



Latin American Journal of Energy Research – Lajer (2022) v. 9, n. 1, pp. 49–68
<https://doi.org/10.21712/lajer.2022.v9.n1.p49-68>

Aplicação do modelo DPSIR (*Drivers – Pressures – State – Impact – Response*) com foco nas respostas tecnológicas para a redução dos gases de efeito estufa
Application of the DPSIR (Drivers – Pressures – State – Impact – Response) model with a focus on technological responses to reduce greenhouse gases

Gabriela Bartu^{1,*}, Yvan Asencios²

¹ Bacharel em Ciência e Tecnologia do Mar, Universidade Federal de São Paulo – UNIFESP, campus Baixada Santista, SP, Brasil

² Professor de Graduação do Bacharelado Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia do Mar, Universidade Federal de São Paulo – UNIFESP, campus Baixada Santista, SP, Brasil

*Autor para correspondência, E-mail: gabriela.bartu@unifesp.br

Received: 02 March 2022 | Accepted: 14 July 2022 | Published online: 31 August 2022

Resumo: As mudanças climáticas são um grande desafio da atualidade. Sabe-se que o aumento da concentração de gases de efeito estufa, especialmente o CO₂, intensifica essa problemática. Esse aumento é decorrente de algumas atividades humanas, por exemplo, o consumo energético. Para entender essa relação causal, o presente estudo teve como objetivo aplicar o modelo de causa e efeito DPSIR (*Drivers – Pressures – State – Impact – Response*) com foco nas respostas tecnológicas que favorecem a redução da emissão do CO₂ e a transformação do mesmo em produtos com valor agregado. Nesse caso, foi utilizado uma busca bibliográfica sistêmica nas bases de dados de artigos científicos. Com a aplicação do DPSIR foi possível visualizar de forma mais clara as forças motrizes que levam a emissão de CO₂, pressões no meio ambiente, mudança de estados, impactos e por fim, as respostas tecnológicas. As principais abordagens tecnológicas identificadas foram a captura e armazenamento de carbono (CCS) bem como sua utilização (CCUS), sendo este último relacionado a reciclagem do CO₂. Essa reciclagem pode ocorrer por diversas rotas químicas, como a fotocatalise de CO₂ que apresenta grande vantagem por não necessitar de adição energética em seu processo e a outra rota é a hidrogenação do CO₂ que permite obter uma variedade de produtos com finalidades energéticas distintas. Por fim, as mudanças climáticas são um desafio sistêmico que necessita de soluções seja do âmbito público, privado ou tecnológico que combinam e cooperam entre si, nesse sentido a aplicação do modelo DPSIR pode ser uma estratégia para os tomadores de decisão. Palavras chave: DPSIR, redução de CO₂, tecnologias climáticas

Abstract: Climate change is a major challenge today. It is known that the increase in the concentration of greenhouse gases, especially CO₂, intensifies this problem. This increase is due to some human activities, for example, energy consumption. To understand this causal relationship, the present study aimed to apply the DPSIR (*Drivers – Pressures – State – Impact – Response*) cause and effect model focusing on technological responses that favor the reduction of CO₂ emission and its transformation into value-added products. In this case, a systemic bibliographic search was used in the databases of scientific articles. With the application of the DPSIR, it was possible to visualize in a clearer way the driving forces that lead to the emission of CO₂, pressures on the environment, change of states, impacts and, finally, the technological responses. The main technological approaches identified were carbon capture and storage (CCS) as well as its use (CCUS), the latter being related to CO₂ recycling. This recycling can occur through several chemical routes, such as CO₂ photocatalysis, which has a great advantage because it does not require energy addition in its process and the other route is CO₂ hydrogenation, which allows obtaining a variety of products with different energy purposes. Finally, climate change is a systemic challenge that needs solutions whether public, private or technological that combine and cooperate with each other, in this sense the application of the DPSIR model can be a strategy for decision makers.

Keywords: DPSIR, CO₂ reduction, climate technologies

1. Introdução

Nas últimas décadas, a preocupação com as questões ambientais e o debate sobre esse assunto ganhou notoriedade na política, na educação, em setores públicos e privados. Segundo Giddens (2009) a mudança climática e o aquecimento global tornaram-se o centro do debate público como o maior desafio para o século XXI, tendo participação diária na mídia nacional e internacional. Isso se deu por conta da compreensão de alguns efeitos adversos ocasionados pelo aquecimento global, tais efeitos tendem a dificultar a capacidade de todos os países alcançarem o desenvolvimento sustentável (ONU, 2015). Além disso, o aquecimento global se associa a impactos negativos à sociedade, que repercutem tanto de forma direta como indireta nas atividades econômicas (PBMC, 2014).

Afim de discutir sobre o problema, em 1992 foi realizado um tratado internacional resultante da Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e o Desenvolvimento (CNUMAD) conhecido Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), com o objetivo de estabelecer políticas que reduzissem as emissões de GEE de uma forma que as atividades humanas não interferissem de modo intenso e direto nas mudanças climáticas. Desde esse momento, diversas mobilizações foram acontecendo, como por exemplo a aprovação do Protocolo de Quioto que deu ênfase a metas de redução das emissões de GEE e que ficou em vigência até 2020. O mais recente tratado internacional é o Acordo de Paris, adotado em 2015, durante a COP-21 que objetiva a redução de 60% das emissões de GEE por parte de 195 países participantes, sendo o Brasil, um signatário desse acordo.

Uma estratégia para atingir a meta do Acordo de Paris é através dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) proposto pela Organização das Nações Unidas (ONU) para que os países pudessem atingir o desenvolvimento sustentável. Esses ODS consistem em 17 objetivos direcionados aos países, empresas instituições e sociedade civil que buscam contemplar os aspectos sociais, econômicos e ambientais (Pacto Global, 2022), sendo que o ODS 13, que tem como principal objetivo “tomar medidas urgentes para combater a mudança climática e seus impactos” (Pacto Global, 2022), está diretamente relacionado ao tema em questão. No entanto, relacionados de forma indireta ao tema estão o ODS 7 – energia acessível e limpa; o ODS 9 – Indústria inovação e infraestrutura e o ODS 12 – Consumo e produção responsáveis.

Na prática, atingir os ODS é um grande desafio pois depende de um conjunto de esforços do setor público, instituições privadas e sociedade civil para propor e aplicar medidas mitigatórias, desenvolvimento tecnológico e inovações, afim de prevenir, compensar, melhorar ou adaptar as consequências negativas das mudanças climáticas (Pacto Global, 2022; IPCC, 2014). Do ponto de vista tecnológico, diversas abordagens são consideradas para reduzir as emissões dos GEE, especialmente o CO₂, como por exemplo a captura e armazenamento de carbono (do inglês *Carbon Capture and storage - CCS*), que captura o CO₂ de setores elétricos e industriais, e até mesmo da atmosfera. Vale ressaltar que, dependendo da origem do CO₂, há diferentes tecnologias para realizar o CCS (Rosa et al., 2021).

Uma outra opção que é potencialmente mais atraente em alguns aspectos, mas que também pode complementar o CCS é a captura e utilização de carbono (do inglês *Carbon Capture and Utilization - CCU*), que busca valorizar o CO₂ capturado por meio de sua utilização, seja de forma direta ou indireta (Kankeng et al., 2020). O uso direto envolve a utilização do CO₂ no seu estado puro ou adicionado a uma solução (Jarvis e Samsatli, 2018). Por outro lado, a utilização indireta do CO₂ se refere a conversão do gás em produtos químicos, materiais e combustíveis realizado por diferentes processos químicos e biológicos (Styring e Armstrong, 2011).

Para que essa conversão não gere impactos negativos ao meio ambiente e a sociedade, é necessário que seja realizada de forma sustentável, uma maneira de se fazer isso é por meio da química verde. Segundo Leonardão et al., (2003) este conceito de química busca diminuir a poluição antropogênica por meio da redução no uso de combustíveis fósseis, redução no consumo de energia, entre outros. Basicamente, a química verde consiste em 12 princípios sendo os principais: otimizar o uso de energia, utilização de matérias-primas de fonte renováveis e eficiência atômica. Neste último, busca-se maximizar a incorporação de todos os insumos utilizados durante o processo químico e o produto final, ou seja, reduzir os resíduos gerados em uma reação (Silva et al., 2005; Trost, 1991; Vision for Bioenergy and Biobased Products in the United States, 2006).

Segundo o Quinto Relatório Síntese do IPCC (2014) é evidente a influência humana no sistema climático, além disso, o relatório afirma que, as recentes emissões antropogênicas de gases de efeito estufa são as mais altas da história. Tendo isso em vista, é de suma importância compreender essa relação para que um gerenciamento eficaz seja proposto e estabelecido. No entanto, essas relações não são tão claras, por se tratar de assunto que envolve diversos agentes.

A estrutura DPSIR (do inglês *Drivers-Pressures-State-Impact-Response*), traduzido Forças motrizes - Pressões - Estado - Impacto - Respostas, é uma ferramenta a qual fornece uma visão mais clara acerca das questões ambientais, além de permitir um análise sequencial, ou seja, de causa e efeito sobre as relações entre as atividades humanas e seus impactos ambientais e socioeconômicos (Moss et al., 2021).

O modelo DPSIR originou-se a partir da estrutura Pressão-Estado- Resposta (do inglês *Pressure-State-Response (PSR)*) utilizado pela OCDE em 1993 para avaliação do desempenho ambiental, que por sua vez teve base da estrutura desenvolvida pelo *Statistics Canada* em 1979, chamada Estresse-Resposta (do inglês, *Stress-Response (SR)*). No início, a estrutura SR tinha como objetivo levantar respostas apenas no âmbito social e ambiental (Gari et al., 2015). Contudo, o modelo DPSIR foi uma evolução complementar aos modelos de análises causais.

A análise do DPSIR se inicia a partir dos *drivers* (força motriz), essas forças motrizes são fatores antropogênicos, como por exemplo, crescimento populacional, adensamento populacional na região costeira, desenvolvimento econômico e industrial (Newton e Weichselgartner, 2014). É importante ressaltar que, esses fatores antropogênicos estão relacionados às necessidades humanas, por exemplo, a indústria vem para suprir a necessidade por consumo de alimentos, tecnologia, equipamento, dentre outros. Sendo assim, as forças motrizes podem partir de três aspectos (sociais, econômicos ou ambientais) que por sua vez, exercem *pressões* sobre o meio ambiente, em função disso, ocorrem mudanças nos parâmetros ambientais, como alteração na concentração de um determinado contaminante proveniente de um efluente doméstico, o que gera pressões ao meio ambiente. Consequentemente, essas pressões colaboram para a mudança do estado natural do ambiente, que por sua vez leva a impactos que podem fomentar respostas, sejam estas, ações políticas, medidas de gestão ou inovações tecnológicas direcionadas as forças motrizes, pressões, estados ou impactos da mesma maneira (Lewison et al., 2016; Svartad et al., 2008). A Figura 1 ilustra a estrutura DPSIR em sua forma mais básica.

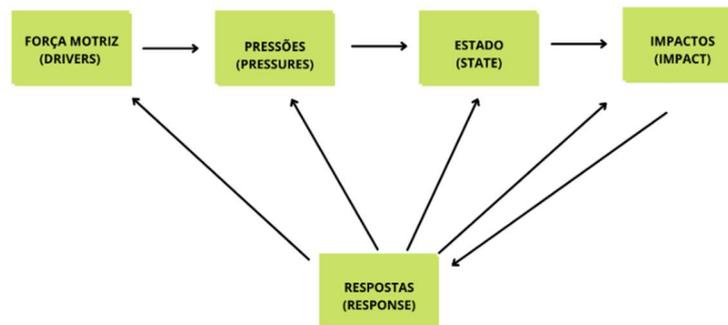


Figura 1. Estrutura DPSIR Fonte: Adaptado Svarstad et al., (2008).

Diversos autores utilizaram a estrutura DPSIR para investigar as relações de causa e efeito entre as atividades antrópicas e seus impactos ambientais e socioeconômicos, como por exemplo, Miranda et al., (2019) que realizou o estudo sobre a poluição de microplásticos através de uma análise DPSIR (*Microplastics in the environmental: A DPSIR analysis with focus on the responses*). A estrutura DPSIR também foi aplicada em um estudo que investigou os impactos das mudanças climáticas nos serviços ecossistêmicos, por Moss et al., (2021) (*Investigating the impacts of climate change on ecosystem services in UK agro-ecosystems: An application of the DPSIR framework*). Os estudos citados mostram que a estrutura DPSIR auxilia no entendimento do contexto estudado em cada pesquisa. Além disso, de acordo Ballantyne et al., (2015); Holman et al., (2008); Omann e Stocker (2009); Rounsevell et al., (2010) o DPSIR é adequado para analisar as mudanças climáticas, uma vez que pode fornecer percepções para além da dimensão ambiental.

Diante disso, este estudo aplicou a estrutura DPSIR com foco nas respostas tecnológicas que favorecem a redução da emissão do CO₂ à atmosfera e a transformação do mesmo em produtos com valor agregado.

2. Metodologia

O presente estudo foi realizado por meio de revisão bibliográfica de caráter analítico a respeito da aplicação do modelo de DPSIR no cenário das mudanças climáticas. A coleta de dados foi obtida através de quatro bases de dados: *Scientific Electronic Library Online (SCIELO)*, *Google Scholar*, *ScienceDirect* e *Scopus Preview*. Foi definido como critério de inclusão, artigos que apresentassem descritores como: DPSIR, tecnologias climáticas e redução de CO₂.

3. Resultados e discussões

3.1 Mudanças climáticas: uma análise DPSIR

Uma análise DPSIR foi usada para organizar as principais informações sobre as mudanças climáticas, sendo revisado as informações referentes as forças motrizes, pressões, estados, impactos e respostas. As respostas encontradas foram organizadas em uma seção separada (3.2), uma vez que, essa revisão focou especialmente nas respostas tecnológicas. A Figura 2 resume os resultados desta análise e pode ser usada como esquema de apoio à discussão restante.

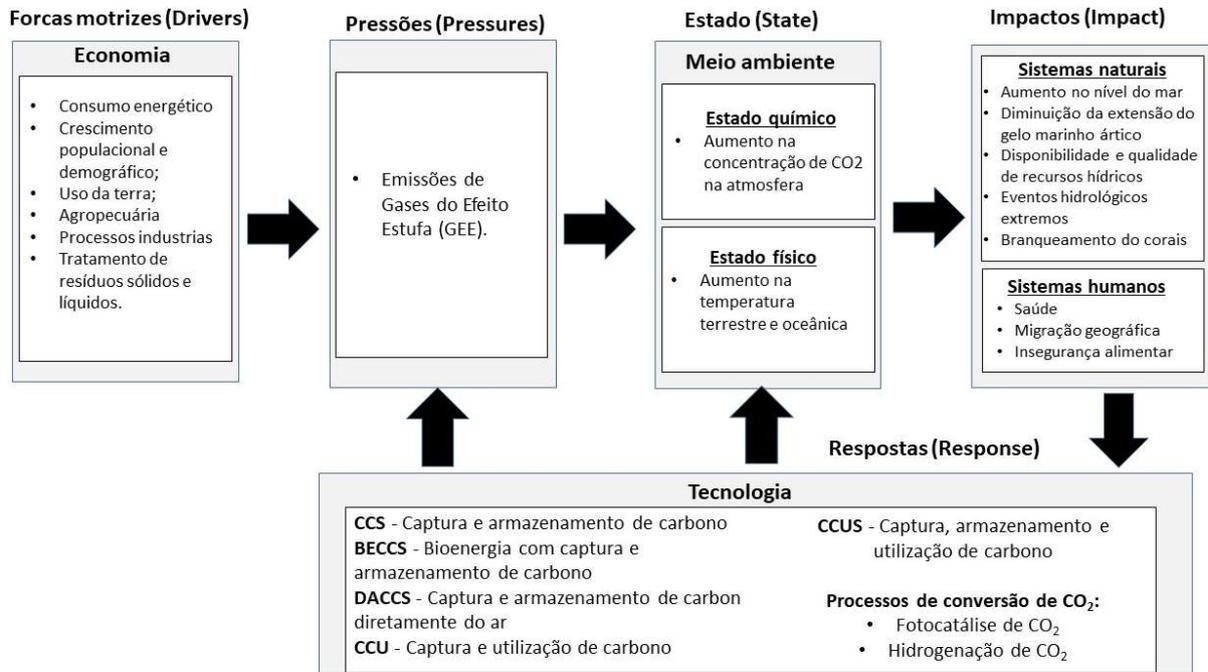


Figura 2. Avaliação das mudanças climáticas integrada a estrutura DPSIR

3.1.1 Forças motrizes

De acordo com Nobre (2012) o aquecimento global se caracteriza como o aumento da temperatura média dos oceanos e da camada de ar próxima à superfície da Terra. Isso ocorre principalmente em decorrência do aumento da concentração de Gases de Efeito Estufa (GEE). Segundo o Protocolo de Quioto os principais GEE são: CO₂, N₂O, CH₄, CFCs, HFCs, PFCs, SF₆. Dentre esses gases os mais relevantes são CO₂, N₂O, CH₄, devido ao volume das emissões lançadas à atmosfera (NASA, 2021).

Esses gases são essenciais para a manutenção da vida na Terra, uma vez que mantêm o equilíbrio climático do planeta. Entretanto, evidências científicas mostram que estão sendo inseridos à atmosfera em um ritmo muito acelerado em um curto espaço de tempo, o que dificulta a remoção por processos naturais. Consequentemente, cria-se um reservatório de gás de longa duração tanto na atmosfera quanto nos oceanos, que afeta o equilíbrio climático da Terra (NASA, 2021).

Essa aceleração, iniciou-se desde a era pré-industrial, como consequência do crescimento econômico e demográfico, além disso, a partir da era industrial (1850) a humanidade passou a utilizar intensamente os combustíveis fósseis para movimentar máquinas e desde então, as necessidades de uma sociedade moderna só potencializaram as emissões de origem antrópica (IPCC, 2014; Global Carbon Atlas, 2021). Segundo o IPCC (2014), metade das emissões antrópicas acumuladas entre 1750 e 2011 ocorreram nos últimos 40 anos.

No contexto global, o consumo energético é o principal responsável pelas emissões de GEE, visto que, utiliza-se muito a queima de carvão para geração de energia elétrica e queima de combustíveis fósseis para movimentar veículos e o no uso industrial (WRI, 2020). Contudo, as emissões provenientes do consumo energético incluem tanto as emissões diretas da queima de combustíveis fósseis quanto as emissões indiretas de atividades como o uso de eletricidade.

Esse cenário de consumo de energia elétrica é impulsionado com a Era da informação e conectividade, uma vez que aumenta a demanda de energia elétrica (Global Carbon Atlas, 2021). Além disso, a competitividade dos países e a qualidade de vida de seus cidadãos é influenciada de forma intensa pela a energia (Tolmasquim et al., 2007), resultando em um aumento das emissões de GEE relacionada a este setor.

No Brasil, a realidade é outra, as atividades correspondentes aos setores de Mudança no Uso da Terra, como por exemplo, o desmatamento e as queimadas, são responsáveis pela maior parte das emissões do país. De acordo com os dados fornecidos pelo SEEG Brasil (2020), o desmatamento, em especial o da Amazônia, puxou o crescimento das emissões nacionais no ano de 2019.

A agropecuária vem em segundo lugar, as emissões diretas deste setor estão relacionadas ao rebanho bovino. Seguindo, o setor de energia, que teve um discreto aumento de 1,1% de 2018 para 2019 em decorrência do aumento do consumo de energia elétrica, que levou ao acionamento de termelétricas a gás mesmo num cenário mediano de precipitação e o uso de diesel em transportes de carga. Por fim, há uma pequena parcela de emissões oriunda dos processos industriais e resíduos (SEEG 8, 2020).

Contudo, conforme descrito anteriormente, o consumo energético, o uso da terra, a agropecuária, os processos industriais e o tratamento de resíduos e efluentes são atividades humanas responsáveis pelas emissões de GEE à atmosfera em diferentes proporções.

3.1.2 Pressões

No contexto global, o consumo energético é o maior responsável por essas emissões sendo 73% das emissões de GEE em todo o mundo. Ademais, outros setores fazem-se responsáveis pelas emissões, como a agropecuária que contribui com 12%; uso da terra (6,5%) processos industriais de produtos químicos, cimento e outros (5,6%); e resíduos, incluindo aterros e águas residuais (3,2%) (WRI, 2020). A Figura 3 apresenta de forma visual as emissões de GEE por setor econômico.



Figura 3. Emissões de gases do efeito estufa por setor econômico. Fonte: Adaptado WRI (2020).

De acordo com o IPCC (2014), a emissões anuais antropogênicas só aumentaram desde 1970, sendo que em 2010 a humanidade atingiu o maior volume de emissões da história $49 (\pm 4,5) \text{ Gt}^1 \text{CO}_{2\text{eq}}^2$. 78% do aumento total dessas emissões foi oriunda da combustão de combustíveis fósseis e processos industriais, sendo o CO_2 o principal GEE.

Historicamente, houve uma ascensão nas emissões globais, antes da Revolução Industrial, as emissões eram relativamente baixas com um crescimento lento até meados do século XX. Em 1950, 6 bilhões de toneladas de CO_2 foram lançadas à atmosfera, posteriormente, esse número só se multiplicou (Ritchie e Roser, 2020).

¹ Gt: Unidade de medida que representa Gigatonelada, ou seja, 1 Gigatonelada [Gt] = $1,0 \times 10^9$ Tonelada métrica [T].

² $\text{CO}_{2\text{eq}}$: Medida internacional que expressa a quantidade de gases de efeito estufa em termos de equivalentes a quantidade de dióxido de carbono.

Ao longo das últimas décadas, as emissões totais de GEE tendeu ao crescimento, entretanto, em alguns momentos da história esse crescimento declinou por um pequeno período e retornou ao crescimento, conforme mostra a Figura 4.

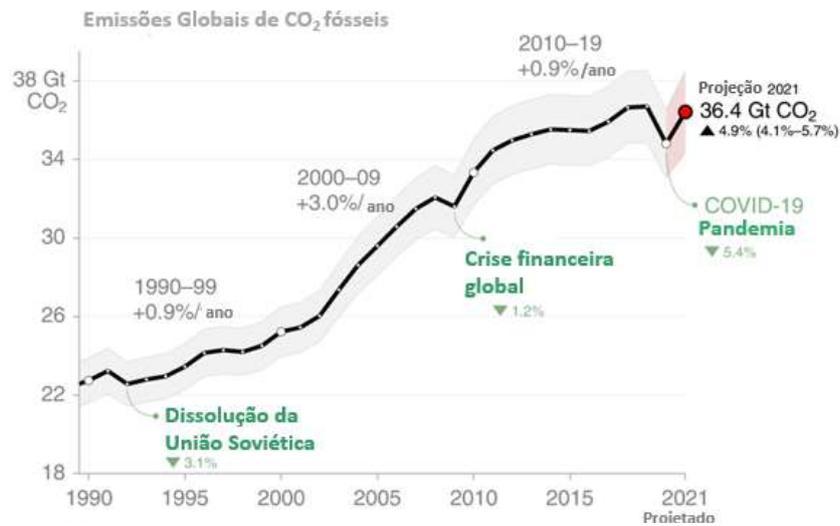


Figura 4. Emissões globais de CO₂ fóssil. Fonte: Adaptado de *Global Carbon Budget* (2021).

Alguns momentos históricos como crises do petróleo e financeira e até mesmo a dissolução da União Soviética, afetaram as emissões de CO₂. O momento mais recente enfrentado pela humanidade que afetou diretamente essas emissões foi a pandemia do novo coronavírus (COVID-19) que forçou uma paralisação repentina das principais atividades econômicas, a fim de evitar a disseminação do vírus. No início da paralisação, com as restrições ao transporte aéreo internacional e à industrialização, as emissões de CO₂ reduziram em 5,4% quando comparado a 2019 (Global Carbon Budget, 2021).

Entretanto, há possibilidade dessa redução ser temporária, ou seja, a partir do momento em que os países começarem a retomar a economia as emissões voltarão a crescer (Kumar et al., 2022). Segundo Global Carbon Budget (2021), as emissões irão tender aos níveis pré-COVID-19, com uma projeção de crescimento 4,9%, ou seja, 34,4 Gt CO₂.

Adiante, a representatividade dos países com relação às emissões de CO₂ também foi se modificando ao longo do tempo, a Europa e os Estados Unidos dominavam as emissões em meados do século XX, contribuindo com cerca de 90% das emissões mundiais. No entanto, esse cenário mudou significativamente nas últimas décadas com a Ásia, em específico a China, sendo a principal emissora de GEE do mundo (Ritchie e Roser, 2020). De acordo com o Global Carbon Atlas, em 2020 as emissões mundiais chegaram a 34.807 MtCO₂, e no ranking dos 5 países que mais contribuíram para este resultado estão: China (10.668 MtCO₂), Estados Unidos (4.713 MtCO₂), Índia (2.442 MtCO₂), Rússia (1.577 MtCO₂) e Japão (1.031 MtCO₂). O Brasil ficou na 12ª posição e emitiu cerca de 447 MtCO₂ (Andrew et al. 2021).

3.1.3 Estados

Com o objetivo de proporcionar uma visão geral da condição ambiental a partir das mudanças climáticas, será abordado a seguir de forma quantitativa os fenômenos químicos (concentração de CO₂) e fenômenos físicos (temperatura terrestre e oceânica, aumento do nível do mar, derretimento das geleiras).

Em relação a concentração de dióxido de carbono, de acordo com os dados mais recentes da NOAA (2021) *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) os níveis de CO₂ atmosférico são os mais altos em 650.000 anos. Em outubro de 2021 a concentração média de CO₂ na atmosfera atingiu o valor de 417,28 partes por milhão (ppm) (NASA, 2021).

Dando sequência, muitas pesquisas conduzidas por pesquisadores ao redor do mundo documentaram aumentos de temperatura na superfície da Terra, bem como na atmosfera e nos oceanos. Desde 1950 a temperatura global cresceu de forma significativa e atingiu um dos patamares mais altos dos últimos 2.000 anos. A média da temperatura global terrestre no ano de 2020 foi de 1,2° C acima das temperaturas da era pré-industrial (1880) (NASA, 2021).

O cenário atual dos oceanos também é de aquecimento, a temperatura média dos oceanos, especialmente os primeiros 2.000 metros de profundidade, atingiu os níveis mais quentes da história (sendo considerado dados desde 1955) (NASA, 2021). Em 2020 a anomalia de calor foi de 326 (± 2) zettajoules

(1ZJ = 1021 Joules) (NOAA, 2020). Esse estado implica diretamente na regulação climática da Terra, pois os oceanos possuem um papel importante nesse sentido, uma vez que são responsáveis por absorver e armazenar cerca de 93% do excesso de energia térmica (calor) da atmosfera. Toda essa interação com a atmosfera terrestre faz com que o calor interno da água aumente (Rhein e Rintoul, 2013).

3.1.4 Impactos

De acordo com o IPCC (2018), os impactos são projetados em sistemas tanto naturais e humanos que afetam ecossistemas e comunidades em todo o mundo. Com relação ao aumento da temperatura dos oceanos, é possível dizer como consequência, o aumento no nível do mar, uma vez que a água do mar se expande à medida que se aquece e aumenta o seu volume. Atualmente, a taxa de variação do nível do mar aumenta em 3,4 milímetros por ano. Aliado a esse fator, está o derretimento da extensão de gelo marinho ártico, que ocorre em uma taxa de 13% por década em relação à média de 1981 a 2010 (NASA, 2021).

Além disso, o IPCC (2018), aponta como principais impactos a disponibilidade e qualidade dos recursos hídricos, e embora as mudanças físicas no fluxo e escoamento continental já haviam sido observadas por conta do crescimento substancial das populações, atividades industriais e agrícolas, as mudanças climáticas, poderá intensificar ou compensar regionalmente a pressão populacional.

Segundo *United Nations* (2021), em muitos lugares a disponibilidade de água está se tornando menos previsível, sendo que essa escassez é potencializada com o aumento da incidência de enchentes que por sua vez pode destruir a infraestrutura de saneamento e contaminar as fontes de recurso hídrico no local. Nesse contexto, o estresse hídrico afeta de forma negativa a saúde e a produtividade das pessoas.

Dando continuidade, esse mesmo relatório indica como impacto, os eventos hidrológicos extremos como inundações e secas. Publicações recentes pautadas em observações e modelagem afirmaram que as emissões humanas aumentaram significativamente a probabilidade de anos de seca na região do Mediterrâneo (IPCC, 2014).

Do ponto de vista ecossistêmico, a mudança no clima contribui de forma significativa ao branqueamento dos corais por conta da acidificação dos oceanos, isso representa perda de toda biodiversidade local que depende dos corais para subsistência (NASA, 2021).

Por fim, as mudanças climáticas afetam os sistemas humanos, impacto a saúde dos seres humanos tanto de forma direta através das ondas de calor, eventos climáticos extremos, quanto indireta através da migração geográfica, escassez de alimentos e insegurança alimentar (IPCC, 2014).

3.1.5 Respostas tecnológicas à mudança do clima

Quando o CCU é integrado ao CCS, torna-se CCUS (captura, utilização e armazenamento de carbono) que desempenha um papel importante na indústria, pois em alguns processos industriais e de transformação de combustíveis, o CCUS se torna economicamente viável para reduções de emissões em grande escala (IEA, 2019).

Conforme descrito anteriormente, o tratado internacional mais recente é o Acordo de Paris que envolve 195 países e que entrou em vigor em 2016 e substitui o Protocolo de Kioto a partir de 2020. Um dos principais pontos acordados neste tratado foi fixar um limite de 1,5°C para o aumento da temperatura global, além disso, o acordo buscou trazer incentivos financeiros para o desenvolvimento de tecnologias que beneficiam o meio ambiente, propor recomendações quanto à adaptação de países signatários às mudanças climáticas, principalmente os menos desenvolvidos, de modo a reduzir a vulnerabilidade a eventos extremos (Farias e Fávoro, 2011).

Segundo IPCC (2018), para limitar o aquecimento global a 1,5°C é necessário transições rápidas e de longo prazo em energia, terra, infraestrutura urbana (incluindo transporte e edificações) e sistemas industriais. Além disso, o relatório demonstra a necessidade de redução em 45% das emissões antrópicas em relação aos níveis emitidos entre os anos 2010 a 2030, atingindo assim, o valor líquido zero por volta de 2050. Essa necessidade de redução de emissões vem da constante dependência da queima de combustíveis fósseis para demandas energéticas que força o desenvolvimento de diferentes tecnologias de baixo carbono para redução das emissões (Tapia et al. 2018). Todas essas vias tendem ao uso de Remoção de Dióxido de Carbono (*Carbon Dioxide Removal* – CDR), que podem resultar em uma redução de 39% nas emissões anuais de CO₂ até 2035 (IEA, 2013).

As abordagens tecnológicas já existentes de CDR incluem captura e armazenamento de dióxido de carbono (do inglês *Carbon Capture and storage* - CCS); bioenergia com CCS (BECCS) e captura e armazenamento diretamente do ar (*Carbon Capture and Storage Directly the Air* - DACCS), captura e

utilização de carbono (do inglês *Carbon Capture end Utilization – CCU*) intemperismo intenso e alcalinização dos oceanos. A aplicabilidade dessas tecnologias depende de alguns fatores como, maturidade, potenciais custos e riscos associados à sua implantação (IPCC, 2018).

3.1.5.1 Análise bibliométrica sobre o tema

Para compreender qual a contribuição do conhecimento científico derivado das publicações na área das tecnologias descritas anteriormente, foi realizado uma pesquisa bibliométrica a partir da base de dados Scopus. A lista de publicações foi gerada a partir desta base de dados, pois esta é uma das mais relevantes do mundo. Duas tendências baseadas nas respostas tecnológicas à mudança do clima foram analisadas:

- Quantidade de publicações ao longo das últimas décadas relacionados as tecnologias CCS e CCU e quantidade de publicações por região.
- Quantidade de publicações ao longo das últimas décadas relacionados a reciclagem do CO₂ e quantidade de publicações por região.

A Tabela 1 mostra as palavras – chaves utilizadas para pesquisar na base de dados, assim como o ano de referência. Além disso, a tabela apresenta a quantidade de publicações encontradas com esses critérios.

Tabela 1. Critérios utilizados para realização da pesquisa bibliométrica (Busca feita em janeiro de 2022).

Palavras-chaves	Ano de referência	Quantidade de publicações
CCS* and CCU**	2000 - 2021	89
CO ₂ and recycling	2000 - 2021	382

Fonte: Autoria própria. * *Carbon Capture and Storage*; ** *Carbon Capture and Utilization*.

Para a primeira tendência, é possível perceber que houve um crescimento considerável de publicações sobre o tema desde 2011, sendo os países que mais contribuíram com esse resultado: Estados Unidos; China e Reino Unido. A Figura 5 e a Figura 6 demonstram esse cenário.

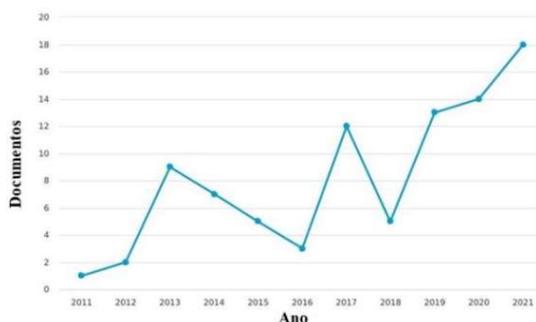


Figura 5. Quantidade de publicações relacionadas a CCS e CCU por ano. Fonte: Base de dados Scopus (2022).

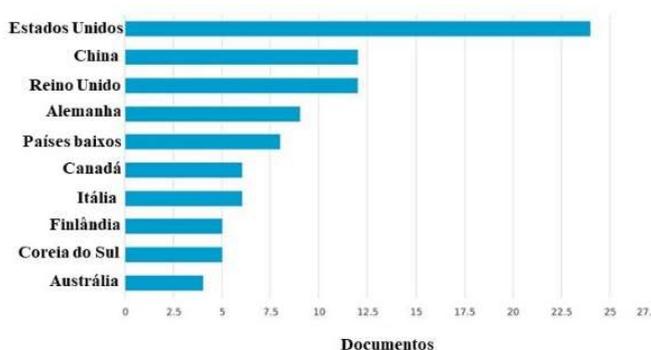


Figura 6. Quantidade de publicações relacionadas a CCS e CCU por país/território. Fonte: Base de dados Scopus (2022).

Para as pesquisas relacionadas a reciclagem de CO₂ é possível dizer que o número de publicações teve um crescimento acelerado a partir de 2016 até 2019. Neste caso, os países que mais contribuíram foram: China, Estados Unidos e o Japão, consecutivamente. A

Figura 7 e a Figura 8 demonstram esse cenário.

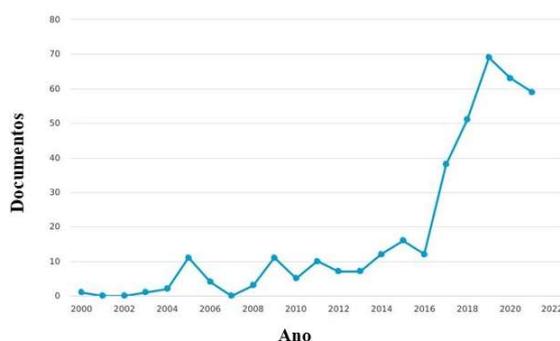


Figura 7. Quantidade de publicações relacionadas a reciclagem do CO₂ por ano. Fonte: Base de dados Scopus (2022).

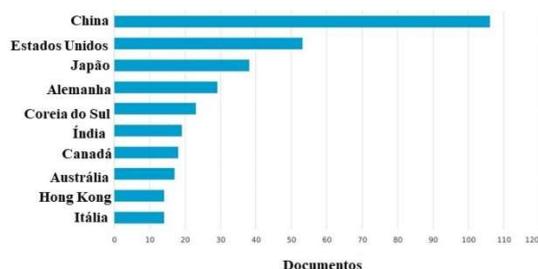


Figura 8. Quantidade de publicações relacionadas a reciclagem do CO₂ país/território. Fonte: Base de dados Scopus (2022).

Portanto, conclui-se que, o aumento na produção científica relacionada às tecnologias CCS/CCU e reciclagem do CO₂ mostra um crescente interesse da comunidade global sobre o tema, sendo a China e os Estados Unidos os principais países que publicam sobre o assunto. Curiosamente, esses países são os principais responsáveis pelas emissões de GEE nos dias atuais.

3.2 Tecnologias de captura e armazenamento de CO₂

A tecnologia de captura e armazenamento de dióxido de carbono (Carbon Capture and Storage-CCS) é considerada internacionalmente como uma relevante estratégia capaz de reduzir em cerca de 19% as emissões totais de CO₂ provenientes da produção de ferro e aço e uma redução de 48% na produção de cimento até 2050. Essas duas reduções juntas representam uma redução de cerca de 18GtCO₂ (IEA, 2016). Outrossim, essa tecnologia é vista como um importante acréscimo tecnológico ao portfólio de abordagens às mudanças climáticas (IPCC, 2005; IPCC, 2007), uma vez que, reduz as emissões provenientes de indústrias de intensiva geração e consumo de energia, além do remover o carbono na atmosfera (Global CCS Institute, 2021). Além disso, o CCS é uma das tecnologias potencialmente escaláveis, que pode proporcionar uma economia no consumo energético e aumentar o uso de fontes renováveis (Pires et al., 2011).

O CCS consiste em separar e capturar as emissões de CO₂ produzidas a partir de grandes fontes pontuais, como por exemplo, poços de gás natural, usinas termoeletricas ou em processos industriais, e realizar o transporte por meios de dutos até um local geológico favorável (longe da atmosfera) para armazenamento permanente (IPCC, 2005).

Há três principais tecnologias que estão disponíveis para serem implementadas em grandes fontes pontuais (Raza et al., 2019), sendo essas, Pós-conversão, Pré-conversão e Oxidcombustão (Franca e Azapagic, 2015).

A captura Pós-conversão refere-se à separação de CO₂ dos fluxos de gases residuais resultantes da conversão da fonte de carbono em CO₂, essa fonte se origina a partir da combustão de combustíveis fósseis ou digestão de lodo de água residuais (Franca e Azapagic, 2015).

É possível aplicá-la em diversas indústrias, como usinas de energia, produção de óxido etileno, cimento, aço, ferro e adoçamento do gás natural (IPCC, 2005). Vale ressaltar que, quando a fonte de carbono é à base de combustíveis fósseis, biocombustíveis ou biomassa (submetido a queima na presença de oxigênio e nitrogênio), a captura pós-conversão, é conhecido como pós-combustão (Ketzer et al., 2016; Miranda et al., 2018).

O processo de captura por pós-combustão resulta em nitrogênio (N₂) e o dióxido de carbono (CO₂) que se encontra em baixa concentração (3-15% vol.) (Ketzer et al, 2016). Vários métodos podem ser utilizados para separar o CO₂ dos outros gases, atualmente, os mais utilizados e comercialmente disponíveis

são baseados em absorção em solventes a base de amina, adsorção por pressão e oscilação de vácuo, além de separação por membranas (Franca e Azapagic, 2015; Kohl e Nielsen, 1997).

Já a Captura Pré-conversão/ Pré-combustão captura o CO₂ proveniente de um co-produto indesejado de uma reação anterior ao processo de conversão (Franca e Azapagic, 2015). No caso de usinas de energia como termoeletricas ou refinarias a captura acontece antes da geração de energia e calor. Este processo ocorre em três etapas, primeiro, o combustível (carvão ou biomassa) é convertido em uma mistura chamada SYNGAS (gás de síntese) que consiste em hidrogênio (H₂) e monóxido de carbono (CO).

Posteriormente, acontece uma reação por vapor (reação de deslocamento) que objetiva transformar o CO em CO₂, para então produzir hidrogênio. Por fim, deve ocorrer a separação do CO₂ e hidrogênio. O hidrogênio isolado pode ser utilizado em diversos fins, como por exemplo para produção de energia ou combustíveis (Ketzer et al, 2016; Miranda et al., 2018).

Por último há a tecnologia de Oxi-combustão ou Combustão com Oxigênio, o combustível é queimado com oxigênio puro, o que resulta em CO₂ (em elevada concentração, maior que 80%) e vapor d'água, que podem ser separados por condensação (Ketzer et al, 2016). Uma desvantagem dessa tecnologia é a necessidade da separação prévia do oxigênio do ar, geralmente, essa separação ocorre por um processo criogênico, o qual necessita de um intenso consumo energético (Ketzer et al, 2016; Miller, 2017).

Depois de capturado, o CO₂ é comprimido e enviado para ser armazenado no solo, no oceano ou como um carbonato mineral. A primeira opção, conhecida como armazenamento geológico que se dá em formações geológicas, bem como campos de petróleo e gás (não exploráveis); leitos de carvão e profundas formações salinas (IPCC, 2005; Saeedi e Rezaee, 2012). A escolha de um local geológico adequado depende de alguns parâmetros como por exemplo, as propriedades físicas do CO₂, bem como sua mudança de fase (gás, líquido, sólido e supercrítico³) sob diferentes condições de pressão e temperatura (Raza et al., 2019). No entanto, quando se trata de injeção em formações geológicas localizadas a 800 m, o CO₂ se encontra em um estado de fluido supercrítico devido ao significativo aumento de pressão e temperatura (Raza et al., 2016). A Figura 9 apresenta o CCS de forma esquematizada.

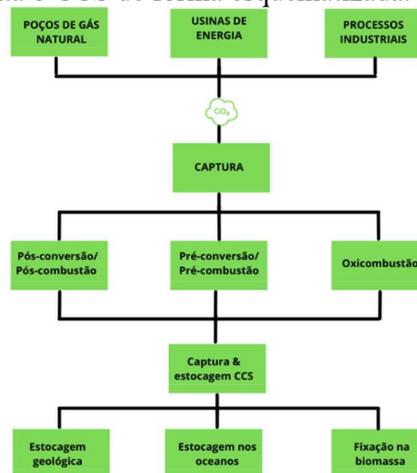


Figura 9. Panorama geral sobre captura e estocagem de carbono - CCS. Fonte: Adaptado de Miranda et al. (2018).

Quando o CCS é instalado em fontes pontuais de geração de energia proveniente de biomassa, é conhecido como bioenergia com CCS (BECCS) (Shahbaz et al., 2021). Essa implementação pode reduzir em 83% as emissões de CO₂ durante o ciclo de vida de uma usina que produz energia a partir do carvão (SHING et al. 2015). Uma vez que o CO₂ é capturado e armazenado em formações geológicas é atingido as emissões negativas do gás (POUR, 2019). O BECCS consiste em, capturar o CO₂ atmosférico por meio de plantas e árvores, que são colhidas como biomassa. Em seguida, a biomassa pode ser queimada para gerar calor e eletricidade. O CO₂ liberado nessa combustão é capturado com a utilização do CCS (Gambhir e Tavoni, 2019).

Embora a tecnologia de bioenergia associada a captura e armazenamento de CO₂ (BECCS) seja uma estratégia importante para atingir as emissões negativas, há dúvidas quanto a viabilidade para alcançar as remoções líquidas necessárias para mitigar as mudanças climáticas, uma vez que é necessário a disponibilidade de terras para florestamento, água e fertilizantes para o crescimento da biomassa (Gambhir

³ Supercrítico: Fluido supercrítico é qualquer substância em uma temperatura e pressão acima do seu ponto crítico, no qual não existe mais distinção entre as fases líquida e gasosa. Ele sofre efusão através de sólidos como um gás, e pode dissolver materiais como um líquido.

e Tavoni, 2019). Nesse contexto, outras vias alternativas de mitigação têm sido exploradas, como a captura e sequestro direto de carbono no ar (DACCS), que é outra abordagem que integra o CCS.

Ainda que o CO₂ não seja altamente concentrado na atmosfera, distribuído em um pouco mais de 400 partes por milhão em volume (ppmv), a tecnologia DACCS permite remover quantidades significativas a cada ano. Basicamente, o DACCS capta o CO₂ por meio de produtos químicos como sorventes, que podem ser sólidos ou soluções básicas aquosas (Gambhir e Tavoni, 2019; Keith et al., 2018).

Os sorventes sólidos oferecem alguns benefícios como, baixo consumo energético e operacionais, além de possibilitar a aplicabilidade em uma ampla gama de escalas. Entretanto, os desafios da viabilidade de instalação encontram-se na necessidade de construir uma estrutura grande a baixo custo, além de manter a qualidade e desempenho do sorvente que está em contato com o ar ambiente impuro. Já os sorventes aquosos oferecem a vantagem de poder operar continuamente, além disso, sua superfície (líquida) pode ser constantemente renovada, o que permite uma vida mais prolongada do contator, porém as desvantagens incluem complexidade no sistema de regeneração e perda de água em ambientes secos (Keith et al., 2018).

Em 2021, de acordo com o relatório publicado pelo Global CCS Institute (Global Status of CCS 2021), haviam 135 instalações comerciais de CCS distribuídas pelo mundo com capacidade de captação de 149,3 milhões de toneladas por ano (Mtpa). Essa capacidade obteve um crescimento de cerca de 30% comparado ao ano de 2017, uma vez que essa tecnologia se tornou estratégia tanto do setor privado quanto público para alcançarem o net zero (emissões líquidas de CO₂ zero). No topo do ranking de países que possuem instalações de CCS estão os Estados Unidos (36 instalações) seguido do Reino Unido (8 instalações), Holanda (5 instalações) e Bélgica (4 instalações). Atualmente, no Brasil há uma instalação comercial de CCS operando desde de 2011, localizada no Campo de Petróleo do Pré-Sal na Bacia de Santos/SP e um projeto de injeção de CO₂ na Bahia (Global CCS Institute, 2022).

O CCS é uma tecnologia madura que pode ser implementada em escala comercial, no entanto, a transição para sua implantação generalizada continua a ser um desafio, uma vez que essa transição requer a combinação de apoio político e investimentos financeiros, capaz de garantir um retorno atraente ao investimento (Dowell et al., 2017). Além disso, o uso dessa tecnologia implica no aumento do consumo de energia elétrica no processo de captura e compressão (Tapia et al. 2018).

Por conta do custo elevado do CCS, faz-se necessário incentivos econômicos, mecanismos de precificação de CO₂ e a valoração do CO₂ capturado para que essa tecnologia seja de fato implantada. Neste contexto, o CCU (Captura, utilização de Carbono) é frequentemente mencionado como uma estratégia tecnológica mais favorável, pois além de permitir a redução de combustíveis fósseis ela também a reduz as emissões ao mesmo tempo em que gera receita aos investidores (Tapia et al. 2018).

3.3 Tecnologias de transformação e reciclagem do CO₂

O CCU consiste basicamente em capturar o CO₂, agregar valor a ele, convertê-lo em combustível ou produtos químicos valiosos para que sejam utilizados em diversas aplicações. Essa tecnologia integrada ao CCS, permite a redução de custos incorporados na instalação da infraestrutura do CCS, tornando-se um sistema de captura, utilização e armazenamento de CO₂ (CCUS) (Tapia et al. 2018). Além disso, essa tecnologia promove uma economia circular, através de incentivos à simbiose industrial de indústrias que possuem grande volume de emissão de CO₂ e armazenamento de energia renovável (produto da transformação do CO₂) (Saeid et al., 2021).

Neste sistema as principais opções de utilização do CO₂ consistem em: I) uso como fluido de injeção na recuperação avançada de petróleo (Dowell et al., 2017), e II) como matéria prima química para a produção de produtos químicos com valor agregado. Esse último, Aresta e Dibenedetto (2010) ressalta que, o CO₂ capturado pode ser utilizado tanto na síntese de combustível, como por exemplo o metanol, como na síntese de material como os polímeros.

A utilização do CO₂ em processos industriais ainda é escassa, porém com grande potencial. Atualmente, a maior parte do CO₂ utilizado está associado a indústria alimentícia (carbonização de bebidas), produção de ureia, metanol, formaldeído e de dimetilcarbonato (Miranda et al., 2018). Dependendo do produto final, diversas rotas são aplicadas na conversão do CO₂, por exemplo, a rota comercial da ureia consistem em uma reação de CO₂ com amônia em temperaturas e pressão elevadas, a do metano é conhecida como síntese Sabatier, a hidrogenação do CO₂ para produção do metanol e o dimetil carbonato (DMC), a fotocatalise do CO₂, entre outros (Miranda et al., 2018; Styring e Armstrong, 2011). Essas duas últimas rotas serão abordadas na sequência.

A fonte de origem do CO₂ é um importante fator que influencia a aplicabilidade do mesmo, por exemplo, no processamento de alimentos e na síntese química o CO₂ capturado dos gases de combustão

não é utilizado (devido a presença de outros gases) ao menos que tenha um processo disponível de purificação no sistema de CCUS. Geralmente, o CO₂ com um maior grau de impureza é utilizado na injeção de poços de petróleo, o que resulta no sequestro parcial permanente do gás, ou seja, utilização e armazenamento de forma simultânea (Tapia et al. 2018).

Um dos obstáculos na implantação a larga escala da tecnologia de utilização do CO₂ é o fato do CO₂ se encontrar no estado mais baixo de energia, ou seja, qualquer processo de conversão química da molécula necessita de entrada de energia, já que os processos costumam ocorrer em altas temperaturas. Neste caso, prioriza-se a utilização de energias renováveis (solar, eólica, hídrica, biomassa, etc). Além disso, a demanda de mercado de um produto específico vai determinar sua produção a partir da captura do CO₂.

Styring e Armstrong, (2011), ressaltam que converter o CO₂ em produtos com alta demanda, como os combustíveis e polímeros, pode ser uma estratégia para viabilizar economicamente a implantação desta tecnologia. Essa conversão pautado nos princípios da química verde pode ser uma estratégia muito eficaz para o cumprimento do Acordo de Paris, uma vez que, ao produzir produtos químicos com valor agregado e com alta demanda comercial (por exemplo, o metanol), favorece a redução do CO₂, e o consumo de energias não renováveis ou combustíveis fósseis, além de manter o CO₂ como insumo e não como resíduo.

O reaproveitamento do CO₂ é algo bastante promissor, diversas estratégias têm sido propostas para realizar essa conversão, por exemplo, técnica com biomassa, que utilizam algas para capturar o CO₂ dissolvido na água; eletroquímico que reduz o CO₂ e o transforma em novos produtos, nesse caso, um potencial é aplicado em um eletrodo com o objetivo de gerar elétrons; fotoquímicos ou processos catalíticos, entre outros (Gothe et al., 2020). A seguir serão apresentados a conversão fotocatalítica e a hidrogenação do CO₂.

3.3.1 Transformação fotoquímica de CO₂

A transformação fotoquímica do CO₂ é uma técnica que utiliza fotocatalisadores para absorver a irradiação luminosa afim de realizar a redução de CO₂ em produtos químicos e combustíveis (por exemplo, o metanol – CH₃OH) (Yaashikaa et al., 2019).

O processo de redução fotocatalítica de CO₂ pode ser dividido em dois grupos: processo fotocatalítico homogêneo e heterogêneo. Na fotocatalise homogênea, os reagentes e o catalisador se encontram na mesma fase. Eventualmente, esse processo possui um catalisador, doador de elétrons e absorvedor de luz e sua aplicação é restrita devido as reações colaterais, reações de recombinação, entre outras (Yaashikaa et al., 2019).

Na técnica de fotocatalise heterogênea (os catalisadores se encontram em fases diferentes) são empregados semicondutores, que consiste em bandas de valência (BV) e bandas de condução (BC), que pode ser ativado por uma luz natural ou artificial. Além disso, esse processo pode ser dividida em três etapas principais: (1) absorção de luz, (2) separação de carga e (3) reações na superfície dos fotocatalisadores (Du et al., 2020).

Durante a etapa de absorção de luz, os fótons gerados a partir da ativação da luz são absorvidos, para que o processo fotocatalítico ocorra a energia de radiação solar deve ser igual ou superior à energia band gap (energia necessária para promoção de um elétron que se encontra na banda de valência para a de condução). Vale ressaltar que, essa etapa depende da morfologia e da estrutura dos catalisadores utilizados (Nogueira e Jardim, 1988; Yaashikaa et al., 2019). Em seguida, os elétrons que estão na banda de valência (BV) são excitados e promovidos à banda de condução (BC), o que ocasiona simultaneamente uma lacuna na banda de valência (Nogueira e Jardim, 1988). Nas etapas seguintes, os elétrons que passaram para o CB serão utilizados para a redução do CO₂, por outro lado, as lacunas presentes no VB serão utilizadas para a oxidação da água (Du et al., 2020). A Figura 10 apresenta uma representação esquemática do funcionamento da fotocatalise aplicada a um semicondutor.

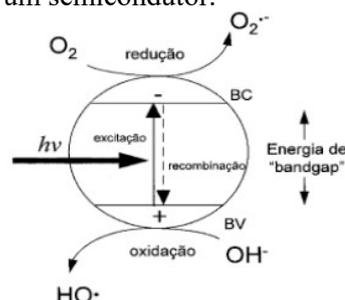


Figura 10. Representação esquemática da fotocatalise. Fonte: Sobrinho (2013).

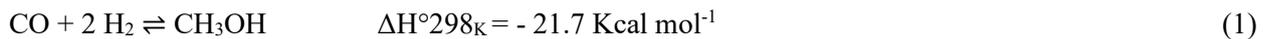
A transformação de CO₂ por fotocatálise é uma tecnologia emergente e sustentável, além de ser eficiente, uma vez que não causa nenhum efeito ao meio ambiente, pressão considerável, baixa temperatura e não necessita de energia adicional para realizar a redução do CO₂ (Yaashikaa et al., 2019). Sendo assim, a fotocatalise do CO₂ pode favorecer a implantação do CCUS.

3.3.2 Hidrogenação do CO₂

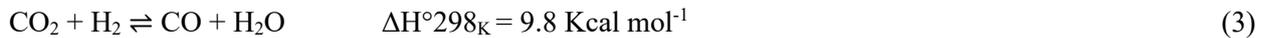
Outro processo de conversão do CO₂ é a hidrogenação do CO₂ que permite obter uma variedade de produtos com finalidades energéticas distintas. A qualidade e quantidade de produtos obtidos podem ser controlados pela escolha do catalisador apropriado. Dentre esses produtos destaca-se o metanol, por ser produzido por um processo tecnológico pouco complexo, com alta seletividade e flexibilidade de uso. Sua aplicabilidade se dá em diferentes mercados como por exemplo, produtos químicos, transporte e geração de energia. Portanto, a transformação do CO₂ em metanol possibilita uma economia fechada do ciclo do carbono (Goepfert, et al. 2014; Gothe et al., 2020).

O metanol (álcool metílico), o mais simples álcool existente, é uma das *commodities* mais comercializadas globalmente com mais de 90 plantas de metanol pelo mundo com capacidade de produção de 110 milhões de toneladas/ano (138 bilhões de litros) (METHANOL INSTITUTE, 2018). A China é o maior produtor dessa molécula, uma vez que metas para combater a poluição do ar foi estabelecida no país (Gothé et al., 2020).

Atualmente, a produção industrial de metanol é proveniente do gás de síntese (SYNGAS) (CO/H₂), que por sua vez tem origem fóssil (METHANOL INSTITUTE, 2018). Comercialmente, os catalisadores para a produção do metanol são baseados em Cu/ZnO/Al₂O₃ (Goepfert et al., 2014). A produção do metanol pode ser feita pela hidrogenação do CO (Eq. 1) e pela hidrogenação do CO₂ (Eq. 2):



Utilizando catalisadores de cobre, acontece uma reação de interconversão entre CO e CO₂ (Eq. 3) a via reversa do gás-água (do inglês Reverse Water Gas Shift – RWGS) seguida do processo de Fischer – Tropsch (Miranda et al., 2018). Completando as três reações que envolvem a síntese do metanol.



Além da produção de metanol a partir do SYNGAS, é possível utilizar como fonte de CO₂ emissões antropogênicas e o CO₂ de origem natural, como o carbono biogênico⁴ (Goepfert et al. 2018). Depois do CO₂ capturado, diversas vias podem ser utilizadas para transformar o CO₂ em metanol como por exemplo, hidrogenação catalítica, redução de CO₂ seguida de hidrogenação, rotas eletroquímicas de CO₂ para metanol e por fim redução fotoquímica de CO₂ para metanol, entre outras, que podem ser vistas no *Toward a Sustainable Carbon Cycle: The Methanol Economy* (Goepfert, et al., 2018).

De acordo com Goepfert et al., (2018) uma das vias mais diretas para converter CO₂ e H₂ em metanol é através da hidrogenação catalítica, com o uso de catalisadores, principalmente heterogêneos baseados em cobre (Cu) e zinco (Zn). As condições dessa conversão são: temperatura de 220 – 250°C e pressão de 10 - 30bar. Um dos gargalos desse processo é a obtenção do H₂ que precisa ser de origem sustentável, por exemplo a água, extraído por eletrólise que é um processo de separação dos componentes da água por adição de corrente elétrica e eletrólitos (Miranda et al., 2018). Vale ressaltar também que, a energia adicionada ao processo de eletrólise pode vir de uma fonte renovável, como a energia eólica.

Atualmente, essa conversão de CO₂ e H₂ a partir da hidrogenação catalítica está sendo utilizada de forma industrial na Islândia pela Carbon Recycling International (CRI), com uma capacidade de produção de 5 milhões de litros de “metanol renovável” por ano. Essa planta recicla em torno

⁴ Carbono biogênico proveniente da queima da biomassa. A fixação biológica do carbono ocorre por meio da fotossíntese.

de 5,5 toneladas de CO₂ que seriam lançados à atmosfera. Vale ressaltar que, o hidrogênio consumido é produzido por eletrólise. Além dessa planta, há um projeto piloto construída em 2008 no Japão pela companhia Mitsui Chemicals Inc. com capacidade de produção 100 toneladas anual de metanol a partir do CO₂.

Uma das vantagens de reciclar o CO₂ antrópico, é a possibilidade de contribuir com a redução do CO₂ atmosférico e conseqüentemente compactuar com a mitigação das mudanças climáticas, além disso, essa alternativa se torna viável economicamente e ambientalmente, uma vez que representa uma fonte inesgotável de carbono renovável e pode tornar neutro em carbono o uso de combustíveis fósseis (Olah et al., 2009).

3.3.2.1 Perspectivas futuras e cenário brasileiro na produção do “metanol renovável”

No cenário brasileiro, a produção de metanol a partir do SYNGAS não supre a demanda interna do país, o que faz com que seja necessário a importação de produtos químicos de outros países como Trinidad e Tobago, Chile e Venezuela. Um dos grandes desafios do país em aumentar a sua capacidade produtiva é a disponibilidade e o preço de gás natural – uma vez que comercialmente a principal fonte de CO₂ é o gás natural. Associado a esse desafio, está competição internacional e o volume de investimentos necessários (Machado, et al., 2019).

É importante ressaltar que, há diversas pesquisas para desenvolver metanol a partir de fontes renováveis, como a biomassa, nesse sentido o Brasil é um país com grande potencial para produção de “metanol renovável”, uma vez que é pioneiro na produção de etanol derivado de cana-de-açúcar (Bonfim-Rocha et al., 2018). Além disso, quando o assunto é a obtenção de H₂ de fontes renováveis – no caso a água (um dos principais gargalos da produção de metanol a partir do CO₂ antrópico), o Brasil obtém uma vantagem por possuir uma variedade de hidrelétricas, que pode ser fonte de energia elétrica (fonte renovável) para realização da eletrólise (Neto e Moreira, 2007; Palhares et al., 2016).

Diante desse contexto, abre espaço para produção científica no Brasil para conversão do CO₂ em “metanol renovável”, uma vez que pode ser uma alternativa interessante para produção de biocombustíveis (Bonfim-Rocha et al., 2018).

3.4 Panorama geral do DPSIR

Após aplicar a estrutura DPSIR sobre a temática das mudanças climáticas foi possível perceber a relação causa e efeito entre os sistemas sociais, econômico e ambientais. Diante dessa análise percebe-se que, atividades humanas compactuam com a alteração do estado ambiental, sendo a demanda energética a principal responsável por essa modificação, devido a quantidade de GEE lançados a atmosfera, especialmente o CO₂. Com isso, as respostas tecnológicas que favorecem a redução da emissão do CO₂ na atmosfera e a transformação do mesmo em produtos com valor agregado se relacionam exclusivamente as pressões (emissões de GEE) e ao estado, especialmente, o estado químico (concentração de CO₂ na atmosfera).

Apesar da estrutura DPSIR ser uma estrutura que auxilia na organização das informações sobre o estado do meio ambiente e sua relação com as atividades humanas, ela é uma estrutura genérica que apresenta limitações, uma vez que apresenta uma relação mais simplista das interconexões dos sistemas naturais e humanos (Moss et al., 2021). No entanto, essa simplificação de um problema como as mudanças climáticas pode representar um potencial instrumento na gestão para tomadas de decisão.

Esse estudo se limitou as respostas tecnológicas para a redução do CO₂, no entanto, a estrutura DPSIR permite estruturar respostas para todas as partes do modelo (forças motrizes, pressões, estado e impactos). Diante disso, faz-se necessário novas aplicações do modelo para identificar respostas em diferentes perspectivas e assim identificar diferentes soluções (seja no âmbito público, privado ou sociedade civil) para um problema tão complexo como as mudanças climáticas.

4. Conclusões

1. A partir deste artigo conclui-se que, a estrutura DPSIR (forças motrizes, pressões, estado, impactos e respostas) oferece uma visão mais clara e sistêmica acerca das questões ambientais, sendo assim, a aplicação dessa estrutura possibilitou analisar de forma estrutural e interconectada a temática mudanças climáticas.
2. A redução dos gases do efeito estufa, especialmente o dióxido de carbono é um ponto importante para mitigação das mudanças climáticas. Nesse sentido, o CCS e o CCUS são tecnologias com potencial para solucionar esse problema, entretanto necessitam de investimentos políticos e financeiros para que sua implantação seja viável.
3. Atualmente, há diversas rotas químicas para conversão do CO₂ em produto com alto valor agregado, uma delas é a redução fotocatalítica de CO₂ que apresenta grande vantagem por não necessitar de adição energética em seu processo e a outra rota é a hidrogenação do CO₂ que permite obter uma variedade de produtos com finalidades energéticas distintas, um desses produtos é o metanol, uma molécula estratégica na indústria química. Essa conversão representa uma estratégia para diminuir os custos da implantação das tecnologias climáticas.
4. Embora a aplicação da estrutura DPSIR sobre essa temática, possibilitou estabelecer uma relação de causa e efeito sobre as atividades humanas, o meio ambiente e a economia, o modelo traz uma visão mais simplista sobre essas relações por apresentar conexões de forma linear.
5. Dessa forma, abre possibilidades de mais pesquisas sobre essa aplicação para suprir a lacuna do modelo e assim detalhar mais o assunto sobre mudanças climáticas e seus diversos agentes.
6. Por fim, as mudanças climáticas são um problema atual que afeta o planeta como um todo, que necessita de soluções que combinam e cooperam entre si. Tendo isso em vista, utilizar a estrutura DPSIR pode possibilitar um entendimento mais claro sobre esse desafio sistêmico.

Referências bibliográficas

- Andrew, R. et al. 2021. The Global Carbon Project's fossil CO₂ emissions dataset.
- Aresta M., Dibenedetto A. 2010. Industrial utilization of carbon dioxide (CO₂) Maroto-Valer M.M. (Ed.), Developments and Innovation in Carbon Dioxide (CO₂) Capture and Storage Technology: Volume 2: *Carbon Dioxide (CO₂) Storage and Utilisation*, v. 2, Woodhead Publishing Limited, Great Abington.
- Ballantyne, G. et al. 2015. Constructing more informative plant–pollinator networks: visitation and pollen deposition networks in a heathland plant community. *Proceedings of the royal society B*. v. 282, <<https://doi.org/10.1098/rspb.2015.1130>>.
- Bonfim-Rocha, Lucas et al. 2018. Multi-objective design of a new sustainable scenario for bio-methanol production in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, v. 187 pp. 1043-1056.
- Change, N. G. C. Global Surface Temperature | NASA Global Climate Change. Disponível em: <<https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature>> (acessado 11 dezembro de 2021).
- Change, N. G. C. Ocean Heat Content | NASA Global Climate Change. Disponível em: <<https://climate.nasa.gov/vital-signs/ocean-heat>> (acessado 12 dezembro de 2021).
- Dowell, Niall M. et al., 2017. The role of CO₂ capture and utilization in mitigating climate change. *Nature Climate Change*, v. 7, p. 243-249. Disponível em: <www.nature.com/articles/nclimate3231>.
- Du, C. et al., 2020. CO₂ transformation to multicarbon products by photocatalysis and electrocatalysis. *Materialstoday Advances*, v. 6. <<https://doi.org/10.1016/j.mtadv.2020.100071>>.
- Farias, L. e Fávoro, D 2011. Vinte anos de Química verde: conquistas e desafios. *Química Nova*. v. 34, n. 6, p. 1089-1093.

- Franca, C. M. R. Azapagic, Adisa 2015. Carbon capture, storage and utilisation Technologies: A critical analysis and comparison of their life cycle environmental impacts. *Journal of CO2 Utilization*, v.9, p. 82-102. <<https://doi.org/10.1016/j.jcou.2014.12.001>>.
- Gambhir, Ajay. Tavoni, Massimo 2019. Direct Air Carbon Capture and Sequestration: How It Works and How It Could Contribute to Climate-Change Mitigation. *One Earth*, v.1, p. 405-409. <<https://doi.org/10.1016/j.oneear.2019.11.006>>.
- Gari, R. S. et al., 2015. A review of the application and evolution of the DPSIR framework with an emphasis on coastal social-ecological systems. *Ocean & Coastal Management*, v. 103, p. 63-77.
- Giddens, Anthony 2009. The Politics of Climate Change. Cambridge: *Polity Press*, p. 256.
- Global Carbon Atlas. Welcome to Carbon Atlas. Disponível em: <www.globalcarbonatlas.org/es/content/welcome-carbon-atlas> (acessado 25 novembro de 2021).
- Global Carbon Budget. Carbon budget 2021. Disponível em: <www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/21/files/GCP_CarbonBudget_2021.pdf>. Acesso em: 18 de novembro de 2021.
- Global CCS Institute. Carbon removal with CCS Technologies. Disponível em: <www.globalccsinstitute.com/resources/publications-reports-research/carbon-removal-and-ccs/> (acessado 22 de maio de 2021).
- Global CCS Institute. *Facility Date*. Disponível em: < <https://co2re.co/FacilityData>> (acessado 22 de janeiro de 2022).
- Goepfert, A. et al. 2018. Toward a Sustainable Carbon Cycle: The Methanol Economy. *Green Chemistry*. University of Southern California, Los Angeles, CA, Estados Unidos.
- Goepfert, Alain et al. 2014. Recycling of carbon dioxide to methanol and derived products—closing the loop. *Chemical Society Reviews*, v. 43, n. 23, p. 7995-8048.
- Gothe, Maitê L. et al. 2020. Selective CO₂ hydrogenation into methanol in a supercritical flow process. *Journal of CO2 Utilization*, v. 40.
- Heuberger, Clara F. et al. 2016. Quantifying the value of CCS for the future electricity system. *Royal Society of Chemistry*. <10.1039/C6EE01120A>.
- Holman, P. M D. A. et al. The concepts and development of a participatory regional integrated assessment tool *Clim. Change*. 2008. <10.1007/s10584-008-9453-6>.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA), 2013. Technology roadmap: Carbon capture and storage. Disponível em: <<https://iea.blob.core.windows.net/assets/bca6758e-9a74-4d2a-9c35-b324d81fc714/TechnologyRoadmapCarbonCaptureandStorage.pdf>>.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA), 2016. 20 Years of Carbon Capture and Storage IEA. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/24c3d26b-aa44-4b54-b9c0-5201d4d86a04/20YearsofCarbonCaptureandStorage_WEB.pdf>.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Transforming Industry through CCUS. Disponível em: <www.iea.org/reports/transforming-industry-through-ccus> (acessado 19 de maio de 2021).
- IPCC, 2005: Carbon Dioxide Capture and Storage. Disponível em: <www.ipcc.ch/report/carbon-dioxide-capture-and-storage/>.
- IPCC, 2007: Climate Change: 2007 – Synthesis Report. Disponível em: <www.ipcc.ch/report/ar4/syr/>.
- IPCC, 2014: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- IPCC, 2018: Painel Intergovernamental sobre mudanças climáticas – Aquecimento global de 1,5°C. Disponível em: <www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/07/SPM-Portuguese-version.pdf> (acessado 19 de maio de 2021).

- Jarvis, Sean M. Samsatli, Sheila 2018. Technologies and infrastructures underpinning future CO₂ value chains: A comprehensive review and comparative analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 85, p. 46-68. <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.01.007>>.
- Kamkeng, Ariane D. N. et al. 2020. Transformation Technologies for CO₂ utilisation: Current status, challenges and future prospects. *Chemical Engineering Journal*, v. 409, p. 128138. <<https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.128138>>.
- Keith, David W. et al. 2018. A Process for Capturing CO₂ from the Atmosphere. *Joule*, v. 2, p. 1573-1594. <<https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.05.006>>.
- Ketzer, João M. M. et al. 2016. Atlas brasileiro de captura e armazenamento geológico de CO₂. Editora Universitária da PUCRS. Porto Alegre, RS.
- Kohl, A.; Nielsen, R. Gas Purification, 5th ed.; Gulf Publishing Co.: Houston, 1997. Global CCS Institute. Global Status of CCS 2021. Disponível em: <www.globalccsinstitute.com/resources/global-status-report/> (acessado 10 de janeiro de 2022).
- Kumar, A. et al. 2022. Impact of COVID-19 on greenhouse gases emissions: A critical review. *Science of The Total Environment*, v. 806, p. 150349.
- Leonardão, E. J. et al. "Green chemistry": os 12 princípios da química verde e sua inserção nas atividades de ensino e pesquisa. *Química nova*, v. 26, jan. 2003. <<https://doi.org/10.1590/S0100-40422003000100020>>.
- Lewison, Rebeca L. et al. How the DPSIR framework can be used for structuring problems and facilitating empirical research in coastal systems. *Environmental Science & Policy*, v. 56, p. 110-119, Fev, 2016. <<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.11.001>>.
- Machado, G. V. et al. Informe Técnico Competitividade do Gás Natural: Estudo de Caso na Indústria de Metanol. EPE – Empresa de Pesquisa Energética. 2019
- Methanol Institute. Renewable Methanol Report. 2018. Disponível em: < www.methanol.org/wp-content/uploads/2019/01/MethanolReport.pdf > (acessado 10 de dezembro de 2021).
- Miller, Bruce G. 13 – Carbon Dioxide Emissions Reduction and Storage. *Clean Coal Engineering Technology*. Edição 2, p. 609-668, 2017. <<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811365-3.00013-2>>.
- Miranda, J. L. et al. 2018. O antropoceno e o CO₂: Processos de captura e conversão. *Revista Virtual de Química*.
- Miranda, Mariana N. et al. 2020. Microplastics in the environment: A DPSIR analysis with focus on the responses. *Science of the Total Environment*, v. 718. <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134968>>.
- Moss, E. D. et al. 2021. Investigating the impacts of climate change on ecosystem services in UK agroecosystems: An application of the DPSIR framework. *Land Use Policy*, v. 105. <<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105394>>.
- NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). The Causes of Climate Change. Disponível em: <<https://climate.nasa.gov/causes/>> (acessado 30 de abril de 2021).
- Neto, Roberto Liberato; MOREIRA, José Roberto Simões 2007. Geração e combustão do hidrogênio obtido através do processo de eletrólise da água. Portal de química. Leis da Eletrólise.
- Newton, Aline. Weichselgartner, Juergen 2014. Hotspots of coastal vulnerability: A DPSIR analysis to find societal pathways and responses. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v.140, p. 123-133. <<https://doi.org/10.1016/j.ecss.2013.10.010>>.
- NOAA. National Oceanic and Atmospheric Administration: Despite pandemic shutdowns, carbon dioxide and methane surged in 2020. Abr. 2021. Disponível em: < <https://research.noaa.gov/article/ArtMID/587/ArticleID/2742/Despite-pandemic-shutdowns-carbon-dioxide-and-methane-surged-in-2020> > (acessado 20 de novembro de 2021).
- Nobre, Carlos A. Reid, Julia, Veiga, A. P. S. 2012. Fundamentos científicos das mudanças climáticas. São José dos Campos, SP: Rede Clima/INPE, p. 44.

- Nogueira, R. F. P.; Jardim, W. F. 1998. A fotocatalise heterogênea e sua aplicação ambiental. *Química nova*, v.21, p. 69-72.
- Oecd 1993. OECD Core set of Indicators for Environmental Performance Reviews. Organization for Economic Cooperation and Development, Paris, France pp. 93.
- Olah, George A.; Goepfert, Alain; Prakash, GK Surya 2009. Chemical recycling of carbon dioxide to methanol and dimethyl ether: from greenhouse gas to renewable, environmentally carbono neutral fuels and synthetic hydrocarbons. *The Journal of organic chemistry*, v. 74, n. 2, p. 487-498.
- Omann, I. A E Stocker, J. J. 2009. Climate change as a threat to biodiversity: an application of the DPSIR approach. *Ecological Economic*, v. 69, pp. 24-31. <<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.01.003>>
- Pachauri, R. K.; Mayer, L.; INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (EDS.). Climate change 2014: synthesis report. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2015.
- Pacto Global Brasil. Objetivos do desenvolvimento sustentável. Disponível em: <<https://www.pactoglobal.org.br/ods>> (acessado 16 de janeiro de 2022).
- Palhares, Dayana D. et al. Produção de hidrogênio por eletrólise alcalina da água e energia solar. 2016.
- PBMC, 2014: Impactos, vulnerabilidades e adaptação às mudanças climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho 2 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas [Assad, E.D., Magalhães, A. R. (eds.)]. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 414 pp.
- Pires, J. C. M. et al. Recent developments on carbon capture and storage: An overview Chem. Eng. Res. Des. Vol. 89, pp. 1446-1460, 2011.
- Pour, Nasim. Chapter 5 - Status of bioenergy with carbon capture and storage - potential and challenges. Bioenergy with Carbon Capture and Storage. p. 85-107, Ago, 2019. <<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816229-3.00005-3>>.
- Raza, Arshad. et al., 2016. A screening criterion for selection of suitable CO₂ storage sites. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, v. 28, p. 317-327. <<https://doi.org/10.1016/j.jngse.2015.11.053>>
- Raza, Arshad. et al., 2019. Significant aspects of carbon capture and storage – A review. *Petroleum*. Volume 5, p. 335-340. <<https://doi.org/10.1016/j.petlm.2018.12.007>>
- Rhein, M. E Rintoul, S. R. Observations: Ocean. Climate Change 2013. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter03_FINAL.pdf> (acessado 18 de dezembro de 2021).
- Ritchie, H.; Roser, M. CO₂ and Greenhouse Gas Emissions. Our World in Data, 11 maio 2020.
- Rosa, Lorenzo, et al., The water footprint of carbono capture and storage Technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 138, Mar, 2021. <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110511>>.
- Rounsevell. M. D. et al. 2010. A conceptual framework to assess the effects of environmental change on ecosystem services Biodivers. *Biodiversity and Conservation*, v. 19, p. 2823-2842. <[10.1007/s10531-010-9838-5](https://doi.org/10.1007/s10531-010-9838-5)>.
- Saeedi, Ali. Rezaee, Reza 2012. Effect of residual natural ga saturation on multiphase flow behaviour during CO₂ geo-sequestration in depleted natural gas reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, v. 82-83, p. 17-26. <<https://doi.org/10.1016/j.petrol.2011.12.012>>.
- Saeid, Samrand, et al., 2021. Recent advances in CO₂ hydrogenation to value-added products – Current challenges and future direction. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 85. <<https://doi.org/10.1016/j.peccs.2021.100905>>.
- SEEG 8: Análises das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas de clima do Brasil 1970-2019. 2020.
- Shahbaz, Muhammad. et al. 2021. A comprehensive review of biomass based thermochemical conversion technologies integrated with CO₂ capture and utilisation within BECCS networks. Resources, *Conservation and Recycling*, v. 173. <<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105734>>.

- Shing, Bhawna. et al. 2015. Material use for electricity generation with carbon dioxide capture and storage: Extending life cycle analysis indices for material accounting. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 100, p. 49-57. <<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.03.010>>.
- Silva, F. M. et al. 2005. Desenvolvimento sustentável e química verde. *Química nova*, v. 28, <<https://doi.org/10.1590/S0100-40422005000100019>>.
- Sobrinho, J. F. A. S. 2013. Emprego de óxidos de zinco e titânio na oxidação fotocatalítica do azul de metileno.
- Styring, P. Armstrong, K. 2011. Catalytic carbon dioxide conversions to value-added chemicals. *Chimica Oggi*, v. 29, p. 34-37. Disponível em: <www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84856170817&origin=inward&txGid=ef030e5d0dc00b33e2fccdaff8f46cf9>.
- Svarstad, Hanne. et al. 2018. Discursive biases of the environmental research framework DPSIR. *Land Use Policy*, v. 25, p. 116 – 125. <<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2007.03.005>>.
- Tapia, J. F. et al. 2018. A review of optimization and decision-making models for the planning of capture, utilization and storage (CCUS) systems. *Sustainable Production and Consumption*. Vol. 13. <<https://doi.org/10.1016/j.spc.2017.10.001>>.
- Tolmasquim, M. T. et al. 2007. Matriz energética brasileira: uma prospectiva. *Novos Estudos - CEBRAP*, n. 79, p. 47–69.
- Trost, Barry M. The atom economy--a search for synthetic efficiency. *Science*, v. 254, n. 5037, p. 1471-1477, 1991. <[10.1126/science.1962206](https://doi.org/10.1126/science.1962206)>.
- United Nations. Um water. Disponível em: <www.unwater.org/water-facts/climate-change/>. (acessado 18 de dezembro de 2021).
- Vision for Bioenergy and Biobased Products in the United States (2006). Biomass Research and Development Initiative. [S.D.]. Disponível em: <www1.eere.energy.gov/bioenergy/pdfs/final_2006_vision.pdf> (acessado 16 de janeiro de 2022).
- World Resources Institute (WRI). 4 Charts Explain Greenhouse Gas Emissions by Countries and Sectors. Disponível em: <www.wri.org/insights/4-charts-explain-greenhouse-gas-emissions-countries-and-sectors> (acessado 06 de maio de 2021).
- Yaashikaa, P. R. et al. 2019. A review on photochemical, biochemical and electrochemical transformation of CO₂ into value-added products. *Journal of CO₂ Utilization*, v. 33, p. 131-147. <<https://doi.org/10.1016/j.jcou.2019.05.017>>.

Lista de abreviaturas e siglas

Air –DACCS - Carbon Capture and Storage Directly the Air
BECCS - Bioenergy with carbon capture and storage
CCS - Carbon Capture and storage
CCU - Carbon Capture and Utilization
CCUS – Carbon, Capture, Utilization and Storage
CDR - Carbon Dioxide Removal
CFCs - Clorofluorcarbonetos
CH₃OH – Metanol
CH₄ – Metano
CNUMAD - United Nations Conference on Environment and Development
CO₂ - Dióxido de carbono
COP-21 - Conference of the Parties
DPSIR - Drivers-Pressures-State-Impact-Response
GEE – Gases do efeito estufa
H₂ – Hidrogênio
HFCs - Hidrofluorcarbono
IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change
N₂O – Óxido nitroso

ODS – Objetivos do desenvolvimento sustentável

ONU – Organização das Nações Unidas

PFCs – Perfluorcarbono

PSR - Pressure-State-Response

SF₆ – Hexafluor sulfúrico

SR - Stress-Response

SYNGAS – Gás de síntese (H₂/CO)

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change