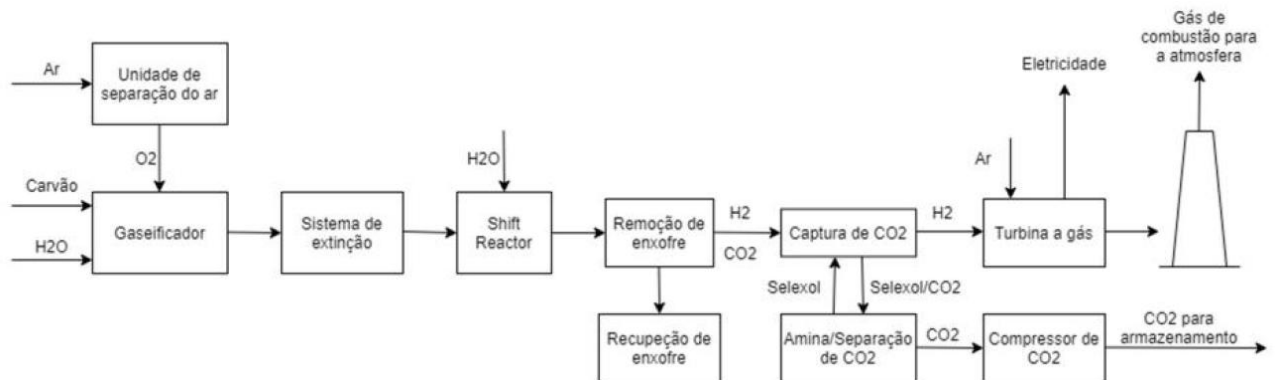


Figura 2: Desenho esquemático de uma planta de captura de CO_2 por pré-combustão. Fonte: MOTA, 2021.

A vantagem dessa técnica é o baixo consumo de energia necessária para a separação do CO₂, pois o gás resultante da pré-combustão apresenta concentração de aproximadamente 40% de CO₂. A energia utilizada pela planta é de aproximadamente 10-16% da energia total gerada (OLAJIRE, 2010). A desvantagem é a necessidade de altos investimentos em equipamentos que atendam às necessidades da tecnologia além da alta complexidade para a geração do gás sintético.

- **Pós-combustão:** A captura ocorre após o combustível fóssil ter sido queimado e por se encontrar em pressão atmosférica, apresenta concentrações muito baixas de CO₂, entre 3% e 15%, por isso utilizam-se solventes líquidos (aminas) para poder capturar o CO₂. O processo, conforme exemplificado na figura 6, consiste no gás da combustão passar por um absorvedor onde a reação química entre o solvente líquido e o CO₂ ocorre, capturando aproximadamente 90% do CO₂. Este solvente rico em carbono é transportado a uma torre regeneradora e submetido a temperaturas superiores a 100°C, ocasionando a quebra das ligações químicas formadas, possibilitando então a pressurização do CO₂ e armazenamento. A figura 2 descreve o processo.

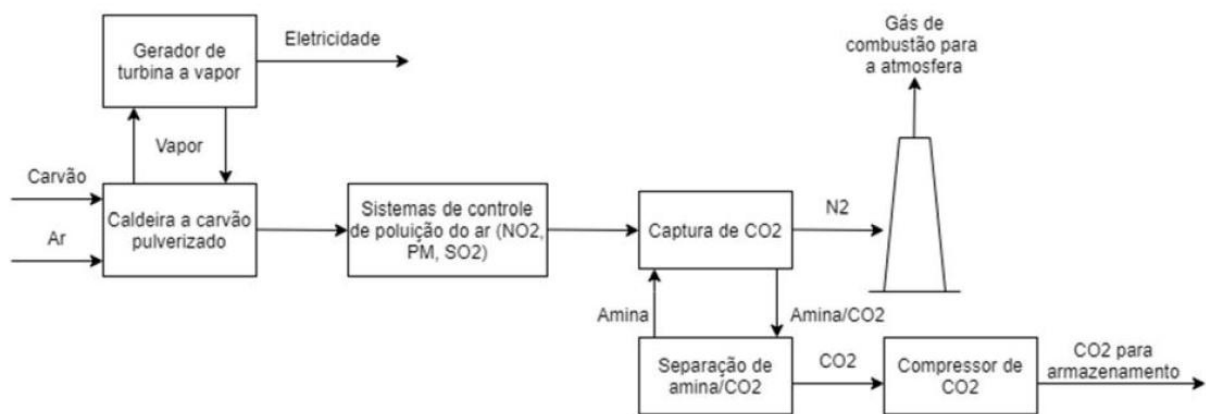


Figura 3: Desenho esquemático de uma planta de captura de CO₂ por pós-combustão. Fonte: MOTA, 2021.

A vantagem dessa técnica é ser a mais econômica das três aqui abordados. Porém, gera volumes imensos de gases de combustão com baixa concentração de CO₂, na média de 3% a 15% e isso se reflete na necessidade de alto consumo de energia para separação do carbono. Estima-se que de toda a energia gerada na usina termelétrica, entre 25 e 35% seja destinada para a separação do CO₂ (OLAJIRE, 2010).

- **Oxi-combustão:** Consiste em utilizar oxigênio em alto grau de pureza (95% - 99%) para realizar a combustão do carvão. A utilização desse oxigênio para combustão gera temperaturas de até 3500°C, extremamente altas para o tipo de material comumente utilizado nos fornos, portanto se faz necessário diluir esse oxigênio, ficando aproximadamente 35% O₂ e 65% CO₂ reciclado. Ao fazer a combustão, obtém-se um gás com aproximadamente 80% CO₂, H₂O vapor e traços desprezíveis de impurezas. Por fim, o CO₂ pode ser comprimido e armazenado, conforme exemplificado na figura 3.

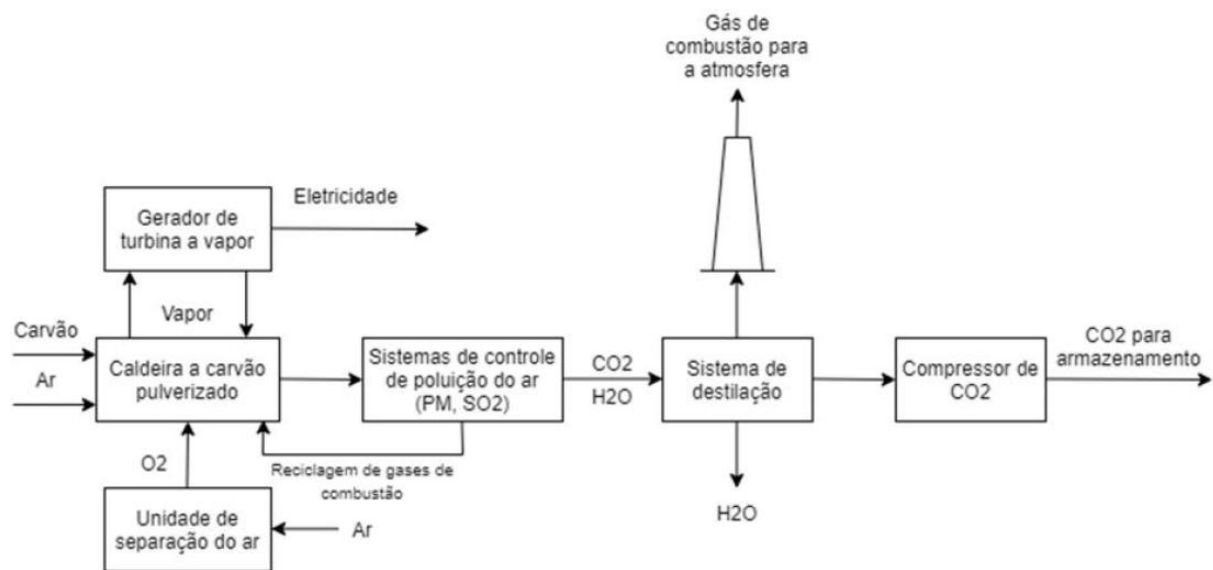


Figura 4: Desenho esquemático de uma planta de captura de CO₂ por oxi-combustão. Fonte: MOTA, 2021.

Como vantagem, destaca-se a ausência de nitrogênio na queima do combustível, impedindo a formação de impurezas como óxidos de nitrogênio, o que diminui custos de separação dos elementos do gás obtido na combustão. Também é possível adaptar esse processo em plantas que já utilizam sistemas de pós-combustão. Contudo, essa é a tecnologia menos desenvolvida até o momento e se faz necessário altos investimentos em equipamentos para a separação do oxigênio do ar, equipamentos estes que também são responsáveis por consumir grande quantidade de energia. Além disso, é necessário construir fornos com materiais que suportem as temperaturas alcançadas na queima do combustível, tornando muito custoso o processo como um todo (OLAJIRE, 2010).

Em conjunto com os três processos citados, podem ser utilizadas três tecnologias de captura de carbono: absorção, adsorção e uso de membranas.

- **Absorção:** Neste método, a substância absorvente é geralmente uma amina e tem sua capacidade de absorção baseada na reversibilidade das reações químicas do solvente. Durante

este processo, o CO_2 é absorvido pela amina. As operações de absorção geralmente ocorrem em torres, onde os gases de exaustão fluem contracorrente ao solvente. Exemplos de solventes comumente utilizados incluem monoetanolamina, dietanolamina, entre outros (LESSA, 2012).

- **Adsorção:** A adsorção é um processo no qual a substância adsorvente retém a substância adsorvida na sua superfície, sem que esta seja incorporada à estrutura da outra. Diversas variáveis podem influenciar esse processo, incluindo temperatura, pressão, propriedades das superfícies dos materiais e tamanho dos poros na superfície. Como materiais adsorventes podem ser utilizadas zeólitas, carvão ativado, óxidos de cálcio, zirconato de lítio e hidrotalcitas (MOTA, 2021).

- **Membranas:** Outra abordagem para a captura de CO_2 envolve o uso de membranas seletivas. Essas membranas têm a capacidade de separar uma variedade de elementos, como H_2 , CO_2 e O_2 . Podem ser fabricadas a partir de materiais como metais, polímeros ou cerâmicas, porém são sensíveis a corrosão de outros elementos que podem estar presentes nos gases, como óxidos de enxofre, óxidos de nitrogênio e sulfeto de hidrogênio. (MOTA, 2021).

Uma das dificuldades associadas ao uso de sistemas de membranas são os custos operacionais e de implantação, bem como a incerteza quanto à eficiência na captura de CO_2 . Por esse motivo, geralmente, em sistemas de captura de CO_2 opta-se em utilizar tecnologias de absorção baseadas em aminas como solvente, devido à sua capacidade de captura de CO_2 , que pode chegar a níveis de até 90%. No entanto, assim como as membranas, os sistemas de absorção baseados em aminas ainda implicam em um consumo significativo de energia pela usina. Estima-se que ao implementar esses sistemas, a produção líquida da usina possa diminuir entre 12% e 16%, enquanto a penalidade na energia líquida se aproxima de 17% a 22% da energia bruta (RAO, KUMAR, 2014).

Uma análise da implementação de um sistema de captura de CO_2 em regime de pós-combustão, utilizando amina como solvente, em uma usina termoelétrica movida a carvão pulverizado foi conduzida por Koehler (2015). De acordo com as estimativas, a redução na eficiência da planta é da ordem de 20%, o aumento no custo da energia é aproximadamente de 136%, e o custo total do sistema é estimado em cerca de US\$ 500 mi.

As tecnologias de captura de dióxido de carbono têm avançado, empregando uma variedade de procedimentos aprimorados e solventes mais eficazes, buscando reduzir os custos e aumentar a eficiência. No entanto, um dos principais desafios ainda é o impacto significativo nas unidades geradoras de energia em termos de custos e eficiência. Para mitigar esses efeitos, tem havido um crescente interesse em tecnologias de adsorção com sólidos. A adsorção em sólidos emerge como uma abordagem promissora para contornar os altos custos associados a

regeneração de solventes líquidos, que demandam mais energia e tempo no processo. Essa abordagem visa minimizar a penalidade na eficiência das usinas geradoras de energia e reduzir os custos finais para os consumidores.

Nos processos de adsorção de CO₂ utilizando sólidos de um aluminossilicato como a zeólita, por exemplo, diversas partículas são introduzidas por gravidade e fluem contracorrente aos gases de exaustão, os quais são insuflados por baixo. Os sólidos adsorvem o dióxido de carbono, que fica retido em sua superfície. Posteriormente, passam por um processo de regeneração no qual o CO₂ é separado das zeólitas, as quais retornam ao ciclo. Como a regeneração de um sólido demanda menos energia do que a regeneração de um solvente líquido, como amina (através de evaporação), o processo de adsorção torna-se mais viável em termos de eficiência energética e custos (BHATTACHARYYA, MILLER, 2017).

Portanto, no contexto brasileiro, uma configuração ideal para uma termelétrica seria a combinação do processo de pós-combustão e com um sistema de captura de CO₂ de adsorção utilizando sólidos, tais como zeólitas, carvão ativado, óxido de cálcio, zirconato de lítio e hidrotalcitas que, embora muito recente e pouco desenvolvida, seria uma alternativa promissora. Além disso, a demanda energética pela adsorção é inferior à da absorção por aminas, penalizando menos a produtividade entregue pela planta. Tudo isso implicaria em menores custos de implementação, pois a pós-combustão utiliza os gases resultantes após a queima do carvão para extrair o CO₂. Não havendo a necessidade de instalar equipamentos diferentes dos já existentes ou realizar adaptações complexas, pois o sistema de captura seria no final da linha, a última etapa.

6.1 Transporte

Uma vez que o CO₂ foi comprimido ou liquefeito, ele pode ser transportado até um reservatório geológico. O transporte pode ser feito de diversas maneiras, dentre elas podemos citar gasodutos, navios e caminhões tanque. A escolha do tipo de transporte reflete questões como quantidade de volume e distância até o destino.

Gasodutos são vistos como a melhor alternativa para o transporte do CO₂, devido à possibilidade de instalação em diversos ambientes e permitir o deslocamento de grandes volumes tanto por terra quanto por mar. Para obter a melhor eficiência, é necessário que as condições da infraestrutura suportem pressões entre 85bar e 150bar e temperaturas variáveis de 13°C a 44°C (IPCC, 2005).

Navios também são escolhas possíveis de serem utilizadas para o transporte de CO₂ devido à grande disponibilidade e capacidade de carga dessas embarcações, utilizadas para transportar gás natural liquefeito, contudo deve-se observar se o navio é carbono neutro.

Por fim, o uso de caminhões tanque no transporte de CO₂ também é uma alternativa, quando as anteriores não estão disponíveis no lugar onde o gás foi sequestrado, desde que seja utilizado caminhões elétricos ou movidos a hidrogênio. Vale destacar que em termos de eficiência, esta seria a alternativa mais limitada, considerando o baixo volume de armazenamento dos tanques, além dos custos que podem superar em até duas vezes o do transporte via gasoduto (IPCC, 2005).

6.1.1 Armazenamento em reservatório geológico

A última etapa do processo de sequestro de carbono é a destinação final do produto. Após a extração do CO₂ nas termelétricas e do transporte via gasoduto, navio ou caminhão, a etapa mais importante é a injeção desse gás em poços extintos de gás natural e petróleo, jazidas de carvão ou até em aquíferos salinos, contanto que nesses lugares existam rochas com porosidade e impermeabilidade adequadas. Diferentes tipos de rochas que podem funcionar como selantes, ou capeadoras, nos termos da indústria do petróleo, cuja função seria impedir a subida do gás através das diferentes camadas geológicas. As principais rochas selantes seriam os folhelhos (rochas argilosas laminadas), evaporitos (sal), rochas carbonáticas (calcário) e rochas ígneas (granito e basalto) (*Brazilian Atlas of CO₂*, 2014).

Para o processo de injeção de CO₂ apresentar os melhores resultados, é necessário que o poço tenha profundidade superior a mil metros, preservando o estado supercrítico do gás e garantindo que aproximadamente 99% do CO₂ permaneça aprisionado, segundo estimativas, por cerca de mil anos (IPCC, 2005). O aprisionamento do carbono irá ocorrer a partir de processos físicos, enclausuramento nos poros da rocha e sob a camada selante, também por processos químicos, adsorção em matéria orgânica ou dissolução em fluidos de formação.

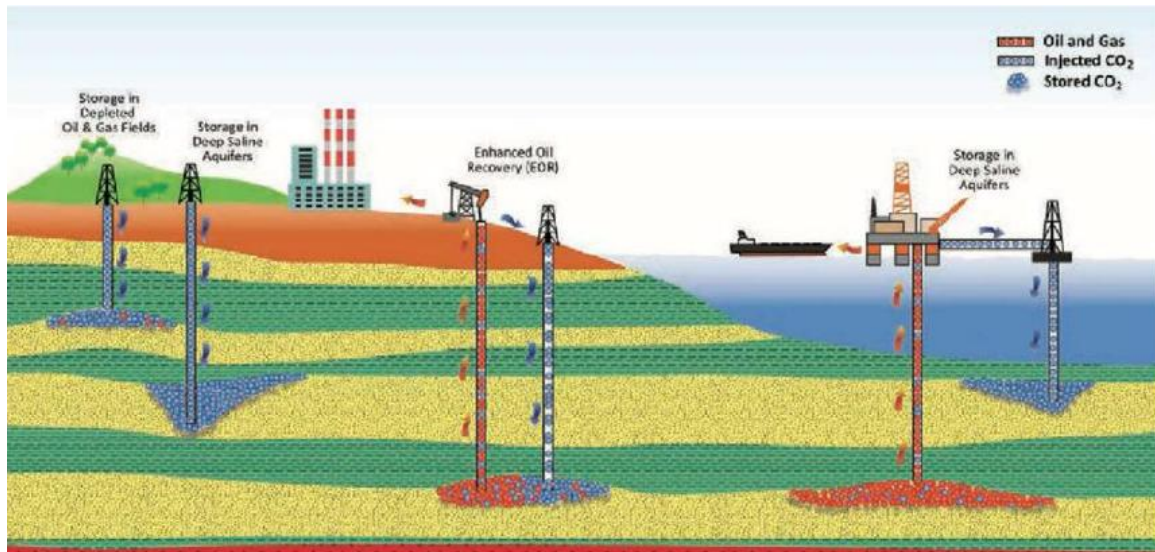


Figura 5: Opções para armazenamento geológico de CO₂ – Fonte: *Brazilian Atlas of CO₂*, 2014

É importante mencionar que é possível injetar CO₂ em poços de petróleo e gás que se encontrem em estágios finais de extração. A injeção do dióxido de carbono irá aumentar a pressão, diminuindo a viscosidade do petróleo ocorrendo no aumento da capacidade de extração. Essa técnica denominada *Enhanced Oil Recovery* (EOR) e *Enhanced Gas Recovery* (EGR) proporciona a recuperação de aproximadamente 40% do óleo que seria deixado após a extração tradicional finalizar. Porém, estima-se que metade do gás injetado retorne para a superfície agregado ao óleo produzido, sendo separado e reinjetado. Estimativas apontam que poços esgotados de petróleo e gás possam armazenar entre 675 e 900 GtCO₂ (IPCC, 2005).

Um estudo brasileiro de 2020, realizado pelo Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo (IEE-USP) e apresentado na *Rio Oil Gas Expo and Conference*, trouxe projeções acerca do investimento necessário para a injeção de CO₂ em poços de gás natural localizados na formação Irati, pertencente à Bacia do Rio Paraná e rica em folhelhos negros. A escolha do local e do tipo de rocha deu-se pelos seguintes fatores: (I) Os folhelhos são rochas sedimentares clásticas que se formam pela consolidação de partículas argilosas e siltico-argilosas, em lâminas de baixa permeabilidade. Essa baixa permeabilidade confere a característica de o folhelho ser utilizado como camada selante após a injeção de CO₂, no poço de gás natural, de baixa porosidade (MASULINO, 2020). Além disso, por ser uma rocha rica em matéria orgânica, facilitaria o aprisionamento do gás através da adsorção. (II) A formação Irati encontra-se em uma área próxima dos grandes centros emissores de CO₂ no Brasil, as regiões sul e sudeste. Isso proporcionaria maior facilidade no transporte do gás.

A conclusão do estudo revelou que, para um poço a pelo menos 800m de profundidade e com dimensões 1200m X 600m X 40m, em um período mínimo de 10 anos e máximo de 50 anos, os custos seriam de aproximadamente 22 milhões de dólares ao longo de 10 anos e 59 milhões de dólares ao longo de 50 anos. A capacidade de armazenamento de CO₂ foi de 176 mil toneladas (10 anos) e 492 mil toneladas (50 anos) e o custo por tonelada de CO₂ injetado ficou entre 72 e 129 dólares, o que, segundo o estudo, seria um valor muito próximo das taxas existentes em outros países.

Além desse estudo brasileiro, é relevante mencionar a iniciativa pioneira da empresa Carbfix, da Islândia e que mantém projetos de pesquisa e desenvolvimento em parceria com diversos países, incluindo Inglaterra, Alemanha, Itália e Turquia. Fundada em 2007, a premissa da empresa é transformar dióxido de carbono em rochas.

O processo desenvolvido consiste em injetar água altamente concentrada em CO₂ em formações basálticas compostas por pelo menos 25% de cálcio, ferro e magnésio. A injeção da água gaseificada no basalto permite a penetração nos poros e fissuras ocasionando a carbonatação e aprisionamento do CO₂ por milhares de anos.

Segundo a empresa, por ser mais densa do que a água presente na formação geológica, ao ser injetada, penetra nas fissuras e poros descendo pela rocha e quando em contato com os elementos do basalto, inicia o processo de mineralização. Enquanto em métodos de injeção de gás liquefeito se faz necessário a presença de uma rocha selante, uma vez que o gás irá subir pelas camadas geológicas até ser barrado por esta rocha selante. A Carbfix declara que em 2 anos, até 95% do CO₂ injetado já se encontra em estado mineralizado devido à alta capacidade de reação dos minerais presentes no basalto com a água rica em CO₂.

8. CONCLUSÃO

Atualmente, a principal fonte energética global deriva da extração e queima de combustíveis fósseis, como carvão, petróleo e gás natural, especialmente para geração de energia elétrica. As tecnologias apresentadas para a captura e armazenamento do CO₂ possuem suas vantagens e limitações, enfrentando desafios consideráveis: otimizar a eficiência na remoção do dióxido de carbono para reduzir os custos energéticos necessários à separação, além da pouca difusão de informações referente a essas tecnologias para a sociedade, que poderia pressionar governo e indústria afim de popularizar e baratear os processos.

A partir das informações e dados apresentados, foi possível compreender o cenário atual e analisar as principais tecnologias de captura de CO₂ vigentes, assim como as principais inovações. Notamos uma tendência maior à adesão do processo de pós-combustão, principalmente pelo fato de não se fazerem necessárias grandes alterações nas configurações já utilizadas nas termelétricas do Brasil, refletindo em menores custos de implementação.

Além disso, a tecnologia de separação de CO₂ por absorção, utilizando aminas, é a mais madura e desenvolvida atualmente, podendo ser implantada e explorada. Contudo, esse método separação de CO₂ exige alto custo energético. Assim, a utilização de adsorventes sólidos, como a zeólita, tem se mostrado promissor nas pesquisas, proporcionando menor gasto energético e impactando menos na eficiência da planta, quando comparado com a absorção por aminas.

Por fim, é notável que a comunidade acadêmica está trabalhando com afinco na questão das emissões de gases de efeito estufa, buscando aperfeiçoar as tecnologias existentes além de desenvolver outras, mais eficientes. As tecnologias de captura e armazenamento de CO₂ estão se tornando uma fonte de pesquisas e experimentos cruciais na busca por estratégias para mitigar as mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS

CANDIOTA III e Pampa Sul são as usinas termelétricas que mais emitiram gases de efeito estufa por eletricidade gerada em 2020, mostra estudo inédito do IEMA. **IEMA**, 2022. Disponível em: <<https://energiaambiente.org.br/candiota-iii-e-pampa-sul-sao-as-usinas-termelétricas-que-mais-emitiram-gases-de-efeito-estufa-por-eletricidade-gerada-em-2020-mostra-estudo-inedito-do-iema-20220630>>. Acesso em 23 de out. 2023.

CARBFIX. Carbfix: *We turn CO₂ into stone*, 2023. Página inicial. Disponível em: <<https://www.carbfix.com>>. Acesso em: 15 de dez. 2023.

CLIMATE WATCH. *Climate Watch*, 2023. *Key Visualization*. Disponível em: <https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?chartType=line&end_year=2020&gases=co2®ions=WORLD&start_year=1990>. Acesso em: 30 de out. 2023.

COMPANHIA RIOGRANDENSE DE MINERAÇÃO. **CRM**, 2023. Minas. Disponível em <<https://www.crm.rs.gov.br/minas>>. Acesso em: 22 de jul. 2023.

DANTAS, Carolina. 8 dos 10 municípios que mais emitem gases do aquecimento global no Brasil estão na Amazônia. **G1**, 2022. Disponível em: <<https://g1.globo.com/meio-ambiente/aquecimento-global/noticia/2022/06/13/8-dos-10-municipios-que-mais-emitem-gases-do-aquecimento-global-no-brasil-estao-na-amazonia.ghtml>>. Acesso em 24 abr. 2023.

ELETOBRAS. Eletrobras CGT Eletrosul, 2023. Página inicial. Disponível em: <<https://www.cgteletrosul.com.br/nosso-negocio/geracao/candiota>>. Acesso em: 16 de out. 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Matriz Energética e Elétrica. **EPE**, 2023. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em 03 de jun. 2023.

FRIEDRICH, Johannes; MENGPIN, Ge; PICKENS Andrew. A trajetória dos 10 maiores emissores de carbono desde o Acordo de Paris em gráficos interativos. **WRI BRASIL**, 2023. Disponível em: <<https://www.wribrasil.org.br/noticias/trajetoria-dos-10-maiores-emissores-de-carbono-desde-o-acordo-de-paris-em-graficos>>. Acesso em: 10 de jan. 2024.

FRONZA, E. E. Potencial de sequestro de carbono em pastagens da Região Sul do Brasil: uma revisão sistemática. 2023. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/251937>>. Acesso em: 02 ago. 2023.

GLOBAL CCS INSTITUTE. *Global CCS Institute*. Página Inicial. 2024. Disponível em: <<https://www.globalccsinstitute.com/>> Acesso em: 12 jan. 2024.

HARRIS, Nancy; GIBBS David. Florestas absorvem duas vezes mais CO₂ do que emitem por ano. **WRI BRASIL**, 2021. Disponível em: <<https://www.wribrasil.org.br/noticias/florestas-absorvem-duas-vezes-mais-co2-do-que-emitem-por-ano>>. Acesso em 8 de jan. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. IEA, 2023. *Cement*. Disponível em: <<https://www.iea.org/energy-system/industry/cement>>. Acesso em 13 de nov. 2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. IEA, 2023. *CO₂ Emissions in 2022*. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022>>. Acesso em: 10 de nov. 2023.

JR Ferraz. “Série Energia”: Na contramão da sustentabilidade, carvão mineral segue firme na produção de energia térmica. **Jornal da USP**, 2022. Disponível em: <<https://jornal.usp.br/campus-ribeirao-preto/serie-energia-na-contramao-da-sustentabilidade-carvao-mineral-segue-firme-na-producao-de-energia-termica/>>. Acesso em 23 de out. 2023.

LIMA JUNIOR, N. S. Neutralização das emissões de gases de efeito de estufa através de ações de sequestro de carbono: uma metodologia para os municípios. 2021. Disponível em: <<https://run.unl.pt/handle/10362/132379>>. Acesso em: 22 mai. 2023.

MACHADO, Nayara. Demanda por carvão deve superar 8,5 bilhões de toneladas pela primeira vez. **EPBR**, 2023. Disponível em: <<https://epbr.com.br/demanda-por-carvao-deve-superar-85-bilhoes-de-toneladas-pela-primeira-vez/#:~:text=China%2C%20%C3%8Dndia%20e%20Indon%C3%A9sia%20%E2%80%93%20os,uma%20nova%20alta%20em%202023>>. Acesso em: 02 de jan. 2024.

MATRIZ energética brasileira: o que é e do que é composta. **Raízen**, 2023. Disponível em: <<https://www.raizen.com.br/blog/matriz-energetica-brasileira>>. Acesso em: 19 de nov. 2023.

MELO, BMD. Estoque e potencial de sequestro de carbono no Estado de Santa Catarina. 2023. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/247676>>. Acesso em: 11 out. 2023.

MISRA, Ria. Estas rochas podem ajudar a reverter a mudança climática. **Gizmodo**, 2016. Disponível em: <<https://gizmodo.uol.com.br/co2-em-rocha/>>. Acesso em: 01 de abr. 2023.

MOTA, Maria Luiza Aguiar. Panorama atual dos processos de captura e armazenamento de CO₂. **UFRJ**, 2021. Disponível em: <<https://pantheon.ufrj.br/handle/11422/16753>>. Acesso em: 01 de abr. 2024.

PEÇANHA, Alessandra. Transição energética: Tecnologias *Carbon Capture and Storage* (CCS), 2020. Disponível em: <<https://www.aapgybrazil.com/post/transi%C3%A7%C3%A3o-energ%C3%A9tica-tecnologias-carbon-capture-and-storage-ccs>>. Acesso em: 10 jan. 2024.

RESEARCH CENTRE FOR GREENHOUSE GAS INNOVATION. *Research Centre for Greenhouse Gas Innovation*, 2024. Captura e utilização de carbono (CCU). Disponível em: <<https://sites.usp.br/rcgi/br/captura-e-utilizacao-de-carbono-ccu/>>. Acesso em: 10 fev. 2024.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Serviço Geológico do Brasil, 2024. Carvão Mineral. Disponível em: <<https://www.sgb.gov.br/publique/SGB-Divulga/Canal-Escola/Carvao-Mineral-2558.html>>. Acesso em: 16 mar. 2024.

VENTURI, Luis Antonio Bittar. **Recursos naturais do Brasil**. 1ª ed. Curitiba: Appris, 2021.