



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA DE QUÍMICA

MARIA LUIZA AGUIAR DA MOTA

Panorama atual dos processos de captura e armazenagem de CO₂

Rio de Janeiro, 2021

AGRADECIMENTOS

Gostaria de começar esta seção do trabalho agradecendo primeiramente ao meu avô Armando. Infelizmente ele não está mais neste plano, mas sou eternamente grata a ele por ter sempre acreditado em mim e por ter sido o melhor avô do mundo. Gostaria também de agradecer à minha mãe Juliana, por ter sempre feito tudo ao seu alcance para me proporcionar a educação que tenho hoje e por ter superado todos os sacrifícios que a vida lhe impôs durante a minha criação. Gostaria de agradecer à minha avó Aurora. Ela sempre foi e sempre vai ser o maior exemplo de força e superação que eu tenho, além de estar sempre presente me guiando durante os percalços da vida. Sem eles eu não seria a pessoa que me tornei e jamais teria chegado até aqui.

Agradeço ao meu pai Bruno e à minha avó Angela, por terem sempre torcido por mim durante toda a minha trajetória e por terem sempre estado presentes. Agradeço também aos meus tios, Priscilla e Celso, por terem me recebido e me acolhido em um momento tão difícil. Agradeço também à todo o restante da minha família. A família é e sempre vai ser o meu bem mais precioso.

Não poderia deixar de agradecer aos meus amigos. A vida não é doce sem a presença deles. Agradeço à minha amiga Isabella, por sempre estar do meu lado nos momentos mais difíceis e por ter se tornado uma verdadeira irmã para mim. Agradeço às minhas amigas Júlia e Juliana por terem me mostrado que as verdadeiras amizades são eternas e um dos maiores presentes da vida. Agradeço ao meu amigo Luca, por me fazer sorrir quando a vida não tem graça alguma e por sempre ter me dado todo o suporte possível. Também sou grata a todos os outros amigos que compartilharam os anos de faculdade comigo, dentre eles o Guilherme, o João Victor e o Breno. Todas essas pessoas me proporcionaram momentos incríveis e inesquecíveis.

Por fim, agradeço à Escola de Química e à Universidade Federal do Rio de Janeiro, em especial aos professores e aos funcionários. Tenho muito orgulho de ter estudado em uma Universidade pública que me fez crescer não somente como profissional, mas também como ser humano.

RESUMO

O efeito estufa e as mudanças climáticas têm sido tópicos de grande interesse e preocupação nas agendas internacionais. Os gases de efeito estufa (GEE) advindos de emissões antrópicas são os principais responsáveis pelo agravamento do sistema climático da Terra e, conseqüentemente, por provocar a elevação da temperatura média global. O CO₂ é o gás de efeito estufa que apresenta maior crescimento de emissão e, portanto, é de extrema importância a procura por formas de reduzir a concentração desse gás na atmosfera. Uma das formas disso ser feito é por meio da captura e armazenamento de carbono (CCS) que é uma estratégia fundamental de mitigação do CO₂ e seu gerenciamento. Existem três principais processos passíveis de serem utilizados e implementados em escala industrial: pós combustão, pré combustão e oxi-combustão. Cada um deles apresentam diferentes características e suas recomendações variam de acordo com a atuação industrial em análise. Além disso, é importante considerar que há diversas tecnologias disponíveis para realizar a separação do CO₂ e cada uma delas apresenta particularidades físico-químicas que devem ser levadas em conta de forma a obter a maior eficiência e o menor custo econômico. Em vista disso, esse trabalho tem como objetivo fazer um estudo técnico e qualitativo do processo de captura e armazenamento do CO₂ com foco para as principais tecnologias de separação. Dessa forma, foi feita uma análise do panorama global e brasileiro sobre as emissões de CO₂ de forma a mapear e entender a atual conjuntura e os principais pontos que precisam ser aprimorados. Além disso, foi realizada uma pesquisa qualitativa exploratória em bases de artigos científicos com a finalidade de encontrar trabalhos que abordam sobre o processo CCS e mostram oportunidades tecnológicas e seus desafios.

Sumário

Capítulo 1.....	6
1.1 Introdução	6
1.2 Objetivos.....	6
Capítulo 2.....	7
2.1 Gases de Efeito Estufa	7
2.2 Emissão do Dióxido de Carbono e o mercado global.....	9
2.3 Emissão de Dióxido de Carbono e o mercado brasileiro	12
2.4 Utilizações do Dióxido de Carbono	15
2.5 Captura e Armazenamento de CO ₂	18
2.6 Sistemas de Captura de CO ₂	19
2.7 Tecnologias de separação de gases	22
2.7.1 Separação por absorção.....	22
2.7.2 Separação por adsorção.....	24
2.7.3 Separação por destilação criogênica	24
2.7.4 Separação por membranas	25
2.7.5 Combustão química em circuito fechado.....	25
2.8 Transporte e Armazenamento de CO ₂	27
2.8.1 Transporte de CO ₂	27
2.8.2 Armazenamento de CO ₂	28
Capítulo 3.....	29
3.1. Metodologia	29
3.1.1. Análise Macro	30
3.1.2. Análise Meso	30
3.1.3. Análise Micro.....	31
Capítulo 4.....	31
4.1. Resultados e Discussões	31
4.1.1. Análise Macro.....	31
4.1.2. Análise Meso	34
4.1.3. Análise Micro.....	37
4.2. Conclusões	41
Capítulo 5.....	42
5.1. Referências.....	42

Lista de Figuras

Figura 1 - Emissões globais de GEE em 2010	9
Figura 2 - Emissão global de CO ₂ por setores, 1990-2019	10
Figura 3 - Emissões globais de CO ₂ da combustão de combustíveis por países (MtCO ₂) ...	12
Figura 4 - Matriz elétrica brasileira 2020	14
Figura 5 - Emissões antrópicas totais (2020) da matriz energética brasileira	15
Figura 6 - Visão geral das oportunidades de utilização de CO ₂	16
Figura 7 - Exemplo de processo de pós combustão utilizando carvão como matéria prima .	19
Figura 8 - Exemplo de processo de pré combustão com alimentação de carvão e sistema de gaseificação	20
Figura 9 - Processo de oxi combustão para o carvão	21
Figura 10 - Fluxograma de um processo utilizando a absorção química para recuperar o CO ₂	23
Figura 11 - Fluxograma do processo de combustão química em circuito fechado	26
Figura 12 - Opções geológicas de armazenamento	28
Figura 13 - Evolução de publicações na base <i>Science Direct</i> no período de 2015-2020	32
Figura 14 - Áreas dos artigos levantados na base <i>Science Direct</i>	32
Figura 15 - Evolução de publicações na base <i>Scopus</i> no período de 2015-2020	33
Figura 16 - Áreas dos artigos levantados na base <i>Scopus</i>	33
Figura 17 - Análise geográfica das publicações da base <i>Scopus</i>	34
Figura 18 - Distribuição dos tipos de processos pesquisados nos artigos levantados	35
Figura 19 - Setores industriais dos artigos encontrados	36
Figura 20 - Tecnologias abordadas nos artigos na análise Meso	37

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Perfil das maiores fontes estacionárias que emitem CO ₂	11
Tabela 2 - Repartição da Oferta Interna de Energia no Brasil 2020	13
Tabela 3 - Nível de avanço tecnológico para diferentes tipos de utilização do CO ₂	17
Tabela 4 - Vantagens e desvantagens das estratégias dos processos atuais de captura de CO ₂	22
Tabela 5 - Artigos mais citados usados na avaliação Micro	37

Capítulo 1

1.1 Introdução

O aquecimento global, causado por fontes antrópicas, possui influência direta na atmosfera, nos oceanos, criosfera e na biosfera. De acordo com o relatório de avaliação do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), o mundo provavelmente atingirá um aumento de 1,5°C na sua temperatura média nas próximas duas décadas. (IPCC, 2021).

Entre os gases causadores do efeito estufa destacam-se o dióxido de carbono (CO₂), usualmente associado a queima de combustíveis fósseis, o metano (CH₄), emitido em atividades industriais e na agropecuária, o óxido nitroso (N₂O), o hexafluoreto de enxofre (SF₆) e o hidrofluorcarboneto (HFC). Como forma de evitar um colapso global, o IPCC acredita que deverá ocorrer uma redução de 50-80% das emissões desses gases até 2050 (Pachauri et al., 2014; Al-Maamary et al., 2017; Ouda et al., 2016).

A Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas de 2015 recomendou algumas estratégias importantes e necessárias como forma de limitar as concentrações de CO₂ e controlar o aumento da temperatura média da Terra. Dentre elas, encontram-se a adoção de energias renováveis e combustíveis de baixo carbono, emprego de técnicas da geoengenharia, utilização da conservação e eficiência energética e, principalmente, desenvolvimento e adoção de técnicas de captura e armazenamento de CO₂ (CCS) (Leung et al., 2014; Kumar et al., 2017).

Sendo assim, o presente trabalho faz um levantamento detalhado dos processos de captura e armazenamento de CO₂, através de um amplo levantamento bibliográfico, permitindo assim identificar o cenário atual dessa tecnologia e suas perspectivas futuras.

1.2 Objetivos

Tendo em vista os efeitos gerados pelo aumento das emissões do CO₂ na atmosfera por fontes antrópicas, o presente trabalho tem como objetivo mapear e entender as principais tecnologias de captura e armazenamento de CO₂ (CCS) descritas na literatura.

Do mesmo modo, o trabalho estuda o cenário das emissões do CO₂ em um panorama brasileiro e global, de forma a entender a situação e gravidade atual, além de fazer uma análise de técnicas de utilização do CO₂ como alternativas ao armazenamento geológico.

Capítulo 2

2.1. Gases de Efeito Estufa

As fontes de emissão antropogênica afetam a composição atmosférica tanto de forma direta, via emissões de gases e partículas, como indireta, por meio de produtos químicos. Como consequência, ocorrem variações nas concentrações dos gases de efeito estufa afetando todo o sistema climático da Terra (IPCC, 2013).

O Sol é responsável pela emissão de radiação solar que se propaga pelo espaço por meio de ondas eletromagnéticas. Como o Sol é a fonte principal de energia terrestre, de forma a não ter um aumento constante da temperatura, a Terra deve reemitir parte desta energia de volta para o espaço (Junges et al., 2018).

Da radiação solar incidente de ondas curtas, com comprimentos de onda próximos da luz visível, cerca de metade é absorvida pela superfície terrestre. Dessa energia, 30% é refletida de volta para o espaço por gases, aerossóis, nuvens e pela superfície da Terra e cerca de 20% é absorvida na atmosfera. Com base na temperatura da superfície terrestre, grande parte do fluxo de energia que sai da Terra está na forma de radiação de onda longa, também conhecida como radiação infravermelha (IPCC, 2013).

Alguns gases presentes na atmosfera possuem a propriedade de ser ativos radioativamente na faixa de comprimentos de ondas longas, enquanto que são inertes à radiação de comprimentos de ondas curtas, absorvendo pouca ou quase nenhuma radiação visível. Esses gases são os chamados Gases de Efeito Estufa (GEE), sendo o dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), CFCs e ozônio (O_3) os principais (Junges et al., 2018).

Sendo assim, devido a propriedade desses gases, temos que a radiação visível vinda do Sol atinge a superfície terrestre com facilidade, mas a radiação infravermelha, de maior comprimento de onda, remetida pela Terra, não atravessa completamente a atmosfera, o que provoca aquecimento das camadas inferiores e da superfície terrestre (Junges et al, 2018; IPCC, 2013).

Este fenômeno denominado Efeito Estufa é de suma importância para a manutenção da vida na Terra, uma vez que impede a perda de calor e mantém o planeta aquecido. Entretanto,

as fontes antrópicas têm gerado um aumento das concentrações desses gases, ocasionando em uma elevação da temperatura média global (ABNT).

O aumento dos gases de efeito estufa antropogênicos ocorre desde a era pré-industrial, sendo o crescimento econômico e populacional os principais precursores. Seus efeitos abrangem todo o sistema climático e é extremamente provável que eles tenham sido os responsáveis pelo aquecimento crescente observado desde meados do século XX (IPCC, 2014).

Uma métrica comumente usada para se medir o aquecimento global é o Potencial de Aquecimento Global (GWP), que pode ser definida como o calor acumulado dentro de um intervalo de tempo, causado pela emissão de um quilograma de gás, utilizando o CO₂ como gás de referência (IPCC, 2014).

O GWP do CO₂ tem, por definição, o valor unitário independente do período de tempo contabilizado, e sua vida útil é de difícil representação, visto que ele não é destruído ao longo do tempo, mas se move pelo ar, oceanos e sistemas terrestres. De forma geral, a combustão de combustíveis fósseis e processos industriais possuem as maiores parcelas de emissão, contribuindo com 78% de todas as emissões de gases de efeito estufa entre 1970 - 2010 (IPCC, 2014).

O metano (CH₄) tem um valor de GWP estimado em 28 ao longo de 100 anos (IPCC, 2014). Embora a duração do metano emitido hoje (cerca de uma década), seja menor do que a do dióxido de carbono, o CH₄ absorve muito mais energia do que o CO₂, tornando o valor do seu GWP maior. No âmbito global, cerca de 50-65% das emissões totais de CH₄ são provenientes de fontes antrópicas, sendo os setores de agricultura, indústria energética (com destaque para as indústrias de gás natural e petróleo) e decomposição de resíduos nos aterros sanitários os principais emissores (IPCC 2014).

O valor de GWP do óxido nitroso (N₂O) é de aproximadamente 265 ao longo de 100 anos, ou seja, quase trezentas vezes maior que o GWP do dióxido de carbono (IPCC, 2014). O tempo de permanência do N₂O na atmosfera é de cerca de 100 anos e em torno de 40% de suas emissões são oriundas de atividades humanas, com enfoque para o setor de agricultura (que abrange 75% das emissões), queima de combustíveis fósseis, processos industriais e tratamento de águas residuais (IPCC 2014).

Por fim, os gases fluorados que, ao contrário dos outros GEE, vem apenas de fontes antrópicas, possuem GWP com valores na casa dos milhares ou dezenas de milhares. Assim, pequenas presenças desses gases na atmosfera já podem causar efeitos imensos nas temperaturas globais, visto que uma diminuta quantidade desses gases consegue acumular valores exacerbados de calor. Além disso, a permanência dos gases fluorados na atmosfera

pode ser de milhares de anos e alguns deles conseguem ser removidos somente quando destruídos pela luz solar nas camadas atmosféricas de maiores latitudes (IPCC 2014).

O dióxido de carbono (CO_2) é o gás de efeito estufa que apresenta maior crescimento de emissão, atingindo médias anuais de 410 partes por milhão (ppm), seguindo pelo metano (CH_4) com 1866 partes por bilhão (ppb) e óxido nitroso (N_2O) com 332 ppb em 2019 (IPCC, 2021).

Ao fazer uma análise comparativa entre as emissões de todos os gases de efeito estufa de fontes com origem antropogênicas em gigatonelada de CO_2 -equivalente ($\text{GtCO}_2\text{-eq}$), percebe-se que o CO_2 representa cerca de 76% das emissões totais em 2010, sendo 65% provenientes de combustíveis fósseis e processos industriais e 11% provenientes de desmatamentos florestais e outros usos de terra, conforme mostra a Figura 1. (IPCC, 2014).

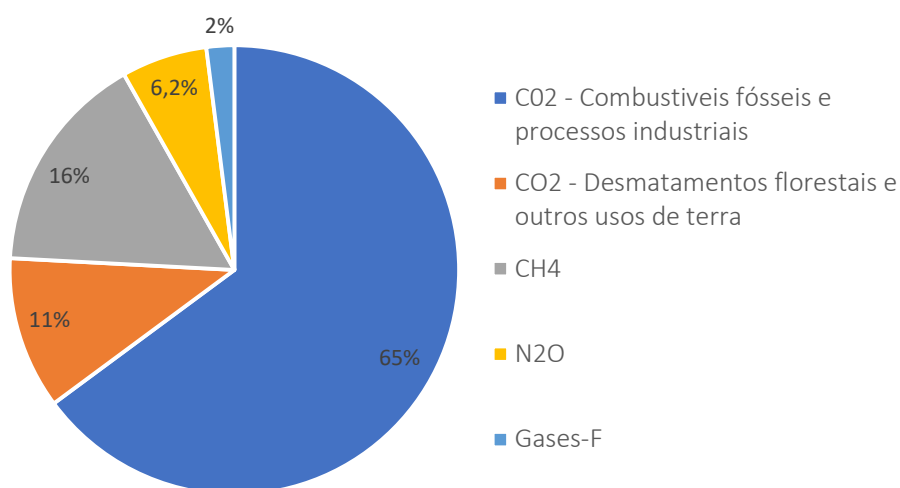


Figura 1. Emissões globais de GEE em 2010.

Fonte: IPCC, 2014

2.2. Emissão do Dióxido de Carbono e o mercado global

O crescimento econômico e populacional são os principais responsáveis pelo aumento das emissões de CO_2 provenientes da combustão de combustíveis fósseis em escala global e, portanto, faz-se necessário entender as principais indústrias e setores responsáveis (IPCC, 2014 – Working Group III).

Como pode ser observado na Figura 2, o setor de eletricidade e geração de calor juntamente com o setor de processos industriais são responsáveis por 60% das emissões, enquanto que o setor de transporte com o de residências contabilizam 31%. No entanto, deve-se notar que as emissões dos dois últimos setores dificultam o processo de captura, transporte e armazenamento, uma vez que as emissões são móveis, pequenas e de baixos volumes, tornando o processo de CCS custoso e inviável (IPCC, 2005).

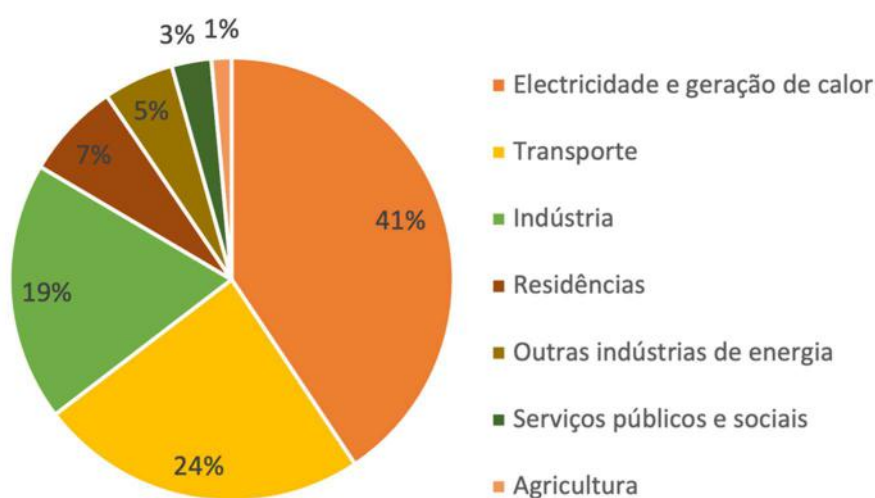


Figura 2. Emissão global de CO₂ por setores, 1990-2019

Fonte: IEA – *International Energy Agency*

As fontes estacionárias estão presentes principalmente nas atividades de queima de combustíveis, processos industriais e processamento de gás natural, sendo as maiores emissões de CO₂ obtidas a partir da queima dos combustíveis fósseis devido a oxidação do carbono (Tabela 1). Dentre os processos industriais que emitem altas quantidades de CO₂ encontram-se a produção de cimento ou cal, o uso de combustíveis como matéria-prima em processos petroquímicos, a produção comercial de metais e a fermentação da biomassa (IPCC, 2005).

Globalmente, a indústria de produção de cimento é uma das maiores emissoras de CO₂, tendo apresentado um aumento de 1,8% de emissão entre os anos de 2015 a 2020. A China é o maior produtor de cimento, responsável por cerca de 55% da produção global, seguida pela Índia com 8% (IEA, 2021 – *Cement Analysis*).

Tabela 1. Perfil das maiores fontes estacionárias que emitem CO₂

Processo	Número de fontes	Emissões (MtCO₂/ano)
Combustíveis fósseis		
Energia	4942	10539
Produção de cimento	1175	932
Refinarias	638	798
Indústria de ferro e aço	269	646
Indústria petroquímica	470	379
Processamento de óleo e gás	N/A	50
Outras fontes	90	33
Biomassa		
Bioetanol e bioenergia	303	91
Total	7887	13466

Fonte: IPCC, 2005

Ao ser feita uma análise comparativa entre os países, conforme mostra a Figura 3, é possível notar que a China vem apresentando um crescimento progressivo de emissões, com uma taxa de crescimento anual de 1,7% em 2019. Os Estados Unidos, por sua vez, obtiveram uma queda de 3,3% no mesmo ano, assim como a União Europeia que continua obtendo uma tendência decrescente de emissões de 4,9%. Outros países que também apresentaram queda das emissões no ano de 2019 foram o Brasil (-6,2%), Rússia (-5,2%) e Japão (-3,0%).

No cenário atual, houve uma queda de 5,8% em 2020 das emissões de CO₂, o maior declínio da história, contabilizando quase 2000 milhões de toneladas. Essa queda se deve ao impacto da pandemia na demanda por petróleo e carvão, com queda de 8,6% e 4% respectivamente, enquanto que as fontes renováveis atingiram sua maior participação anual na matriz energética. O declínio do petróleo no ano de 2020 respondeu por mais da metade da queda nas emissões globais e se deu principalmente pela queda das atividades do transporte rodoviário e do setor de aviação (IEA, 2021 – Global Energy Review).

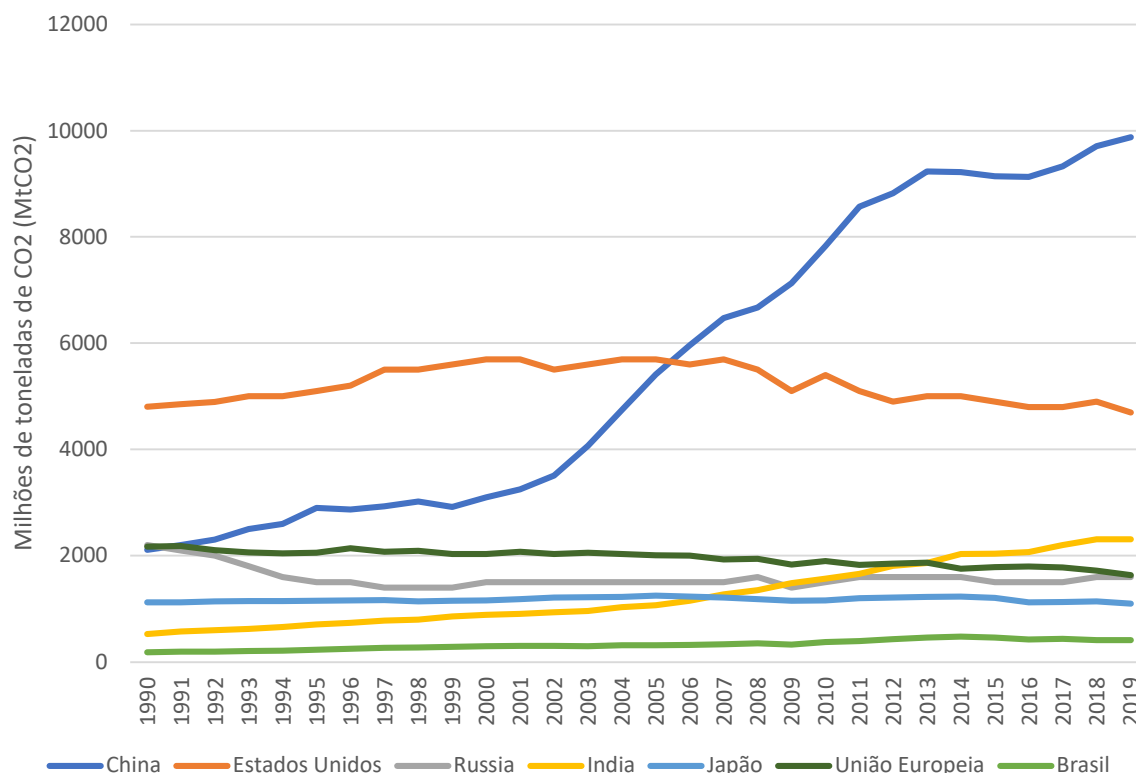


Figura 3. Emissões globais de CO2 da combustão de combustíveis por países (MtCO2)

Fonte: IEA – International Energy Agency

2.3. Emissão de Dióxido de Carbono e o mercado brasileiro

A matriz energética brasileira apresenta grande diversificação e alta participação de energias renováveis (BEN, 2021). A energia fornecida pelas diferentes fontes não possui aproveitamento completo devido às perdas nos processos de conversão, distribuição e armazenamento até chegar ao consumidor. A Oferta Interna de Energia (OIE) é a soma dessas perdas e o real consumo em variados setores econômicos (Silva, 2014).

Quando comparada com 2019, a OIE brasileira apresentou aumento de 2,5% das fontes renováveis enquanto que as não renováveis caíram em 6,2%, como pode ser visto na tabela 2. Este cenário se deve principalmente ao aumento da oferta da biomassa da cana e do biodiesel juntamente com o recuo de petróleo e derivados.

Tabela 2. Repartição da Oferta Interna de Energia no Brasil 2020

Fonte (Mtep)	2019	2020	Δ 20/19
RENOVÁVEIS	135,6	139,1	2,5%
Biomassa da cana	52,8	54,9	4,0%
Energia hidráulica	36,4	36,2	-0,4%
Lenha e carvão vegetal	25,7	25,7	-0,1%
Lixívia	8,9	9,6	7,0%
Biodiesel	4,9	5,3	8,6%
Eólica	4,8	4,9	1,9%
Outras renováveis	2,1	2,5	18,7%
NÃO RENOVÁVEIS	158,3	148,5	-6,2%
Petróleo e derivados	100,9	95,2	-5,6%
Gás natural	35,9	33,8	-5,8%
Carvão mineral	15,4	14	-9,1%
Urânio (U3O8)	4,3	3,7	-13,2%
Outras não renováveis	1,8	1,7	-4,9%

Fonte: Ministério de Minas e Energia, 2021

A matriz elétrica brasileira possui uma parcela de fontes renováveis ainda maior do que a energética, uma vez que as usinas hidrelétricas geraram 65,2% da energia elétrica no Brasil em 2020, conforme pode ser observado na Figura 4 (BEN, 2021).

Quando comparada com a matriz elétrica global, o Brasil apresentou 83% da sua geração proveniente de fontes renováveis em 2019, enquanto que no mundo as fontes renováveis contabilizaram apenas 27%. Tal cenário é extremamente positivo para o Brasil, pois além das fontes renováveis possuírem menores custos de operação, a emissão de gases de efeito estufa pelas usinas renováveis é consideravelmente reduzida (BEN, 2021).

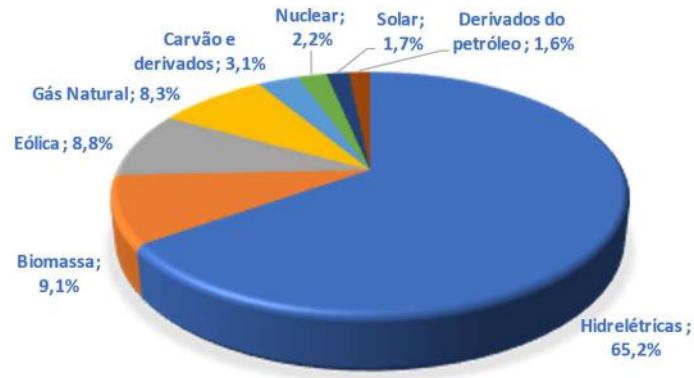


Figura 4. Matriz elétrica brasileira 2020

Fonte: Ministério de Minas e Energia, 2021

No que diz respeito às emissões de CO₂ no Brasil, em 2020 foram emitidos 398,3 milhões de toneladas de CO₂ equivalente (redução de 4,9% comparado com 2019) por fontes antrópicas associadas à matriz energética, na qual a indústria de transportes foi a maior emissora (Figura 5). É importante destacar também que, dentre os outros setores que emitiram 128,5 MtCO₂-eq, encontra-se o setor da agropecuária que possui forte influência nas emissões de CO₂ no país (MME, 2021). Na região Sul do Brasil, 75,6% dos municípios apresentam a agropecuária como o setor com maiores taxas de emissão de GEE. Além disso, a conversão de florestas para o uso agropecuário é responsável pelos altos níveis de emissão de gases de efeito estufa na região Norte, que é a região que mais emite quando comparado com o resto do país (ICLEI, 2021).

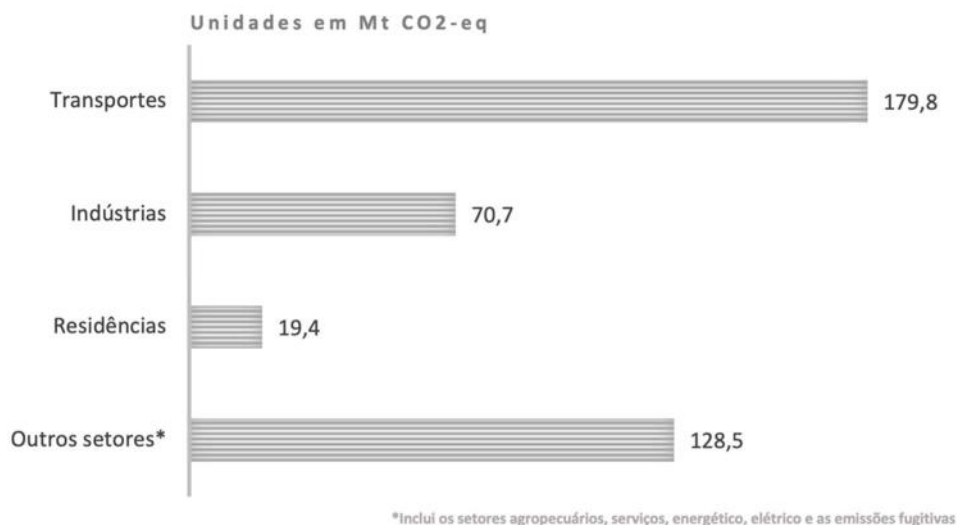


Figura 5. Emissões antrópicas totais (2020) da matriz energética brasileira

Em comparação com outros países, para a produção de 1MWh de energia elétrica, o Brasil emite 1/3 do valor emitido pela União Europeia, 1/4 do valor emitido pelos Estados Unidos e 1/7 do que é emitido pelo setor elétrico da China (MME, 2021).

Durante a 26 Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas (COP26), o Governo Federal do Brasil anunciou a meta de reduzir das emissões de carbono em 50% até 2030 (GOV, 2021).

A legislação brasileira vigente sobre mudanças climáticas é a Lei 12.187/2009 que institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC) e define os conceitos de adaptação e mitigação. Adaptação envolve a diminuição da vulnerabilidade dos sistemas considerando os possíveis cenários para alterações climáticas. Mitigação, por sua vez, está relacionada com a diminuição dos gases de efeito estufa por meio de mudanças, substituições tecnológicas e sistemas de sequestros de GEE. O art. 12 desta lei instituiu o compromisso de reduzir as emissões dos gases de efeito estufa de 36,1% a 38,9% até 2020.

2.4. Utilizações do Dióxido de Carbono

Atualmente existem algumas técnicas de utilização do CO₂, além de seu armazenamento geológico convencional, como tentativas de fechar seu ciclo antropogênico. O Dióxido de Carbono possui várias utilizações diretas como, por exemplo, nos refrigerantes, em extintores de incêndio e em agentes espumantes. Além disso, alguns processos permitem o armazenamento do CO₂ e ajudam no alcance da diminuição de sua concentração atmosférica como o uso do gás para a recuperação de óleo em reservas e em processos de carbonatação mineral (Valluri et al., 2022).

Além de utilizações diretas, também é possível realizar a conversão do CO₂ em algum produto de interesse. Assim, forma-se um ciclo antropogênico do carbono, no qual há a conversão do gás em algum produto químico que, em algum momento, poderá se transformar novamente em CO₂. Como parte do ciclo, este CO₂ será capturado novamente e retransformado em um novo produto. Este tipo de aplicação do CO₂ é chamado de utilização indireta (Valluri et al., 2022).

Na figura abaixo é possível observar os diferentes meios de utilização de CO₂ de forma a alcançar a meta de emissões líquidas negativas.

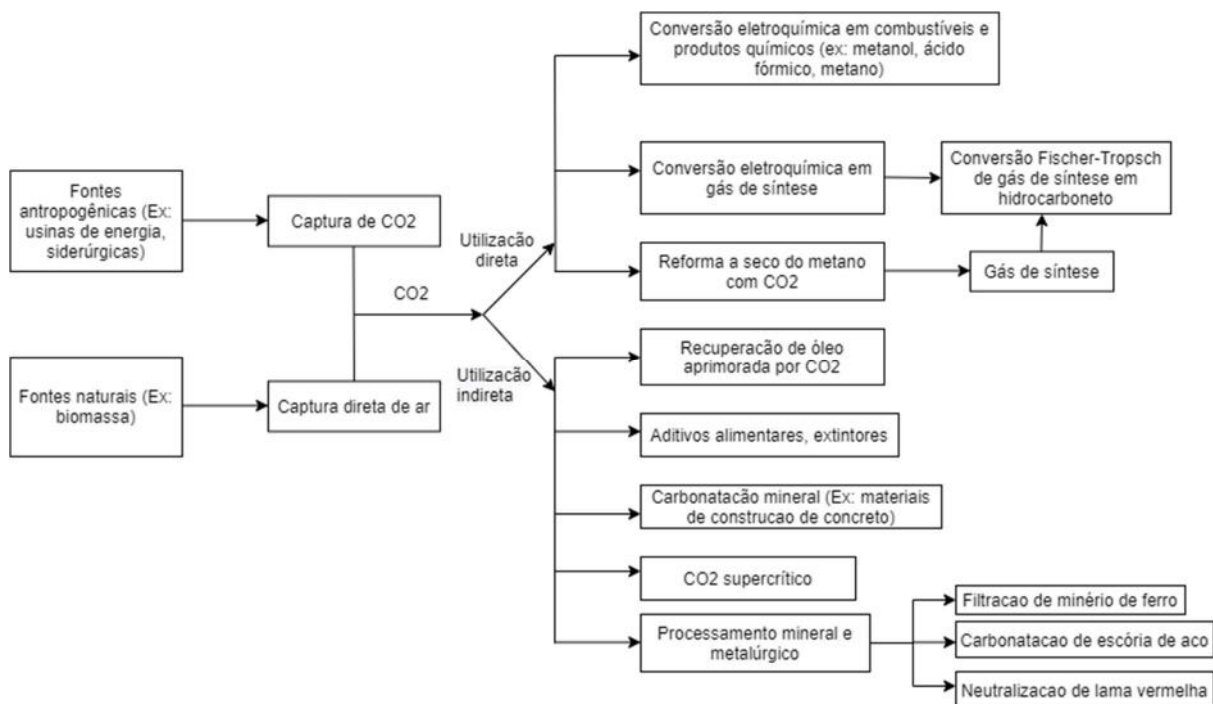


Figura 6. Visão geral das oportunidades de utilização de CO2

Ao fazer uma análise comparativa entre as diferentes oportunidades de utilização do carbono é possível perceber que nem todas estão no mesmo nível de desenvolvimento tecnológico e também não possuem a mesma capacidade de absorção de CO₂ considerando um determinado tempo de análise, como pode ser visto na tabela 3 (Valluri et al., 2022).

Tabela 3. Nível de avanço tecnológico para diferentes tipos de utilização do CO₂.

Tipo de processo	Aplicações	Impacto	Capacidade de absorção do CO ₂ (Gton CO ₂ /ano)	Nível de prontidão tecnológica*
Combustíveis e químicos	Combustíveis (metanol, etanol, gás de síntese, metano); Químicos (ácido fórmico, ácido oxálico); Produção de ureia.	Alto	-	5 - 6
Indústria alimentícia	Gelo seco; Carbonatação de bebidas; Bicarbonato de sódio; Conservante de alimentos.	Médio	-	10
Indústria química e de processamento de materiais	Fabricação de ferro e aço; Carbonatação da escória de aço.	Médio	0.2 - 0.3	6 - 8
Óleo e gás	Recuperação aprimorada de óleo.	Muito alto	0.1 - 1	10
Carbonatação mineral	Materiais de construção de concreto; Neutralização de lama vermelha (resíduo de bauxita).	Médio	3 - 4	7 - 8
Setor de energia	Fluido motor no ciclo de potência	Médio	-	3 - 4
Outros	Solvente (CO ₂ supercrítico); Refrigerante.	Baixo	-	6

* Atribuído um índice de 1 a 10, onde 1 significa que a tecnologia ainda está fundamentalmente no estágio de ideia, 5 significa que já houve um trabalho significativo em laboratório e está pronta para implementação em escala piloto e 10 significa que a tecnologia já alcançou ampla adoção comercial.

Fonte: Valluri et al., 2022

A conversão do dióxido de carbono em produtos químicos e combustíveis, por exemplo, já está pronta para implementação em escala piloto e possui alto impacto na redução do carbono atmosférico. É imprescindível, porém, que todo o CO₂ utilizado neste processo seja capturado da atmosfera ou de fontes emissoras de modo a fechar o ciclo antrópico do carbono (Valluri et al., 2022)..

A conversão em combustíveis se dá pelo armazenamento do CO₂ de forma que ele fique disponível até o momento em que a energia seja necessária. O combustível gerado é neutro em carbono, visto que o CO₂ utilizado foi capturado de fontes emissoras ou da atmosfera e, a partir que o CO₂ desse combustível retornar para a atmosfera, ele será capturado novamente fechando o ciclo. Em relação aos produtos químicos, existem diversos que podem ser produzidos a partir do CO₂, tais como o metanol, ácido fórmico, etileno e propanol. O processo é realizado por redução e pode ser feito por meios termoquímicos ou eletroquímicos (Valluri et al., 2022).

No caso da carbonatação mineral, que apresenta grande potencial de aplicação em um curto horizonte de tempo, o CO₂ capturado reage com materiais contendo óxidos e formam-se carbonatos. Essa tecnologia é especialmente interessante por conta do seu uso em materiais de

construção, além de possuir alta capacidade de absorção do CO₂ (3-4 Gton CO₂/ano) (IPCC, 2005; Valluri et al., 2022).

Entretanto, apesar dessas tecnologias serem atrativas economicamente, poucas apresentam verdadeiro potencial de chegar em concentrações negativas de carbono, de forma que mesmo que haja a aplicação de todas essas tecnologias, ainda será necessário realizar o armazenamento geológico do CO₂ (Valluri et al., 2022).

2.5. Captura e Armazenamento de CO₂

A liberação excessiva de CO₂ para a atmosfera está atuando de forma crítica no aquecimento global e no ciclo de vida da Terra. Assim, a captura e o armazenamento de carbono (CCS) tem sido alvo de grande interesse como uma estratégia potencialmente importante de mitigação das mudanças climáticas (IPCC, 2007; Al-Maamary et al., 2017).

Como já visto, a emissão de CO₂ é proveniente de diferentes fontes. As grandes unidades de combustão responsáveis pela queima de combustíveis fósseis, como usinas de geração de energia, são os principais sítios emissores. Além destes, fontes menores e mais distribuídas, como motores de combustão interna usados nos transportes, também possuem parcela de emissão, assim como processos industriais e extração de recursos. A tecnologia de CCS é direcionada para atuar nas grandes fontes pontuais de CO₂, como os grandes processos industriais e as usinas de energia, de tal forma que alguma delas poderiam gerar combustíveis livres de carbono e abastecer sítios de menores demandas (IPCC, 2005).

A tecnologia de captura e armazenamento de carbono consiste em um processo integrado de captura e separação de CO₂. A etapa de captura ocorre em fontes estacionárias como usinas elétricas e indústrias. Posteriormente, o CO₂ capturado é transportado para locais adequados de armazenamento e injetado nos poros das rochas subterrâneas sem estar, portanto, em contato com a atmosfera (Brazilian Atlas of CO₂). Dessa forma, o CCS possibilita o uso de combustíveis fósseis sem que haja emissão de CO₂, ou que ocorra uma emissão mínima (IPCC, 2005).

De forma abrangente, pode-se dividir o CCS em quatro etapas: captura e separação do CO₂ de outros gases no local de emissão, atingindo uma pureza maior do que 90%; transporte do CO₂ por gasodutos ou caminhões até o local de armazenamento temporário; depósito do CO₂ em diferentes formações geológicas e, por fim, medição, monitoramento e verificação de CO₂ durante e depois da fase de injeção em uma formação geológica (Brazilian Atlas of CO₂).

2.6. Sistemas de Captura de CO₂

De forma a ser economicamente viável, é importante que o processo de captura produza uma corrente altamente concentrada em CO₂ e altas pressões. Caso contrário, apesar de ser teoricamente possível, o alto custo energético torna o transporte e a injeção de CO₂ a baixas concentrações impraticável (IPCC, 2005).

Existem atualmente três principais sistemas de captura de CO₂ e a escolha por um deles se dá pelo tipo de processo realizado e da indústria de energia em questão (IPCC, 2005). As tecnologias são chamadas de pós combustão, pré combustão e oxi combustão.

A tecnologia de **pós combustão** pode ser classificado como aquela em que a captura de CO₂ ocorre após o combustível fóssil (carvão, óleo ou gás natural) ter sido queimado (IPCC, 2005). Devido ao gás de combustão estar em pressão atmosférica e a fração de CO₂ presente na corrente ser relativamente pequena, ficando entre a faixa de 3% a 15%, normalmente utilizam-se solventes líquidos para realizar a captura (Anwar, 2018 e Rubin, 2008). Os solventes mais comuns empregados são as aminas, como por exemplo, monoetanolamina, dietanolamina e metil-dietanolamina, podendo também utilizar sistemas de absorção física com metanol a frio e outros (Olajire, 2010).

O processo de pós combustão pode ser visualizado na figura 7. O gás de combustão passa primeiro por um absorvedor no qual ocorre a reação química entre o solvente líquido e o CO₂, capturando cerca de 85-90% do gás de interesse. O solvente carregado segue então para torre regeneradora, onde aumenta-se a temperatura (100 – 200°C), possibilitando a quebra da ligação formada anteriormente (Rubin, 2008 e Anwar, 2018).

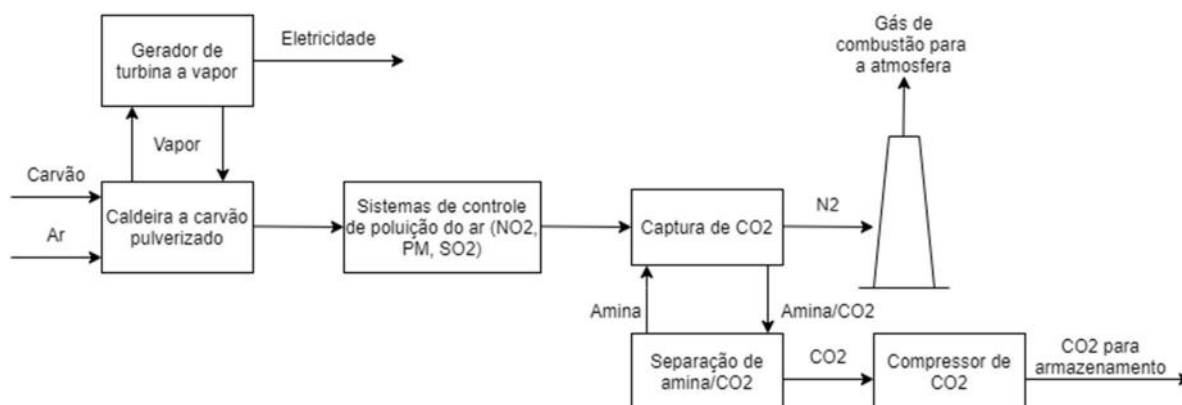


Figura 7. Exemplo de processo de pós combustão utilizando carvão como matéria prima

A tecnologia de **pré combustão** é um processo no qual o combustível fóssil reage com vapor e oxigênio a altas temperaturas e pressões, em um sistema chamado de reforma, quando utiliza hidrocarbonetos leves, ou gaseificação quando se utiliza carvão como matéria prima. O produto da reação é o gás de síntese, formado principalmente por monóxido de carbono e hidrogênio. Normalmente há presença de impurezas na corrente de gás de partida, como o sulfeto de hidrogênio, H_2S , sendo necessário a remoção desse usando tecnologia convencional de limpeza de gás (IPCC, 2005 e Rubin, 2008). Na gaseificação a eliminação de H_2S acontece após a geração de gás de síntese, já quando se faz reforma de gás leve, a remoção de H_2S ocorre antes da etapa inicial, visto que o sistema de reforma é catalisado, sendo esse catalisador possível de perda, caso em contato com H_2S .

Como pode ser visto na figura 6, em um segundo reator, denominado reator de *shift*, é feita a reação de CO com vapor, produzindo hidrogênio adicional e CO_2 . Em seguida, há a separação da mistura H_2 - CO_2 e o CO_2 pode ser comprimido para transporte, enquanto que o hidrogênio é um portador de energia que pode ser queimado e gerar energia/calor livre de carbono, ou ainda ser utilizado para produção de amônia, ou mesmo utilizado como insumo em processos de hidrocraqueamento, hidrodessulfurização e outros (IPCC, 2005 e Rubin, 2008).

As maiores concentrações de CO_2 permitidas pelo *shift* (entre 15 a 60% em volume em base seca), assim como as pressões mais elevadas nos gaseificadores e reformadores, fazem com que os processos de pré combustão sejam mais favoráveis para a separação de CO_2 do que os de pós combustão. Pode-se fazer uso de processos comerciais para absorver o CO_2 , como o Selexol, Rectisol, ou ainda processos de absorção química com soluções de aminas, e posteriormente, realizar rápida queda de pressão para obter a regeneração do solvente e separar o CO_2 (IPCC, 2005 e Rubin, 2008).

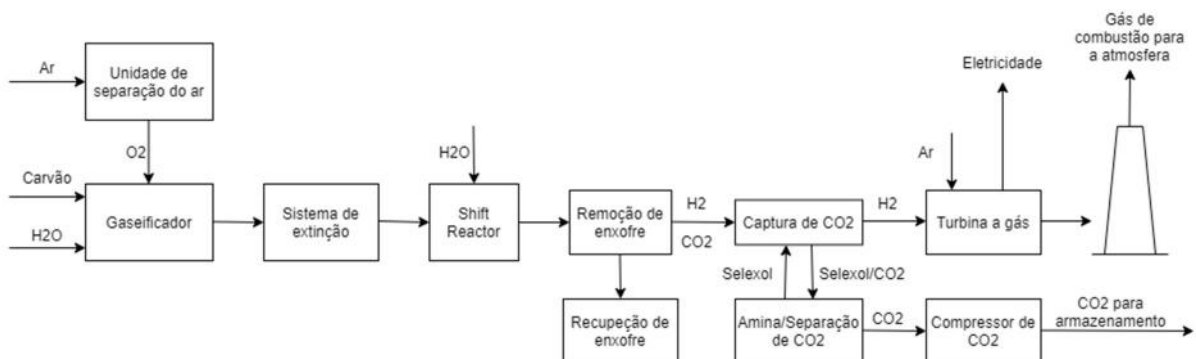


Figura 8. Exemplo de processo de pré combustão com alimentação de carvão e sistema de gaseificação.

A oxidação (Figura 7) é um processo no qual é utilizado oxigênio ao invés de ar para realizar a combustão. Assim, o gás produzido é constituído somente de CO₂ e vapor d'água, que pode ser removido por resfriamento e compressão, deixando uma corrente de CO₂ praticamente pura (IPCC, 2005 e Rubin, 2008).

Apesar de não precisar de um dispositivo de captura de pós combustão, este processo requer tratamento do gás de combustão para remover impurezas e poluente. Esta etapa é necessária para atender normas ambientais e requisitos de pureza de CO₂ antes dele ser mandado para armazenamento. Além disso, como o processo de oxidação utiliza oxigênio puro, este tem que passar por uma etapa anterior de purificação e chegar a níveis de pureza de aproximadamente 95-99%. Este sistema de purificação é feito por processo de retificação criogênica do ar (IPCC, 2005 e Rubin, 2008).

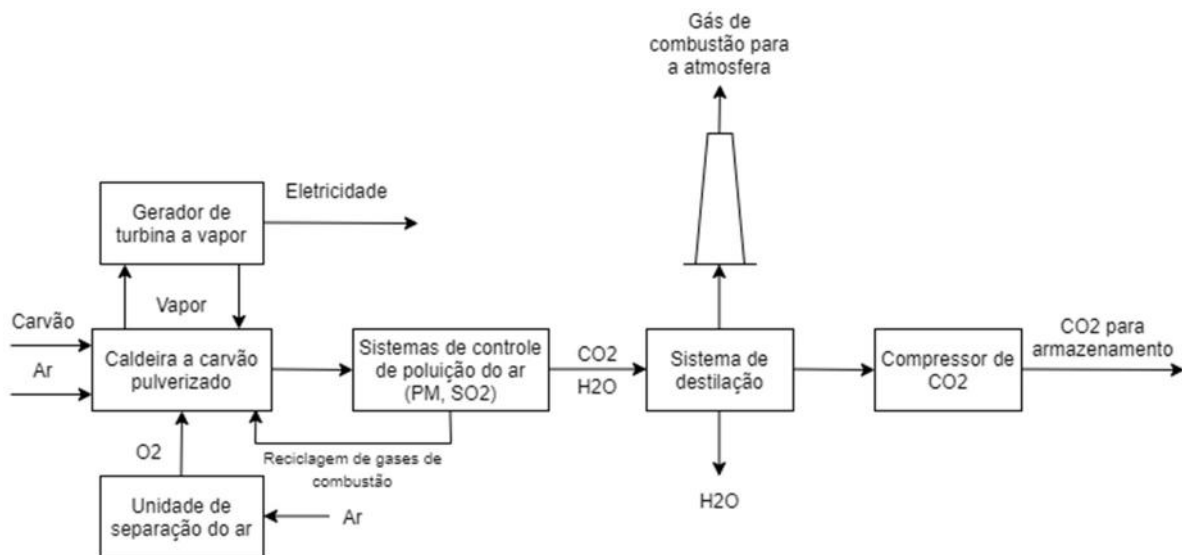


Figura 9. Processo de oxidação para o carvão.

Ao fazer uma análise comparativa entre os diferentes sistemas, pode-se dizer que a de pós combustão possui a maior parcela de processos de captura de CO₂ existentes nas usinas de energia, processando cerca de 0,1 MtCO₂yr⁻¹. Além disso, já existe um mercado maduro que utiliza uma tecnologia muito similar a de pós combustão na indústria de processamento de gás natural (IPCC, 2005).

A tecnologia de pré combustão apresenta a desvantagem de necessitar de um processo inicial de purificação do oxigênio, aumentando o nível de complexidade e custo, mas a alta pressão nos gaseificadores assim como as altas concentrações permitidas pelo *shift*, faz com que a separação do CO₂ torna-se mais simples e fácil (IPCC, 2005).

Ambos os sistemas permitem uma captura de aproximadamente 85-90% do CO₂ produzido, porém o custo da planta, por ter que realizar a captura e compressão, aumenta em cerca de 10-40%. Além disso, apesar de ser possível, aumentar os níveis de captura significaria em maiores compartimentos de separação, fazendo com que o custo do processo e a demanda energética apresentassem valores ainda maiores (IPCC, 2005).

Por fim, a oxi combustão, apesar de conseguir capturar praticamente todo o CO₂, é a tecnologia menos madura. Além disso, a necessidade de um sistema de destilação e de tratamento de gás, faz com que a eficiência de captura caia para valores de aproximadamente 90% (IPCC, 2005).

Na tabela 4 abaixo é possível observar uma comparação entre as maiores vantagens e desvantagens dos três processos de captura de CO₂.

Tabela 4. Vantagens e desvantagens das estratégias dos processos atuais de captura de CO₂.

Estratégias de captura de CO ₂	Vantagens	Desvantagens
Pré combustão	- Alta concentração e pressão de CO ₂ - Escala comercial aplicada a alguns setores industriais	- Condições de operação severas - Penalidade de energia devido à regeneração do solvente
Oxi combustão	- Custo de capital mais baixo - Alta concentração de CO ₂ - Baixo investimento de caldeira e outros equipamentos	- Penalidade de energia e queda de eficiência
Pós combustão	- Uma abordagem simples para ser adaptada - Mais madura do que outras estratégias	- Concentração diluída de CO ₂ próxima a pressão atmosférica - Penalidade de energia devido à regeneração de solvente

Fonte: Song et al., 2019

2.7. Tecnologias de separação de gases

2.7.1. Separação por absorção

Neste tipo de processo, mistura de gases contendo CO₂ passam por um solvente líquido que seja capaz de interagir de forma seletiva com o CO₂ sob condições de altas pressões e baixas temperaturas. Posteriormente, a mistura gerada é introduzida em um regenerador que se encontra a baixas pressões e altas temperaturas, de forma a regenerar o solvente que é, então, recirculado para o tanque de absorção para capturar mais CO₂ (Anwar et al, 2018 e IPCC, 2005).

Um sistema de absorção comercial pode ser analisado no fluxograma abaixo (Figura 8).

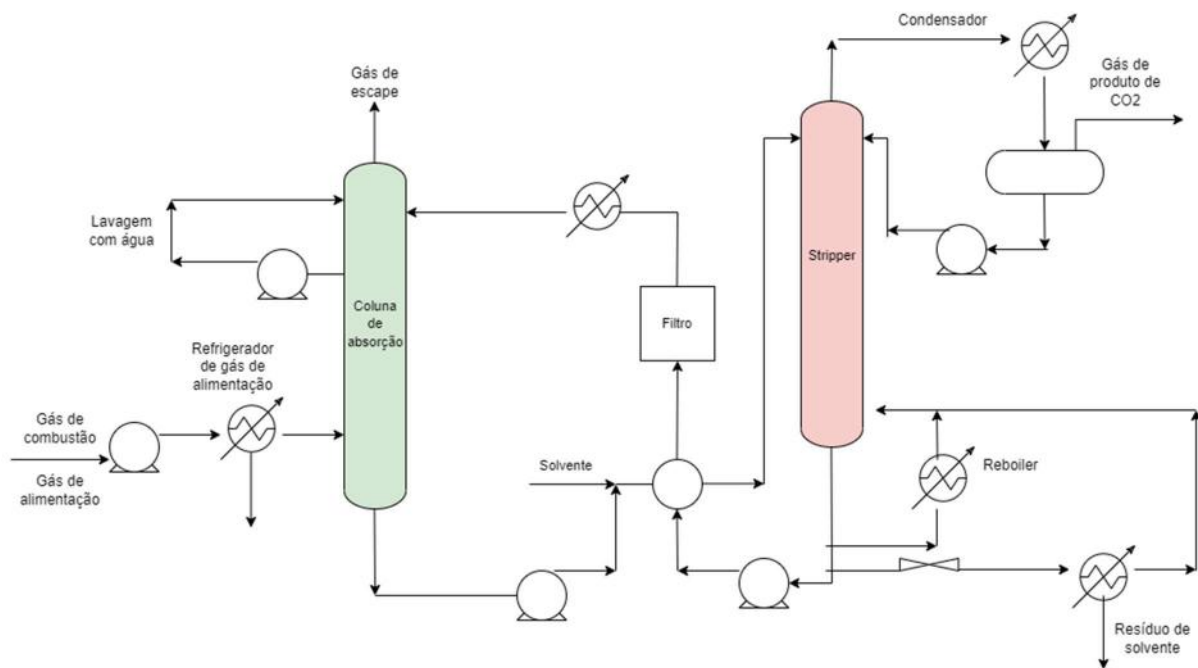


Figura 10. Fluxograma de um processo utilizado a absorção química para recuperar o CO₂.

Fonte: IPCC, 2005

O gás de combustão precisa primeiro ser resfriado antes de entrar na torre absorvedora, que opera em uma faixa de temperatura entre 40 e 60°C. O gás que deixa a torre passa por uma seção de lavagem de modo a remover qualquer gotícula ou vapor de solvente transportado. Antes de ser enviado para a torre regeneradora (*stripper*), o solvente rico em CO₂ passa por um trocador calor de modo a aumentar sua temperatura. A regeneração do solvente químico se dá no *stripper* em altas temperaturas (100 a 140°C) e baixas pressões (próximas da atmosférica). O calor é fornecido pelo revedor para que seja possível remover o CO₂ que está quimicamente ligado ao solvente. O solvente pobre que deixa a parte inferior do *stripper* é bombeado de volta para o absorvedor através do trocador de calor para reduzir sua temperatura. Na saída do *stripper* há um condensador utilizado para recuperar o vapor e a corrente rica em CO₂ deixa o processo (IPCC, 2005).

Dentre os solventes que podem ser utilizados, encontram-se as monoetanolamina (MEA), dietanolamina (DEA), carbonato de potássio, metanol a frio entre outros. O MEA é o solvente que apresenta maior eficiência, chegando a valores de 90% (Leung et al., 2014). As soluções de amina consistem em processos de absorção química, mais seletivos, enquanto que o sistema com carbonato de potássio, metanol a frio, entre outros, consiste em sistemas de absorção física, menos seletivos mas de mais fácil regeneração.

Apesar dessa tecnologia ser a mais madura e o método mais promissor para captura de CO₂, existem alguns motivos responsáveis por causar aumento de custo e perda de eficiência neste tipo de processo. Dentre eles, destaca-se o tamanho dos equipamentos responsáveis pela absorção/regeneração devido ao grande fluxo de CO₂ a ser capturado pela usina. Além disso, alguns solventes apresentam alto custo de compra sendo, portanto, extremamente importante que eles possam realizar múltiplos ciclos sob altas cargas de CO₂. Por fim, soluções de aminas que são as mais eficientes, apresentam característica corrosiva e alta toxicidade, colocando em risco equipamentos e a saúde dos operadores (IPCC, 2005).

2.7.2. Separação por adsorção

Neste caso, é utilizado adsorventes sólidos que possam adsorver o CO₂ em suas superfícies. Diferentemente da separação por absorção, o processo ocorre em um único reator e são realizadas oscilações na pressão e temperatura de acordo com o objetivo de adsorver o CO₂ ou regenerar o material utilizado para adsorção. Assim, condições de alta pressão e baixa temperatura são necessárias para que o CO₂ seja adsorvido, enquanto que ao reduzir a pressão para valores próximos da pressão atmosférica e aumentando a temperatura com ar quente ou injeção de vapor, faz com que haja a liberação do CO₂ da superfície do adsorvente sólido (Leung et al., 2014).

Para que o processo apresente alta eficiência, é necessário que o adsorvente utilizado apresente algumas características específicas, como grande área de superfície, alta capacidade de regeneração e alta seletividade. Assim, os materiais físicos mais utilizados são zeólitas, óxidos de cálcio, peneiras moleculares, carvão ativado, zirconato de lítio e hidrotalcitas (Leung et al., 2014).

Os processos podem ser do tipo que altera pressão para adsorver/regenerar o adsorvente, chamado de *Pressure Swing Adsorption (PSA)*, ou do tipo em que se altera a temperatura, sendo denominado *Temperature Swing Adsorption (TSA)*.

2.7.3. Separação por destilação criogênica

Este processo visa a separação do CO₂ por meio da condensação da mistura gasosa, que é permitida quando o processo atinge temperaturas criogênicas, altas pressões e etapas de expansão. Em posse da mistura gasosa na fase líquida, a separação pode ser realizada utilizando uma coluna de destilação (IPCC, 2005).

A grande vantagem deste processo é que a produção de CO₂ liquefeito faz com que o transporte e a etapa de injeção sejam mais fáceis e viáveis. Entretanto, a grande possibilidade de formação de CO₂ sólido coloca em risco a segurança do processo, podendo levar a bloqueio de tubulação e flutuações na pressão (Leung et al., 2014; Knapik et al., 2017).

2.7.4. Separação por membranas

Uma das formas de separação de gases é por meio da utilização de membranas, que possuem diferentes seletividades de acordo com seus materiais e poros. Estudos e pesquisas estão sendo feitos em busca de materiais cada vez mais eficientes e adequados para aplicações em larga escala. Atualmente já é possível chegar em uma eficiência de 90% com o uso de membranas cerâmicas, poliméricas ou metálicas, porém com menores vazões de produto quando comparados as tecnologias anteriores (Laung et al., 2014).

Em uma membrana há multicamadas com diferentes finalidades e características. As camadas mais finas são responsáveis pela seletividade, enquanto que as mais grossas oferecem maior resistência mecânica. Além disso, o fluxo de gás através da membrana é permitido por conta do diferencial de pressão presente, o que explica a preferência por correntes que estejam em altas pressões. Todas essas características permitem que haja a separação do CO₂ em relação aos outros componentes presentes na corrente gasosa (Laung et al., 2014; IPCC, 2005).

A tecnologia de separação por membranas apresenta algumas desvantagens que limitam o seu uso. As membranas possuem requisitos de temperatura, uma vez que, caso a temperatura do gás de combustão ultrapasse valores de 100°C, a sua estrutura é danificada. Além disso, uma etapa de pré tratamento é necessária porque as membranas possuem alta sensibilidade a gases corrosivos, como o SO_x, NO_x e H₂S. Por fim, um dos maiores desafios para a implementação prática dessa tecnologia nas indústrias, é a dificuldade em manter o desempenho das membranas por um longo período de operação (Song et al., 2019).

2.7.5. Combustão química em circuito fechado

Na combustão química em circuito fechado (*CLC – Chemical Looping Combustion*), óxidos metálicos, como NiO, Mn₂O₃ e Fe₂O₃, são utilizados para fornecer o oxigênio para o processo de oxi-combustão. O combustível é oxidado a CO₂ e água, que pode ser facilmente condensada, e CO₂ é produzido sem gasto energético de separação. O metal reduzido sofre

oxidação em uma etapa posterior do processo e pode ser reciclado. Além disso, ao ser feito um comparativo com a pré combustão, a combustão química em *loop* apresenta um desempenho maior (Leung et al., 2014).

É possível observar um esquema detalhado da combustão química em circuito fechado na Figura 10. Os óxidos metálicos, também chamado de “transportadores de oxigênio”, carregam o oxigênio entre dois reatores: de ar e de combustível. Ao chegar no reator de combustível, ocorre a queima e consequente oxidação do combustível e o carreador de oxigênio é reduzido a metal (Me) ou estado menos oxidado (MeOa^{-1}). De forma a voltar para o estado de oxidação (MeOa), o transportador de oxigênio retorna ao reator de ar que recebe uma corrente de entrada de ar. Posteriormente, o óxido metálico retorna então para o reator de combustão e, assim, ciclos de combustão química contínua ocorrem entre oxigênio puro e combustível. Caso a combustão no reator seja incompleta, é necessária a etapa de polimento de oxigênio, no qual é adicionado oxigênio puro externo (Abuelgasim et al., 2020).

Como não há N_2 e o gás de combustão é constituído basicamente de CO_2 e vapor d’água, utiliza-se um condensador para realizar a separação e é obtida uma corrente pura de CO_2 que pode ser encaminhada para armazenamento após passar por um compressor (Abuelgasim et al., 2020).

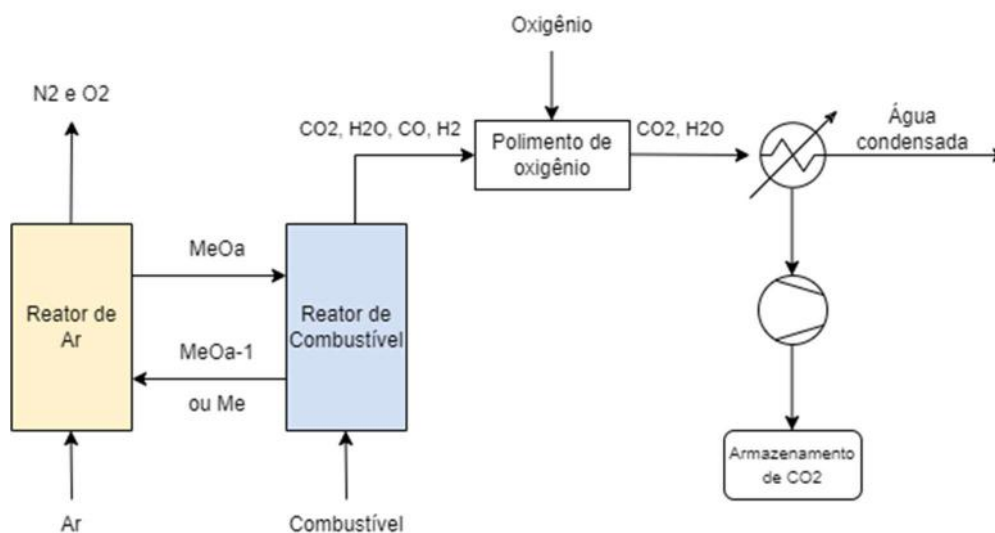


Figura 11. Fluxograma do processo de combustão química em circuito fechado

Fonte: Abuelgasim et al., 2020

2.8. Transporte e Armazenamento de CO₂

Uma vez realizada a etapa de separação do CO₂ dos outros componentes do gás de combustão, é necessário haver o transporte até o local de armazenamento ou, caso esse CO₂ for usado em outros processos, até a instalação industrial para o seu aproveitamento. De forma a tornar o transporte e armazenamento mais fáceis e viáveis, o CO₂ capturado normalmente passa por uma etapa de compressão a alta densidade nas instalações de captura (IPCC, 2005).

2.8.1. Transporte de CO₂

O transporte de CO₂ de forma segura, executável e economicamente viável é de suma importância para qualquer projeto de captura e armazenamento de carbono. A escolha pelo tipo de transporte está diretamente relacionada com os volumes envolvidos e o transporte pode ser feito em três estados: gas, líquido e sólido. Oleodutos, navios e caminhões tanques são os meios comumente utilizados em escala comercial para o transporte de CO₂ na fase gasosa e líquida (Leung et al., 2014; IPCC, 2005).

Uma rede de gaseodutos é vista como a principal alternativa de infraestrutura de transporte para carregar o CO₂ por grandes distâncias e em quantidades significativas que consigam impactar e ajudar na mitigação das mudanças climáticas. Eles permitem o transporte tanto em terra quanto no mar e podem ser instalados nos mais diversos locais, como desertos, áreas altamente populosas e em mares e em oceanos (IPCC, 2005).

O gás transportado pelos gaseodutos precisa estar comprimido e, portanto, ocupando menos volume (IPCC, 2005). Desse modo, o CO₂ é transportado em condições líquidas ou supercríticas, sendo a última a forma preferencial. As condições de operação necessárias para garantir o transporte em fluxo monofásico e estável através da tubulação são pressões entre 85 a 150 bar e temperaturas entre 13°C a 44°C (Leung et al., 2014).

Outro meio de transporte passível de ser utilizado para carregar o gás são os navios, que já carregam o gás natural liquefeito e gases de petróleo em grande escala comercial. Como não há muitas diferenças em relação as propriedades do CO₂ liquefeito e dos gases liquefeitos de petróleo, a infraestrutura de navios pode ser aplicada sem muitos problemas. Entretanto, sua limitação se deve ao transporte em menores escalas (IPCC, 2005).

Por último, os caminhões tanque também permitem o carregamento de CO₂. Entretanto, suas limitações de baixos volumes e seus altos custos, que podem chegar a valores duas vezes maiores que os de gaseodutos, tornam essa opção menos atrativa (IPCC, 2005).

2.8.2. Armazenamento de CO₂

O CO₂ capturado deve ser transportado até o local de armazenamento, onde ele é injetado e mantido fora de contato com a atmosfera. O armazenamento geológico é o local mais adequado de injeção, uma vez que abriga quantidades de CO₂ suficientes para reduzir o aquecimento global. Além disso, quando injetado no local adequado, cerca de 99% do CO₂ fica retido por aproximadamente 1000 anos (IPCC, 2005).

As formações salinas profundas e os campos de petróleo e gás são as opções geológicas mais importantes para o armazenamento seguro e em grandes quantidades (Brazilian Atlas of CO₂, 2014). O principal objetivo de injetar CO₂ em campos de petróleo é manter a pressurização que aumenta a produtividade do poço. Estima-se que os reservatórios esgotados de petróleo e gás consigam armazenar 675-900 GtCO₂ e as formações salinas profundas consigam armazenar pelo menos 1000 GtCO₂ (IPCC, 2005). Um esquema representativo é mostrado na Figura 11.

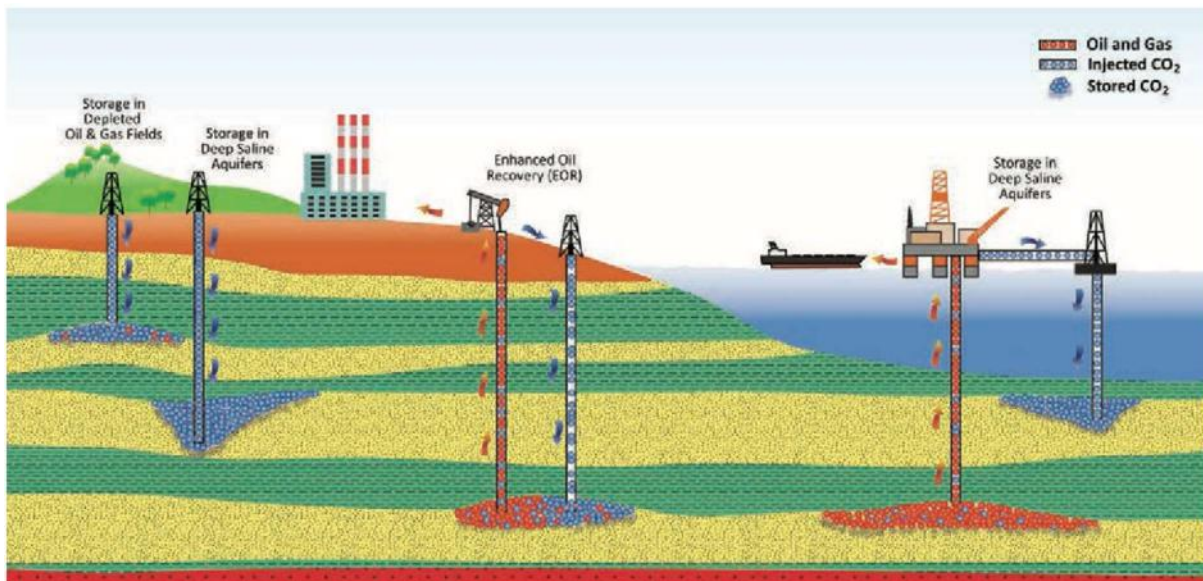


Figura 12. Opções geológicas de armazenamento (Brazilian Atlas of CO₂, 2014)

São necessárias algumas características importantes para cumprir com o critério de boa formação geológica de armazenamento, tais como um ambiente geológico estável, porosidade, espessura e permeabilidade adequadas da rocha do reservatório e uma rocha com boa capacidade de vedação (Leung et al., 2014).

Para que o armazenamento seja mais eficiente e ocupe um menor volume de poros, o CO₂ deve ser injetado no estado supercrítico, visto que, majoritariamente, quanto mais profundo, maior a temperatura e pressão. Para garantir o estado supercrítico, o reservatório não deve ter menos de 0,8 quilômetros de profundidade (Brazilian Atlas of CO₂, 2014).

O CO₂ fica impossibilitado de retornar para a atmosfera por meio de mecanismos de aprisionamento físicos e químicos, tais como adsorção em matéria orgânica; dissolução nos fluidos de formação *in situ*; aprisionamento nos espaços porosos; e/ou aprisionamento abaixo de uma camada impermeável e confinante (Brazilian Atlas of CO₂, 2014; IPCC, 2005).

Por fim, deve-se atentar aos riscos potenciais aos humanos e ao meio ambiente que podem ser gerados por vazamentos de poços, não fiscalização e falhas nas camadas de aprisionamento. As falhas podem afetar as águas subterrâneas, desequilibrar o ecossistema do subsolo e, caso o CO₂ volte para a atmosfera, afetar a segurança e saúde da população local (IPCC, 2005).

Capítulo 3

3.1. Metodologia

A pesquisa por meio da gestão de informação realizada com o auxílio de artigos científicos, é uma ferramenta de extrema eficácia para inferir o estado da arte de um setor em específico. Tal análise possibilita uma melhor compreensão em relação a trajetória, o presente e tendências futuras de mercado do setor (Borschiver et al., 2017). Assim, para o desenvolvimento do presente trabalho, foi feito um mapeamento e avaliação das oportunidades relacionadas a captura de carbono, através de busca de artigos.

A busca e extração de informações foram feitas por meio da análise em diferentes níveis: macro, meso e micro, utilizando como referência Borchevier et al., 2017 e Fierro et al., 2017. Cada um desses níveis possuem objetivos específicos detalhados abaixo:

- Nível Macro: Visa obter informações abrangentes e imediatas do artigo, como o título, ano e localização geográfica. Permitirá uma visão ampla do cenário de captura e armazenamento de CO₂.

- Nível Meso: É necessária a leitura do resumo do artigo e realizar a extração dos aspectos mais relevantes. Posteriormente, é feita a criação de taxonomias de forma a categorizar as informações principais. Permite uma visão mais detalhada do cenário a ser investigado.

- Nível Micro: É feito o detalhamento das taxonomias da análise Meso proporcionando o detalhamento e aprofundamento do setor de captura e armazenamento de CO₂.

Foi realizada uma busca ordenada da literatura constituída da coleta, filtragem e apuração de dados (Speroni et al., 2015). A estratégia de pesquisa utilizada para realizar a coleta das informações requeridas dentro do contexto de tecnologias que visam a captura de CO₂, foi por meio do uso de palavras-chave nas bases de dados.

Para o mapeamento de artigos científicos foram utilizadas duas bases: *Scopus e Science Direct*. A escolha por essas bases se deu pelo grande reconhecimento acadêmico de ambas, e grande volume de materiais disponíveis. Além disso, as duas bases são pertencentes à empresa editorial holandesa *Elsevier*, especializada em conteúdo científico e considerada uma das seis maiores empresas que dominam a publicação científica no mundo. Na análise Macro, será comparada ambas as bases e será definido qual delas será utilizada, conforme descrito a seguir.

3.1.1. Análise Macro

De forma a obter um resultado de busca mais abrangente e que contenha informações a respeito da evolução dos artigos publicados e tecnologias desenvolvidas sobre a captura de CO₂ nos últimos anos, fez-se inicialmente uma análise macro.

A pesquisa se deu entre os anos de 2015 a 2020 e a palavra-chave inserida foi “CO₂ capture” no campo de busca *Título, resumo, palavras-chave*. O uso das aspas se deu de forma que a base de dados procurasse pelo conjunto das duas palavras de forma difusa, ou seja, o mecanismo de pesquisa também procura por substantivos no singular e plural, ortografia do Estados Unidos e Reino Unido, ignora símbolos e pontuação.

Os principais objetivos desta análise são, portanto, obter uma análise histórica e quantitativa das publicações, avaliar a distribuição por países, por áreas tecnológicas e, por fim, definir a base de dados, mais adequada entre as duas, que será usada.

3.1.2. Análise Meso

A análise Meso tem como objetivo filtrar os resultados obtidos e categorizá-los de acordo com os aspectos mais relevantes. Para isso, é necessária a leitura dos resumos e, posteriormente, a criação de taxonomias que melhor agrupem e descrevam as principais tecnologias usadas para a captura de carbono (Borschiver et al., 2017).

Com o intuito de especificar a busca, as palavras-chave foram alteradas para (“*CO2 capture*” *AND industry*). A adição da palavra *industry* é crucial para afunilar a pesquisa e encontrar resultados mais precisos sobre o assunto do presente estudo. O campo de busca e o intervalo temporal continuaram os mesmos usados na análise Macro e, a base de dados utilizada é a definida pela avaliação feita na análise macro.

3.1.3. Análise Micro

Para que seja possível obter uma compreensão mais detalhada a respeito das tecnologias mais promissoras, é necessário fazer um estudo aprofundado dos artigos mais citados e com maior visibilidade, fazendo uma avaliação crítica deles. Dessa forma, para esta etapa foi feita a leitura de artigos e a escolha destes se deu de forma a priorizar as diferentes tecnologias e suas comparações.

Capítulo 4

4.1. Resultados e Discussões

Na sequência serão apresentados e discutidos os resultados das análises Macro, Meso e Micro realizadas.

4.1.1. Análise Macro

Foram analisadas duas bases de dados (*Science Direct* e *Scopus*) para posterior escolha daquela mais representativa para realização das análise Meso e Micro. Os resultados da análise Macro são descritos na sequência para cada base de dados.

- *Science Direct*

O número de artigos encontrados nesta base foi 3300 e a análise histórica obtida indica que houve uma crescente quantidade de artigos no período analisado, mostrando a importância do tema (Figura 12).

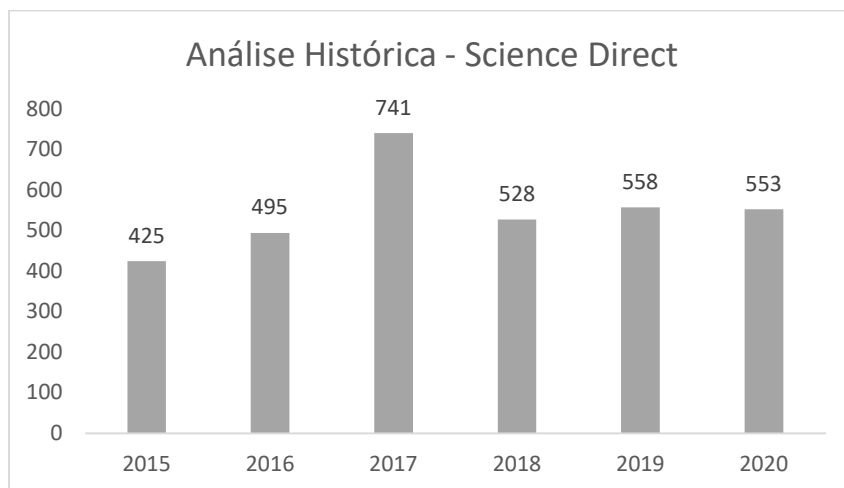


Figura 13. Evolução de publicações na base *Science Direct* no período de 2015-2020

Ao se analisar as áreas tecnológicas nas quais há maiores pesquisas relacionadas à captura de carbono, percebe-se que o setor de Energia apresenta a maior parcela (28%), seguido pelas áreas Engenharia Química (20%), Ciências Ambientais (17%) e Ciências dos Materiais (13%). A maior parcela se deve ao fato de que o desenvolvimento de tecnologias relacionadas a captura de carbono é crucial para limitar as futuras emissões de CO₂ do uso de energia advinda dos combustíveis fósseis. O resultado do levantamento é mostrado na Figura 13.

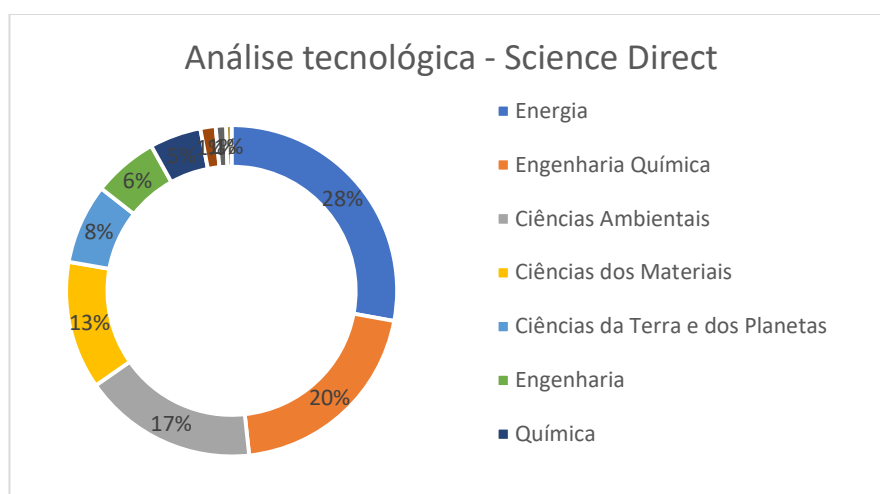


Figura 14. Áreas dos artigos levantados na base *Science Direct*.

- *Scopus*

Na base *Scopus* foram encontrados 7897 artigos com um perfil histórico muito semelhante ao da base *Science Direct*, como ilustra a figura 14:

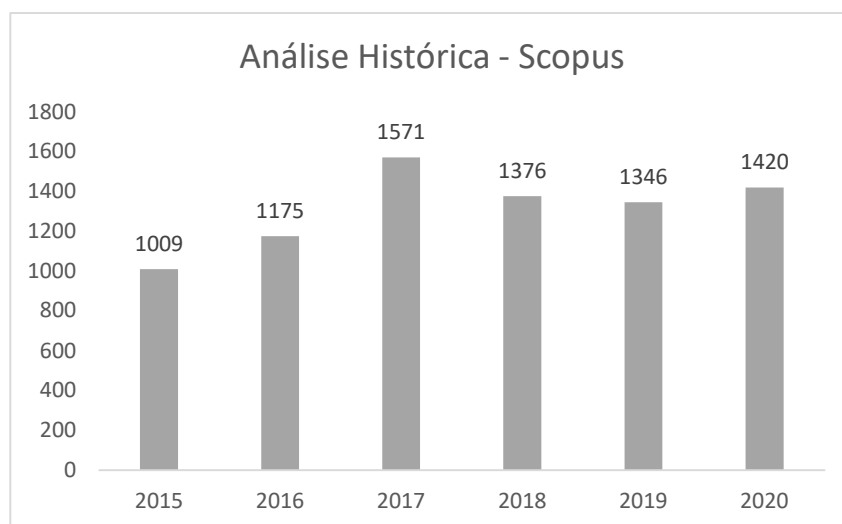


Figura 15. Evolução de publicações na base *Scopus* no período de 2015-2020

No que diz respeito as áreas tecnológicas nas quais a captura de carbono é pesquisada, observa-se pela Figura 15, que há uma distribuição concorrente entre as áreas de Engenharia Química (18%) e Energia (18%), seguidas por Química (17%) e Engenharia (15%).

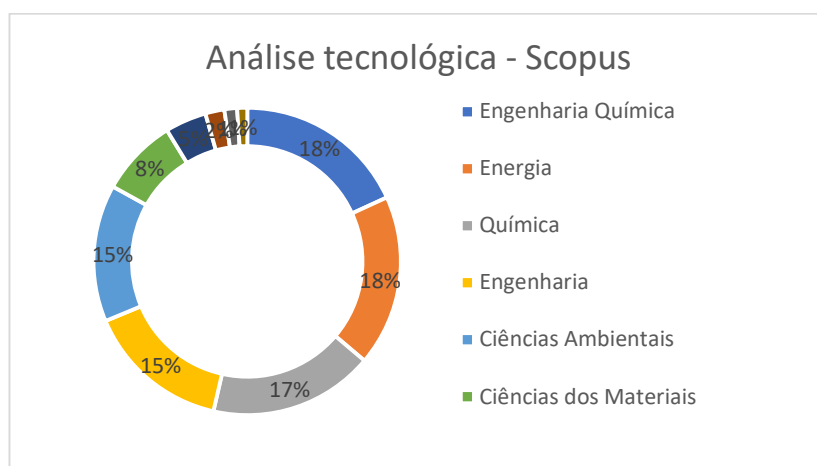


Figura 16. Áreas dos artigos levantados na base *Scopus*.

Diferentemente da base *Science Direct*, a base *Scopus* permite realizar uma análise geográfica das publicações, indicando quais países apresentam maior investimento de pesquisa a respeito da captura de carbono. Dessa forma, de acordo com a Figura 14, é possível observar

que a China apresenta liderança em relação aos outros países com um total de 2620 artigos publicados, seguida pelos Estados Unidos com 1204. Os resultados encontrados estão dentro do esperado, visto que a China e os Estados Unidos são os países com maiores números de publicações em praticamente todas as áreas do conhecimento. Além disso, a China vem desenvolvendo políticas de incentivo para minimizar as emissões de CO₂ e outros poluentes.

É possível destacar ainda um número expressivo de artigos publicados por centros de pesquisas da Austrália, o que pode estar relacionado com a maior preocupação da comunidade científica desse país, visto que é conhecido que nessa região do planeta há fortes problemas de secas e estiagens, além do que, a Austrália é o maior exportador de carvão do mundo, apresentando grandes reservas exploráveis. Deve se considerar também, que ao contrário de outros países, a Austrália não apresentou propostas concretas de diminuição de uso e exportação de combustíveis fósseis, sendo que suas reservas de carvão poderão continuar sendo usadas na matriz energética e para exportação. Sendo assim, é natural que a comunidade científica desse país busque mais pesquisas relacionadas ao tema (Neves, 2021).

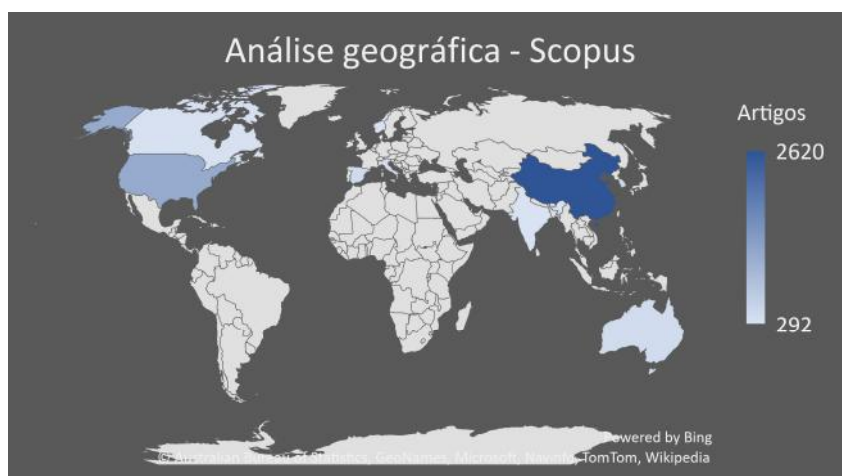


Figura 17. Análise geográfica das publicações da base *Scopus*. (Fonte: *Scopus*, 2022).

Para dar prosseguimento ao trabalho, foi escolhida a base de dados *Science Direct*. O embasamento da escolha se deu pelo fato de que a distribuição tecnológica é mais interessante para o presente estudo, visto que há uma maior disponibilidade de documentos nas áreas de Energia, Engenharia Química e Ciências Ambientais.

4.1.2. Análise Meso

De forma a diminuir o número total de artigos para a análise Meso, foram utilizados as palavras chaves “CO₂ capture” AND “industry” no conjunto de artigos levantados na análise Macro, conforme explicitado na descrição da Metodologia.

Assim, foram encontrados 154 artigos utilizando-se a base de dados *Science Direct* e, após a leitura dos resumos, foi possível realizar a criação das taxonomias. Percebeu-se que as principais tecnologias utilizadas para a captura de CO₂ nas indústrias pertencem a três processos de combustão: pós combustão, pré combustão e oxi combustão. Após leitura minuciosa dos resumos dos artigos, foram encontrados os resultados discutidos na sequência.

A Figura 15 mostra que há um maior interesse na pesquisa por processos de pós combustão (73%), enquanto há uma concorrência entre a pré (13%) e a oxi combustão (14%).

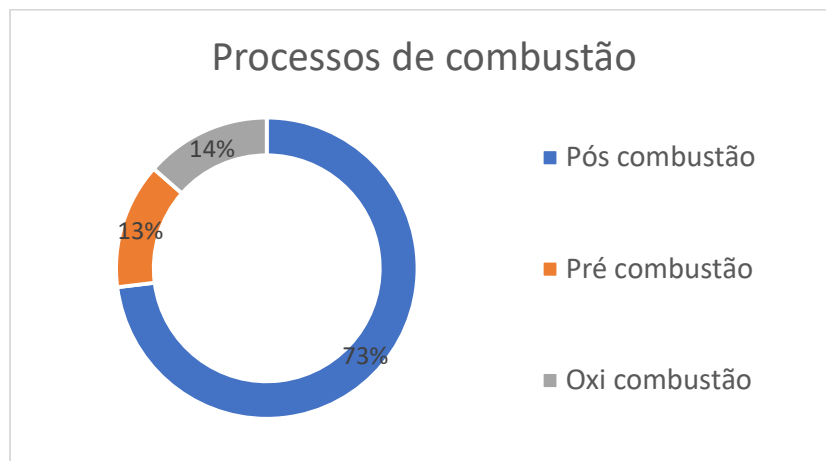


Figura 18. Distribuição dos tipos de processos pesquisados nos artigos levantados

Esse resultado pode ser explicado pelo fato de que a pós combustão é o tipo de processo mais usual em unidades geradoras de energia, principais interessadas em realizar a captura de CO₂. O processo de oxi combustão necessita de oxigênio puro gerado em unidade de retificação criogênica, sendo menos usual pelas dificuldades operacionais. Já o processo de pré combustão é mais comum em unidades industriais que buscam produção de gás de síntese através de reforma de hidrocarbonetos ou gaseificação de carvão, sendo mais usual em planta como as de produção de amônia, onde se necessita do hidrogênio formado para produção do produto final, ou plantas que se destinam a fornecer hidrogênio em refinarias para hidrodessulfurização e hidrocrackeamento da unidade. Ou seja, unidades de pré combustão, não são tão usuais em plantas voltadas exclusivamente para geração de energia, como termelétricas movidas a gás ou carvão.

Na sequência foi possível fazer uma separação por área industrial de forma a analisar as indústrias onde há maior pesquisa e investimento para captura de carbono. Observando a Figura 16, nota-se que a indústria de cimento possui a maior parcela de pesquisas (43%), seguido das unidades termoelétricas (16%). A indústria de cimento contribui com aproximadamente 5% para as emissões antropogênicas globais de CO₂, ou seja, uma das maiores fontes de emissão (Hornberger et al., 2017). Além do que, esses resultados corroboram a avaliação feita anteriormente, visto que em uma planta produtora de cimento e em uma unidade termoelétrica, é mais usual pensar em procesos do tipo pós combustão para caputra de CO₂.

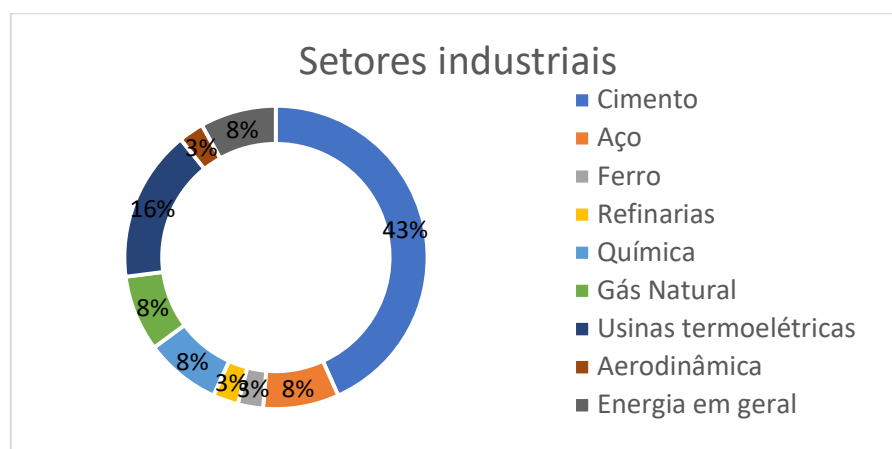


Figura 19. Setores industriais dos artigos encontrados

Além disso, foi possível realizar um mapeamento das tecnologias que estão por trás de cada processo de combustão. Para isso, fez-se um estudo mais aprofundado dos 154 artigos e, além da leitura dos resumos, foi feita a leitura das introduções e conclusões de forma a entender as tecnologias mais utilizadas.

Observando a Figura 17, nota-se que o processo de absorção representa praticamente metade das tecnologias estudadas. Tal análise condiz com o fato de que a captura de CO₂ por absorção é vastamente aceita como uma tecnologia desenvolvida e madura para a mitigação das emissões de CO₂ (Yoro et al., 2021). Porém, a sua grande demanda por energia e o seu alto custo de implementação em escala comercial exige que haja um grande número de estudos para aperfeiçoar essa tecnologia (Yoro et al., 2021).

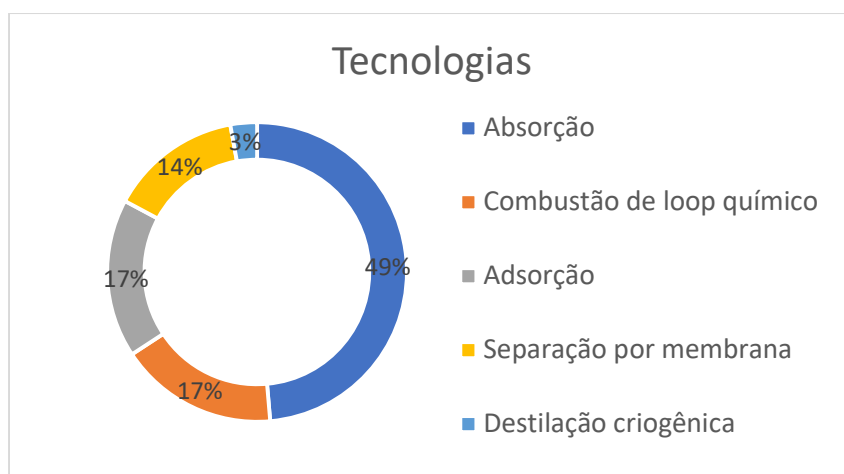


Figura 20 – Tecnologias abordadas nos artigos na análise Meso

4.1.3. Análise Micro

A partir dos 154 artigos obtidos pela análise meso, foram escolhidos os artigos com maior visibilidade, maiores citações, e que abordavam assuntos sobre tecnologias inovativas utilizando diferentes métodos de separação de gases. Após essa etapa, foram obtidos 5 artigos que discutiam sobre as seguintes tecnologias mostradas na Tabela 5:

Artigos
- WANG, Yuan.; ZHAO, Li.; OTTO, Alexander.; ROBINIUS, Martin.; STOLTEN, Detlef. A Review of Post-combustion CO ₂ Capture Technologies from Coal-fired Power Plants, Energy Procedia 114 (2017) 650 – 665
- WANG, Yinglong.; LIU, Xiaobin.; KRASLAWSKI, Andrzej.; GAO, Jun.; CUI, Peizhe.. A novel process design for CO ₂ capture and H ₂ S removal from the syngas using ionic liquid, (2018)
- YOON, Yeo.; KIM, Young.; NAM, Sung.; PARK, Sung.; CHUN, Soo.; LEE, Sun.; KIM, Hee.. Economic analysis of CCU in the Korean cement industry: CO ₂ capture using KIERSOL & PCC conversion, (2017)
- WANG, Geoff.; ZHANG, Zaoxiao.; ZHANG, Chen.; YU, Yunsong.. Characterizing the catalyst fluidization with field synergy to improve the amine absorption for CO ₂ capture, (2019)
- YOUNAS, M.; REZAKAZEMI, M.; DAUD, M.; WAZIR, M.; AHMAD, S.; ULLAH, N.; RAMAKRISHNA, S.. Recent progress and remaining challenges in post-combustion capture using metal-organic frameworks (MOFs), (2020)

Tabela 5 - Artigos mais citados usados na avaliação Micro

Comparação de tecnologias e modelos híbridos: absorção química e membrana

O artigo escrito por WANG, Y. *et al* 2017, trata-se de uma revisão que trás informações sobre tecnologias de pós combustão para captura de CO₂ oriundos de termoelétricas movidas a carvão.

Os autores mostram que em unidades que utilizam absorção química o maior custo é devido ao gasto energético do refulvedor na torre de regeneração, responsável pela recuperação do solvente. Isso ocorre porque a absorção química é um processo mais seletivo, porém que forma uma ligação química forte entre o solvente e o gás de interesse durante a etapa de absorção. Essa ligação precisa de mais alta temperatura no regenerador para romper. Assim, para buscar menor gasto energético deve-se priorizar o desenvolvimento de melhores solventes, modificações no processo e otimização de parâmetros operacionais (WANG, Y. *et al* 2017).

Em sistemas de membranas o mais indicado e eficiente são sistemas de dois estágios, uma vez que já foi comprovado que o sistema de único estágio não pode produzir o produto desejado com alto grau de captura e pureza de CO₂, e o de três estágios não proporciona vantagens comparativas. Esses estágios em sistemas de membranas corresponde a duas passagens em sistemas de membrana, ou seja, o permeado do primeiro sistema, contendo CO₂ e impurezas, deve ser comprimido e levado para um segundo sistema de membrana para aumento da concentração (WANG, Y. *et al* 2017).

Por fim, WANG, Y. *et al* 2017 discutem sistemas híbridos de captura de CO₂. O grande interesse por esses sistemas vem do fato de que, apesar de todo o esforço na procura de otimizações e melhorias nos processos de absorção química e separação por membranas, essas tecnologias ainda apresentam alguns inconvenientes, como o gasto energético da absorção e a menor vazão de produto das membranas. Assim, o sistema híbrido permite maior rendimento nas unidades.

Um sistema híbrido típico apresenta configuração em série, sendo que o gás de combustão passa primeiramente pelo processo de absorção química e posteriormente em mebranas. Outra configuração possível é em paralelo onde a corrente de alimentação é dividida para uma linha de absorção e uma linha de membrana. Quando feita a comparação energética e econômica, analisou-se que, para o arranjo em série, há uma menor demanda de energia para regeneração do solvente e para o arranjo em paralelo, o custo capital diminui consideravelmente uma vez que é possível adotar uma torre de absorção química menor (WANG, Y. *et al* 2017).

Líquidos iônicos em substituição a processos de absorção física convencional

O artigo escrito por WANG, Y. *et al* 2018, trata-se de um novo processo utilizando líquido iônico como solvente físico para adsorver gases ácidos, com enfoque para o CO₂ e H₂S. O intuito é substituir o Rectisol, processo já estabelecido na indústria, que utiliza metanol como solvente. O sistema Rectisol trata-se de uma absorção física que ocorre em baixas temperaturas. A regeneração do solvente é relativamente simples, porém o processo é menos seletivo quando comparado a processos de absorção química.

Sendo assim, WANG, Y. *et al* 2018, comprovam que os líquidos iônicos conseguem atuar como solventes a temperatura ambiente com baixa volatilidade, alta estabilidade térmica e baixa inflamabilidade. Após ter sido feita a modelagem e a simulação do processo, os autores concluíram que é possível realizar a captura do CO₂ e remover H₂S por meio do processo descrito, com taxas de 97.6% e 95.3% respectivamente, acima do rendimento usual do Rectisol. Logo, percebe-se que a captura de CO₂ utilizando líquidos iônicos é mais efetiva. Ademais, o estudo conseguiu chegar a uma taxa de 99.91%.

Captura de CO₂ utilizando o processo KIERSOL em plantas de cimento

Yoon, Y. *et al* 2017 discute sobre uma estratégia que utiliza o processo KIERSOL para realizar a captura de CO₂ com concentração de 25% em plantas de cimento. O estudo foca principalmente na redução do custo de operação permitida pela recuperação do calor do forno rotativo que pode ser utilizado no refervedor.

O KIERSOL, que é uma mistura aquosa com carbonato de potássio e diamina e foi utilizado para capturar o CO₂ no gás de forno de cimento. A escolha pelo carbonato de potássio se dá por apresentar menor calor de absorção, menor custo que a amina, baixa volatilidade e baixa toxicidade. A diamina ajuda com uma alta taxa de absorção e na etapa de dessorção. O processo consiste em uma torre absorvedora e um stripper utilizado para regenerar o solvente. O mecanismo de captura de CO₂ é o “Shuttle Mechanism”, onde o CO₂ é absorvido rapidamente a baixas temperaturas.

Dessa forma, Yoon, Y. *et al* 2017 mostra que o custo evitado de CO₂ usando o KIERSOL pode ser reduzido de US\$25/t CO₂ para US\$19/t CO₂ por conta da recuperação de calor. O CO₂ altamente concentrado vindo do stripper é utilizado para a fabricação do carbonato de cálcio precipitado (PCC) a partir de CaO e o PCC fabricado obteve uma concentração de 99,3%.

Fluidização catalítica como forma de aumentar a absorção do CO₂ utilizando amina

Yu, Y. et al 2018 traz uma nova abordagem de utilização do processo de absorção por amina de forma a reduzir os altos custos, causados pelo consumo de energia e de solução. Como forma de intensificar a transferência de massa e de calor, *Yu, Yunsong. et al 2018* propõe o uso da fluidização catalítica.

O intuito é usufruir da força de arraste produzida na fluidização para melhorar os efeitos interativos entre as soluções de CO₂ e amina. Dessa forma, além de melhorar os coeficientes de transferência de massa e calor, a fluidização catalítica proporciona o aumento da razão de volume de gás e líquido e, assim, reduz a quantidade de consumo da solução. Como consequência, há uma redução no consumo de energia, já que há aumento na eficiência de dessorção e a temperatura de regeneração pode ser diminuída devido aos efeitos do catalisador.

Após ter sido feita a modelagem e simulação do processo, *Yu, Y. et al 2018* que o coeficiente de transferência de massa no reator fluidizado foi 17% maior do que no reator convencional. Além disso, houve uma redução de 9% do consumo de energia através do uso da fluidização catalítica quando comparado com a absorção convencional.

Utilização de estruturas metal-orgânicas para a captura de CO₂ em processo de pós combustão

Younas, M. et al 2020 traz uma abordagem diferente de captura de CO₂ que se baseia na utilização de estruturas metal-orgânicas (MOFs) como material adsorvente eficaz devido à sua estrutura microporosa. Dessa forma, *Younas, M. et al 2020* tenta associar, ao longo do artigo, a química do MOF à economia do processo para pós combustão de captura de CO₂.

Os MOFs apresentam grande áreas de superfície, grande variedade estrutural, alta porosidade e grandes volumes vazios para armazenamento sendo, portanto, potenciais adsorventes eficazes para a captura de CO₂. Assim, *Younas, M. et al 2020*, fez um estudo do progresso atual da captura, separação e conversão catalítica de CO₂ utilizando MOFs por meio da revisão de estudos computacionais e experimentais.

Após ter feito o estudo, *Younas, M. et al 2020* constatou que, apesar da estabilidade térmica, química, mecânica e hidrotermal dos MOFs em condições de trabalho severas, o custo de captura de CO₂ ainda é alto quando comparado com solventes comercialmente utilizados como o MEA. Dessa forma, ainda há uma severa necessidade de acoplar as características

moleculares dos MOFs com economia de processo de forma a tornar esta tecnologia economicamente viável.

4.2. Conclusões

A partir das informações e dados apresentados, foi possível entender o cenário atual e mapear as principais tecnologias de captura de Dióxido de Carbono vigentes, assim como as principais inovações tecnológicas.

Assim, por meio da análise Macro identificou-se que há um avanço crescente nas publicações relacionadas às tecnologias de CO₂, principalmente para o setor de energia, que é o principal responsável pelas emissões devido ao uso dos combustíveis fósseis. Ademais, a distribuição regional mostrou a liderança em pesquisa da China e dos Estados Unidos que, além de liderarem as publicações científicas em diversas áreas, também são os países que mais emitem CO₂ anualmente, com destaque para a China que vem aumentando suas emissões consideravelmente desde 2002.

Além disso, a análise Meso mostrou que o maior interesse de pesquisa atualmente é pelo sistema de pós combustão. Tal cenário condiz com o fato de que este processo é o mais maduro atualmente e apresenta maior aplicação comercial quando comparado com os processos de pré e oxidação. Além disso, também foi possível observar que a indústria de cimento é o setor industrial que apresenta maior foco de pesquisa devido às suas altas parcelas de emissão. Por fim, a tecnologia de absorção (49%) seguida pela combustão de loop químico (17%) e adsorção (17%) lideram os números de publicações científicas. Isso se deve ao vasto uso da tecnologia de absorção nos processos de pós combustão, principalmente com os solventes do tipo amina.

Por meio da análise Micro foi possível descobrir processos inovativos que estão sendo estudados de forma a diminuir os custos e aumentar a eficiência dos processos. Foi possível perceber que há um forte interesse pelo aperfeiçoamento da tecnologia de absorção, uma vez que ela é a mais madura e com maior aplicação comercial. Dessa forma, foi visto que há estudos com enfoque para o uso de diferentes adsorventes como os MOFs, como também possíveis mudanças de processo que consigam gerar uma maior eficiência de absorção e regeneração, como o uso de leitos de fluidização catalítica e sistemas híbridos com o uso de membranas.

Dessa forma, conclui-se que as tecnologias de captura de CO₂ apresentam um potencial a ser explorado e também uma forte necessidade vigente atualmente, devido à crescente preocupação com o aumento dos gases de efeito estufa e suas consequências para a vida

humana, flora e fauna. O aumento das publicações científicas e a diversidade de estudos, mostra que a comunidade acadêmica vem procurando cada vez mais aprimorar e aperfeiçoar as tecnologias existentes, de forma a torná-las menos custosas e mais aplicáveis em escala industrial e comercial. Além disso, também há uma forte procura por novas tecnologias que obtenham resultados de captura ainda melhores que os atuais e que possam ser implementados em um futuro próximo para contribuir com a redução da concentração de CO₂.

Capítulo 5

5.1. Referências

- ABNT
[https://www.abntonline.com.br/sustentabilidade/GHG/O_que_%C3%A9_gee#:~:text=Os%20gases%20internacionalmente%20reconhecidos%20como,%20e%20Perfluorcarbono%20\(PFC\).](https://www.abntonline.com.br/sustentabilidade/GHG/O_que_%C3%A9_gee#:~:text=Os%20gases%20internacionalmente%20reconhecidos%20como,%20e%20Perfluorcarbono%20(PFC).)
- Abuelgasim, S., Wang, W., Abdalazeez, A. A brief review of chemical looping combustion as a promising CO₂ capture technology: Fundamentals and progress., 2020.
- ABU-ZHARA, Mohammad.; SCHNEIDERS, Léon.; NIEDERER, John.; FERON, Paul.; VERSTEEG, Geert.. CO₂ capture from power plants: Part I. A parametric study of the technical performance based on monoethanolamine, 2007
- Al-Maamary, H.M., Kazen, H.A., Chaican, M.T., 2017. Climate change: the game changer in the Gulf Cooperation Council region. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 76.
- ALMENDRA, Francisco.; WEST, Logan.; ZHENG, Li.; FORBES, Sarah.. CCS Demonstration in Developing Countries: Priorities for a Financing Mechanism for Carbon Dioxide Capture and Storage, 2011
- ANWAR, M.N., FAYYAZ, A., SOHAIL, N.F., KHOKHAR, M.F., BAQAR, M., KHAN, W.D., RASOOL, K., REHAN, M., NIZAMI, A.S., CO₂ capture and storage: A way forward for sustainable environment, 2018.
- BAKER, W. W., et al. Gas separation process using membranes with permeate sweep to remove CO₂ from combustion gases, 2011
- BORSCHIVER, S.; REALPE, C.; COUTO, M.A.G; COELHO, K.. Prospecção tecnológica de combustível renovável para aviação: estudo de caso do diesel verde, 2017
- Brazilian atlas of CO₂ capture and geological storage, 2014 – como citar?

- Doughty C., Freifeld BM., Trautz RC. Site characterization for CO₂ geological storage and vice versa: the Frio brine pilot, Texas, USA as a case study, 2008.
- EPA 1 <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>
- EPA 2 <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases#colorbox-hidden>
- FIERRO, I., & ANTUNES, A. M. (2017). X ENCONTRO ACADÊMICO DE PROPRIEDADE INTELECTUAL, INOVAÇÃO E DESENVOLVIMENTO, 2017.
- GIELEN, D., KRAM, T., 1998. The Role of Non-CO₂ Greenhouse Gases in Meeting Kyoto Targets.
- GOV, 2021 <https://www.gov.br/planalto/pt-br/acompanhe-o-planalto/noticias/2021/10/em-nova-meta-brasil-ira-reduzir-emissoes-de-carbono-em-50-ate-2030>
- Guimarães, C., Controle e Monitoramento de Poluentes Atmosféricos, 2016.
- HEINTZ, Y.J., SEHABIAGUE, L., MORSI, B.I., JONES, K.L., LUEBKE, D.R., PENNLIN, H.W.. Hydrogen sulfide and carbon dioxide removal from dry fuel gas streams using an ionic liquid as physical solvent, 2009
- HORNBERGER, M.; SPÖRL, R.; SCHEFFKNECHT, G.. Calcium Looping for CO₂ Capture in cement plants – pilot scale, 2017
- IEA, 2021 – Cement Analysis <https://www.iea.org/reports/cement>
- IEA, 2021 – Global Energy Review <https://www.iea.org/articles/global-energy-review-co2-emissions-in-2020>
- IEA, CO₂ Emissions from fuel combustion, Highlights, 2017.
- IEA, Greenhouse Gas Emissions from Energy - <https://www.iea.org/reports/greenhouse-gas-emissions-from-energy-overview/emissions-by-sector>
- IPCC (2007) Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Metz B et al. (eds). Cambridge University Press, New York, NY, USA
- IPCC 2005 – Como citar?
- IPCC 2021- Como citar?
- JALILI, A.H., SHOKOUHI, M., MAURER, G., HOSSEINI-JENAB, M.. Solubility of CO₂ and H₂S in the ionic liquid 1-ethyl-3-methylimidazolium tris (pentafluoroethyl) trifluorophosphate
- JUNGES, A., SANTOS, V., MASSONI, N., SANTOS, F., 2018. Efeito Estufa e aquecimento global: uma abordagem conceitual a partir da física para educação básica
- KNAPIK, E., KOSOWSKI, P., STOPA, J., 2017. Cryogenic liquefaction and separation of CO₂ using Nitrogen Removal Unit cold energy.
- LEUNG, D.Y., CARAMANNA, G., MAROTO-VALER, M.M., An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies, 2014.

- LIU, X., HUANG, Y., ZHAO, Y., GANI, R., ZHANG, S.. Ionic liquid design and process simulation for decarbonization of shale gas, 2016
- LUIS, P., GAREA, A., IRABIEN, A.. Quantitative structure-activity relationships (QSARs) to estimate ionic liquids ecotoxicity EC50, 2010
- MA, Chunyan.; WANG, Nan.; YE, Nannan.; JI, Xiaoyan.. CO2 Capture using ionic liquid-based hybrid solvents from experiment to process evaluation, 2021
- MERKEL, T. C., et al. Advances in CO2 capture technology – The U.S. Department of Energy’s Carbon Sequestration Program. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2008
- NEVES, E.; Por que a Austrália vem sendo apontada como a nova vilá do clima. Veja Mundo, publicação *on line* disponível em: <https://veja.abril.com.br/mundo/porque-a-australia-vem-sendo-apontada-como-nova-vila-do-clima/> . Acessado em março de 2022.
- OLAJIRE, A.A., CO2 Capture and separation technologies for end-of
- ROBESON, L. M. Correlation of separation factor versus permeability for polymeric membranes. Journal of Membrane Science 1991
- RUBIN, S.E., CO2 Capture and Transport, 2008
- SPERONI, R.; DANDOLINI, G.; SOUZA, J.; GAUTHIER, F.. Estado da arte da produção científica sobre indicadores e índices de inovação, 2015
- WANG, Yinglong.; LIU, Xiaobin.; KRASLAWSKI, Andrzej.; GAO, Jun.; CUI, Peizhe.. A novel process design for CO2 capture and H2S removal from the syngas using ionic liquid, 2018
- WANG, Yuan.; ZHAO, Li.; OTTO, Alexander.; ROBINIUS, Martin.; STOLTEN, Detlef.. A Review of Post-combustion CO2 Capture Technologies from Coal-fired Power Plants, 2017
- YANG, Sheng.; QIAN, Yu.; YANG, Siyu.. Development of a full CO2 capture process based on the rectisol wash technology, 2016
- YORO, Kelvin.; DARAMOLA, Michael.; SEKOAI, Patrick.; ARMAH, Edward.; WILSON, Uwemedimo.. Advances and emerging techniques for energy recovery during absorptive CO2 capture: A review of process and non-process integration-based strategies, 2021
- YOUNAS, Mohammad.; REZAKAZEMI, Mashallah.; DAUD, Muhammad.; WAZIR, Muhammad.; AHMAD, Shakil.; ULLAH, Nehar.; INAMUDDIN.; RAMAKRISHNA, Seeram.. Recent progress and remaining challenges in post-combustion CO2 capture using metal-organic frameworks (MOFS), 2020
- ZHANG, Yingying.; JI, Xiaoyan.; XIE, Yujiao.; LU, Xiaohua.. Screening of conventional ionic liquids for carbon dioxide capture and separation, 2016
- ZHAO, L., et al. A parametric study of CO2/N2 gas separation membrane processes for post-combustion capture. Journal of Membrane Science 2008

