

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA
ESCOLA POLITÉCNICA DA USP
ESPECIALIZAÇÃO ENERGIAS RENOVÁVEIS, GERAÇÃO DISTRIBUÍDA
E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

CLEIDINALDO DE JESUS BARBOSA

**HIDROGÊNIO RENOVÁVEL: TRANSIÇÃO PARA UMA ECONOMIA
DE BAIXO CARBONO**

SÃO PAULO

2024

CLEIDINALDO DE JESUS BARBOSA

**HIDROGÊNIO RENOVÁVEL: TRANSIÇÃO PARA UMA ECONOMIA
DE BAIXO CARBONO**

Monografia apresentada ao Programa de Educação
Continuada (PECE/USP) como parte dos requisitos
para obtenção do título de especialista em Energias
Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência
Energética.

Orientadora: Prof. Dr^a. Patrícia Helena Lara

SÃO PAULO

2024

CLEIDINALDO DE JESUS BARBOSA

**HIDROGÊNIO RENOVÁVEL: TRANSIÇÃO PARA UMA ECONOMIA DE
BAIXO CARBONO**

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada (PECE/USP) como parte dos requisitos para obtenção do título de especialista em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética. defendido e aprovado em _____ de _____ de 2024 pela banca examinadora constituída por:

Prof. Dr^a. Patrícia Helena Lara - PECE/USP
Presidente da Banca

Prof. Dr^a. xxxxxxxxxxxxxxxxx - PECE/USP

Prof. Dr. XXXXXXXXXXXXX - PECE/USP

DEDICATÓRIA

À minha esposa Tatiane e aos meus filhos, Arthur e Heitor.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de expressar minha mais profunda gratidão a Deus, por me conceder a força e a capacidade intelectual necessárias para alcançar este resultado. Sem Sua presença em minha vida, este feito não teria sido possível.

Agradeço de coração aos meus familiares pelo apoio incondicional e pela compreensão diante das inúmeras ausências e momentos em que não pude estar presente. Sua paciência e amor foram fundamentais para a realização deste trabalho.

Desejo também dedicar um especial agradecimento ao meu amigo Luis Fernando. Luis, conhecer você foi uma das melhores conquistas deste percurso. Sua inspiração, brilhantismo e apoio incansável durante esses dois árduos anos foram essenciais para que eu não desistisse. Obrigado por acreditar em mim quando eu mesmo duvidava.

À minha orientadora, Prof.^a Dr.^a Patrícia Helena Lara, meus sinceros agradecimentos pelas valiosas contribuições. Sua confiança em meu potencial e a liberdade concedida para explorar temas significativos para mim foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Obrigado por me guiar com sabedoria e por encorajar minha autonomia acadêmica.

Não poderia deixar de agradecer ao Professor Simões e a todo o corpo docente, cujas aulas e orientações enriqueceram meu conhecimento e contribuíram significativamente para a construção deste estudo. Sua dedicação ao ensino e ao desenvolvimento acadêmico foi inspiradora.

EPÍGRAFE

Transformar a energia do sol e do vento em poder renovável é a chave para um futuro sustentável e eficiente. Cada passo em direção à geração distribuída e à eficiência energética é um passo em direção à preservação do planeta.

RESUMO

BARBOSA, C. de J. Hidrogênio renovável: transição para uma economia de baixo carbono. 83 f. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso - Programa de Educação Continuada (PECE/USP) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

Neste estudo, investigou-se a transição energética e os desafios climáticos do século XX ao XXI, com foco no papel do hidrogênio renovável como vetor energético para uma economia de baixo carbono. O objetivo principal é investigar o potencial do hidrogênio renovável como alternativa aos desafios energéticos e ambientais contemporâneos. A pesquisa propõe a hipótese de que a expansão da infraestrutura para a produção de hidrogênio renovável poderia resultar em uma redução significativa das emissões globais de carbono. Este estudo utiliza uma metodologia mista, incorporando análise qualitativa e quantitativa, e se baseia em dados secundários de fontes reconhecidas que abordam temas como aquecimento global, hidrogênio, descarbonização e emissões de gases de efeito estufa. A pesquisa revela que o hidrogênio renovável não só se apresenta como alternativa eficaz aos combustíveis fósseis, reduzindo emissões diretas de carbono, mas também facilita a integração de energias renováveis em vários setores, contribuindo para a estabilização das redes elétricas e promovendo uma economia de baixo carbono. O estudo destaca a relevância do hidrogênio renovável em setores de difícil descarbonização, como a indústria pesada e o transporte. Os resultados confirmam a hipótese inicial, indicando que uma infraestrutura bem desenvolvida para hidrogênio renovável tem o potencial de ser uma parte crucial na transição global para uma matriz energética de baixo carbono.

Palavras chaves: hidrogênio renovável, aquecimento global, descarbonização, transição energética, energias renováveis.

ABSTRACT

BARBOSA, C. de J. *Renewable hydrogen: transition to a low carbon economy*. 83 p. 2024. *Final Year Project - Continuing Education Program (PECE/USP) – University of São Paulo, São Paulo, 2024.*

In this study, the energy transition and climate challenges from the 20th to the 21st century were investigated, focusing on the role of renewable hydrogen as an energy vector for a low-carbon economy. The main objective is to investigate the potential of renewable hydrogen as an alternative to contemporary energy and environmental challenges. The research proposes the hypothesis that expanding infrastructure for renewable hydrogen production could result in a significant reduction in global carbon emissions. This study uses a mixed methodology, incorporating qualitative and quantitative analysis, and is based on secondary data from recognized sources that address topics such as global warming, hydrogen, decarbonization, and greenhouse gas emissions. The research reveals that renewable hydrogen not only presents itself as an effective alternative to fossil fuels, reducing direct carbon emissions, but also facilitates the integration of renewable energies in various sectors, contributing to the stabilization of power grids and promoting a low-carbon economy. The study highlights the relevance of renewable hydrogen in hard-to-decarbonize sectors, such as heavy industry and transportation. The results confirm the initial hypothesis, indicating that a well-developed infrastructure for renewable hydrogen has the potential to be a crucial part of the global transition to a low-carbon energy matrix.

Key words: renewable hydrogen, global warming, decarbonization, energy transition, renewable energies.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fontes de energia (1850-2050).	19
Figura 2: Base da transição energética.	20
Figura 3: Extensão diária de gelo marítimo da antártica.	24
Figura 4: Atmosfera terrestre.....	26
Figura 5: Emissões de gases de efeito estufa.....	28
Figura 6: Emissões per capita de gases de efeito estufa.	29
Figura 7: Emissões per capita por ano de óxido nitroso (N ₂ O) de 1850 a 2021.....	31
Figura 8: Fontes de emissões de metano em 2022.	33
Figura 9: Emissões per capita por ano de metano (CH ₄) de 1850 a 2021.	34
Figura 10: Emissões <i>per capita</i> por ano de dióxido de carbono (CO ₂) de 1850 a 2021.....	35
Figura 11: Observatório Mauna Loa.	38
Figura 12: Média mensal de CO ₂ no observatório Mauna Loa de 2020 a 2024.....	39
Figura 13: CO ₂ atmosférico no observatório Mauna Loa de 1960 a 2024.....	39
Figura 14: Anomalia de temperatura em °C, em 2023, comparado com a média de 1951-1980.	40
Figura 15: Temperatura global da superfície: aumento acima do nível pré-industrial (1850-1900).....	41
Figura 16: O efeito estufa.	47
Figura 17: Índice anual de gás de efeito estufa (AGGI).....	50
Figura 18: Tempo de permanência dos gases de efeito estufa na atmosfera e impacto na temperatura.	51
Figura 19: Produção global de hidrogénio por tecnologia, 2020-2022.	52
Figura 20: Produção de hidrogênio de baixas emissões por rota tecnológica, maturidade e região com base em projetos anunciados e no NZE até 2050, 2030.	54
Figura 21: Produção de hidrogênio com baixas emissões por estágio e por setor com base em projetos anunciados, 2030.	55
Figura 22: Mapa dos projetos anunciados de produção de hidrogênio com baixas emissões..	57
Figura 23: Demanda e oferta potencial de hidrogênio de baixa emissão criadas por políticas e metas governamentais para 2030.....	60
Figura 24: Representação esquemática de rotas tecnológicas.	62
Figura 25: Eficiências típicas de conversão em processos de produção de hidrogênio.	64
Figura 26: Classificação do hidrogênio em escala de cores.	65

Figura 27: Comparação da intensidade de emissões de diferentes rotas de produção de hidrogênio, 2021.....	67
Figura 28: Custo nivelado da produção de hidrogênio por tecnologia em 2021, 2022 e no cenário de emissões líquidas zero até 2050 em 2030.....	69
Figura 29: Capacidade instalada de geração de energia por fonte no Cenário de Políticas Declaradas, 2000-2040.....	71
Figura 30: Comparação entre potencial de recursos e demanda de energia no horizonte do PNE 2050.....	72
Figura 31: Potencial de recursos com maiores desafios de aproveitamento no horizonte de 2050.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Efeito de aquecimento de diferentes gases de efeito estufa.....	49
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- C3S – Copernicus Climate Change Service (Centro de Serviços de Mudança Climática).
- CCS - Carbon Capture and Storage (Captura e Armazenamento de Carbono).
- CH4 - Metano.
- CO - Monóxido de Carbono.
- CO2 - Dióxido de Carbono.
- COP - Conference of the Parties (Conferência das Partes).
- ECMWF – European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo).
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética.
- EU - European Union (União Europeia).
- EUMETSAT – (European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites)
Organização Europeia para a Exploração de Satélites Meteorológicos.
- GEE - Gases de Efeito Estufa.
- GHG - Greenhouse Gases (Gases de Efeito Estufa).
- GWP - Global Warming Potential (Potencial de Aquecimento Global).
- HFCs - Hydrofluorocarbons (Hidrofluorcarbonetos).
- IEA - International Energy Agency (Agência Internacional de Energia).
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas).
- MME - Ministério de Minas e Energia.
- MP - Material Particulado.
- N2O - Óxido Nitroso.
- NASA - Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço.
- NDC - Nationally Determined Contributions (Contribuições Nacionalmente Determinadas).
- NOx - Óxidos de Nitrogênio.
- PFCs - Perfluorocarbons (Perfluorcarbonetos).
- R&D - Research and Development (Pesquisa e Desenvolvimento).
- SF6 - Hexafluoreto de Enxofre.
- SO2 - Dióxido de Enxofre.
- UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change (Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima).

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1. Transições energéticas e desafios climáticos do Século XX ao XXI	17
2.1.1. O petróleo e a transição energética.....	17
2.2. Mudanças climáticas e o aquecimento global	22
2.2.1. Impactos e desafios das emissões de gases de efeito estufa	27
2.2.2. Emissão de dióxido de carbono e suas implicações para o aquecimento global	36
2.3. Da poluição local à crise ambiental global	42
2.3.1. Impactos ambientais local e global.....	43
2.3.2. Dinâmicas atmosféricas e gases de efeito estufa.....	47
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
3.1. Hidrogênio renovável: mercado, tecnologia e estratégias para uma economia de baixo carbono.....	52
3.1.1. Panorama do mercado de hidrogênio.....	52
3.1.1.1. Dinâmicas globais e avanços na produção de hidrogênio de baixa emissão: tendências, desafios e perspectivas futuras.....	52
3.1.1.2. Expansão global e estratégias para o hidrogênio de baixa emissão: desafios e políticas para 2030.....	58
3.1.2. De fontes a aplicações: uma visão integrada das rotas tecnológicas para a produção sustentável de hidrogênio.....	61
3.1.2.1. Custos associados à produção de hidrogênio por rotas tecnológicas.....	68
3.1.3. Superação da oferta energética de 2050 no Brasil: o papel do hidrogênio na armazenagem e na transição para uma economia de baixo carbono.....	70
4. CONCLUSÃO	76
5. REFERÊNCIAS.....	78

1. INTRODUÇÃO

A transição energética é um dos maiores desafios do século XXI, especialmente no contexto das mudanças climáticas. Desde o século XX, o petróleo tem sido a principal fonte de energia, com a Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP) desempenhando um papel central na formulação de políticas globais e na regulação dos preços. No entanto, os impactos ambientais e as flutuações do mercado de petróleo, exacerbados por conflitos geopolíticos como o da Ucrânia, têm incentivado a busca por alternativas energéticas mais sustentáveis.

Com a crescente demanda por segurança energética e a necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa, a transição para energias renováveis, como a eólica e a solar, tornou-se imperativa. Este processo, multifacetado e gradual, é impulsionado por avanços tecnológicos e imperativos de desenvolvimento sustentável, criando oportunidades no setor energético. A economia do hidrogênio, particularmente a produção de hidrogênio, surge como uma solução promissora para a descarbonização.

O hidrogênio renovável surge como um vetor energético promissor, especialmente por representar uma alternativa aos combustíveis fósseis e contribuir no processo de redução de emissões de carbono. Sua produção, principalmente através da eletrólise da água utilizando eletricidade proveniente de fontes renováveis, não só elimina emissões de carbono diretas, mas também viabiliza a utilização desta energia em setores críticos como transporte, indústria e aquecimento residencial, contribuindo significativamente para a descarbonização desses setores.

Além disso, o hidrogênio renovável desempenha um papel importante na estabilização das redes elétricas. Devido à natureza intermitente de fontes renováveis como a solar e a eólica, o hidrogênio serve como um meio eficaz de armazenamento de energia, equilibrando oferta e demanda e proporcionando um fornecimento de energia mais constante e confiável. Esta característica é essencial para garantir a resiliência e a estabilidade das redes de energia à medida que avançamos para um futuro de baixo carbono.

Dessa forma, o hidrogênio renovável contribui para a construção de uma economia de baixo carbono e assim, para o desenvolvimento sustentável. Ele permite uma armazenagem e transporte eficientes de energia, facilitando a integração de fontes renováveis no *mix* energético

global. Essa integração é vital para reduzir a dependência dos combustíveis fósseis, abordando assim as mudanças climáticas e promovendo metas de sustentabilidade a longo prazo. Portanto, o hidrogênio renovável não é apenas um elemento facilitador da transição energética, mas também um pilar para alcançar uma economia global mais sustentável e de baixo carbono.

Nesta linha, questiona-se: como o hidrogênio renovável pode contribuir para a transição para uma economia de baixo carbono no contexto das demandas energéticas globais? Assim, o objetivo desta pesquisa é explorar o potencial do hidrogênio renovável como uma solução sustentável para os desafios energéticos e ambientais contemporâneos. A pesquisa visa demonstrar como o hidrogênio pode contribuir para diminuir as emissões de gases de efeito estufa. A análise focará em entender como essa alternativa energética pode não apenas ajudar a mitigar o aquecimento global, mas também promover a sustentabilidade e a resiliência energética em longo prazo.

A hipótese central desta pesquisa é que a expansão da infraestrutura para a produção de hidrogênio renovável pode efetivamente levar a uma redução substancial das emissões de carbono globais. Ao utilizar fontes renováveis, como energia solar, eólica e hidrelétrica para eletrólise, a produção de hidrogênio passa a ser um processo com baixa ou nenhuma emissão de gases de efeito estufa, tornando-o um substituto viável para os combustíveis fósseis na geração de eletricidade e em setores de difícil descarbonização, como a indústria pesada e o transporte. Esta expansão tem o potencial de criar uma cadeia de valor para o hidrogênio verde, que poderá ajudar a acelerar a transição para uma matriz energética mais limpa, reduzindo nossa dependência de fontes não renováveis e contribuindo para conter o aquecimento global.

Na metodologia desta pesquisa, adotou-se uma abordagem qualitativa e quantitativa, utilizando-se de dados secundários provenientes de fontes nacionais e internacionais reconhecidas na temática de aquecimento global, hidrogênio, descarbonização e emissões de gases. A coleta de dados envolveu uma extensa revisão de literatura, incluindo artigos acadêmicos, relatórios governamentais e publicações de organizações internacionais, para obter uma compreensão abrangente das tendências atuais e das perspectivas futuras na transição energética para uma economia de baixo carbono.

A estrutura do trabalho é organizada em quatro partes principais, abrangendo desde o contexto histórico das transições energéticas até projeções futuras relacionadas ao mercado de hidrogênio. Na primeira parte introduz os conceitos básicos e a relevância do hidrogênio renovável no panorama energético atual. Seguem-se na segunda e terceira partes sobre as transições energéticas do século XX ao XXI, a crise ambiental global decorrente da poluição, e uma análise específica do mercado de hidrogênio, suas tecnologias e estratégias futuras. A

pesquisa culmina com a conclusão que resumem os achados e reiteram a importância do hidrogênio renovável como alternativa sustentável para os desafios energéticos e ambientais contemporâneos.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Transições energéticas e desafios climáticos do Século XX ao XXI

2.1.1. O petróleo e a transição energética

O século XX foi caracterizado como a era do petróleo, um período definido pela ascensão da Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP), uma entidade internacional que consolidou os esforços dos países produtores e exportadores de petróleo. A OPEP desempenhou um papel central na formulação de políticas petrolíferas globais e teve uma influência significativa nas flutuações de preços do petróleo. Essas variações de preços, conhecidas como choques petróleo, tiveram efeitos profundos na economia mundial, desencadeando crises econômicas em várias ocasiões ao longo do século. Esses eventos destacaram a dependência mundial do petróleo como fonte primária de energia e matéria-prima industrial, reiterando seu papel vital na sustentação e desenvolvimento das economias globais (YERGIN, 2023).

No século XXI, a dinâmica energética global foi profundamente impactada por significativas flutuações no mercado de petróleo. Os preços deste recurso vital oscilaram drasticamente, mergulhando para abaixo de 20 dólares o barril em momentos subsequentes à crise econômica de 2016 e escalando para além de 100 dólares em 2022. Este fenômeno foi exacerbado por fatores geopolíticos de grande envergadura, notavelmente o conflito militar na Ucrânia, que acentuou a tensão na região. Além disso, a redução progressiva da participação da Rússia no fornecimento de petróleo e gás para a Europa contribuiu significativamente para a volatilidade dos preços, afetando a estabilidade energética e econômica global. Estes eventos ressaltam a interconexão entre política internacional, segurança energética e a economia global, demonstrando a vulnerabilidade do sistema energético mundial a choques externos (YERGIN, 2023).

As oscilações no fornecimento e nos preços do petróleo têm gerado uma tendência crescente de nacionalismo energético, motivando os países a buscarem a autossuficiência energética e a minimizar a dependência de importações, em resposta à volatilidade global no

setor de petróleo e gás. Nesse contexto, observa-se um impulso significativo para a incorporação de fontes de energia renováveis, como a eólica e a solar, que se caracterizam pela produção descentralizada (YERGIN, 2023). Essa transição para energias renováveis não apenas contribui para a segurança energética nacional, mas também se alinha com os esforços globais de mitigação das mudanças climáticas, ao promover sistemas de energia mais limpos e sustentáveis (UNIÃO EUROPEIA, 2023).

Em sintonia com os esforços globais, está sendo empreendida uma significativa iniciativa para diminuir as emissões de gases de efeito estufa, primariamente originadas da queima de combustíveis fósseis. Os compromissos assumidos durante a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima de 1992 e reforçados pelo Acordo de Paris em 2015, estão progressivamente transcendendo o âmbito discursivo para se materializarem em ações concretas (YERGIN, 2023). Neste contexto, a transição para a eletrificação do transporte e o desenvolvimento de tecnologias baseadas em hidrogênio de baixo carbono destacam-se como exemplos emblemáticos desses esforços, evidenciando o avanço na direção de uma matriz energética mais sustentável e de baixo carbono.

A Figura 1 apresenta uma análise da evolução das diversas fontes de energia desde o ano de 1850, abarcando as perspectivas futuras conforme antecipado pelas estimativas da Agência Internacional de Energia (IEA). Este panorama engloba tanto as fontes de energia tradicionais quanto as alternativas, refletindo as mudanças no panorama energético global e as expectativas para os próximos anos.

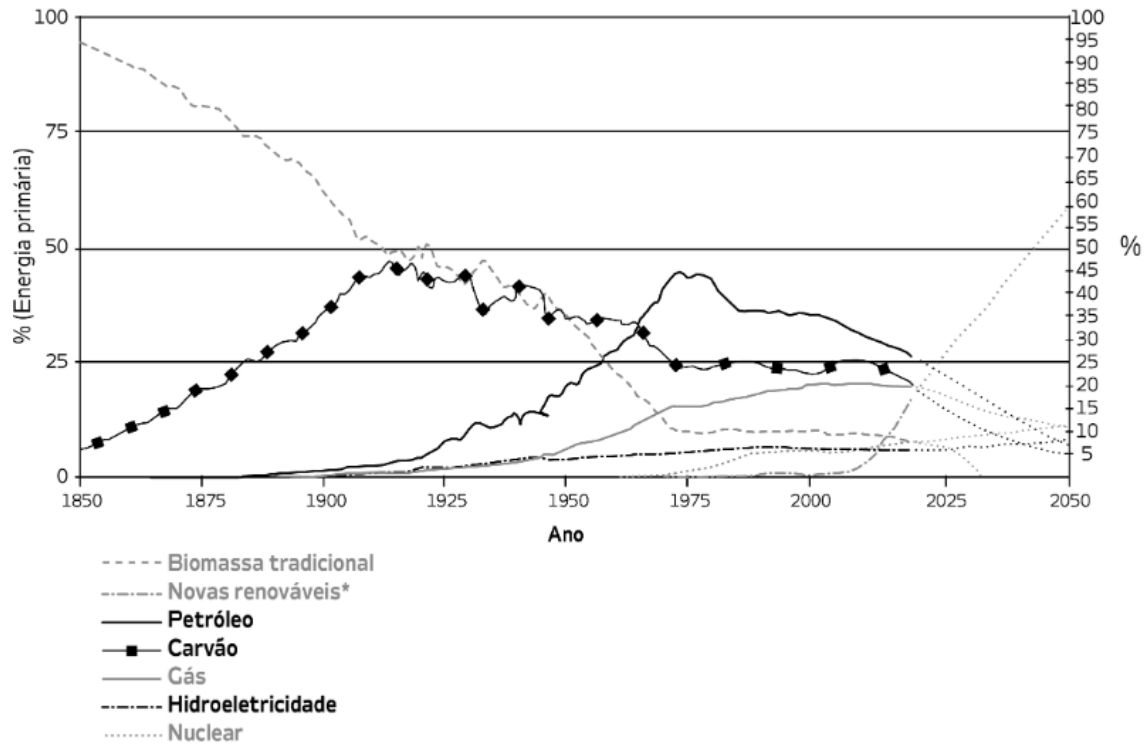


Figura 1: Fontes de energia (1850-2050).

Fonte: IEA *apud* Yergin (2023).

Estas previsões consideram as políticas implementadas por diversas nações com o objetivo de diminuir de forma considerável as emissões de gases de efeito estufa, que contribuem para o aquecimento global. Tais políticas incluem a redução progressiva na utilização de combustíveis fósseis, como carvão, gás natural e petróleo, e o fomento ao desenvolvimento e adoção de fontes de energia renováveis, como a eólica e a solar, bem como a energia nuclear, que, apesar de não ser renovável, apresenta baixas emissões de carbono.

Dessa forma, o conceito de transição energética está vinculado a alterações profundas na composição da matriz energética global. As transições energéticas são, por natureza, processos multifacetados, apresentando diferentes fases e velocidades de mudança dependendo do país, região ou localidade envolvida. Geralmente, não se observa uma mudança abrupta e linear, mas sim um período prolongado de coexistência entre a fonte de energia dominante e aquelas que gradativamente a substituem. A lentidão na transição dos sistemas energéticos globalmente pode ser atribuída a diversos fatores, incluindo a necessidade de adaptar infraestruturas de produção, transporte e consumo de energia. Atualmente, 2020, a transição energética é impulsionada por imperativos como o desenvolvimento sustentável, as respostas às mudanças climáticas e as inovações tecnológicas ligadas à eletrônica e à digitalização, ver Figura 2 (IPEA, 2023; MME; EPE, 2020; RAÍZEN, 2024).

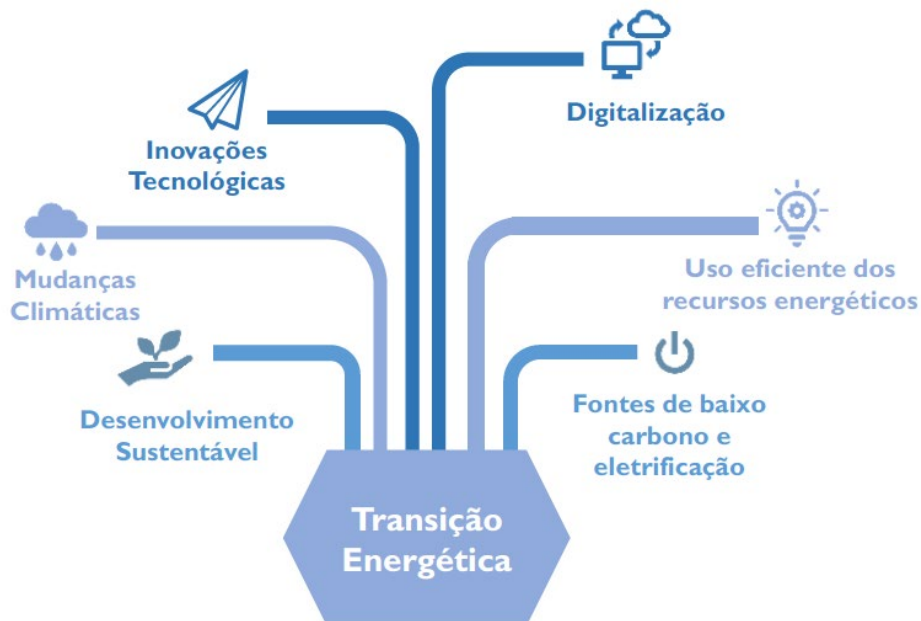


Figura 2: Base da transição energética.

Fonte: MME; EPE (2020).

O processo atual de transição energética constitui um conjunto de mudanças orientadas para uma economia com menor impacto de carbono e reduzida pegada ecológica. Neste cenário, incentivam-se práticas para o uso mais racional dos recursos energéticos e para a diminuição da presença de combustíveis com altas taxas de emissão de carbono na matriz energética global, favorecendo fontes mais sustentáveis como as renováveis e o gás natural, utilizado como um combustível de transição. Paralelamente, a eletrificação dos processos de conversão de energia ganha destaque, acompanhada por uma crescente automação e digitalização de operações, controles e serviços. Essas iniciativas não apenas elevam a eficiência energética, mas também ampliam a utilização de fontes renováveis intermitentes (não despacháveis), como a energia eólica e solar (MME; EPE, 2020).

É importante enfatizar que as alterações na matriz energética primária representam apenas a faceta mais evidente das transições energéticas. Tais transições envolvem também mudanças substanciais na infraestrutura tecnológica dos sistemas de conversão de energia — como as máquinas térmicas ligadas ao uso do carvão mineral, motores de combustão interna, e turbinas aeronáuticas e a gás. Além disso, impactam diretamente os padrões de consumo e as dinâmicas socioeconômicas e ambientais. A digitalização, por sua vez, tem o potencial de reduzir a necessidade de transporte físico de bens e serviços, substituindo-os por transferências de dados e informações — exemplificado por atividades remotas e a impressão 3D. Esses avanços tecnológicos podem, portanto, influenciar e remodelar as relações comerciais e os

padrões de consumo em sociedade, alimentando retroativamente as transformações socioeconômicas e ambientais (MME; EPE, 2020).

As mudanças decorrentes das transições energéticas não apenas reconfiguram o panorama energético, mas também possuem amplas repercussões geopolíticas. Elas modificam o equilíbrio de poder entre nações ou regiões e afetam diversos *stakeholders*, impactando tanto os produtores quanto os consumidores de energias predominantes e as redes tecnológicas a elas vinculadas. Essas transformações influenciam a gama de produtos e serviços gerados por essas tecnologias. Além disso, essas mudanças redistribuem os impactos ambientais e socioeconômicos, afetando como as sociedades acessam e distribuem a riqueza (MME; EPE, 2020).

Importante destacar que tais transformações também criam novas oportunidades no setor energético. Exemplos incluem a revisão de marcos regulatórios que facilitam o reconhecimento dos benefícios ambientais dos recursos energéticos, como a implementação de Certificados de Energia Renovável, Títulos Verdes e esquemas de Precificação de Carbono, promovendo uma maior sustentabilidade e inovação na área energética (CLIMATE BONDS, 2024; GOMES, 2020).

A Economia do Hidrogênio desempenha um papel fundamental na transição para um sistema energético mais sustentável, especialmente considerando a intermitência de muitas fontes renováveis de energia, como a solar e a eólica, que não conseguem atender consistentemente a demanda energética de diversos setores. A eletrólise da água, utilizando eletricidade proveniente de fontes renováveis — conhecida como rota verde —, emerge como a alternativa mais promissora internacionalmente para a produção de hidrogênio. O Brasil é reconhecido globalmente por seu potencial significativo como um dos principais atores neste mercado emergente (MME; EPE, 2020).

Além disso, é fundamental salientar que para alcançar as metas estabelecidas pelo Acordo de Paris, uma extensa descarbonização do sistema energético global se faz necessária (IPCC, 2014; UNFCCC, 2024, 2023). Isso implica na expansão e integração de fontes renováveis em setores intensivos em energia, como transporte e indústria. No entanto, é imperativo desenvolver e implementar mecanismos que garantam uma competição leal entre todas as soluções viáveis que satisfaçam as exigências energéticas, administrando eficientemente a variabilidade das fontes renováveis e atendendo a outras necessidades específicas do sistema energético (MME; EPE, 2020).

2.2. Mudanças climáticas e o aquecimento global

Em um período relativamente breve, aproximadamente um século e meio subsequente à Revolução Industrial, os impactos ambientais oriundos das atividades humanas adquiriram uma magnitude comparável aos provocados por fenômenos naturais, elevando a ação humana a um patamar de influência geológica. Ilustrativamente, enquanto processos naturais como a erosão e atividades vulcânicas deslocam anualmente cerca de 50 milhões de toneladas de materiais, o consumo humano contemporâneo de recursos minerais alcança a média de 8 toneladas *per capita* anualmente, totalizando aproximadamente 48 bilhões de toneladas deslocadas. Essa cifra revela um incremento significativo em comparação a um século atrás, quando a população global era de 1,5 bilhão de indivíduos e o consumo *per capita* não ultrapassava 2 toneladas, resultando em um impacto 16 vezes inferior (GOLDEMBERG, 2023).

De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), o conceito de clima é compreendido como a análise estatística de padrões relevantes do estado do tempo que ocorrem em intervalos temporais variáveis, abrangendo meses até milhões de anos (IPCC, 2014). O clima reflete a regularidade de longa duração das condições atmosféricas em uma determinada área. Os elementos que definem esse conceito incluem padrão, longo prazo e região. O padrão refere-se às condições atmosféricas que se repetem de maneira consistente ao longo do tempo. O longo prazo é o período extenso o suficiente para incorporar variações sazonais e anuais no clima e a região compreende a área geográfica específica onde se estudam estas condições climáticas, que pode variar em escala desde local até global.

O sistema climático terrestre é um complexo entrelaçamento de diversos componentes que inclui a atmosfera, os oceanos, a litosfera, os glaciais e a biosfera. Cada um desempenha um papel fundamental na determinação das condições climáticas de longo prazo (MATHEZ & SMERDON, 1998).

A atmosfera é o envoltório gasoso da Terra, essencial na regulação da radiação solar recebida e refletida, além de ser essencial no ciclo da água e na distribuição de calor pelo planeta. Os oceanos, por sua vez, funcionam como um gigantesco reservatório térmico, desempenhando papel imprescindível na absorção, armazenamento e transporte de calor. A litosfera, embora seja um agente mais estático em escalas temporais humanas, influencia o clima por meio de processos geológicos que liberam ou removem CO₂ da atmosfera (MATHEZ & SMERDON, 1998).

Os glaciais ou geleiras são fundamentais no albedo¹ da Terra, refletindo a radiação solar de volta ao espaço e regulando o clima global. A extensão dos glaciais pode afetar as correntes oceânicas e a circulação atmosférica. Por fim, a biosfera influencia o clima através do sequestro e liberação de gases de efeito estufa, além de mudar o albedo do planeta por meio da cobertura vegetal (NASA, 2023).

A Figura 3 apresenta uma visualização da extensão do gelo marinho antártico de 1978 a 2023. As linhas em cinza claro representam a variação histórica da extensão do gelo marinho para cada ano, enquanto a linha azul forte denota o ano de 2023. O que se destaca imediatamente é o desvio notável da linha de 2023 da média histórica, particularmente de agosto a dezembro, onde ela mergulha para mínimas sem precedentes.

¹ Albedo é um termo derivado do latim *albus* (branco) que se refere à capacidade refletiva de uma superfície ou corpo. No contexto terrestre, o albedo é uma medida da quantidade de radiação solar que é refletida de volta ao espaço pelas superfícies terrestres e atmosféricas. Superfícies mais claras, como neve e gelo, têm um albedo alto, refletindo grande parte da radiação que as atinge, enquanto superfícies escuras, como o oceano ou florestas densas, têm um albedo baixo, absorvendo mais radiação. Albedo terrestre é um indicador crítico do balanço energético do planeta e seu impacto no clima global. Se hipoteticamente o planeta Terra fosse inteiramente revestido por gelo, apresentaria um albedo aproximado de 0,84, refletindo cerca de 84% da luz solar incidente. Em tal cenário, a maior parte da energia solar seria refletida de volta ao espaço, potencialmente levando a uma significativa redução da temperatura global. Contrastando, uma Terra revestida inteiramente por vegetação densa e escura teria um albedo estimado em torno de 0,14, indicando que uma maior parcela da radiação solar seria absorvida, o que poderia resultar em um aumento das temperaturas superficiais. Observações de satélites desde o final dos anos 70 do século XX indicam que o valor médio do albedo terrestre gira em torno de 0,30, demonstrando a habilidade do planeta em refletir quase um terço da energia solar que recebe (NASA, 2023).

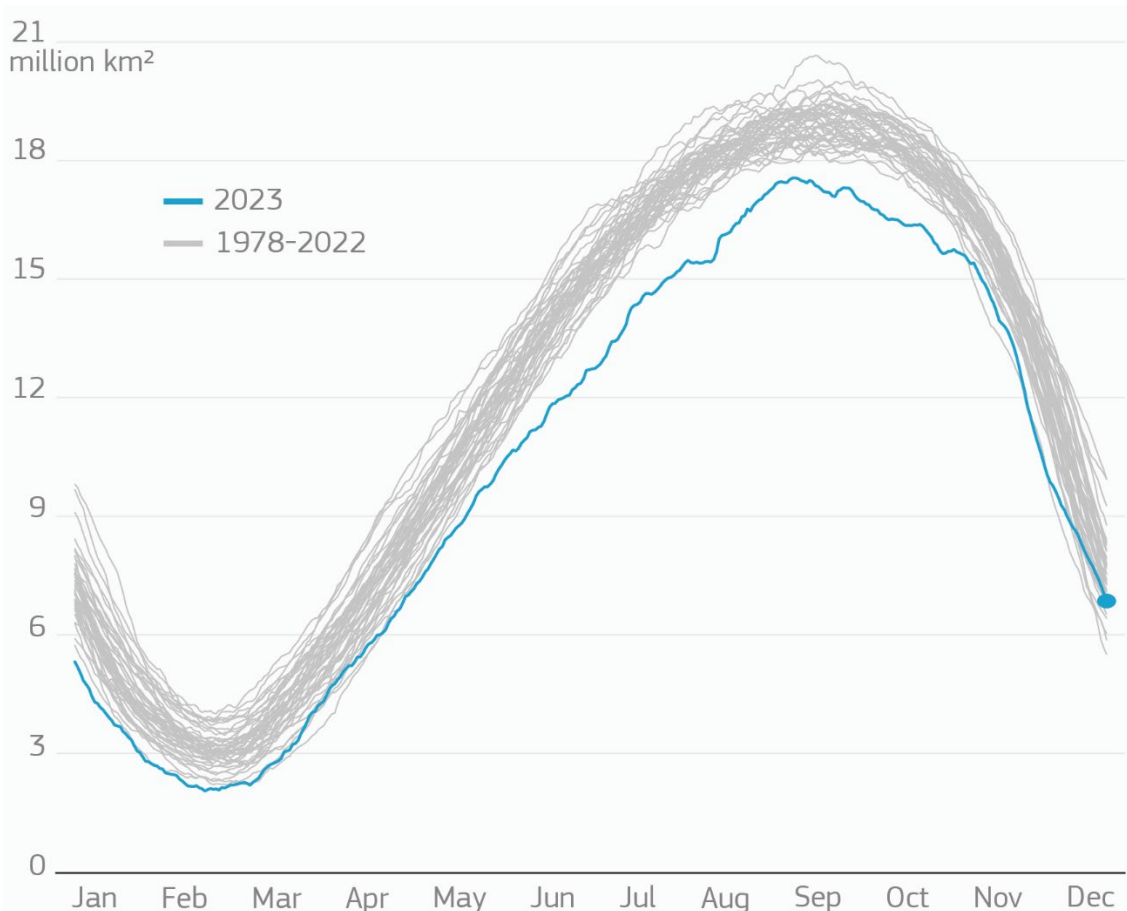


Figura 3: Extensão diária de gelo marítimo da antártica.

Fonte: C3S/ECMWF/EUMETSAT (2024).

Analisando os dados de 2023, conforme Figura 3, indica-se que a extensão do gelo marinho antártico reduziu significativamente, alcançando o que parece ser a menor extensão já registrada. Esses dados são consistentes com as observações feitas ao longo de 2023, que foram marcadas por extensões de gelo marinho em recordes baixos, sugerindo uma potencial aceleração na taxa de perda de gelo marinho (C3S/ECMWF, 2024). Tais mudanças são indicadores críticos no estudo de padrões climáticos e potencialmente sinalizam mudanças ambientais mais amplas ligadas a fenômenos de aquecimento global e mudança climática.

A interconexão entre a redução da extensão do gelo marinho antártico em 2023 e a função vital da atmosfera terrestre na manutenção das condições de vida evidencia a complexidade do sistema climático global. A atmosfera² terrestre, uma camada gasosa essencial que envolve o planeta, desempenha um papel crítico na sustentação da vida ao moderar

² A massa da atmosfera é estimada em aproximadamente $5,14 \times 10^{18}$ kg, em contraste com os oceanos, que possuem uma massa de cerca de $1,39 \times 10^{21}$ kg, e a litosfera, com uma massa imensa de $5,98 \times 10^{24}$ kg (AZEVEDO COELHO et al., 2024).

temperaturas e proporcionar gases vitais. Sem essa camada protetora, as condições na Terra seriam inóspitas, com temperaturas extremamente baixas impedindo a existência da vida tal como a conhecemos (AZEVEDO COELHO et al., 2024).

A estrutura da atmosfera é categorizada em diversas camadas, diferenciadas por variações na composição, temperatura e dinâmica atmosférica. O desenvolvimento da atmosfera iniciou-se há aproximadamente 4,5 bilhões de anos, durante o período de formação terrestre. Originalmente, era composta majoritariamente por vapor d'água, dióxido de carbono e nitrogênio. Ao longo do tempo, essa composição sofreu alterações significativas devido ao resfriamento planetário e à evolução da vida, resultando na atmosfera oxigenada que conhecemos hoje (AZEVEDO COELHO et al., 2024).

Atualmente, a atmosfera terrestre é única no sistema solar devido à sua rica composição em oxigênio. Inicialmente dominada por compostos nitrogenados, sua composição se transformou para incluir 78,1% de nitrogênio (N_2), 20,9% de oxigênio (O_2) e 0,93% de argônio (Ar), entre outros³ gases em menores proporções (BRASIL ESCOLA, 2024) .

A estrutura vertical da atmosfera, ver Figura 4, terrestre apresenta uma complexidade caracterizada pela variação da temperatura em função da altitude. Este fenômeno pode ser observado por meio da análise gráfica, a partir da qual se identifica que a temperatura pode tanto declinar quanto ascender à medida que se ascende na atmosfera. Tal variação permite a estratificação da atmosfera em quatro camadas principais.

³ 0,04% (variável) de Dióxido de carbono (CO_2), 0,002 de neônio (Ne); 0,00017% de metano (CH_4); 0,00005% de hidrogênio (H) (BRASIL ESCOLA, 2024)

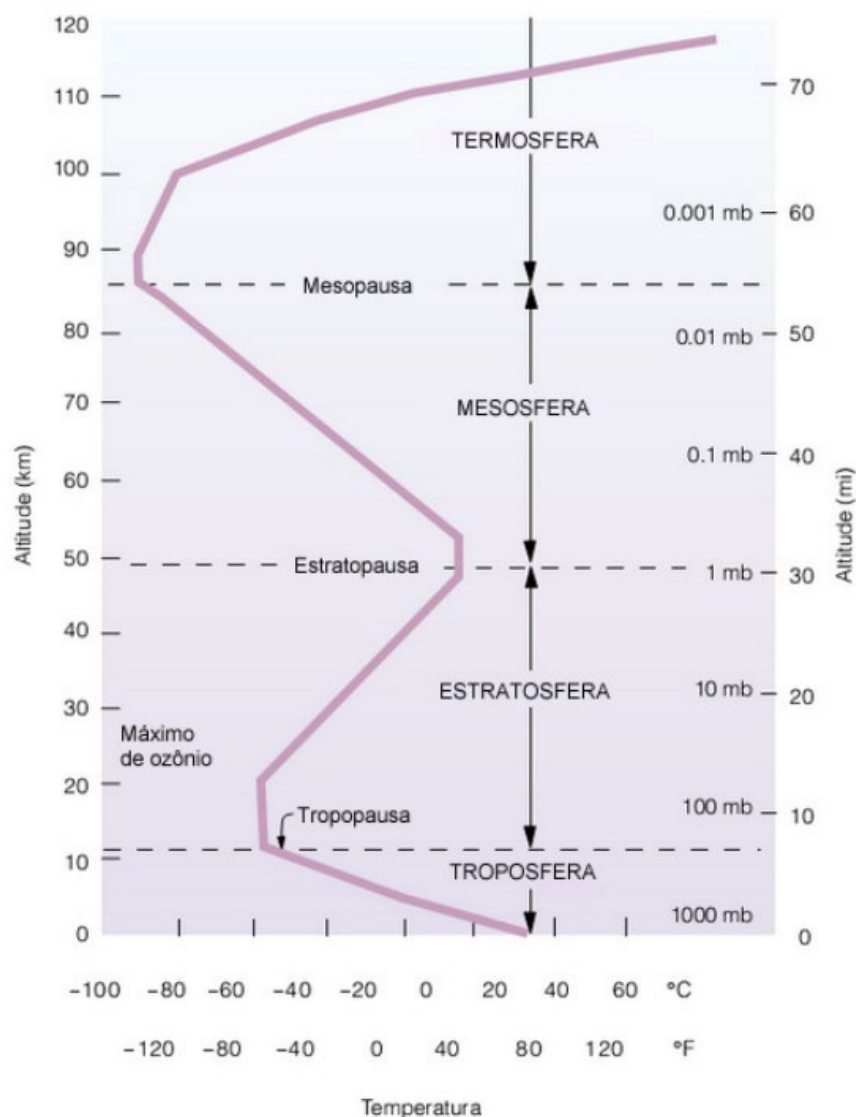


Figura 4: Atmosfera terrestre.

Fonte: Azevedo Coelho et al. (2024).

A camada mais inferior, adjacente à superfície terrestre, é conhecida como troposfera, termo derivado do grego "*tropein*", alusivo a "mudança" ou "mistura". Caracteriza-se por uma diminuição da temperatura com o aumento da altitude, numa média de 6,5°C por quilômetro, até aproximadamente 12 km de altitude, onde se situa a tropopausa, marco divisório com a estratosfera. A troposfera é o principal foco de estudo meteorológico devido à intensa atividade de convecção e mistura vertical promovida pelo aquecimento superficial, o que propicia a instabilidade atmosférica e a consequente formação de fenômenos climáticos variados. Ademais, esta camada abriga a maior parte da biosfera (AZEVEDO COELHO et al., 2024).

A tropopausa, interface entre a troposfera e a estratosfera, possui uma altitude variável influenciada pela temperatura atmosférica e latitude, sendo mais elevada no equador devido à maior convecção térmica e menor nos polos (AZEVEDO COELHO et al., 2024).

Na estratosfera, inicialmente observa-se uma zona isotérmica, onde a temperatura se mantém estável com a altitude. Contudo, acima dos 20 km, a temperatura começa a aumentar até atingir a estratopausa aos 50 km, fenômeno conhecido como inversão térmica, atribuído à absorção de radiação ultravioleta pelo ozônio. Devido à estabilidade desta camada, há uma restrição aos movimentos verticais, o que a torna uma rota preferencial para o tráfego aéreo (AZEVEDO COELHO et al., 2024).

2.2.1. Impactos e desafios das emissões de gases de efeito estufa

A geração de energia, especialmente através da combustão de combustíveis fósseis, é a principal fonte de aproximadamente 75% das emissões globais de gases de efeito estufa. Tal atividade não só constitui o principal impulsionador das mudanças climáticas como também impõe sérias consequências para a saúde pública, com a poluição do ar sendo associada a cerca de cinco milhões de óbitos anualmente (RITCHIE, 2020).

Assim, é imperativo que haja uma transição global para uma matriz energética caracterizada por opções de baixo carbono, como as energias renováveis, em detrimento dos combustíveis fósseis.

Em debates sobre mudanças climáticas, o foco frequentemente recai sobre o dióxido de carbono (CO_2) – principal gás de efeito estufa, cujas fontes incluem a combustão de combustíveis fósseis, processos industriais e mudanças no uso do solo. Contudo, o CO_2 não é o único contribuinte para as mudanças climáticas. Uma gama de outros gases de efeito estufa, tais como o metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), e uma variedade de gases industriais conhecidos coletivamente como "gases fluorados", também têm desempenhado um papel substancial no aquecimento global até o momento (EPA, 2024).

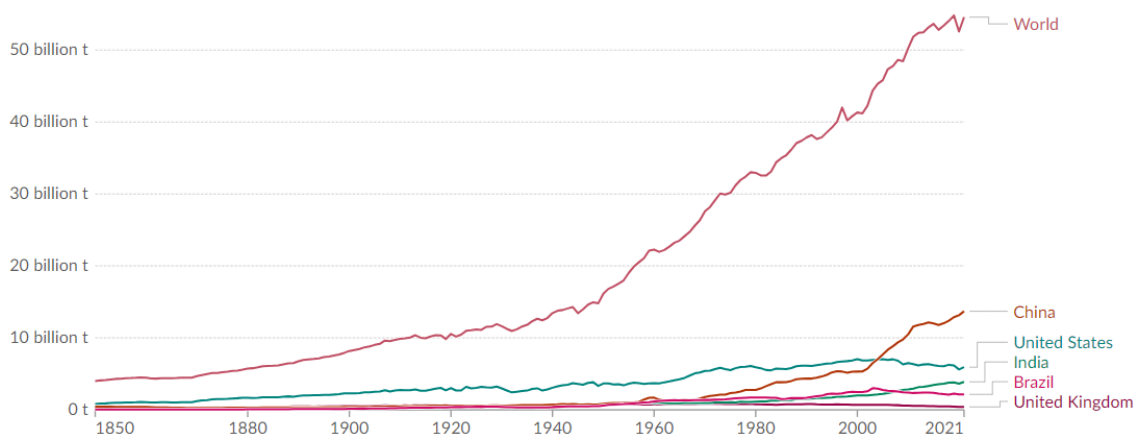


Figura 5: Emissões de gases de efeito estufa.

Fonte: Our World in Data (2024).

A Figura 5 apresentada ilustra a trajetória das emissões⁴ globais de gases de efeito estufa ao longo do tempo, iniciando no ano de 1850 e se estendendo até 2021. Observa-se que as emissões globais têm aumentado significativamente, especialmente a partir da segunda metade do século XX. A figura compara também as emissões de seis entidades distintas: o mundo como um todo, a China, os Estados Unidos, a Índia, o Brasil e o Reino Unido.

De forma notável, as emissões mundiais exibem um crescimento exponencial, o que denota a intensificação das atividades humanas que contribuem para o efeito estufa, como a industrialização e o uso intensivo de combustíveis fósseis. A China, em particular, mostra um aumento significativo em suas emissões nos últimos anos, ultrapassando outras nações historicamente industrializadas como os Estados Unidos e o Reino Unido, que mantêm um crescimento mais estável ou moderado das emissões. O Brasil apresenta um perfil de emissões relativamente menor se comparado às outras nações destacadas.

⁴ As emissões antropogênicas de gases de efeito estufa, abrangendo dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) provêm de uma variedade de fontes, incluindo, mas não limitadas a alterações na gestão e uso do solo (EPA, 2024). A quantificação dessas emissões é realizada mediante a conversão para toneladas de CO₂ equivalente, utilizando-se uma métrica de comparação padronizada com horizonte temporal de 100 anos (OUR WORLD IN DATA, 2024a).

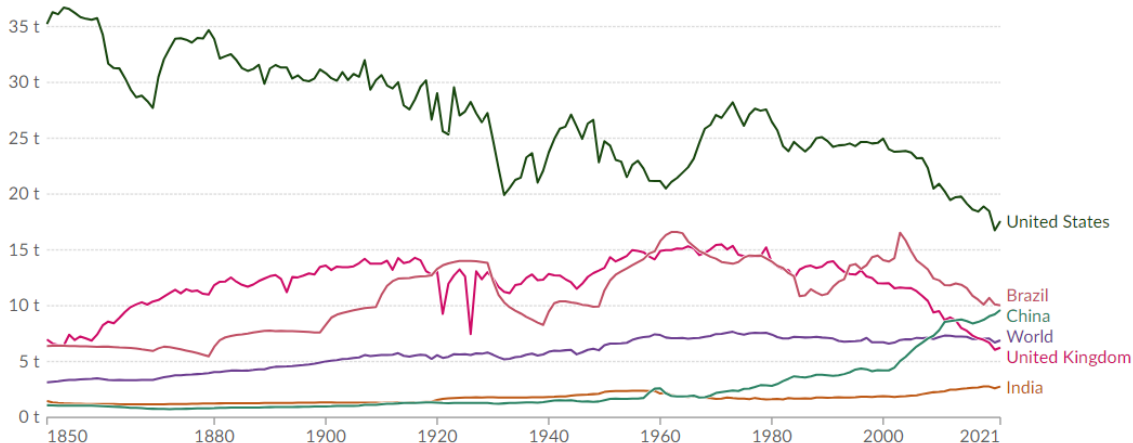


Figura 6: Emissões *per capita* de gases de efeito estufa.

Fonte: Our World in Data (2024).

Ao analisar a Figura 5 e a Figura 6 observa-se diferenças significativas na contribuição para as emissões de gases de efeito estufa (GEE) quando consideramos os dados absolutos em comparação com a emissão *per capita*. A Figura 5 demonstra as emissões totais de GEE, onde países com grandes populações e/ou intensa atividade industrial, como China e Estados Unidos, destacam-se como os maiores emissores. No entanto, essa figura não leva em conta o tamanho da população de cada país.

Já a Figura 6 exibe as emissões de GEE *per capita*, que calcula as emissões médias por pessoa. Quando ajustadas por população, países como os Estados Unidos apresentam valores muito mais altos, sugerindo que, embora o total das emissões possa ser comparável ao de países como a China, a contribuição individual média é consideravelmente maior.

Na Figura 5, emissões totais de GEE, onde o Brasil apresenta um aumento progressivo, porém relativamente moderado em comparação com países de rápido desenvolvimento industrial como a China ou com longa história industrial como os Estados Unidos e o Reino Unido. Esta perspectiva sugere que o Brasil contribui significativamente menos para as emissões globais de GEE do que as outras nações mais desenvolvidas ou populosas.

Contudo, na Figura 6, que demonstra as emissões de GEE *per capita*, o Brasil exibe um perfil diferenciado. As emissões por indivíduo aumentam ao longo do tempo, indicando que o impacto ambiental médio por pessoa está crescendo. Ainda assim, quando comparado com os Estados Unidos, as emissões *per capita* do Brasil são substancialmente menores.

Essa análise revela que, embora o Brasil tenha uma responsabilidade global menor em termos de emissões totais de GEE, o crescimento das emissões *per capita* enfatiza a necessidade de políticas sustentáveis de desenvolvimento e gestão ambiental para mitigar o impacto

climático no futuro. Essas estratégias devem equilibrar o crescimento econômico com a preservação ambiental, garantindo um futuro sustentável para as próximas gerações.

Portanto, a análise *per capita* revela um cenário diferente e complementa o entendimento das responsabilidades globais, mostrando a importância de estratégias diferenciadas para a mitigação das emissões de GEE. Essa análise sugere uma necessidade urgente de mitigação das emissões, destacando os desafios enfrentados globalmente e a importância de compromissos internacionais como o Acordo de Paris para enfrentar o aquecimento global (MASSON-DELMOTTE et al., 2024).

O cômputo global das emissões de gases de efeito estufa⁵ consiste na soma das contribuições de múltiplos gases. Estes incluem o dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄), o óxido nitroso (N₂O), além de gases menos prevalentes, como os hidrofluorcarbonetos (HFCs) e o hexafluoreto de enxofre (SF₆) (EPA, 2024). Cada gás tem um potencial de aquecimento global distinto e contribui de maneira diversa para as emissões totais de gases de efeito estufa.

As fontes primárias de emissões de óxido nitroso⁶ (N₂O) estão majoritariamente associadas às práticas agrícolas: esse gás é gerado nos solos através da utilização de fertilizantes nitrogenados (EPA, 2024). Esse fenômeno ocorre porque os microrganismos presentes nos solos transformam o nitrogênio acessível, que não é inteiramente assimilado pelas plantas, em N₂O. Esse processo não é exclusivo dos fertilizantes sintéticos; também ocorre com o uso de fontes orgânicas de nitrogênio, como o esterco animal (EMBRAPA, 2024a).

Em relação ao seu potencial de aquecimento, o óxido nitroso é um gás de efeito estufa consideravelmente mais potente do que o dióxido de carbono (CO₂). Especificamente, em um horizonte temporal de um século e excluindo-se retroalimentações climáticas, uma tonelada de N₂O contribui para o aquecimento global em uma escala 296 vezes maior que uma tonelada de CO₂ (IPCC, 2001).

⁵ Equivalentes de dióxido de carbono (CO₂eq) constituem uma métrica utilizada para quantificar as emissões totais de gases de efeito estufa de modo unificado, considerando não apenas o CO₂ mas também outros gases. Esta abordagem permite comparar o impacto de diferentes gases com base no seu Potencial de Aquecimento Global (GWP). O GWP é uma medida do calor retido por um determinado gás na atmosfera em comparação com o CO₂, ao qual é atribuído o valor padrão de 1. Se um gás possui um GWP de 10, significa que ele é capaz de reter dez vezes mais calor do que a mesma quantidade de CO₂ por um determinado período. Para calcular o CO₂eq, multiplica-se a quantidade emitida de um determinado gás pelo seu GWP. O GWP é avaliado em diferentes escalas temporais; por exemplo, o GWP100 é o potencial de aquecimento do gás ao longo de 100 anos. A soma dos CO₂eq de cada gás fornece uma medida compreensiva das emissões totais de efeito estufa (OUR WORLD IN DATA, 2024a).

Quanto à permanência na atmosfera, o óxido nitroso apresenta uma vida útil média de aproximadamente 121 anos. Isso é consideravelmente menor do que a durabilidade do CO₂, que pode permanecer na atmosfera por séculos ou até milênios, mas é mais extensa que a do metano, cuja média é de 12 anos (IPCC, 2014; OUR WORLD IN DATA, 2023a).

O óxido nitroso (N₂O) tem sua origem preponderantemente na prática agrícola, mais especificamente através da utilização de fertilizantes contendo nitrogênio (EPA, 2024). Quando estes são aplicados ao solo, proporcionam excesso de nitrogênio que não é totalmente absorvido pelas plantas, tornando-se disponível para que microrganismos no solo o transformem em N₂O (EMBRAPA, 2024a; OUR WORLD IN DATA, 2023b).

A Figura 7 apresenta a trajetória histórica das emissões *per capita* de óxido nitroso (N₂O) de 1850 a 2021. Os Estados Unidos apresentaram um aumento consistente até cerca de 1970, seguido de uma ascensão acentuada até os anos 1990, decrescendo posteriormente, o que pode refletir melhoria em práticas agrícolas ou políticas de mitigação de gases de efeito estufa (EPA, 2024).

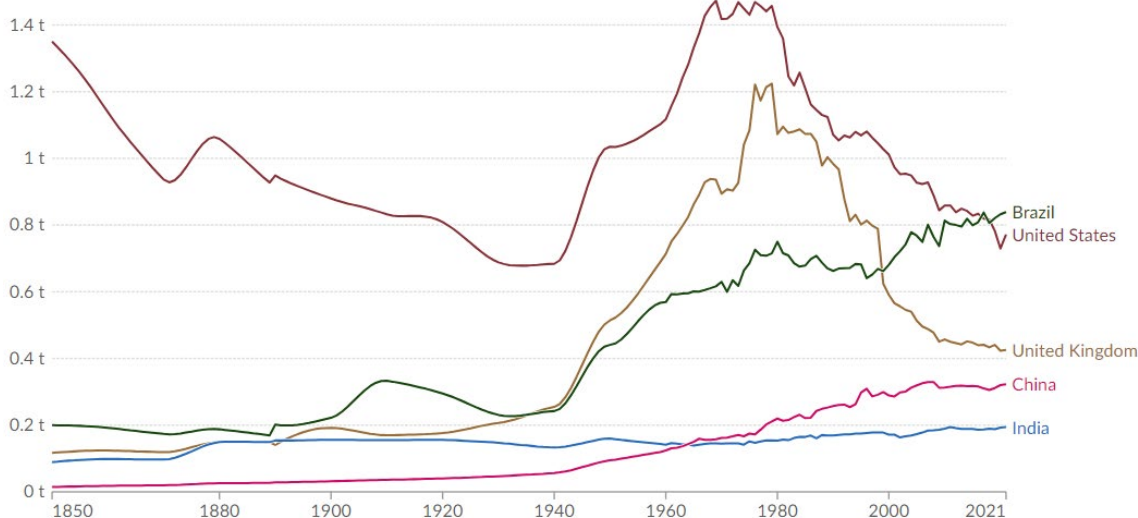


Figura 7: Emissões per capita por ano de óxido nitroso (N₂O) de 1850 a 2021.

Fonte: Our World in Data (2024).

Por outro lado, o Reino Unido manteve um perfil baixo e estável ao longo do tempo, indicando políticas consistentes de controle de emissões e potencialmente uma menor dependência de práticas agrícolas intensivas em nitrogênio. A China exibiu um crescimento substancial a partir dos anos 2000, provavelmente devido ao rápido desenvolvimento industrial e expansão agrícola.

A Índia apresentou um aumento gradual e consistente, sugerindo um aumento contínuo no uso de práticas agrícolas que liberam N_2O . Por fim, o Brasil teve um pico notável nas emissões em meados do século XX, seguido de uma flutuação e, mais recentemente, uma tendência de estabilização ou diminuição, talvez refletindo mudanças nas técnicas agrícolas ou políticas ambientais.

No ano de 2021, conforme Figura 7, observa-se uma variação significativa nas emissões per capita de óxido nitroso (N_2O) entre diferentes países. O Brasil liderou as emissões com 0,84 toneladas por pessoa, o que pode refletir intensas atividades agrícolas que empregam fertilizantes nitrogenados, sendo essa uma das principais fontes de N_2O antropogênico. Os Estados Unidos seguiram de perto com 0,77 toneladas per capita, indicando também altos níveis de emissão que podem ser atribuídos a práticas agrícolas intensivas e outros fatores como o desmatamento para a agropecuária (EPA, 2024).

O Reino Unido apresentou um nível intermediário de 0,43 toneladas per capita. Isto pode ser parcialmente explicado pela menor extensão territorial e por políticas ambientais voltadas para a redução das emissões dos gases de efeito estufa, incluindo o N_2O . Por outro lado, a China e a Índia apresentaram níveis mais baixos, com 0,32 e 0,19 toneladas per capita, respectivamente, o que pode ser influenciado por diferenças nas práticas agrícolas, na eficiência do uso de fertilizantes e na estrutura econômica destes países.

As emissões antropogênicas de metano (CH_4) são majoritariamente oriundas da agricultura, exploração de combustíveis fósseis e gestão de resíduos (EPA, 2024; OUR WORLD IN DATA, 2024b). O metano é gerado pela fermentação entérica durante a digestão de animais ruminantes, como bovinos, caprinos e ovinos (EMBRAPA, 2024b).

Em 2022, a concentração atmosférica de metano superou em duas vezes e meia os índices registrados na era pré-industrial, observando-se uma aceleração desse incremento nos últimos anos. Estima-se que as emissões anuais globais de metano seja de aproximadamente 580 milhões de toneladas, ver Figura 8. Dessas, aproximadamente 40% originam-se de fontes naturais, enquanto cerca de 60% são atribuíveis a atividades antrópicas. Dentro deste contexto, a agricultura emerge como a principal fonte antropogênica, respondendo por aproximadamente um quarto do total de emissões, seguida de perto pelo setor energético. Este último engloba emissões derivadas da exploração de carvão, petróleo, gás natural e biocombustíveis (IEA, 2023a).

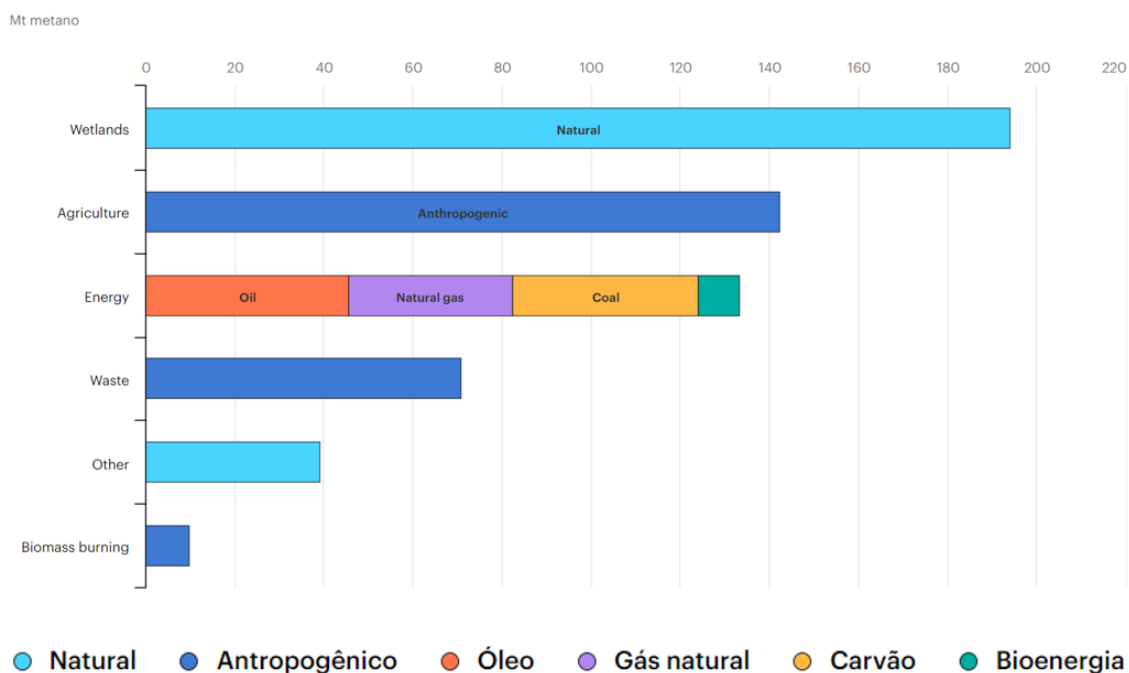


Figura 8: Fontes de emissões de metano em 2022.

Fonte: IEA (2023).

Os campos de arroz alagados criam condições propícias para a metanogênese, onde micróbios produzem metano. As queimadas de grandes áreas florestais, savanas e detritos agrícolas geram metano por combustão incompleta. A decomposição anaeróbica em aterros sanitários também contribui para a liberação de metano. Além disso, tem-se as emissões fugitivas são resultado da extração e processamento de combustíveis fósseis (EMBRAPA, 2024b; IEA, 2024a).

O metano tem um potencial de aquecimento global 23 vezes superior ao do dióxido de carbono (CO_2) em um horizonte de 100 anos, fazendo com que sua menor contribuição em massa seja desproporcionalmente impactante no forçamento radiativo global desde 1750 (IPCC, 2001). Quanto à persistência atmosférica, o metano tem uma vida útil de aproximadamente 12 anos, sendo removido mais rapidamente que o CO_2 . Por isso, iniciativas para diminuir as emissões de metano podem ter efeitos benéficos imediatos no clima (IPCC, 2014).

A Figura 9 apresenta a trajetória histórica das emissões *per capita* de metano (CH_4) desde 1850 até 2021, comparando cinco países. As emissões são expressas em toneladas *per capita* por ano. O Brasil e os Estados Unidos mostram as maiores emissões *per capita*, refletindo significativas atividades agropecuárias que incluem a criação de gado, reconhecida como uma fonte primária de metano devido à fermentação entérica.

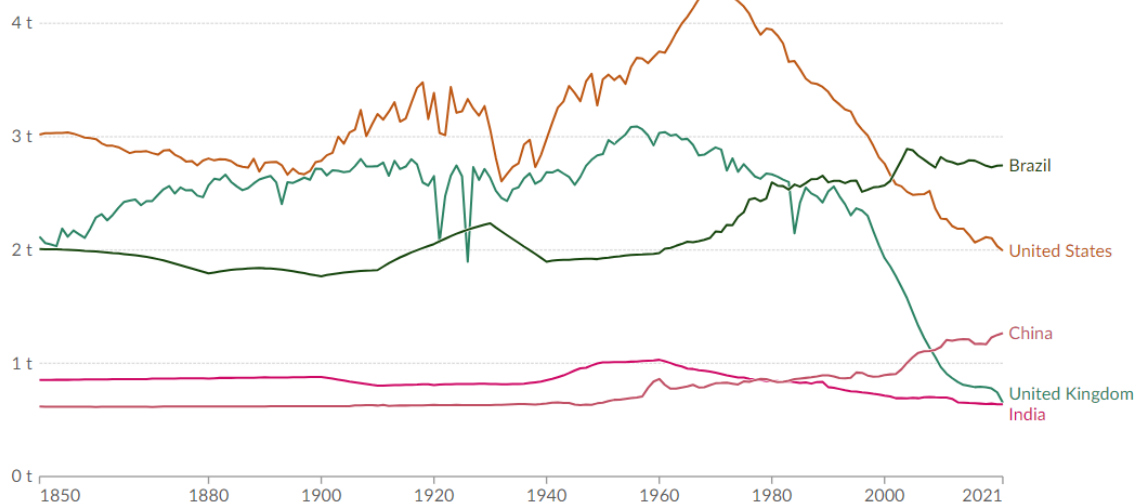


Figura 9: Emissões per capita por ano de metano (CH₄) de 1850 a 2021.

Fonte: Our World in Data (2024).

A China apresenta um crescimento nas emissões ao longo do tempo, o que pode estar ligado à expansão econômica e aumento na produção agropecuária. O Reino Unido e a Índia mostram níveis relativamente baixos e estáveis de emissões per capita ao longo do tempo. O pico notável nas emissões dos Estados Unidos em meados do século XX pode ser atribuído a um aumento na produção de gado e queimadas na época, mas uma subsequente redução sugere melhorias na gestão de resíduos e eficiências na produção agropecuária (EPA, 2024).

Notavelmente, a Figura 9 indica uma queda drástica nas emissões dos Estados Unidos após o pico, que pode ser resultado de políticas ambientais efetivas ou avanços tecnológicos na captura e reutilização de metano. Este declínio nas emissões por país mais industrializado sugere um movimento positivo na gestão das emissões de metano, contrastando com o aumento contínuo em países em desenvolvimento ou emergentes como Brasil e China, onde a mitigação ainda é um desafio.

Os dados indicam que em 2021, ver Figura 9, o Brasil foi o maior emissor de metano entre as nações listadas, com 2,7 toneladas, seguido pelos Estados Unidos com 2,0 tonelada. A China registrou 1,3 toneladas, enquanto o Reino Unido e a Índia apresentaram menores quantidades, com 0,7 e 0,6 toneladas, respectivamente.

Essas estatísticas são reflexo direto das atividades predominantes em cada país. No Brasil, por exemplo, a significativa contribuição para as emissões de metano pode ser atribuída às vastas atividades agropecuárias, especialmente na criação de gado, que produz metano através da fermentação entérica (EMBRAPA, 2024c). Os Estados Unidos, com sua extensa

produção industrial e de energia, além da agricultura, também têm uma grande contribuição. China, Reino Unido e Índia possuem emissões relevantes mas em menor escala, o que pode ser associado a uma combinação de práticas agrícolas, industrialização e esforços de mitigação diferenciados (UN, 2024).

As emissões de dióxido de carbono (CO₂) são predominantemente derivadas da combustão de combustíveis fósseis para geração de energia e processos industriais, como a fabricação de cimento. A proporção de contribuição de cada fonte de combustível para as emissões totais de CO₂ de um país é variável e dependente do *mix* energético nacional. As emissões podem ser detalhadamente segregadas entre o uso de carvão, petróleo, gás natural, processos de produção de cimento e a queima de gás em outras aplicações(OUR WORLD IN DATA, 2023a).

A Figura 10 apresenta as tendências históricas das emissões *per capita* de dióxido de carbono (CO₂) de vários países desde 1850 até 2021. Observa-se que as emissões *per capita* dos Estados Unidos têm sido historicamente altas, com um pico em meados do século 20 e uma tendência de queda e estabilização nas últimas décadas. Este padrão pode ser parcialmente atribuído a melhorias na eficiência energética e a uma transição gradual para fontes de energia menos intensivas em carbono(OUR WORLD IN DATA, 2023b).

A China, por outro lado, mostrou um rápido aumento nas emissões per capita de CO₂, especialmente desde o início dos anos 2000, refletindo seu rápido crescimento industrial e expansão econômica. O Reino Unido, berço da Revolução Industrial, mostra uma tendência de declínio a longo prazo após um pico no início do século 20, o que pode indicar a desindustrialização e a adoção de políticas de energia limpa (OUR WORLD IN DATA, 2023a).

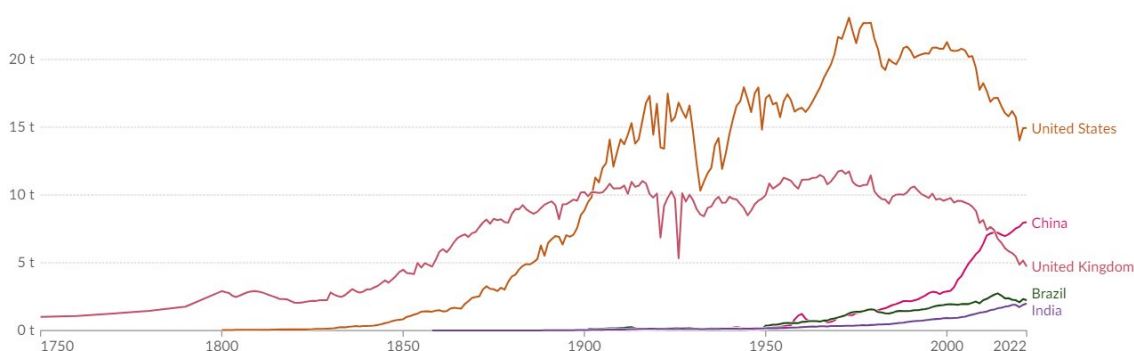


Figura 10: Emissões *per capita* por ano de dióxido de carbono (CO₂) de 1850 a 2021.

Fonte: Our World in Data (2023).

As emissões *per capita* de CO₂ do Brasil e da Índia permaneceram relativamente baixas em comparação com as outras nações representadas, embora com uma tendência de crescimento lento ao longo do tempo, possivelmente devido ao desenvolvimento econômico e à mudança nas práticas de uso de terra e energia.

Tais dados ilustram a necessidade de considerar não apenas as emissões totais, mas também as emissões relativas à população de cada nação, para entender a contribuição global de cada país ao efeito estufa e, conseqüentemente, identificar onde as intervenções podem ser mais necessárias e eficazes.

De acordo com a Figura 10 os Estados Unidos lideram as emissões de CO₂ em 2022 com 14,9 toneladas por pessoa, o que reflete a alta taxa de consumo energético e a dependência de combustíveis fósseis. A China, com seu rápido crescimento industrial e expansão econômica, registra 8,0 toneladas per capita, indicando o impacto significativo do desenvolvimento em suas emissões de CO₂.

O Reino Unido, com 4,7 toneladas por pessoa, e o Brasil, com 2,2 toneladas, mostram um nível intermediário de emissões *per capita* de CO₂. Essas quantias podem ser atribuídas a uma combinação de industrialização e medidas de mitigação de emissões. A Índia, com 2,0 toneladas por pessoa, apresenta as menores emissões *per capita* dentre os países listados, possivelmente devido à menor taxa de industrialização.

2.2.2. Emissão de dióxido de carbono e suas implicações para o aquecimento global

O debate sobre as mudanças climáticas na esfera científica destaca uma evolução preocupante nos indicadores climáticos. Uma evidência crítica dessa mudança é o aumento acentuado nos níveis de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera, elevando-se de 315 partes por milhão (ppm) em 1958 para 424,55 ppm em fevereiro de 2024, um dos principais impulsionadores do efeito estufa e, por consequência, do aquecimento global (GLOBAL MONITORING LABORATORY, 2024).

Este aumento de concentração de CO₂ acompanha um incremento na temperatura global, distinguindo-se duas fases principais: um aquecimento inicial entre 1910 e 1940 e um período de maior intensidade a partir de 1970 até hoje. A correlação dessas temperaturas com o aumento do CO₂ e outras observações reforça a compreensão de que atividades humanas,

como a queima de combustíveis fósseis e mudanças no uso do solo, estão intrinsecamente ligadas às alterações no clima da Terra (MATHEZ & SMERDON, 1998; ONU, 2024).

A gravidade dessas informações é inegável para o entendimento dos mecanismos climáticos e ressalta a urgência em políticas ambientais e práticas de gestão de recursos naturais para mitigar as consequências das mudanças climáticas, enfatizando a necessidade crítica de reduzir as emissões de gases de efeito estufa.

O *Global Carbon Budget* de 2023 prevê um ligeiro aumento nas emissões de CO₂ fóssil, refletindo uma redução em algumas regiões como Europa e EUA, mas um aumento geral, sinalizando uma ação global insuficiente contra os combustíveis fósseis para evitar alterações climáticas perigosas. Surpreendentemente, as emissões decorrentes da mudança no uso do solo diminuíram um pouco, embora não o suficiente para serem compensadas pela reflorestação (GLOBAL CARBON PROJECT, 2024).

A pesquisa liderada pela Universidade de *Exeter* e envolvendo outras instituições renomadas, como a Universidade de *East Anglia* e o Centro CICERO para Pesquisa Climática Internacional, alerta para a lentidão das ações para reduzir as emissões de carbono dos combustíveis fósseis. A estimativa é que, ao ritmo atual, há 50% de chance de excedermos consistentemente o limite de aquecimento global de 1,5°C em cerca de sete anos, destacando a iminente necessidade de descarbonização das economias para evitar os piores impactos das mudanças climáticas (GLOBAL CARBON PROJECT, 2024).

A Figura 12 e Figura 13 fornecem uma visualização clara da tendência ascendente nos níveis de CO₂ atmosférico medidos no Observatório de *Mauna Loa*, ver Figura 11. A Figura 12 apresenta a média mensal, de 2020 a 2024, do CO₂, com os dados exibindo flutuações sazonais e uma tendência de aumento ao longo dos últimos anos. A linha vermelha representa as medições mensais, enquanto o traço com pontos pretos destaca a média móvel, que suaviza as flutuações sazonais e revela a tendência subjacente. O pico e o vale anuais refletem as variações sazonais naturais da absorção de CO₂ pelos ecossistemas terrestres, mas o que é notavelmente evidente é a tendência geral de alta.



Figura 11: Observatório Mauna Loa.

Fonte: Global Monitoring Laboratory (2024).

A Figura 13 estende esse registro de volta até 1960, mostrando uma curva quase monotônica ascendente ao longo do tempo. Esta 'Curva de Keeling', nomeada em homenagem a C. David Keeling⁷, revela uma aceleração constante na acumulação de CO₂ na atmosfera, começando de níveis em torno de 315 ppm em 1958 para ultrapassar 400 ppm recentemente (424,55 ppm em fevereiro de 2024). Este aumento exponencial é indicativo do impacto humano no ciclo global do carbono, principalmente através da queima de combustíveis fósseis e do desmatamento (GLOBAL MONITORING LABORATORY, 2024).

⁷ Charles David Keeling foi um climatologista estadunidense nascido em *Scranton*, em 20 de abril de 1928, e falecido em *Hamilton*, em 20 de junho de 2005, vítima de um ataque cardíaco aos 77 anos. Ele é amplamente reconhecido por seu trabalho pioneiro na medição dos níveis de dióxido de carbono na atmosfera, uma contribuição fundamental para a pesquisa climática. Keeling iniciou o programa de monitoramento atmosférico que levou ao desenvolvimento da famosa "Curva de Keeling", um gráfico que demonstra o aumento contínuo dos níveis de CO₂ na atmosfera terrestre desde a década de 1950 e é um indicador crucial das mudanças climáticas antropogênicas (WIKIPÉDIA, 2024).

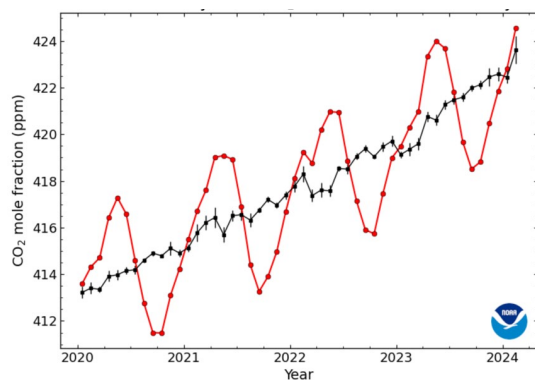


Figura 12: Média mensal de CO₂ no observatório Mauna Loa⁸ de 2020 a 2024⁹.

Fonte: Global Monitoring Laboratory (2024).

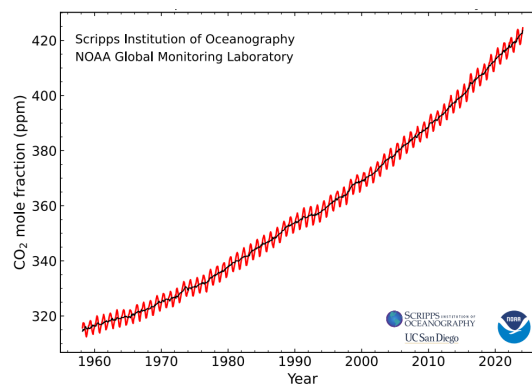


Figura 13: CO₂ atmosférico no observatório Mauna Loa de 1960 a 2024.

Fonte: Global Monitoring Laboratory (2024).

Esses dados apresentados pela Figura 12 e Figura 13 são um testemunho visual poderoso do processo histórico de acumulação acelerada de CO₂ na atmosfera, reforçando a urgência de ações mitigadoras para enfrentar a mudança climática. A continuidade deste padrão de aumento no nível de CO₂ atmosférico tem implicações sérias para o efeito estufa e o aquecimento global, corroborando a necessidade de políticas climáticas mais assertivas e colaboração internacional para reduzir as emissões de gases de efeito estufa.

Nesse sentido, a Figura 14 ilustra uma anomalia de temperatura global, com uma comparação aos padrões climáticos médios entre 1951 e 1980. Os tons mais quentes indicam um aumento de temperatura, que se concentram significativamente no hemisfério norte, refletindo os achados da Agência Espacial Americana (NASA) que 2023 foi o ano mais quente registrado.

⁸ As medições de dióxido de carbono (CO₂) realizadas em *Mauna Loa Observatory*, no Havaí, representam a série mais extensa de registros diretos de CO₂ atmosférico. Iniciadas por C. David Keeling do *Scripps Institution of Oceanography* em março de 1958, estas observações foram estabelecidas em uma estação da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) (KEELING apud GLOBAL MONITORING LABORATORY, 2024). A partir de maio de 1974, a NOAA começou a realizar suas próprias medições de CO₂, que têm sido conduzidas em conjunto com as da Scripps desde essa data (THONING apud GLOBAL MONITORING LABORATORY, 2024).

⁹ As medições de dióxido de carbono (CO₂) realizadas em *Mauna Loa Observatory*, no Havaí, representam a série mais extensa de registros diretos de CO₂ atmosférico. Iniciadas por C. David Keeling do *Scripps Institution of Oceanography* em março de 1958, estas observações foram estabelecidas em uma estação da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) (KEELING apud GLOBAL MONITORING LABORATORY, 2024). A partir de maio de 1974, a NOAA começou a realizar suas próprias medições de CO₂, que têm sido conduzidas em conjunto com as da Scripps desde essa data (THONING apud GLOBAL MONITORING LABORATORY, 2024).

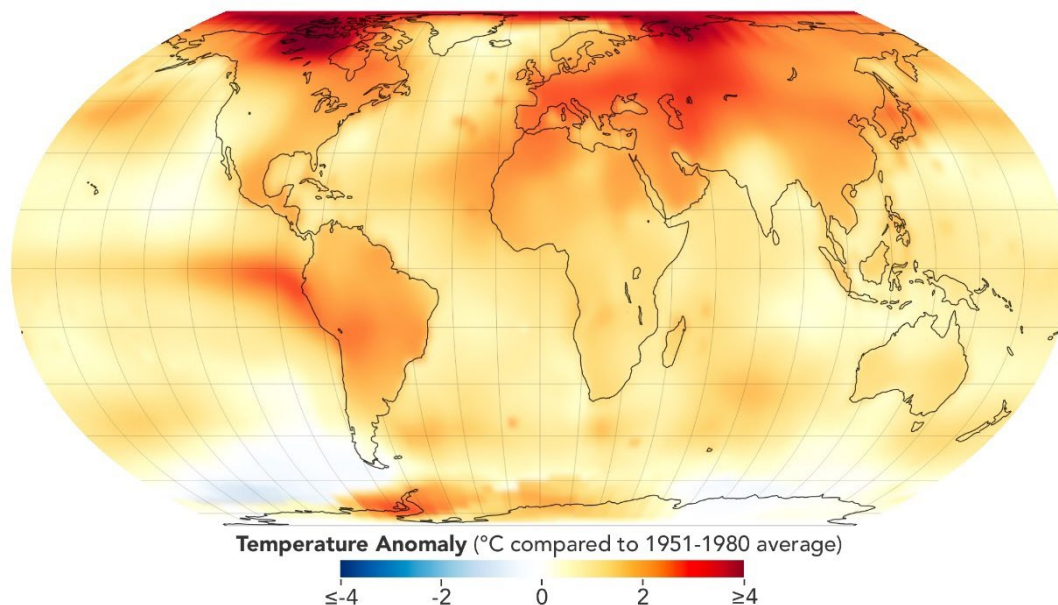


Figura 14: Anomalia de temperatura em °C, em 2023, comparado com a média de 1951-1980.

Fonte: NASA (2024).

A NASA, por intermédio do *Goddard Institute for Space Studies*, divulgou que o ano de 2023 se consagrou como o mais quente na série histórica, iniciada em 1880. Esta constatação emerge de uma meticulosa análise das médias de temperatura global anual, destacando uma discrepância notável em relação às médias climáticas estabelecidas entre 1951 e 1980 (NASA, 2024). O período compreendido entre junho e dezembro de 2023 foi particularmente significativo, com cada mês ultrapassando recordes anteriores de calor, sendo julho destacado como o mês supremo neste contexto.

Investigações científicas se aprofundaram na questão do porquê deste fenômeno extraordinário em 2023, sobretudo na sua segunda metade. A elevação progressiva de gases de efeito estufa foi identificada como a principal causa subjacente (NASA, 2024).

Este incremento é resultado de mais de um século de atividades humanas intensivas, incluindo a queima de combustíveis fósseis e alterações significativas no uso do solo, que contribuíram para o acúmulo de gases de efeito estufa na atmosfera. Esses gases funcionam efetivamente como um isolante térmico, exacerbando o aquecimento global.

Em maio de 2023, as medições indicaram que as concentrações atmosféricas de dióxido de carbono atingiram um ápice histórico de 424 partes por milhão no Observatório Mauna Loa, Figura 11, situado no Havá (GLOBAL MONITORING LABORATORY, 2024). Esse marco representa uma tendência ascendente contínua, corroborada por outras iniciativas de monitoramento globais. Análises retrospectivas, apoiadas por dados de núcleos de gelo,

sugerem que os níveis atuais de dióxido de carbono são os mais elevados em aproximadamente 800.000 anos (NASA, 2024).

Visando resgatar o processo histórico de evolução do aquecimento global e reforçar o momento climático atual (2024), a Figura 15 apresenta duas representações gráficas do aumento das temperaturas globais ao longo do tempo, ilustrando claramente o fenômeno do aquecimento global. No gráfico da esquerda da Figura 15, temos uma média de cinco anos das temperaturas globais desde 1850. Observa-se uma tendência de aquecimento gradual, mas mais acentuada nas últimas décadas, indicada pela linha vermelha da ERA5¹⁰, que denota os dados mais recentes, evidenciando um acréscimo significativo comparado a outras fontes, indicadas pela área em tons de laranja.

A gráfico da direita, Figura 15, foca nas médias anuais de temperatura a partir de 1967, com uma visualização mais detalhada da variação anual. A progressão das barras verticais, que se tornam mais altas e densas em direção a 2023, simboliza o aumento constante da temperatura, sublinhando o pico em 2023.

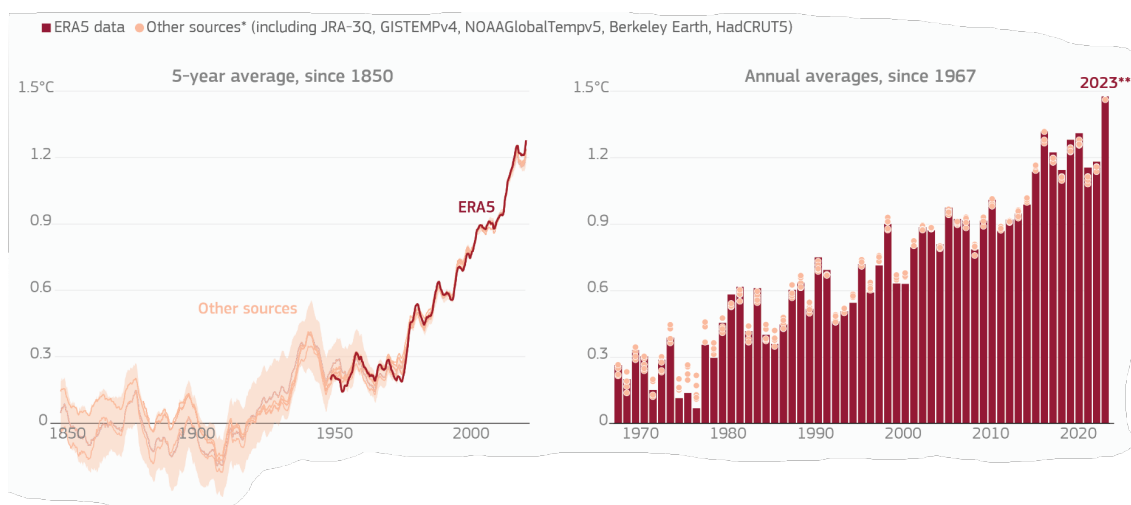


Figura 15: Temperatura global da superfície: aumento acima do nível pré-industrial (1850-1900).

* Os dados ERA5 e JRA-3Q são mostrados apenas a partir de 1948. A área sombreada representa a incerteza para os dados HadCRUT5. Estimativa para 2023 baseada apenas em dados ERA5 e JRA-3Q.

Fonte: C3S/ECMWF (2024).

¹⁰ O ERA5 representa a mais recente e avançada reanálise do clima global realizada pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), abrangendo dados históricos desde janeiro de 1940 até a atualidade. Desenvolvido sob os auspícios do *Copernicus Climate Change Service* (C3S) e integrado ao ECMWF, o ERA5 é fundamental para compreender dinâmicas climáticas complexas. Compreendendo estimativas horárias de inúmeras variáveis climáticas, o ERA5 abrange dados atmosféricos, terrestres e oceânicos. A cobertura de dados é extensa, estendendo-se por uma malha global de 31 km e incorporando 137 camadas verticais da atmosfera, do nível do mar até 80 km de altitude. Este conjunto de dados também é notável por fornecer estimativas de incerteza para cada variável, oferecidas em resoluções espaciais e temporais simplificadas (ECMWF, 2024).

A análise da Figura 15 fornece um retrato alarmante da tendência de aquecimento global que estamos vivenciando. O ano de 2023 estabeleceu um marco preocupante ao ser confirmado como o ano mais quente desde que os registros globais de temperatura começaram em 1850. A temperatura média global atingiu 14,98°C, que é 0,17°C superior ao recorde anterior de 2016 (C3S/ECMWF, 2024).

Este aumento representa um aquecimento de 0,60°C acima da média do período de 1991-2020 e uma alarmante ascensão de 1,48°C em comparação com os níveis pré-industriais de 1850-1900. Tais estatísticas salientam a progressão contínua do aquecimento do planeta e uma tendência que parece não apenas persistir, mas também se acelerar (C3S/ECMWF, 2024; GLOBAL MONITORING LABORATORY, 2024; NASA, 2024).

É importante destacar que cada mês de junho a dezembro de 2023 foi mais quente do que o mesmo mês em anos anteriores, com julho e agosto sendo os dois meses mais quentes já registrados, e o verão boreal de 2023 sendo a estação mais quente já registrada. Setembro de 2023 teve um desvio de temperatura maior que qualquer outro mês no conjunto de dados ERA5, 0,93°C acima da média de 1991-2020. Da mesma forma, outubro, novembro e dezembro também tiveram temperaturas excepcionalmente altas, com desvios de 0,85°C acima da média, tornando-se os segundos maiores em termos de desvio de temperatura para esses meses (C3S/ECMWF, 2024). Esses dados ressaltam uma clara tendência de aquecimento global que afeta todas as regiões do planeta, sublinhando a urgência de ações globais para mitigar as mudanças climáticas.

2.3. Da poluição local à crise ambiental global

Diante deste panorama, emergiram novas problemáticas e áreas de interesse no âmbito ambiental. Os desafios ambientais são comumente categorizados em três esferas: local, regional e global. A poluição local, abrangendo questões como qualidade do ar, fornecimento de água potável, gestão de resíduos sólidos e efluentes, entre outros, é uma preocupação desde a antiguidade, exemplificada pelas infraestruturas de cidades da Roma Antiga. Entretanto, em diversas nações em desenvolvimento, uma parcela significativa da população reside em condições precárias, evidenciadas nas periferias urbanas, onde a falta de infraestrutura básica é patente. Tais condições são frequentemente associadas à pobreza e demandam a atuação dos governos locais (GOLDEMBERG, 2023; MAY, 2010; THOMAS, 2010).

Por sua vez, a poluição regional, impulsionada por veículos automotores, geração de energia e indústrias pesadas, predomina em contextos de maior prosperidade econômica. Metrôpoles como Los Angeles, Cidade do México e São Paulo enfrentam há décadas a problemática do *smog* e outras formas de poluição atmosférica resultantes da queima de combustíveis fósseis. Em certas circunstâncias, a poluição regional pode transcender fronteiras, causando fenômenos como a chuva ácida, que, embora originada em um país, afeta ecossistemas aquáticos em territórios adjacentes. Tal problemática demanda soluções coordenadas em escalas estadual, nacional e, eventualmente, internacional (GOLDEMBERG, 2023; MAY, 2010; THOMAS, 2010).

A poluição global, caracterizada por questões como o esgotamento da camada de ozônio e o aquecimento global, é impulsionada por alterações na composição atmosférica e transcende limitações geográficas. As consequências dessa forma de poluição afetam indistintamente o globo, tornando imperativa uma abordagem colaborativa internacional para sua mitigação (GOLDEMBERG, 2023; MAY, 2010; THOMAS, 2010).

Embora a classificação dos problemas ambientais em categorias locais, regionais e globais forneça um esquema organizacional útil, é importante reconhecer o caráter fluido dessas categorias, visto que questões inicialmente locais podem adquirir dimensões regionais ou globais, como ilustrado pelos episódios de derramamento de petróleo que, apesar de frequentes, ocasionalmente ganham proeminência global devido à sua magnitude ou às consequências derivadas (GOLDEMBERG, 2023; MAY, 2010; THOMAS, 2010).

2.3.1. Impactos ambientais local e global

Os desafios ambientais locais categorizam-se em três principais vertentes: i) poluição atmosférica urbana, ii) de interiores e, iii) contaminação hídrica e do solo. A poluição atmosférica urbana se origina preponderantemente das emissões veiculares, como carros e caminhões movidos a gasolina e diesel. Poluentes típicos incluem dióxido de enxofre (SO₂), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NOX) e partículas em suspensão (MP), geradas pela combustão de combustíveis fósseis como o petróleo e o carvão, além das emissões industriais e da produção de energia elétrica (GOLDEMBERG, 2023).

A Poluição de ambientes internos consiste na liberação de partículas em suspensão (MP) e CO decorrem do uso de combustíveis sólidos, como biomassa e carvão, para aquecimento e

culinária, bem como de emissões nocivas oriundas de processos industriais e de manufatura (GOLDEMBERG, 2023).

A contaminação hídrica e do solo refere-se ao comprometimento de corpos hídricos superficiais (rios, lagos, estuários) e subterrâneos, assim como a poluição do solo. Advêm de derramamentos de derivados de petróleo, aplicação de fertilizantes e pesticidas na agropecuária, vazamentos em postos de combustível e descartes industriais diversos. Adicionalmente, zonas industriais e de extração mineral inativas, que não passaram por processos adequados de desativação (como limpeza, isolamento, armazenamento seguro e recuperação), também representam uma fonte significativa de degradação ambiental (GOLDEMBERG, 2023).

A poluição atmosférica urbana representa uma das consequências mais evidentes e indesejáveis do progresso civilizatório. Essa questão já se manifestava no século XVI, evidenciada pelo adiamento das sessões do parlamento britânico em Londres, atribuído a intensos episódios de poluição advindos da combustão de madeira e carvão para aquecimento doméstico. A emissão de fuligem e partículas sólidas atua como núcleo de condensação para o vapor d'água atmosférico, culminando na formação de nevoeiros densos. Um episódio notório ocorreu em 1952, quando um espesso nevoeiro em Londres foi responsável por aproximadamente 4.000 fatalidades e mais de 20.000 enfermidades, com a poluição do Rio Tâmisa desempenhando um papel significativo neste contexto. Tal catástrofe precipitou a implementação da *Clean Air Act* de 1956 no Reino Unido, que delimitou restrições às emissões poluentes e estabeleceu padrões de qualidade do ar. Medidas similares foram adotadas subsequentemente em diversas nações da Europa Ocidental, América do Norte e Japão, promovendo a instituição de órgãos regulatórios dedicados ao monitoramento e à preservação da qualidade ambiental, com resultados amplamente positivos (GOLDEMBERG, 2023).

Os principais contaminantes atmosféricos urbanos compreendem: i) óxidos de enxofre (SO_x), sobretudo SO_2 ; ii) óxidos de nitrogênio (NO_x), incluindo principalmente o óxido nítrico (NO) e o dióxido de nitrogênio (NO_2); iii) monóxido de carbono (CO); material particulado (MP), que abarcam metais pesados como chumbo; e iv) Ozônio (O_3) (GOLDEMBERG, 2023).

Predominantemente, as emissões de dióxido de enxofre, responsáveis por cerca de 90% do total, originam-se dos sistemas de energia. A reação do SO_2 com o vapor d'água na atmosfera gera chuva ácida sulfúrica, cujas emissões vêm decrescendo em regiões desenvolvidas nas últimas duas décadas, contrastando com o aumento observado em áreas em desenvolvimento (GOLDEMBERG, 2023).

Em zonas industrializadas, a indústria e o setor de transportes emergem como as principais fontes de CO_2 , com a combustão de combustíveis fósseis e madeira representando

aproximadamente um terço do total de emissões antrópicas. Nas regiões em desenvolvimento, a combustão ineficiente em equipamentos rudimentares constitui uma das principais origens deste poluente (GOLDEMBERG, 2023).

Muitos desafios de poluição têm sua gênese em ambientes urbanos, mas não se limitam a essas localidades, expandindo-se para regiões geograficamente distantes e, por vezes, ultrapassando fronteiras internacionais. Entre os principais problemas ambientais regionais, destacam-se: i) chuva ácida e; ii) poluição marinha e de corpos hídricos transfronteiriços (GOLDEMBERG, 2023).

A chuva Ácida resulta da combinação de água atmosférica (presente em forma de chuva, neve, entre outros) com dióxido de enxofre (SO_2) e dióxido de nitrogênio (NO_2), culminando na formação de ácidos sulfúrico (H_2SO_4) e nítrico (HNO_3). A origem do SO_2 associa-se às impurezas em combustíveis fósseis, enquanto o NO_2 advém da combustão de tais combustíveis em altas temperaturas, promovendo a reação do nitrogênio e oxigênio atmosféricos (GOLDEMBERG, 2023).

Poluição Marinha e de Corpos Hídricos Transfronteiriços: Caracterizada pelo derramamento de petróleo e outros contaminantes em águas que atravessam fronteiras estaduais ou internacionais, essa forma de poluição acarreta a contaminação de lençóis freáticos através da infiltração de substâncias nocivas. Os oceanos, destinatários finais de grande parte dos despejos líquidos e de uma parcela substancial dos resíduos sólidos produzidos em terra, recebem mais de 75% de sua carga poluente de fontes terrestres, incluindo escoamento superficial e descargas em cursos d'água, litorais e procedentes da atmosfera. Contribuições remanescentes à poluição oceânica emergem de atividades como navegação, descarte direto e exploração *offshore* de petróleo, todas intrinsecamente ligadas ao setor energético (GOLDEMBERG, 2023).

Há mais de três décadas, a Suécia começou a expressar preocupações quanto aos efeitos prejudiciais da acidificação ambiental, particularmente evidenciada pelo declínio de populações de peixes em seus corpos d'água, fenômeno correlacionado às alterações no pH aquático. O pH, uma escala que mensura a acidez ou alcalinidade de soluções, considera 7 como um valor neutro, correspondente à água destilada equilibrada em íons positivos e negativos. Valores inferiores a 7 indicam acidez, enquanto superiores a 7 denotam alcalinidade. As medições de pH em precipitações acidificadas, especialmente notáveis nos Estados Unidos e na Suécia, variam geralmente entre 4 e 5 (GOLDEMBERG, 2023).

A chuva ácida é primariamente constituída por ácido sulfúrico (H_2SO_4) e ácido nítrico (HNO_3), sintetizados na atmosfera pela interação entre o dióxido de enxofre (SO_2) e óxidos de

nitrogênio (NO_x), subprodutos da combustão de combustíveis fósseis. Esses poluentes atmosféricos, transportados pelo vento por até 1.000 km de sua fonte original, resultam em acidificação distante de sua origem, caracterizando-o como um desafio transregional, muitas vezes transnacional (GOLDEMBERG, 2023; THOMAS, 2010).

Os danos associados ao SO_2 e ao NO_x ocorrem por meio de dois processos: a deposição seca, prejudicial à vegetação e estruturas, e a deposição úmida, quando esses compostos se dissolvem em precipitação ou névoa, gerando a chuva ácida. A complexidade das reações químicas envolvidas na formação da chuva ácida ainda é parcialmente desconhecida, dependendo de variáveis locais, condições meteorológicas e composição atmosférica. Fatores como radiação solar, partículas de fuligem e presença de metais-traço¹¹ podem intensificar a reação ácida em determinadas circunstâncias (GOLDEMBERG, 2023).

Embora existam fluxos naturais de enxofre e nitrogênio oriundos de fontes como vulcões, incêndios florestais e atividade elétrica atmosférica, é a contribuição antropogênica concentrada em áreas industriais que eleva significativamente os níveis de deposição destes elementos, excedendo os limites naturais e impondo uma problemática ambiental de grande magnitude (GOLDEMBERG, 2023).

Os problemas ambientais globais são aqueles que ultrapassam limites geopolíticos, englobando questões como as emissões de dióxido de carbono (CO_2) provenientes da queima de combustíveis fósseis, a destruição de florestas primárias e as liberações de metano (CH_4) e outros gases que intensificam o fenômeno do efeito estufa (GOLDEMBERG, 2023).

Adicionalmente, há problemas ambientais de escala mundial associados indiretamente ao setor energético, tais como a emissão de ozônio; o desflorestamento visando à obtenção de lenha e carvão, bem como ao avanço das fronteiras agrícolas; a contaminação biológica pelo acúmulo de metais pesados, exemplificada pelo mercúrio emitido por centrais termoelétricas a carvão, que posteriormente integra a cadeia alimentar; a presença de substâncias nocivas produzidas antropogenicamente, como os bifenilos policlorados (PCBs) encontrados em fluidos de equipamentos elétricos; e a dispersão de materiais radioativos resultante de acidentes nucleares, experimentações atômicas e vazamentos de radiação (GOLDEMBERG, 2023).

¹¹ O conceito de "metais-traço" refere-se aos elementos químicos presentes em concentrações mínimas no meio ambiente, os quais podem tornar-se agentes de contaminação ambiental sob determinadas condições (CAMILA et al., 2011).

2.3.2. Dinâmicas atmosféricas e gases de efeito estufa

3. Adicionalmente, há problemas ambientais de escala mundial associados indiretamente ao setor energético, tais como a emissão de ozônio; o desflorestamento visando à obtenção de lenha e carvão, bem como ao avanço das fronteiras agrícolas; a contaminação biológica pelo acúmulo de metais pesados, exemplificada pelo mercúrio emitido por centrais termoelétricas a carvão, que posteriormente integra a cadeia alimentar; a presença de substâncias nocivas produzidas antropogenicamente, como os bifenilos policlorados (PCBs) encontrados em fluidos de equipamentos elétricos; e a dispersão de materiais radioativos resultante de acidentes nucleares, experimentações atômicas e vazamentos de radiação (GOLDEMBERG, 2023).

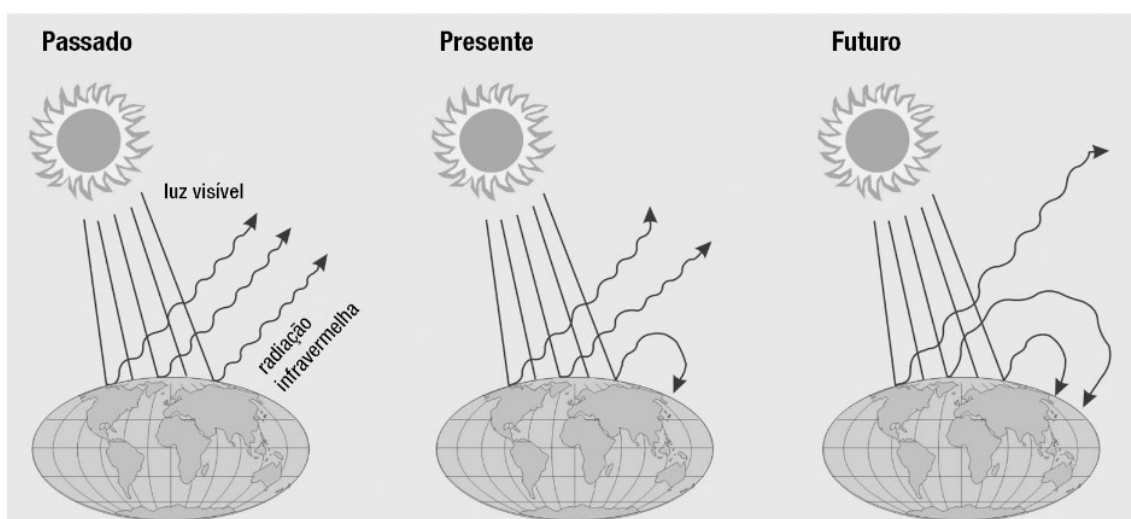


Figura 16: O efeito estufa.

Fonte: Goldemberg (2023).

Em 1896, o cientista Svante Arrhenius postulou que as emissões antrópicas de dióxido de carbono (CO_2) poderiam induzir um aquecimento global. Inicialmente, essa hipótese foi considerada mais um tema de investigação acadêmica do que uma preocupação imediata. Tradicionalmente, a concentração de CO_2 na atmosfera, resultante da combustão de matéria orgânica, manteve-se estável por milênios. Contudo, a revolução industrial iniciada no século XVIII marcou o início de um aumento progressivo nos níveis atmosféricos de CO_2 devido à queima intensificada de combustíveis fósseis (GOLDEMBERG, 2023).

O fenômeno conhecido como efeito estufa, ver Figura 16, que resulta da retenção de calor na atmosfera terrestre por gases como o CO₂, é fundamental para a manutenção da vida no planeta, ao moderar as flutuações de temperatura entre o dia e a noite. Sem esse mecanismo natural, a temperatura média na superfície terrestre poderia ser drasticamente mais baixa (entre 15 e 20 °C abaixo de zero), ao contrário de Vênus, cuja atmosfera rica em CO₂ acarreta altas temperaturas constantes (GOLDEMBERG, 2023).

A intensidade do aquecimento global está diretamente relacionada à quantidade e às características dos gases de efeito estufa presentes na atmosfera, bem como à sua longevidade. Além dos gases, aerossóis provenientes de vulcões, emissões industriais de sulfatos, entre outras fontes, podem influenciar o clima ao absorver e refletir a radiação solar, geralmente resultando em um efeito de resfriamento. Entretanto, a presença de ozônio nas camadas troposférica e estratosférica e alterações no albedo da Terra, provocadas por atividades como desmatamento e alterações no uso do solo, também exercem impacto sobre o clima, embora em menor escala e com maior incerteza científica (GOLDEMBERG, 2023).

As atividades humanas que alteram o equilíbrio radiativo da Terra, seja pelo aumento de gases de efeito estufa ou pela presença de aerossóis, afetam a temperatura atmosférica e oceânica, bem como os padrões climáticos associados. Essas interferências antropogênicas podem interagir e somar-se às variações climáticas naturais (GOLDEMBERG, 2023).

Os principais gases de efeito estufa incluem dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) e halons (clorofluorocarbonetos (CFCs) e hexafluoreto de enxofre (SF₆)). A concentração de CO₂ na atmosfera apresenta uma grande variação, indo de 315 partes por milhão (ppm) em 1958 para 424,55 ppm em fevereiro de 2024¹² (GLOBAL MONITORING LABORATORY, 2024) até 770 partes por bilhão para o CH₄ (GOLDEMBERG, 2023).

A capacidade desses gases em reter o calor reemitido pela Terra na atmosfera varia de acordo com suas propriedades específicas, ver Tabela 1. Por exemplo, o potencial de aquecimento global do CH₄ supera o do CO₂ em 23 vezes.

¹² De acordo com as projeções do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), a manutenção de níveis de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera em uma concentração estável de 550 partes por milhão (ppm) resultaria em um incremento aproximado da temperatura média global de cerca de 3 graus Celsius (IPCC, 2014).

Tabela 1: Efeito de aquecimento de diferentes gases de efeito estufa¹³.

Gás de Efeito Estufa	Potencial de aquecimento global (GWP) por 100 anos
CO ₂	1
CH ₄	23
N ₂ O	296
CF ₃ CH ₂ F*	1.300
CHF ₃ **	12.000
SF ₆	22.200

* HFC-134a gás refrigerante utilizados em ar condicionado e freezers.

** HFC-23 conhecido como trifluorometano é um subproduto da produção hidroclorofluorcarboneto utilizado em sistemas de refrigeração de ar condicionado.

Fonte: IPCC (2001).

A Tabela 1, conforme já destacado, mostra o Potencial de Aquecimento Global (GWP) de vários gases de efeito estufa ao longo de 100 anos. O CO₂ é utilizado como referência com GWP de 1, enquanto outros gases, como CH₄, N₂O, HFC-23, HFC-134a, e SF₆, têm GWPs muito mais altos, refletindo sua maior capacidade de reter calor na atmosfera por molécula quando comparados ao CO₂.

A Figura 17 é um gráfico que apresenta a Força Radiativa (*Radiative Forcing*) dos gases de efeito estufa ao longo do tempo, do final dos anos 1970 até 2022. O Índice Anual de Gás de Estufa (*Annual Greenhouse Gás Index – AGGI*¹⁴) de 2022 é marcado como 1,49, indicando um aumento de 49% na força radiativa desde 1990, o ano de referência.

O AGGI é uma medida que relaciona as concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa com a capacidade de aquecer a atmosfera. O aumento no Índice Anual de Gás de Estufa (*Annual Greenhouse Gás Index – AGGI*) reflete a acumulação de gases de efeito estufa e o consequente aumento no seu impacto no aquecimento global.

¹³ No sexto relatório do IPCC, tem-se que o gás de efeito estufa hexafluoreto de enxofre (SF₆), apresenta uma GWP de 24.300 vezes o GWP do CO₂. O óxido nitroso (N₂O) tem um GWP de 273. O metano (CH₄) têm GWP de 27,9 (IPCC, 2021; OUR WORLD IN DATA, 2024b).

¹⁴ O Índice Anual de Gases de Efeito Estufa (AGGI) pode ser comparado à regulação de temperatura em um cobertor elétrico. Assim como o ajuste do controle não oferece uma medida exata da temperatura que experimentaremos, o AGGI não fornece uma projeção precisa do aquecimento climático terrestre. Contudo, é reconhecido que pequenos incrementos no controle tendem a aumentar gradualmente o calor do cobertor, não de forma instantânea. Analogamente, elevações consideráveis no AGGI indicam que, a longo prazo, a temperatura global se intensificará significativamente (GLOBAL MONITORING LABORATORY, 2024a).

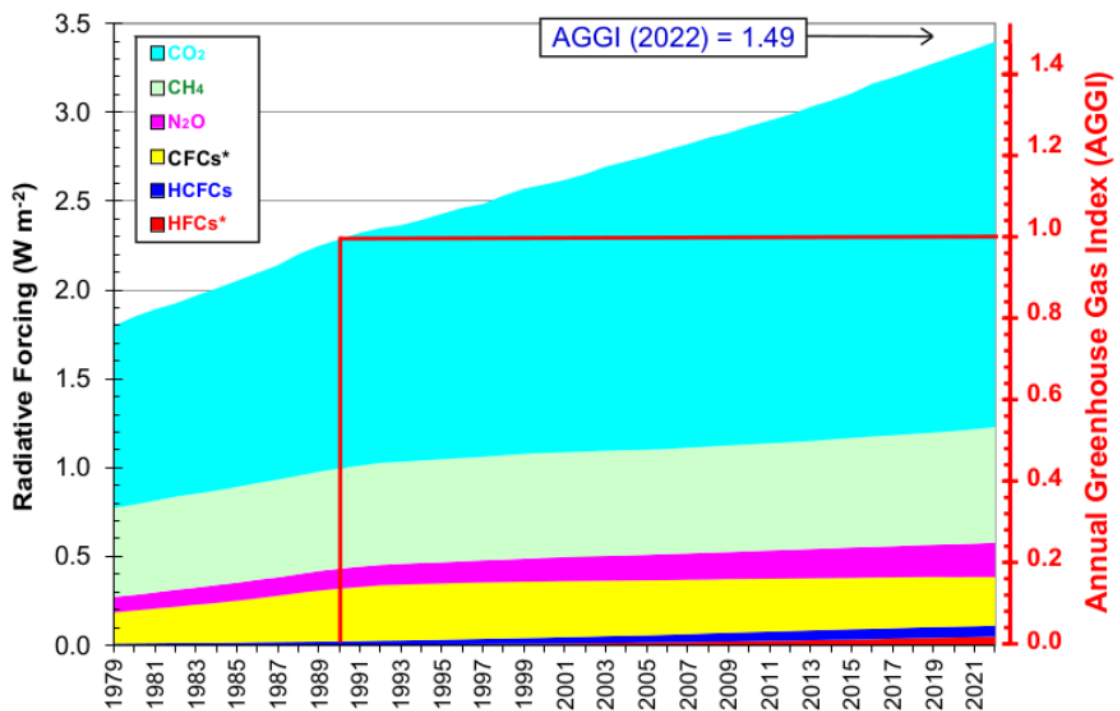


Figura 17: Índice anual de gás de efeito estufa (AGGI).

Fonte: Global Monitoring Laboratory (2024a).

Embora o CO₂ tenha um GWP individual mais baixo, ele é o principal contribuinte para o AGGI devido à sua grande quantidade na atmosfera. A análise conjunta da Tabela 1 e da Figura 17 reforça que, apesar de gases como o CH₄ e o N₂O terem um GWP muito alto, suas concentrações são relativamente baixas se comparadas ao CO₂. Isso explica por que o CO₂ continua a ser o foco principal dos esforços de mitigação das mudanças climáticas, mesmo que por molécula, seu potencial de aquecimento seja menor.

A Figura 18 apresentada é composta por dois gráficos que descrevem o impacto dos gases de efeito estufa (GEE) ao longo do tempo após a emissão. No gráfico da esquerda, vemos a 'força radiante integrada', que representa a força cumulativa que um GEE tem sobre o equilíbrio térmico da Terra. Observa-se que o CO₂ tem uma contribuição crescente e sustentada ao longo do tempo, diferentemente do metano (CH₄) e do óxido nitroso (N₂O), que têm impactos imediatos, mas que se estabilizam ou diminuem com o tempo.

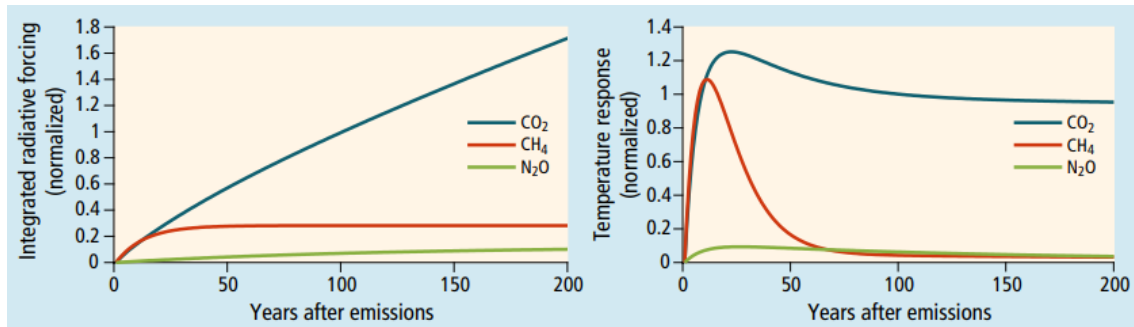


Figura 18: Tempo de permanência dos gases de efeito estufa na atmosfera e impacto na temperatura.

Fonte: IPCC (2014).

Na Figura 18, gráfico da direita, está a 'resposta de temperatura', que reflete a mudança na temperatura média global decorrente da força radiativa dos GEE. O CO₂ mostra um aumento rápido da influência na temperatura, que alcança um pico e depois declina muito lentamente, indicando o longo período durante o qual o CO₂ permanece na atmosfera e continua exercendo efeito no clima. Por outro lado, o CH₄ tem uma resposta rápida na temperatura que logo declina, refletindo seu curto tempo de vida atmosférico. Já o N₂O tem um perfil mais atenuado e persistente em comparação com o CH₄.

É importante reconhecer que a eficácia na redução do aquecimento global depende não apenas do GWP de cada gás, mas também de sua abundância e longevidade na atmosfera, que é onde o CO₂ se destaca e é, portanto, uma preocupação central nas estratégias de redução de emissões.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Hidrogênio renovável: mercado, tecnologia e estratégias para uma economia de baixo carbono

4.1.1. Panorama do mercado de hidrogênio

4.1.1.1. Dinâmicas globais e avanços na produção de hidrogênio de baixa emissão: tendências, desafios e perspectivas futuras

Em 2022, a produção global de hidrogênio alcançou aproximadamente 95 Mt, representando um crescimento de 3% em relação ao ano anterior, conforme ilustrado na Figura 19. A predominância na produção continuou a ser de combustíveis fósseis, com o gás natural sem o uso de tecnologias de captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS) constituindo 62% do total. O carvão, especialmente na China, contribuiu com 21%, e o hidrogênio como subproduto, oriundo principalmente de refinarias e da indústria petroquímica durante processos como a reforma de nafta, representou 16%.

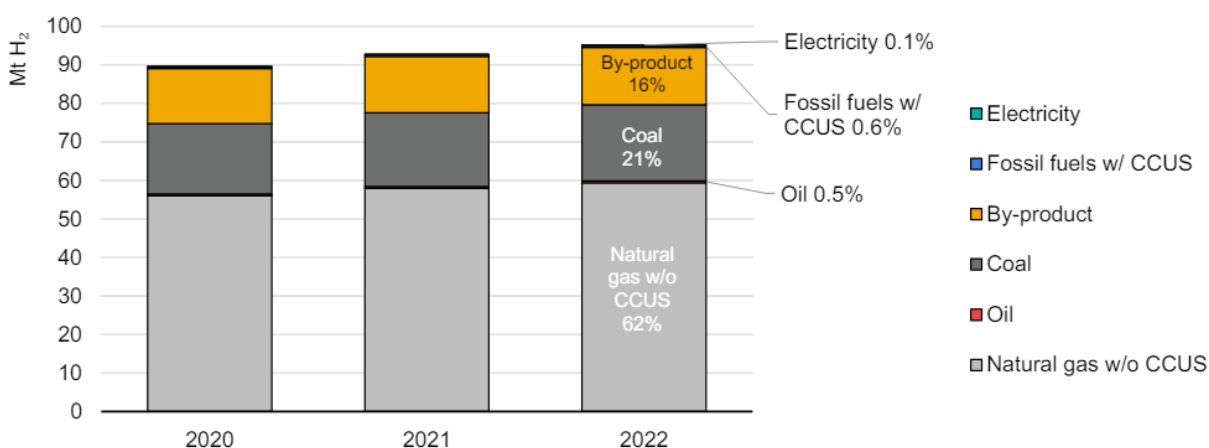


Figura 19: Produção global de hidrogênio por tecnologia, 2020-2022.

Fonte: (IEA, 2023b)

A produção de hidrogênio de baixa emissão foi inferior a 1 Mt, correspondendo a apenas 0,7% da produção global, mantendo-se consistente com os números de 2021 e originando-se majoritariamente de fontes fósseis com CCUS. A produção de hidrogênio (H₂) por eletrólise da água, embora pequena, mostrou um aumento de 35% em relação ao ano anterior, ainda assim permanecendo abaixo de 100 kt H₂.

Regionalmente, a China liderou a produção global com quase 30% do total, refletindo a alta demanda interna das indústrias de refinaria e química. Mais de 70% da produção foi concentrada na China, Estados Unidos, Oriente Médio, Índia e Rússia, em ordem decrescente de contribuição.

A produção global de hidrogênio de baixa emissão está em expansão, com vários projetos anunciados que, se concretizados, poderão elevar a produção anual para mais de 20 milhões de toneladas (Mt) até 2030, um aumento significativo em relação aos 16 Mt registrados em 2022. Este crescimento representa um acréscimo superior a 30% em apenas um ano (IEA, 2023b).

Atualmente, metade do hidrogênio produzido por projetos anunciados para 2030 está em fase de estudo de viabilidade, enquanto cerca de 45% ainda estão em estágios iniciais de desenvolvimento. Apenas 4% dos projetos alcançaram uma decisão final de investimento (FID¹⁵) e estão em construção. Destes, quase metade está associada ao uso existente de hidrogênio em refinarias e na indústria química. Os projetos de eletrólise são predominantes, representando mais de 70% da produção projetada de hidrogênio de baixa emissão para 2030, ver Figura 20. Contudo, 55% desses projetos de eletrólise estão ainda em estágios iniciais, necessitando de desenvolvimento adicional nos próximos anos para assegurar que se tornem operacionais até 2030.

¹⁵ *Final investment decision* (IEA, 2023b).

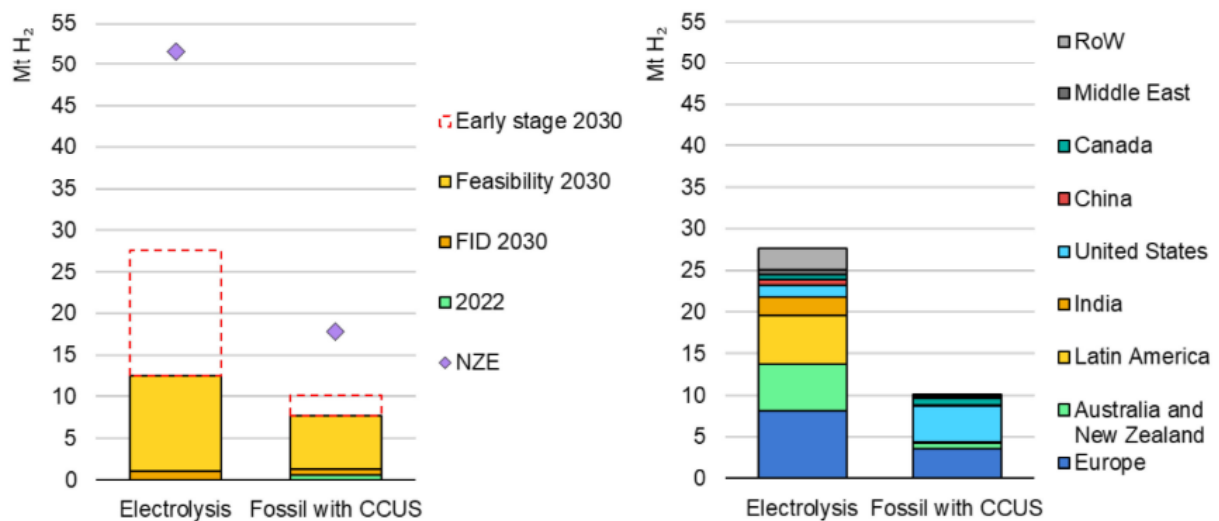


Figura 20: Produção de hidrogênio de baixas emissões por rota tecnológica, maturidade e região com base em projetos anunciados e no NZE até 2050, 2030.

Fonte: (IEA, 2023b)

A Figura 20 mostra que, conforme os projetos anunciados até o momento, a Europa e a Austrália correspondem a quase 30% e 20%, respectivamente, dos projetos de hidrogênio eletrolítico planejados para 2030. Na Europa, Espanha, Dinamarca, Alemanha e Países Baixos lideram, representando quase 55% da produção de hidrogênio eletrolítico do continente. Em 2022, durante a segunda rodada de aprovação de financiamento para Projetos Importantes de Interesse Europeu Comum (IPCEI¹⁶) relacionados ao hidrogênio, a Comissão Europeia concentrou-se em projetos que promovem o fornecimento de hidrogênio renovável e de baixo carbono, com previsão de iniciar os primeiros leilões do Banco Europeu de Hidrogênio no final de 2023. Utilizando suas excelentes fontes renováveis, a Austrália poderia alcançar uma produção próxima de 6 Mt por meio da eletrólise até 2030, com muitos projetos voltados para mercados de exportação. Na América Latina, espera-se que a produção de hidrogênio por eletrólise alcance quase 6 Mt até 2030, com destaque para projetos no Chile, Brasil e Argentina (IEA, 2023b).

Nos Estados Unidos, foram anunciados 9 GW de projetos de eletrólise nos últimos 12 meses do ano de 2023, impulsionados pelo Crédito Fiscal para Produção de Hidrogênio Limpo. Além disso, houve um desenvolvimento significativo de eletrólise na China, onde muitos projetos estão em construção, representando quase 40% do nível de produção atual de

¹⁶ *Important Projects of Common European Interest (IPCEI)* (IEA, 2023b).

hidrogênio de baixa emissão. Na África, a produção de hidrogênio de projetos de eletrólise anunciados poderia chegar a 2 Mt até 2030 (IEA, 2023b).

Para a produção de hidrogênio a partir de combustíveis fósseis com CCUS, os Estados Unidos poderiam representar 4 Mt até 2030. A Europa poderia alcançar mais de 3 Mt, com projetos principalmente localizados no Reino Unido, nos Países Baixos e na Noruega. A produção dos projetos anunciados corresponde a mais da metade da produção projetada de hidrogênio de baixa emissão de quase 70 Mt prevista para 2030 no Cenário NZE. A diferença restante de 30 Mt entre todos os projetos anunciados e o Cenário NZE é composta por 25 Mt destinadas à produção por eletrólise e 8 Mt para produção a partir de combustíveis fósseis com CCUS (IEA, 2023b).

A Figura 21 revela uma distribuição dos projetos de produção de hidrogênio com baixas emissões, classificados conforme o estágio de desenvolvimento e o setor de aplicação, baseada em dados projetados até 2030. O primeiro gráfico, um diagrama de pizza, categoriza os projetos em três estágios principais de desenvolvimento: 'Early Stage', que compõe 46% do total, destacando projetos ainda em fases iniciais; 'Feasibility', representando 48%, indica projetos em fase de estudo de viabilidade técnica e financeira; e 'Operating & FID', que representa 6%, incluindo projetos que já alcançaram a decisão final de investimento ou que estão em operação.

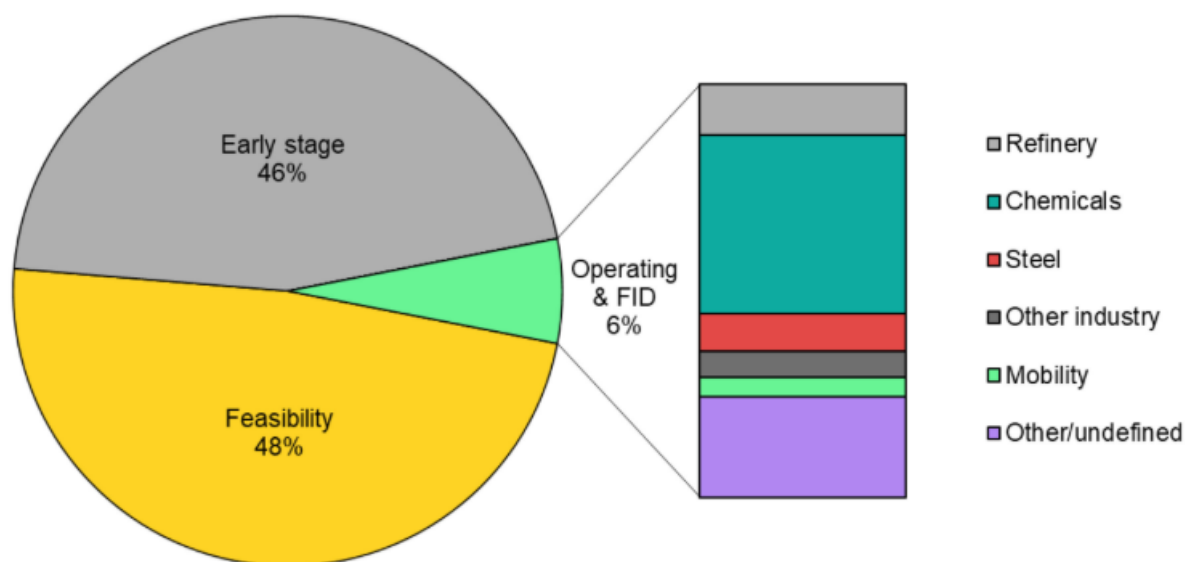


Figura 21: Produção de hidrogênio com baixas emissões por estágio e por setor com base em projetos anunciados, 2030.

Fonte: (IEA, 2023b)

Paralelamente, o segundo gráfico da Figura 21, um diagrama de barras empilhadas, apresenta a distribuição setorial dos projetos. Predomina a presença de projetos na indústria

química, categorias não especificadas ou indefinidas, refinarias, seguida pelo setor siderúrgico, outras indústrias e mobilidade. O destaque do setor de refinarias sugere uma concentração significativa de esforços para a integração do hidrogênio com baixas emissões nos processos de refinamento. O setor químico e o siderúrgico também destacam-se pela adoção do hidrogênio como solução para reduzir emissões de carbono, enquanto o setor de mobilidade explora o hidrogênio como um combustível alternativo.

Esses dados sugerem um foco crescente na adoção de tecnologias de hidrogênio com baixas emissões como parte das estratégias de descarbonização em diversos setores industriais. A predominância de projetos na fase de viabilidade (48%) indica um campo em plena evolução, com substanciais pesquisas e desenvolvimento em progresso, o que aponta para um futuro promissor na implementação de soluções de hidrogênio em larga escala.

A Figura 22 apresenta um mapa global que ilustra a distribuição geográfica dos projetos de produção de hidrogênio com baixas emissões, categorizados por tecnologias de captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS) e eletrolisadores. Esses projetos são adicionalmente classificados de acordo com o estágio de desenvolvimento e a capacidade de produção anual, medida em quilotoneladas de hidrogênio por ano (kt H₂/yr).

Os projetos com CCUS e eletrolisadores são diferenciados por ícones que indicam seu estágio de progresso: em fase inicial, em estudo de viabilidade, em decisão final de investimento/construção ou já operacionais. A diferenciação é feita utilizando cores e formas específicas — triângulos para projetos CCUS e retângulos para projetos de eletrolisadores, com uma escala de cores que vai do vermelho (fase inicial) ao verde (operacional).

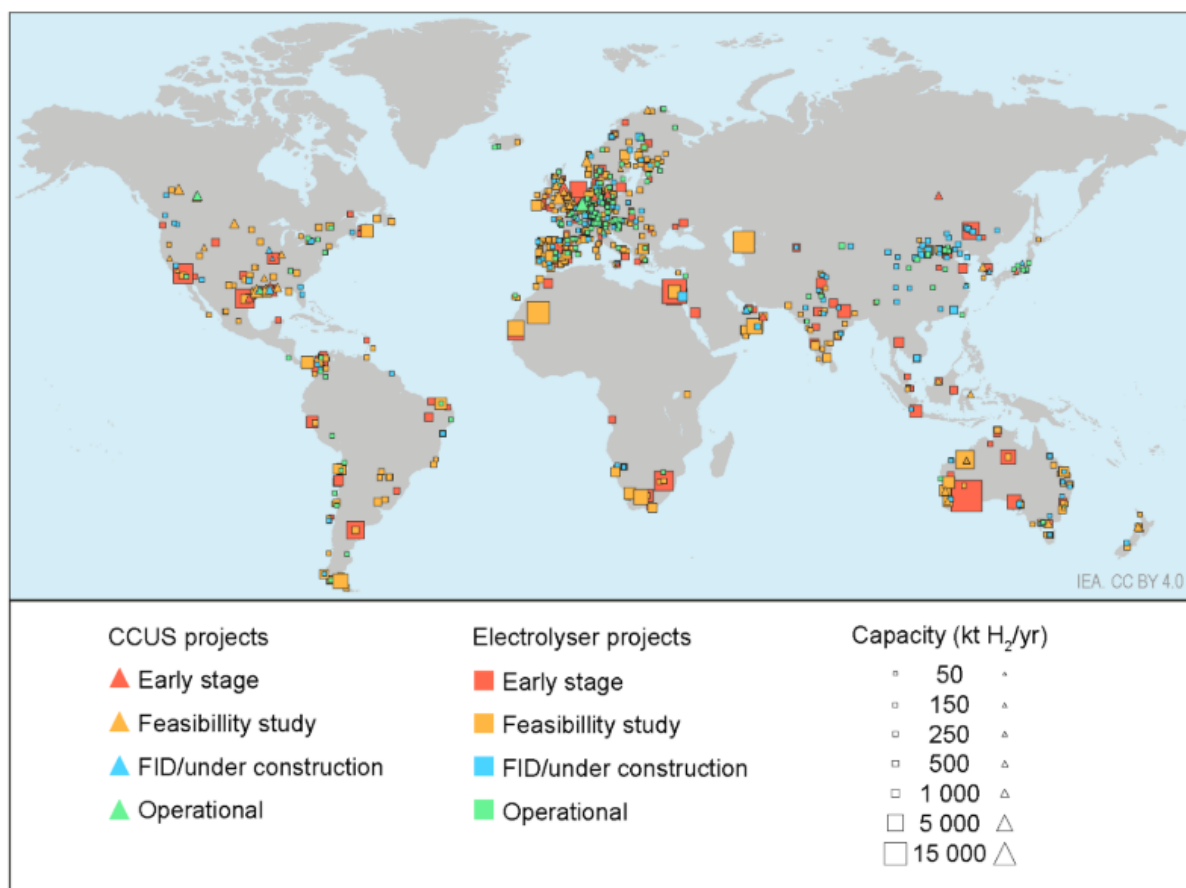


Figura 22: Mapa dos projetos anunciados de produção de hidrogênio com baixas emissões.

Fonte: (IEA, 2023b)

Quanto à capacidade de produção, os ícones variam em tamanho, desde pequenos triângulos e quadrados representando 50 kt H₂/yr, até grandes quadrados e triângulos para capacidades de 15.000 kt H₂/yr. Essa gradação facilita a identificação visual dos projetos com maior capacidade de produção.

No cenário global, observa-se uma densidade significativa de projetos na Europa, América do Norte e Ásia Oriental, com destaque para a Europa, que apresenta uma concentração notável de grandes projetos, principalmente eletrolisadores operacionais e em construção. Essa distribuição reflete um investimento robusto nas tecnologias de hidrogênio em regiões com alta capacidade industrial e infraestrutura tecnológica.

Em contraste, o Brasil mostra uma presença mais modesta no panorama global de produção de hidrogênio com baixas emissões. Os projetos brasileiros são predominantemente menores em escala e ainda em fases iniciais, como estudos de viabilidade, sugerindo que o país está começando a explorar as tecnologias de hidrogênio. A maioria desses projetos está

localizada nas regiões sudeste e nordeste, indicando uma possível estratégia de aproveitar a infraestrutura industrial existente para o desenvolvimento inicial.

Este panorama global, apresentado na Figura 22, indica um interesse crescente e uma adoção das tecnologias de produção de hidrogênio com baixas emissões, refletindo um compromisso com a sustentabilidade e a descarbonização em diferentes regiões. A distribuição dos projetos revela tanto as áreas de liderança global no setor quanto as regiões com potencial para crescimento e desenvolvimento futuro, como o Brasil, que pode beneficiar-se de uma maior colaboração internacional e investimento em tecnologias emergentes.

4.1.1.2. Expansão global e estratégias para o hidrogênio de baixa emissão: desafios e políticas para 2030

Até o ano de 2023, diversos governos definiram objetivos para adotar tecnologias de hidrogênio tanto em setores já existentes, como na indústria, quanto em novos setores, com ênfase no transporte. O Japão, por exemplo, almeja alcançar a marca de 800.000 veículos de célula de combustível nas vias até 2030. Paralelamente, a União Europeia planeja suprir 42% das necessidades industriais de hidrogênio com combustíveis renováveis não derivados de fontes biológicas no mesmo período. Embora essas metas demonstrem um compromisso com produtores e consumidores, elas são inadequadas para motivar os atores do mercado a aderirem completamente ao aumento do uso de hidrogênio de baixa emissão, devido ao elevado custo associado. Para efetivamente estimular o investimento necessário, é imperativo implementar políticas e regulamentações sólidas que vão além de simples metas, combinando incentivos para os desenvolvedores de projetos e sanções para o descumprimento das normas (IEA, 2023b).

Diversas estratégias de apoio estão disponíveis para impulsionar a demanda por hidrogênio de baixa emissão em aplicações já estabelecidas e em novos usos. Essas estratégias variam desde iniciativas específicas que favorecem o hidrogênio e os combustíveis derivados, como orientações para o uso de hidrogênio de baixa emissão em operações correntes, até abordagens setoriais tecnologicamente imparciais que focam na descarbonização. Essas últimas

abrangem ferramentas como os Contratos de Diferença de Carbono (CCfD¹⁷), onde o governo compensa a diferença entre os custos de mitigação de CO₂ de um projeto e um preço referencial de CO₂. A decisão sobre qual tecnologia empregar para reduzir emissões fica a cargo do desenvolvedor do projeto. Outras políticas neutras em tecnologia incluem normas obrigatórias para veículos de emissão zero (ZEVs¹⁸), exigindo que uma quota mínima das vendas seja de ZEVs, permitindo que os fabricantes escolham se essa quota será cumprida através de veículos elétricos (BEVs¹⁹), veículos de célula de combustível (FCEVs²⁰) ou uma combinação dos dois.

Embora muitas políticas tenham sido propostas, a maioria ainda não foi concretizada. De acordo com as projeções atuais, ver Figura 23, estima-se que a demanda por hidrogênio de baixa emissão atinja aproximadamente 7 Mt até 2030, representando um aumento expressivo em comparação ao consumo atual, que é inferior a 1 Mt por ano. Entretanto, este volume é insuficiente para cumprir as metas globais de demanda de hidrogênio estipuladas pelos governos, que preveem um alcance de quase 14 Mt até 2030. Essa demanda incluirá contribuições significativas dos setores industriais e de refino, bem como do setor de transporte. A figura também destaca que, mesmo com a implementação completa das políticas e metas governamentais atuais, a demanda por hidrogênio de baixa emissão projetada ficará muito aquém das metas de produção de 27-35 Mt previstas, indicando uma desconexão substancial entre os objetivos de produção e de demanda (IEA, 2023b).

¹⁷ *Carbon Contracts for Difference (CCfD)* (IEA, 2023b) .

¹⁸ *Zero-emission vehicles (ZEVs)* (IEA, 2023b).

¹⁹ *Battery electric vehicles (BEVs)* (IEA, 2023b) .

²⁰ *Fuel cell electric vehicles (FCEVs)* (IEA, 2023b).

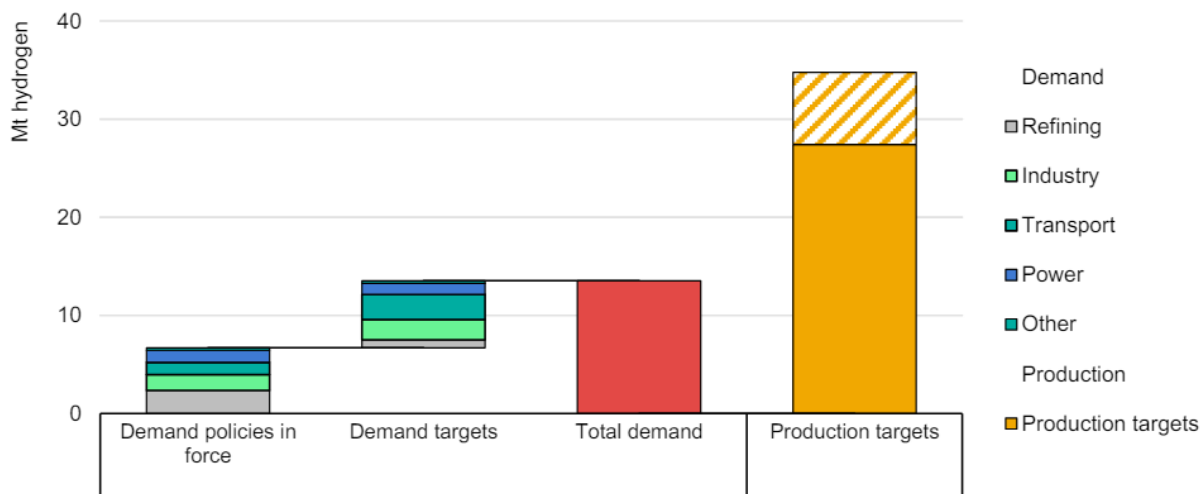


Figura 23: Demanda e oferta potencial de hidrogênio de baixa emissão criadas por políticas e metas governamentais para 2030.

Fonte: IEA (2023b).

Uma estratégia para mitigar o potencial excesso de oferta de hidrogênio de baixa emissão envolve a implementação de políticas ambientais focadas na descarbonização de setores tradicionalmente de difícil descarbonização. Especificamente, a agricultura pode se beneficiar da incorporação de amônia verde, enquanto a siderurgia pode evoluir com o uso de aço verde, processos que utilizam hidrogênio de baixa emissão como matéria-prima principal, reduzindo significativamente a pegada de carbono dessas indústrias. Além disso, o setor de mobilidade, incluindo transporte terrestre, marítimo e aéreo, pode avançar significativamente através da adoção de veículos movidos a hidrogênio. Essas iniciativas, alinhadas com os objetivos do Acordo de Paris, não apenas ajudam a atender às demandas de redução global de emissões de carbono, mas também promovem um mercado sustentável para o hidrogênio de baixa emissão, garantindo sua viabilidade econômica e ambiental a longo prazo.

Para alcançar as metas climáticas globais, é necessário mais do que iniciativas isoladas. Os governos devem colaborar e coordenar esforços para estimular a demanda necessária. Estabelecer cotas mínimas para a utilização de hidrogênio de baixa emissão em setores que já possuem tecnologias de uso final disponíveis comercialmente, ou que se espera que se tornem comerciais até 2030, é essencial para aumentar a confiança no mercado. As diretrizes do Cenário de Emissões Zero Líquidas até 2050 (NZE²¹) podem orientar a implementação dessas

²¹ O Cenário de Emissões Zero Líquidas até 2050 (NZE) constitui um modelo normativo desenvolvido para orientar o setor energético global rumo à neutralidade de carbono até o ano de 2050. Proposto pela Agência Internacional de Energia (IEA), o NZE tem como objetivo direcionar as políticas energéticas e climáticas para

cotas. Adotar cotas para o uso de hidrogênio de baixa emissão em atividades como a refino, produção de amônia e metanol, alinhadas ao Cenário NZE, poderia ativar uma demanda equivalente a 40-50% das metas atuais (2023) de produção governamental e 35-65% da produção projetada a partir de iniciativas já anunciadas para 2030. Essa estratégia permitiria expandir consideravelmente a produção de hidrogênio de baixa emissão e diminuir seus custos, facilitando a adoção em outros setores e aliviando o custo econômico dos governos ao subsidiar os custos adicionais (IEA, 2023b).

4.1.2. De fontes a aplicações: uma visão integrada das rotas tecnológicas para a produção sustentável de hidrogênio

A Figura 24 oferece uma visão abrangente das rotas tecnológicas para a produção de hidrogênio, partindo de diferentes fontes primárias e culminando em uma variedade de aplicações, incluindo suporte para as atividades associadas. O diagrama divide a produção de hidrogênio em fontes primárias, processos de produção, usos finais e atividades de suporte, oferecendo uma visão integrada que abrange desde a geração até a aplicação do hidrogênio.

limitar o aumento da temperatura global a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais, alinhando-se com os objetivos do Acordo de Paris. O cenário antevê um crescimento substancial na adoção de fontes de energia de baixa emissão e na evolução de tecnologias inovadoras necessárias para alcançar a neutralidade de carbono. Isso inclui a melhoria da eficiência energética, a expansão do uso de energias renováveis e a aplicação de tecnologias para captura e armazenamento de carbono (IEA, 2024b).

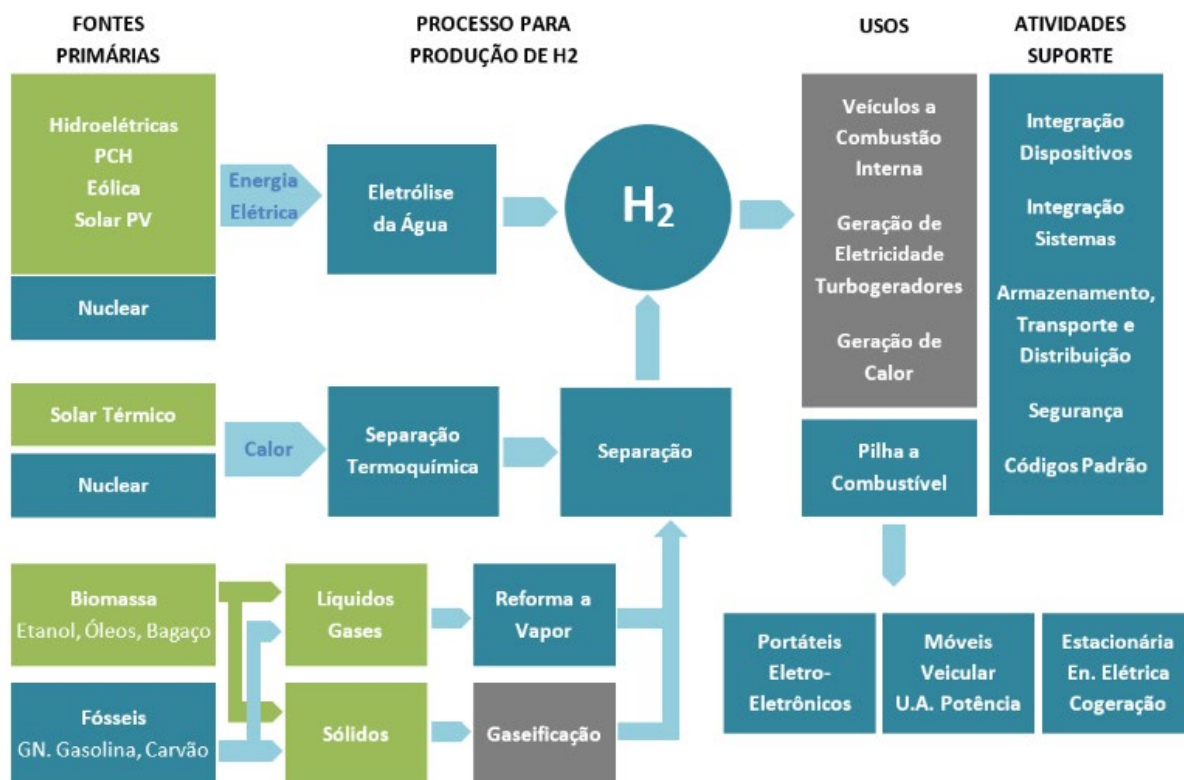


Figura 24: Representação esquemática de rotas tecnológicas.

Fonte: EPE (2021).

As fontes primárias de hidrogênio são diversificadas, incluindo hidrelétricas, eólica, solar fotovoltaica (PV), nuclear, solar térmica, biomassa (etanol, óleos e bagaço), e combustíveis fósseis como gás natural, gasolina e carvão. Essas fontes alimentam diferentes processos tecnológicos para a produção de hidrogênio. A eletrólise da água é vem se destacando como uma rota de produção de hidrogênio, especialmente quando alimentada por energia elétrica proveniente de fontes renováveis, garantindo a produção de hidrogênio com baixas ou nulas emissões de carbono. As principais tecnologias de eletrólise mencionadas incluem a Alcalina Clássica e a de Membrana Polimérica Eletrolítica (PEM).

A conversão térmica também é uma rota viável, utilizando altas temperaturas provenientes de fontes como energia nuclear ou solar concentrada para promover ciclos termoquímicos que quebram a molécula de água. Além disso, a biomassa e os biocombustíveis podem ser transformados em hidrogênio através de gaseificação, reforma a vapor ou processos biológicos, embora a gaseificação de biomassa apresente desafios técnicos devido ao seu menor conteúdo energético e maior umidade (EPE, 2021).

O hidrogênio produzido pode ser utilizado em uma série de aplicações, incluindo veículos com motor de combustão interna, geração de eletricidade através de turbinas, geração

de calor, e células combustíveis. A Figura 24 também destaca o uso em dispositivos portáteis eletroeletrônicos, além de aplicações móveis veiculares e estacionárias em unidades de alimentação de potência e cogeração de energia elétrica.

As atividades de suporte essenciais para o uso eficaz do hidrogênio incluem a integração de dispositivos, sistemas, armazenamento, transporte e a distribuição. Estes elementos são essenciais para a implementação segura e eficiente da infraestrutura de hidrogênio em uma escala ampla, garantindo que as tecnologias sejam não apenas produzidas, mas também implementadas de maneira eficaz e segura no mercado.

Interessante destacar, a descoberta²² de reservatórios geológicos de hidrogênio natural, como em Mali²³, que apresentam novas perspectivas para a exploração de hidrogênio como um recurso natural. No entanto, a viabilidade econômica e a aplicação prática deste recurso ainda necessitam de maior investigação e desenvolvimento.

Apesar da eletrólise da água ser responsável por uma fração mínima da produção dedicada de hidrogênio atualmente, sua importância está crescendo rapidamente, especialmente com o aumento do interesse e do investimento em fontes de energia renováveis. Este cenário destaca uma tendência crescente em direção a uma economia do hidrogênio mais sustentável e com menor impacto ambiental. A Figura 24 sintetiza com eficácia a complexidade e a interconexão das rotas tecnológicas para a produção e uso de hidrogênio, sublinhando sua importância como vetor energético para a transição para uma economia de baixo carbono.

A Figura 25 ilustra de maneira clara as eficiências típicas de conversão nos principais processos de produção de hidrogênio, divididos entre configurações centralizadas e distribuídas. Nos processos centralizados, a reforma do gás natural sem captura, utilização e sequestro de carbono (CCUS) demonstra a maior eficiência, alcançando 72%, seguida de perto

²² No Brasil, descobertas recentes indicam a existência de reservas de hidrogênio natural em pelo menos quatro estados: Ceará, Roraima, Tocantins e Minas Gerais. Estas reservas estão atualmente sob investigação em um projeto conduzido pelas empresas GEO4U e Engie Brasil (COPPE UFRJ, 2018). Além disso, durante a abertura do 3º Congresso Brasileiro do Hidrogênio, realizado em Maricá/RJ, foi anunciada uma descoberta significativa: a identificação de fontes de hidrogênio natural na região. As reservas de hidrogênio natural descobertas estão sendo consideradas entre as mais significativas já registradas tanto no Brasil quanto internacionalmente (PREFEITURA DE MARICÁ, 2023).

²³ Em 1987, no Mali, uma tentativa de perfuração de um poço em busca de água resultou em um cenário surpreendente e transformador. Embora o poço estivesse inicialmente seco, ele começou a exibir uma produção inesperada e significativa de hidrogênio (H₂). Este incidente revelou-se um marco, especialmente para Aliou Diallo, então diretor da Petroma, mais tarde renomeada para Hydroma. Identificando a oportunidade de explorar uma fonte de energia local e isenta de carbono em uma região desprovida de recursos energéticos substanciais, a empresa decidiu capitalizar sobre o hidrogênio natural encontrado. Em 2011, o poço foi reativado e adaptado para um projeto piloto inovador destinado a fornecer eletricidade a uma pequena vila, utilizando o hidrogênio que, devido a sua pureza excepcional de mais de 96%, era ideal para combustão direta em turbinas a gás. Este exemplo não só destacou a viabilidade do hidrogênio como recurso energético sustentável, mas também serviu como um precursor para futuras iniciativas de energia limpa (MORETTI; WEBBER, 2021).

pela reforma com CCUS, que atinge 71%. A gaseificação de carvão mineral mostra uma eficiência significativamente menor, especialmente sem CCUS (56%), enquanto a gaseificação com CCUS aumenta ligeiramente para 54%. A gaseificação de biomassa e a eletrólise da água apresentam eficiências de 44% e 67%, respectivamente.

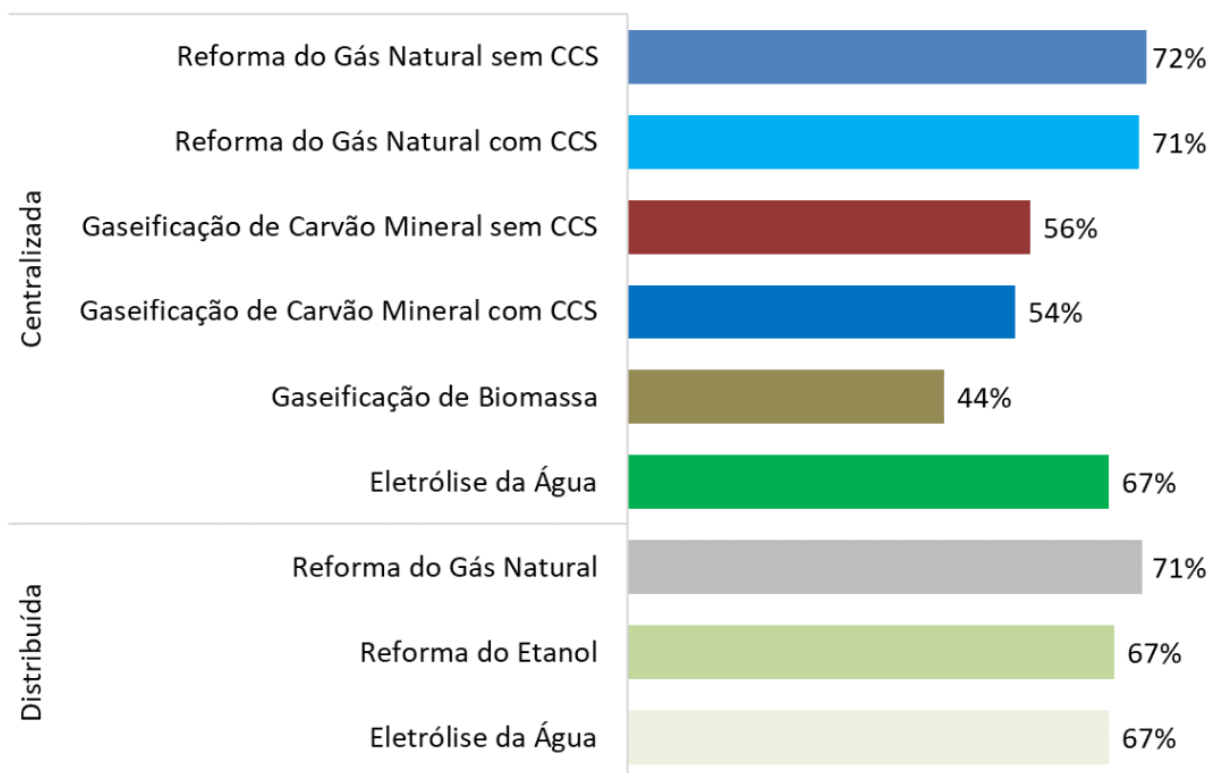


Figura 25: Eficiências típicas de conversão em processos de produção de hidrogênio.

Fonte: EPE (2021).

Para os processos distribuídos, a reforma do gás natural e do etanol ambos exibem uma eficiência de 71% e 67%, respectivamente, enquanto a eletrólise da água mantém uma consistência com a configuração centralizada, também em 67%. Estes dados sublinham as variações de eficiência entre diferentes tecnologias e configurações, destacando a influência da integração de tecnologias CCUS nos processos de produção de hidrogênio.

Além das considerações de eficiência, a Figura 25 também reflete preocupações globais com a descarbonização de sistemas de produção e consumo de energia. A transição energética com o hidrogênio como vetor principal motiva a diferenciação do hidrogênio de acordo com a sua origem e a adoção de tecnologias de CCUS. Este enfoque não só reduz a pegada de carbono, mas também permite a criação de um preço "prêmio" para o hidrogênio produzido de maneira ambientalmente preferencial (EPE, 2021).

Essa diferenciação é paralela ao que se observa no mercado de energia elétrica, onde a origem da eletricidade pode influenciar políticas públicas e precificação. A eletricidade gerada por fontes renováveis, por exemplo, pode ser valorizada em comparação com aquela produzida por fontes não renováveis. Similarmente, no mercado petrolífero, a qualidade do petróleo (densidade, teor de enxofre, entre outros) pode afetar significativamente o seu preço. A diferenciação do hidrogênio, portanto, segue um padrão de mercado já estabelecido para outros recursos energéticos, enfatizando a importância de considerações ambientais nas práticas de mercado e nas estratégias de produção energética (EPE, 2021).

A Figura 26 oferece uma visão sistemática e codificada por cores da classificação de hidrogênio, categorizando as diversas rotas de produção em função de suas características tecnológicas e impactos ambientais. Esta tabela é fundamental para entender a diversidade de métodos de produção de hidrogênio e sua relação com as emissões de carbono associadas.










	Hidrogênio Preto	Produzido por gaseificação do carvão mineral (antracito), sem CCUS
	Hidrogênio Marrom	Produzido por gaseificação do carvão mineral (hulha), sem CCUS
	Hidrogênio Cinza	Produzido por reforma a vapor do gás natural, sem CCUS
	Hidrogênio Azul	Produzido por reforma a vapor do gás natural (eventualmente, também de outros combustíveis fósseis), com CCUS
	Hidrogênio Verde	Produzido via eletrólise da água com energia de fontes renováveis (particularmente, energias eólica e solar).
	Hidrogênio Branco	Produzido por extração de hidrogênio natural ou geológico
	Hidrogênio Turquesa	Produzido por pirólise do metano, sem gerar CO ₂
	Hidrogênio Musgo	Produzido por reformas catalíticas, gaseificação de plásticos residuais ou biodigestão anaeróbica de biomassa ou biocombustíveis, com ou sem CCUS
	Hidrogênio Rosa	Produzido com fonte de energia nuclear

Figura 26: Classificação do hidrogênio em escala de cores.

Fonte: EPE (2021).

Dessa forma, conforme Figura 26, o hidrogênio preto é produzido através da gaseificação de carvão mineral (antracito) sem a utilização de tecnologias CCUS (Captura, Utilização e Sequestro de Carbono). O hidrogênio marrom é similar ao hidrogênio preto, mas

produzido a partir de carvão mineral de menor qualidade, como a hulha, também sem CCUS. Por outro lado, o hidrogênio cinza é resultante da reforma a vapor do gás natural sem o emprego de tecnologias CCUS. O hidrogênio azul é produzido pelo mesmo processo que o hidrogênio cinza, porém com a integração de tecnologias CCUS, potencialmente reduzindo significativamente as emissões de carbono.

Ainda destacando as classificações do hidrogênio em escala de cores, o hidrogênio verde é obtido por meio da eletrólise da água, utilizando energia proveniente de fontes renováveis como eólica e solar, destacando-se por não emitir carbono durante sua produção. O hidrogênio branco é extraído de fontes naturais ou geológicas, sem processo industrial associado à sua produção. O hidrogênio turquesa é originado pela pirólise do metano, um processo que não gera dióxido de carbono. Nesta linha, o hidrogênio musgo é proveniente de reformas catalíticas, gaseificação de plásticos residuais ou biodigestão anaeróbica de biomassa ou biocombustíveis, com ou sem a aplicação de CCUS. Por fim, tem-se o hidrogênio rosa produzido utilizando energia nuclear como fonte primária, combinando uma rota tecnológica que pode ser considerada limpa, dependendo do manejo do combustível nuclear e dos resíduos gerados.

As tecnologias envolvidas na produção de hidrogênio, desde as mais tradicionais até as inovadoras, influenciam diretamente a quantidade de emissões de carbono liberadas no ambiente. Este impacto é fundamental, especialmente quando se considera a urgência global de redução de emissões em resposta às mudanças climáticas. Assim, a transição para práticas mais limpas e eficientes é destacada não apenas pela necessidade de inovação tecnológica, mas também pelo imperativo ambiental de minimizar o impacto climático da produção de hidrogênio.

A análise da Figura 27 evidencia a variação significativa nas intensidades de emissões entre diferentes rotas de produção de hidrogênio, demonstrando o impacto que a tecnologia e o uso de estratégias de mitigação, como a captura e armazenamento de carbono (CCS), têm sobre as emissões totais.

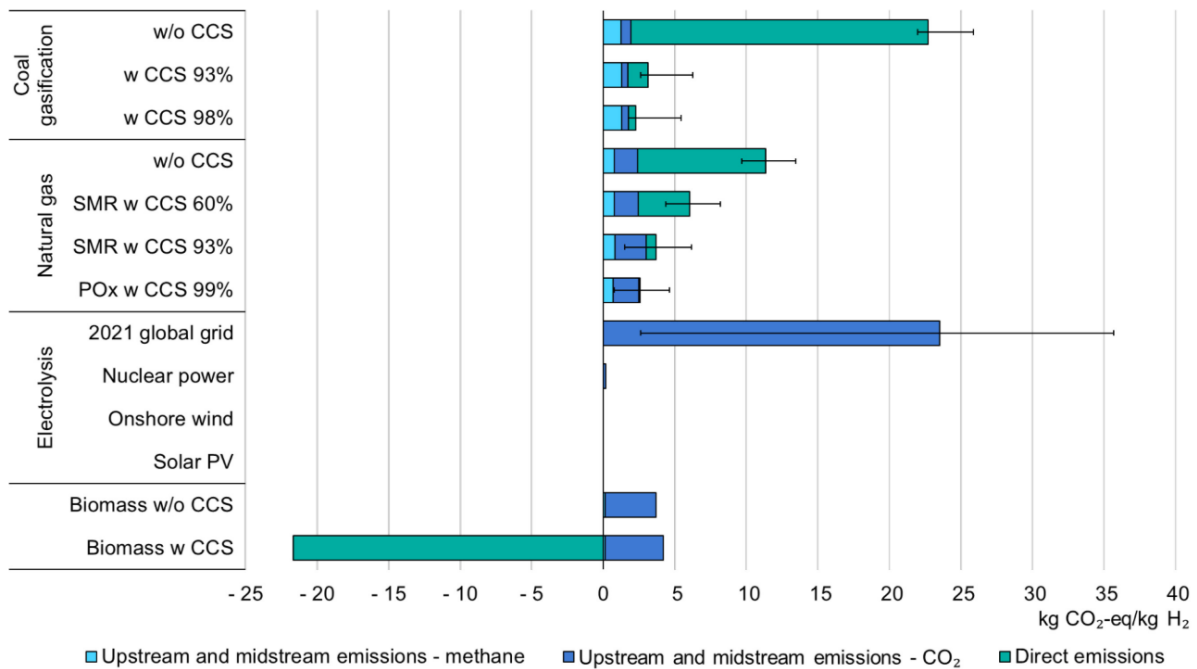


Figura 27: Comparação da intensidade de emissões de diferentes rotas de produção de hidrogênio, 2021.

Notas: CCS = captura e armazenamento de carbono; POx = oxidação parcial; SMR = reforma a vapor do metano. As emissões *upstream* e *midstream* incluem emissões de CO₂ e metano que ocorrem durante a extração, processamento e fornecimento de combustíveis (carvão, gás natural) ou produção, processamento e transporte de biomassa. Barras de erro para gás natural e carvão representam o impacto da gama observada de emissões *upstream* e *midstream* hoje nas intensidades de emissões. Para gás natural, o limite inferior corresponde à melhor tecnologia disponível atualmente (4,5 kg CO₂-eq/GJ), e o limite superior a o percentil 95% da faixa mundial (28 kg CO₂-eq/GJ). Para o carvão, o limite inferior corresponde ao percentil de 5% (6 kg CO₂-eq/GJ) e o limite superior para o percentil 95% (23 kg CO₂-eq/GJ) da produção global *upstream* e *midstream* emissões do fornecimento de carvão. A média da rede mundial de 2021 baseia-se numa média global da rede ponderada pela geração intensidade de eletricidade, com as barras de erro representando o percentil 10% (50 g CO₂-eq/kWh) e o percentil 90% (700 g CO₂-eq/kWh) entre países. As intensidades de eletricidade da rede incluem CO₂ direto, _{met2ano}(CH₄) e óxido nitroso (N₂O) nas centrais elétricas, mas não as emissões a montante e a meio fluxo dos combustíveis utilizados nas centrais elétricas. A eletrólise refere-se à eletrólise da água a baixa temperatura com uma demanda global de eletricidade assumida de 50 kWh/kg H₂, incluindo compressão a 30 bar.

A produção de hidrogênio a partir de gás natural via SMR é baseada em 44,5 kWh/kg H₂ para gás natural no caso de não captura de CO₂, em 45,0 kWh/kg H₂ para gás natural no caso de taxa de captura de 60%, e em 49 kWh/kg H₂ para gás natural e 0,8 kWh/kg H₂ para a eletricidade no caso de uma taxa de captação de 93%. A produção de hidrogênio a partir de gás natural via POx é baseada nas demandas de 41 kWh/kg H₂ para gás natural e 0,6 kWh/kg H₂ para eletricidade no caso de uma taxa de captação de 99%. A produção de hidrogênio a partir do carvão baseia-se na gaseificação, com necessidades de carvão de 57 kWh/kg H₂ e de eletricidade de 0,7 kWh/kg H₂ no caso de não haver captura de CO₂, demanda por carvão de 59 kWh/kg H₂ para uma taxa de captura de CO₂ de 93% e demandas por carvão de 60 kWh/kg H₂ para uma taxa de captura de CO₂ de 98%.

Fonte: IEA (2023b).

A Figura 27 mostra que as emissões diretas da produção de hidrogênio usando gás natural sem CCS, aplicando a tecnologia de reforma a vapor de metano (SMR), resultam em cerca de 9 kg de CO₂ equivalente por kg de hidrogênio. Adicionalmente, as operações de produção, processamento e transporte de gás natural contribuem com emissões de metano e CO₂, totalizando emissões médias de 10 a 13 kg CO₂-eq/kg H₂ para essa rota de produção, conforme o gráfico ilustra. Implementar CCS nessas operações pode reduzir drasticamente as

emissões diretas para cerca de 0,7 kg CO₂-eq/kg H₂ com uma taxa de captura de 93%, levando a emissões totais entre 1,5 a 6,2 kg CO₂-eq/kg H₂.

Para a produção de hidrogênio a partir da gaseificação de carvão sem CCS, conforme Figura 27, observa-se emissões substancialmente mais altas, variando de 22 a 26 kg CO₂-eq/kg H₂, com as emissões de mineração, processamento e transporte de carvão contribuindo menos significativamente, representando menos de 20% do total. A aplicação de CCS nesse contexto também pode reduzir a intensidade das emissões para 2,6 a 6,3 kg CO₂-eq/kg H₂, alinhando-se às reduções observadas no método de SMR com gás natural.

A eletrólise da água destaca-se na Figura 27 com variações drásticas de emissões com base na intensidade de CO₂ da eletricidade usada. A média global de 24 kg CO₂-eq/kg H₂ pode ser drasticamente reduzida para tão baixo quanto 0,5 kg CO₂-eq/kg H₂ em países com redes elétricas de baixa emissão.

As opções de energia renovável, como energia eólica, solar PV, hidrelétrica e geotérmica, são representadas no gráfico como tendo emissões zero, tanto a montante quanto diretas, corroborando a ideia de que essa rota alimentada por essas fontes de energia têm o potencial de produção de hidrogênio verdadeiramente livre de emissões, fundamental para estratégias de descarbonização intensivas.

A Figura 27 sublinha a importância de escolher a rota de produção de hidrogênio apropriada e a tecnologia de mitigação correspondente para minimizar as emissões de gases de efeito estufa, sendo essencial para a transição energética global rumo a sistemas mais sustentáveis e com menor intensidade de carbono.

4.1.2.1. Custos associados à produção de hidrogênio por rotas tecnológicas

A Figura 28 ilustra o custo nivelado²⁴ de produção de hidrogênio por tecnologia em 2021, 2022 e no cenário NZE de 2050 para 2030. Observa-se uma tendência de redução no

²⁴ O Custo Nivelado de Produção de Hidrogênio (LCOH - Levelized Cost of Hydrogen) é uma métrica econômica que quantifica o custo médio por quilograma de hidrogênio ao longo do ciclo de vida de uma instalação ou sistema produtivo. Esta métrica abrange a totalidade dos custos, tanto operacionais quanto de capital, que incluem despesas com instalação, manutenção, combustível e outros custos incidentais, distribuídos pelo volume total de hidrogênio gerado durante o período analisado. O LCOH é fundamental para a avaliação da viabilidade econômica de diversas tecnologias de produção de hidrogênio, proporcionando um padrão comum para comparação. Este padrão leva em consideração variações nas eficiências operacionais e nos custos associados a cada tecnologia, permitindo uma análise comparativa direta entre métodos distintos (H2BRASIL, 2023).

custo de produção de hidrogênio, principalmente para as tecnologias de eletrólise alimentadas por fontes renováveis como a energia solar e eólica.

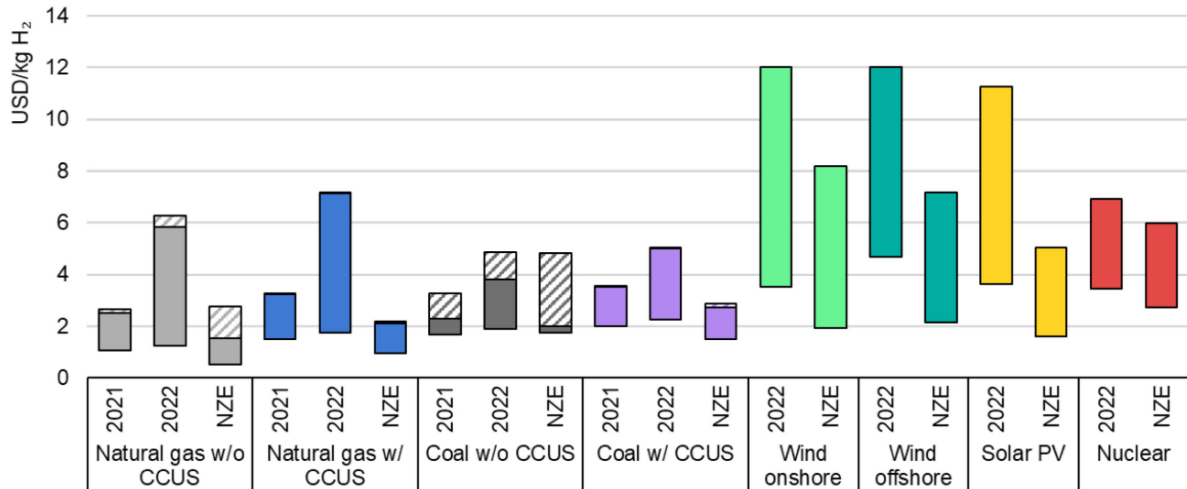


Figura 28: Custo nivelado da produção de hidrogênio por tecnologia em 2021, 2022 e no cenário de emissões líquidas zero até 2050 em 2030.

Notas: CCUS = captura, utilização e armazenamento de carbono; PV = fotovoltaico; NZE= Emissões Líquidas Zero até 2050 Cenário em 2030. Solar fotovoltaica, eólica e nuclear referem-se ao fornecimento de eletricidade para alimentar o processo de eletrólise. Os valores NZE referem-se a 2030. O preço do gás natural é de US\$ 5-15/MBtu para 2021, US\$ 6-36/MBtu para 2022 e US\$ 1-8/MBtu para 2030 NZE. O preço do carvão é USD 40-180/tonelada para 2021, USD 50-360/tonelada para 2022 e USD 30-70/tonelada para 2030 NZE. O custo da eletricidade solar fotovoltaica é 22-120 USD/MWh para 2022, 13-80 USD/MWh para 2030 NZE, com fator de capacidade de 12-35%. Custo da eletricidade eólica *onshore* é de 25-130 USD/MWh para 2022, 25-120 USD/MWh para 2030 NZE, com fator de capacidade de 15-53%. Eletricidade eólica *offshore* o custo é de 50-225 USD/MWh para 2022, 30-125 USD/MWh para 2030 NZE, com fator de capacidade de 32-67%. O custo do capital é 6%. A área tracejada representa o impacto do preço do CO₂, com base em 15-140 USD/t CO₂ para o cenário NZE.

Fonte: IEA (2023b).

De acordo com a Figura 28, o custo de produção de hidrogênio é influenciado pela tecnologia empregada e pelo custo da fonte de energia, variando significativamente entre diferentes regiões. Antes da crise energética global provocada pela invasão da Ucrânia pela Rússia, o custo nivelado de produção de hidrogênio a partir de fontes fósseis sem mitigação estava entre USD 1,0 e 3,0 por kg de H₂ em 2021. Estas fontes eram as mais econômicas em comparação com o uso de combustíveis fósseis com tecnologias de captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS), que variava de USD 1,5 a 3,6 por kg de H₂, ou com a eletrólise utilizando eletricidade de baixa emissão, que custava entre USD 3,4 e 12 por kg de H₂.

A produção de hidrogênio por eletrólise tem seu custo determinado principalmente pelo custo de capital dos eletrolisadores e pelo custo da eletricidade necessária para operá-los. É esperada uma redução substancial nos custos de capital dos eletrolisadores a curto prazo, devido

às economias de escala e avanços tecnológicos. O preço da eletricidade renovável já caiu drasticamente na última década, com uma redução de 80% no custo dos módulos solares entre 2010 e 2020. Aumentos recentes nos preços das *commodities* podem atrasar a diminuição dos custos no curto prazo, mas é improvável que impeçam as reduções a longo prazo. Se o desdobramento em larga escala acontecer como planejado no Cenário de Emissões Zero Líquidas (NZE), os custos de produção de hidrogênio eletrolítico usando eletricidade solar fotovoltaica poderiam diminuir para USD 1,6 por kg de H₂ até 2030 em regiões com alta irradiação solar, como África, Austrália, Chile, China e Oriente Médio. A eletrólise utilizando energia solar fotovoltaica poderia se tornar a forma mais econômica de produção de hidrogênio até o final desta década, enquanto locais com recursos eólicos excepcionais (*offshore* ou *onshore*) poderiam também experimentar uma redução significativa nos custos nivelados de hidrogênio, alcançando valores abaixo de USD 2,1 por kg de H₂ no noroeste da Europa e abaixo de USD 2,3 por kg de H₂ nos Estados Unidos (IEA, 2023b).

4.1.3. Superação da oferta energética de 2050 no Brasil: o papel do hidrogênio na armazenagem e na transição para uma economia de baixo carbono

A matriz energética global vem passando por uma profunda transformação nas últimas décadas. Desde o início do século XXI, um dos focos centrais das políticas energéticas e dos estudos científicos tem sido a diversificação das fontes de energia e a transição para opções mais sustentáveis. A necessidade de mitigar os impactos das mudanças climáticas e a busca por segurança energética têm impulsionado o investimento em fontes renováveis de energia, como a solar, eólica e hidrelétrica (EPE, 2024a).

Essas fontes, renováveis, são consideradas pilares para um futuro sustentável, dada a sua capacidade de regeneração e baixa emissão de carbono em comparação com os combustíveis fósseis (EPE, 2024b). A análise das projeções de capacidade instalada de geração de energia revela uma tendência crescente na adoção dessas fontes renováveis, antecipando um cenário em que elas poderão superar as fontes convencionais até 2040, marcando uma nova era na produção de energia mundial (IEA, 2019).

A Figura 29 mostra a projeção de capacidade instalada de geração de energia de várias fontes, de 2000 a 2040. A energia solar fotovoltaica (PV) e a eólica mostram uma tendência

ascendente acentuada, indicando um crescimento significativo em sua participação na matriz energética global.

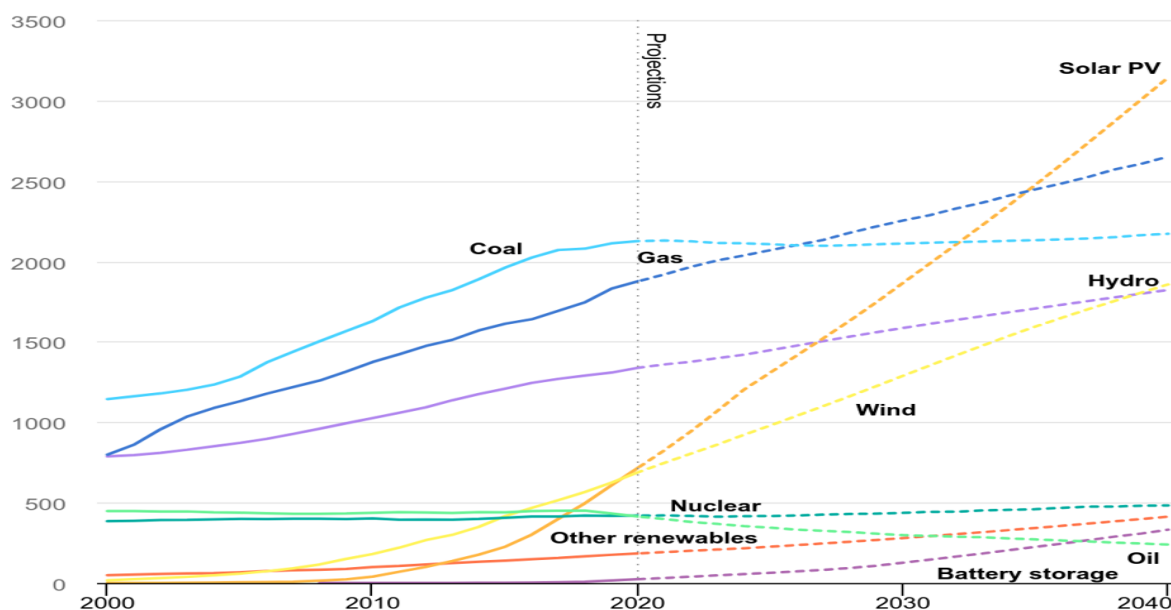


Figura 29: Capacidade instalada de geração de energia por fonte no Cenário de Políticas Declaradas, 2000-2040.

Fonte: (IEA, 2019).

De acordo com essa tendência, elas devem superar a energia a carvão por volta da metade da década de 2020. Até 2040, projeta-se que as fontes de energia de baixo carbono, incluindo solar e eólica, além de hidrelétrica e nuclear, dominem mais da metade da capacidade de geração total, deslocando combustíveis fósseis como carvão e gás natural. A energia hidrelétrica continua a representar uma fração considerável, enquanto a nuclear mantém uma participação menor. Esse gráfico reflete a crescente prioridade dada às energias renováveis em resposta às mudanças climáticas e à busca por sustentabilidade energética.

Observa-se que as fontes renováveis estão no caminho para superar os combustíveis fósseis, com projeções apontando para uma dominância de mais da metade da capacidade de geração de energia por volta de 2040, o que sinaliza uma resposta concreta às preocupações climáticas e ao objetivo de sustentabilidade energética. Nesta linha o Brasil, um país que, devido à sua abundância de recursos renováveis, está posicionado para ultrapassar a demanda interna e se tornar um exportador de energia.

Apesar das incertezas relacionadas à evolução do setor energético a longo prazo, o Brasil destaca-se por sua vasta riqueza em recursos energéticos, que excedem substancialmente a demanda projetada para os próximos anos. Este contexto antecipa uma transformação

significativa no papel histórico do Brasil, que deverá transitar de um consumidor líquido para um fornecedor líquido de energia num futuro próximo.

Essa mudança reflete uma transição de gerenciar a escassez para administrar uma abundância de recursos, conforme ilustrado na Figura 30. O Plano Nacional de Energia de 2050 (PNE 2050) projeta que o Brasil terá um potencial energético de aproximadamente 280 bilhões de toneladas equivalentes de petróleo (tep) até 2050, abrangendo tanto recursos renováveis quanto não renováveis. Este potencial é quase vinte vezes superior à demanda energética estimada para o mesmo período, indicando uma virada significativa em relação aos desafios históricos enfrentados pelo país, como os choques do petróleo na década de 1970 e o racionamento de energia em 2001.

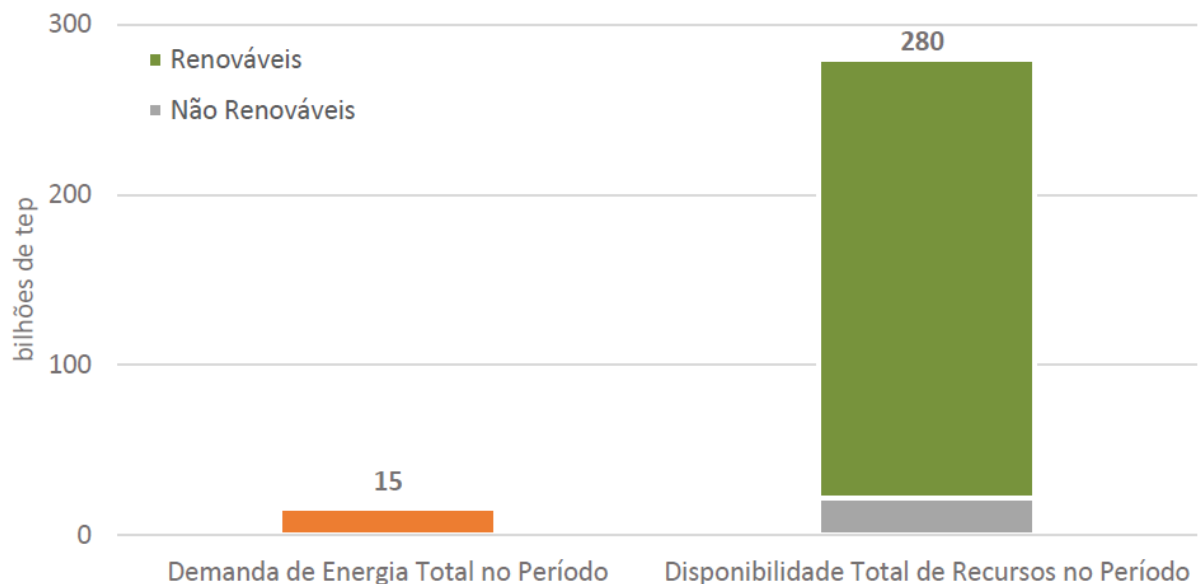


Figura 30: Comparação entre potencial de recursos e demanda de energia no horizonte do PNE 2050.

Fonte: MME; EPE (2020).

A estratégia futura do Brasil será marcada pelo desafio de integrar e maximizar o uso de fontes de energia renováveis, como a solar e a eólica, que, apesar de intermitentes, representarão uma parte substancial do excesso de energia em 2050. Atualmente, muitos *players* do mercado de energia solar e eólica já indicam a capacidade de oferecer muito mais energia do que a atualmente disponibilizada. Contudo, enfrentam limitações significativas devido à inadequação da rede de distribuição de energia do país para lidar com esse potencial (ABEEÓLICA, 2024; ABSOLAR, 2019). Espera-se que até 2050, essa abundância de oferta energética se concretize, destacando a necessidade de preparar a infraestrutura energética para administrar eficientemente esse excesso.

Identificar as fontes primordiais para a abundância energética prevista para 2050 constitui um desafio relevante. Conforme ilustrado na Figura 31, as usinas solares *offshore* devem liderar essa oferta, seguidas por usinas eólicas *offshore*, biomassa e um *mix* de outras fontes como petróleo, gás natural, energia heliotérmica e oceânica. Em 2050, espera-se que a energia solar e eólica se destaque devido à sua ampla disponibilidade.

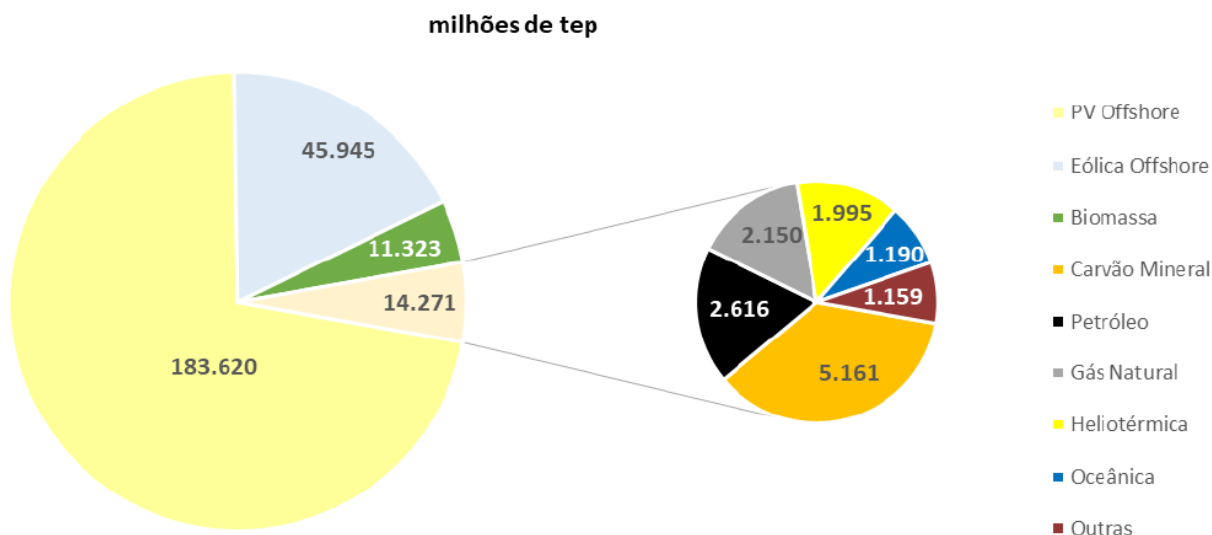


Figura 31: Potencial de recursos com maiores desafios de aproveitamento no horizonte de 2050.

Fonte: MME; EPE (2020).

No contexto dos recursos renováveis, cujo potencial mais significativo poderia atingir quase 245 bilhões de toneladas equivalentes de petróleo (tep) até 2050, os componentes incluem as Usinas Hidrelétricas (UHEs), o potencial de geração eólica *offshore* em zonas até 200 milhas da costa (exceto nas áreas até 10 km), e a capacidade de energia solar fotovoltaica *offshore* em regiões com intensidades de radiação de 6,5 a 6,8 kWh/m² por dia. Segundo estimativas de Strangueto (2016) *apud* MME; EPE (2020), a energia fotovoltaica flutuante poderia gerar cerca de 4.443 TWh por ano.

É crucial ressaltar que as fontes energéticas tradicionais, como biomassa, carvão mineral, petróleo e gás natural, possuem uma infraestrutura de distribuição bem estabelecida no Brasil, o que minimiza a necessidade de grandes modificações no sistema elétrico nacional. A energia da biomassa, por exemplo, pode ser consumida localmente. Embora os combustíveis fósseis possam não participar diretamente no processo de eletrificação, a abundante geração futura de energia solar e eólica exigirá adaptações significativas no *grid* elétrico brasileiro para acomodar esse excesso de capacidade (ABEEÓLICA, 2024; ABSOLAR, 2019).

Esse cenário reflete sobre a capacidade do Brasil de integrar efetivamente fontes de energia intermitentes, como a solar e eólica, ao seu sistema energético nacional. As energias renováveis são notórias por sua intermitência, disponibilizando energia apenas durante condições climáticas favoráveis — solar durante a luz do dia e eólica quando há vento. Esta natureza intermitente levanta questões sobre a viabilidade de sua integração contínua, pois não correspondem necessariamente à demanda do consumidor em tempo real. Portanto, é crucial considerar se a infraestrutura energética brasileira, assim como o planejamento de rede, está suficientemente desenvolvida para gerenciar e armazenar eficazmente o excesso de energia produzido por estas fontes. Este desafio não é exclusivo ao Brasil; outros países, como a Noruega, também enfrentam dificuldades semelhantes na integração de energias renováveis em seus sistemas energéticos nacionais. A experiência internacional sugere que uma transição bem-sucedida para energias renováveis requer não apenas capacidades de geração, mas também investimentos significativos em tecnologias de armazenamento e redes elétricas adaptativas (MME; EPE, 2020).

Para enfrentar esse excesso de energia renovável previsto para 2050, uma solução promissora é o armazenamento de energia na forma de hidrogênio²⁵. O hidrogênio, utilizado como um vetor energético, permite o armazenamento de grandes quantidades de energia renovável e sua disponibilização conforme a necessidade, independentemente das condições climáticas. Esse método de armazenamento representa uma estratégia vital para maximizar o aproveitamento das fontes de energia renováveis e minimizar a variabilidade na oferta de energia.

O hidrogênio tem emergido como um componente fundamental para a transição energética global devido ao seu potencial de proporcionar uma energia limpa e sustentável. O Conselho de Hidrogênio (*Hydrogen Council*), uma aliança formada por 150 entidades influentes que inclui líderes da indústria energética mundial e um vasto grupo de investidores, desempenha um papel crucial nesta mudança. Esse Conselho, reconhecido por sua influência e capacidade de mobilizar recursos significativos, atua ativamente para promover e implementar soluções baseadas em hidrogênio. A presença desses atores-chave sugere um compromisso robusto e uma abordagem estratégica para integrar o hidrogênio como um vetor energético

²⁵ Assim, o hidrogênio é considerado um vetor crucial para o armazenamento do excesso de energias renováveis previsto para 2050. É importante destacar que, geralmente, a produção de hidrogênio requer uma quantidade significativa de energia durante o seu processo de produção.

viável e eficiente. Segundo o *Hydrogen Council, There's no climate solution without clean hydrogen. And there's no clean hydrogen without action*” (HYDROGEN COUNCIL, 2024). Ou seja, enfatizam que “não existe solução para o clima sem hidrogênio limpo e não há hidrogênio limpo sem ação”, sublinhando a necessidade imperativa de hidrogênio renovável para combater as mudanças climáticas e como vetor na transição energética.

É importante notar que, historicamente, o hidrogênio tem sido utilizado principalmente em sua forma fóssil. Contudo, a transição para o hidrogênio de baixo carbono e renovável exige mudanças substanciais e não ocorrerá automaticamente. As iniciativas para essa transição estão sendo impulsionadas tanto por esforços governamentais nacionais e internacionais quanto por grandes corporações do setor energético. Estas ações coletivas são essenciais para redefinir o futuro energético, alinhando-se com as metas globais de redução de emissões de carbono e promovendo uma economia mais verde e sustentável.

Essas ações estão alinhadas com o modelo econômico concebido na década de 1970 pelo eletroquímico *John Bockris*, que antecipava uma economia na qual as cidades seriam abastecidas por energia solar, distribuída principalmente através do vetor energético do hidrogênio. Este modelo, referido como 'economia do hidrogênio', foi primeiramente proposto por *Bockris* durante uma apresentação no Centro Técnico da General Motors em 1970, vislumbrando uma transição de combustíveis fósseis para fontes renováveis (BRANDON; KURBAN, 2017).

A economia do hidrogênio está emergindo como uma solução robusta para o armazenamento de excedentes de energias renováveis intermitentes e para a descarbonização de setores tradicionalmente desafiadores, tais como transportes, siderurgia e agricultura. O processo de descarbonização é viabilizado pelo fato de que o hidrogênio (H₂) não contém carbono em sua composição molecular; seu uso resulta na emissão de apenas vapor d'água como subproduto. Embora o vapor d'água seja um gás de efeito estufa, ele possui um potencial relativamente baixo de contribuir para o aquecimento global. Estudos sugerem que a 'economia do hidrogênio' pode, a longo prazo, substituir a predominante economia baseada no petróleo (AGÊNCIA SENADO, 2024; CNN BRASIL, 2024; IRENA, 2022; JORNAL DA USP, 2023; PORTAL DA INDÚSTRIA, 2023).

5. CONCLUSÃO

A transição energética é um dos desafios mais críticos do século XXI, especialmente no contexto das mudanças climáticas, aquecimento global e necessidade de descarbonização. Historicamente, o petróleo foi a principal fonte de energia do século XX, com a OPEP desempenhando um papel central na política global de preços e fornecimento. No entanto, os impactos ambientais e a volatilidade dos preços do petróleo, exacerbados por conflitos geopolíticos como o da Ucrânia, têm incentivado a busca por alternativas energéticas mais sustentáveis, como energias renováveis e o hidrogênio de baixa emissão.

O hidrogênio de baixa emissão desempenha um papel crucial na transição para uma economia de baixo carbono. A produção de hidrogênio renovável, principalmente através da eletrólise da água utilizando energia proveniente de fontes renováveis, como solar e eólica, oferece uma alternativa limpa que pode significativamente reduzir a dependência de combustíveis fósseis e, por consequência, as emissões de gases de efeito estufa. Este tipo de hidrogênio não apenas serve como uma fonte de energia versátil e limpa, mas também como um meio de armazenamento de energia, facilitando o uso eficiente de fontes renováveis intermitentes. Ele pode ser aplicado em diversos setores críticos, como o transporte e a indústria pesada, que são notoriamente difíceis de descarbonizar. Portanto, a integração do hidrogênio renovável nas estratégias de política energética é essencial para alcançar os objetivos globais de redução de carbono e fomentar uma transição energética sustentável.

Nesta linha, o objetivo desta pesquisa é explorar o potencial do hidrogênio renovável como uma solução sustentável para os desafios energéticos e ambientais contemporâneos. A hipótese central desta pesquisa é que a expansão da infraestrutura para a produção de hidrogênio renovável pode efetivamente levar a uma redução substancial das emissões de carbono globais. Utilizando fontes renováveis como energia solar, eólica e hidrelétrica para eletrólise, a produção de hidrogênio pode se tornar um processo com baixas ou nenhuma emissão de gases de efeito estufa, tornando-o uma alternativa aos combustíveis fósseis em diversos setores.

Os principais resultados da pesquisa corroboram a hipótese inicial. A produção de hidrogênio renovável não só se apresenta como uma alternativa eficaz aos combustíveis fósseis, reduzindo emissões diretas de carbono, mas também facilita a integração de energias renováveis em setores como transporte, indústria e aquecimento residencial. Além disso, o hidrogênio renovável desempenha um papel crucial na estabilização das redes elétricas, proporcionando um fornecimento de energia mais constante e confiável. Esses resultados destacam a

importância do hidrogênio renovável para a construção de uma economia de baixo carbono e para o desenvolvimento sustentável.

Apesar dos avanços, a pesquisa apresenta algumas limitações. Não foram explorados aspectos econômicos detalhados da implementação em larga escala de infraestrutura de hidrogênio renovável, nem foram analisadas as barreiras políticas e regulatórias que podem dificultar essa transição. Além disso, a viabilidade técnica em diferentes contextos regionais e os possíveis impactos socioeconômicos não foram profundamente investigados.

Com base nessas limitações, futuras pesquisas devem focar em análises econômicas detalhadas dos custos e benefícios da infraestrutura de hidrogênio renovável, bem como em estudos de caso regionais para entender melhor as especificidades locais. Além disso, é crucial investigar as políticas e regulamentos necessários para promover a adoção do hidrogênio renovável e como superar as barreiras tecnológicas e de mercado. A análise dos impactos socioeconômicos também é essencial para garantir uma transição justa e equitativa para uma economia de baixo carbono.

6. REFERÊNCIAS

ABEEÓLICA. **Desenvolvimento da eólica no Brasil**. Disponível em:

<<https://abeeolica.org.br/energia-eolica/o-setor/>>. Acesso em: 15 abr. 2024.

ABSOLAR. **ABSOLAR e Abraceel discutem futuro da energia solar fotovoltaica no mercado livre**. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/noticia/absolar-e-abraceel-discutem-futuro-da-energia-solar-fotovoltaica-no-mercado-livre/>>. Acesso em: 15 abr. 2024.

AGÊNCIA SENADO. **Brasil pode produzir 1,8 bi de toneladas ao ano de hidrogênio, mostra debate Fonte: Agência Senado**. Disponível em:

<<https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2024/02/27/brasil-pode-alcancar-1-8-bi-de-toneladas-ao-ano-de-hidrogenio-verde-mostra-debate>>. Acesso em: 17 abr. 2024.

AZEVEDO COELHO, M. et al. Licenciatura em Ciências - USP/Univesp. Módulo 2. Em: [s.l: s.n.].

BRANDON, N. P.; KURBAN, Z. Clean energy and the hydrogen economy. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 375, n. 2098, 28 jul. 2017.

BRASIL ESCOLA. **Composição da atmosfera**. Disponível em:

<<https://brasilecola.uol.com.br/o-que-e/geografia/o-que-e-atmosfera.htm>>. Acesso em: 12 mar. 2024.

C3S/ECMWF, C. C. C. S. **Global Climate Highlights 2023. The 2023 Annual Climate Summary**. Disponível em: <<https://climate.copernicus.eu/global-climate-highlights-2023>>. Acesso em: 9 mar. 2024.

CAMILA, A. DA S. M. et al. A DINÂMICA DE METAIS-TRAÇO NO SOLO DYNAMICS OF SOIL TRACE METAL. **R. Bras. Agrocência**, v. 17, n. n.3-4, p. 383–391, 2011.

CLIMATE BONDS. **Certification**. Disponível em:

<<https://www.climatebonds.net/certification>>. Acesso em: 15 abr. 2024.

CNN BRASIL. **O que é hidrogênio verde e como ele pode ser uma fonte de energia renovável?** Disponível em: <<https://www.cnnbrasil.com.br/economia/entenda-como-o-hidrogenio-verde-pode-ser-usado-como-fonte-de-energia-renovavel/>>. Acesso em: 17 abr. 2024.

COPPE UFRJ, C. DOS P. DE P.-G. EM E. **Hidrogênio natural é descoberto em quatro estados brasileiros**. Disponível em: <<https://coppe.ufrj.br/planeta-coppe/hidrogenio-natural-e-descoberto-em-quatro-estados-brasileiros/>>. Acesso em: 8 maio. 2024.

- ECMWF, E. C. FOR M.-R. W. F. **Reanálise ECMWF v5 (ERA5)**. Disponível em: <<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-v5>>. Acesso em: 9 mar. 2024.
- EMBRAPA, E. B. DE P. A. **Fixação biológica de nitrogênio pode reduzir as emissões de GEE na agricultura**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/8313328/fixacao-biologica-de-nitrogenio-pode-reduzir-as-emissoes-de-gee-na-agricultura>>. Acesso em: 18 mar. 2024a.
- EMBRAPA, E. B. DE P. A. **Agricultura de baixa emissão de carbono**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/tema-agricultura-de-baixo-carbono/perguntas-e-respostas>>. Acesso em: 18 mar. 2024b.
- EMBRAPA, E. B. DE P. A. **Pecuária brasileira reduz emissão de metano entérico por litro de leite**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/80563726/pecuaria-brasileira-reduz-emissao-de-metano-enterico-por-litro-de-leite>>. Acesso em: 18 mar. 2024c.
- EPA, U. S. E. P. A. **Global Greenhouse Gas Emissions Data**. Disponível em: <<https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data>>. Acesso em: 18 mar. 2024.
- EPE, E. DE P. E. **Bases para a consolidação da estratégia brasileira do hidrogênio**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/NT_Hidroe%CC%82nio_rev01%20\(1\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/NT_Hidroe%CC%82nio_rev01%20(1).pdf)>. Acesso em: 17 abr. 2024.
- EPE, E. DE P. E. **Matriz energética e elétrica**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 25 abr. 2024a.
- EPE, E. DE P. E. **Fontes de energia**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/fontes-de-energia>>. Acesso em: 25 abr. 2024b.
- GLOBAL CARBON PROJECT. **Fossil CO2 emissions at record high in 2023**. Disponível em: <<https://globalcarbonbudget.org/fossil-co2-emissions-at-record-high-in-2023/>>. Acesso em: 9 mar. 2024.
- GLOBAL MONITORING LABORATORY. **Trends in atmospheric carbon dioxide**. Disponível em: <<https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>>. Acesso em: 9 mar. 2024a.
- GLOBAL MONITORING LABORATORY. **NOAA's Annual Greenhouse Gas Index**. Disponível em: <<https://gml.noaa.gov/aggi/#:~:text=The%20AGGI%20in%202022%20was,gases%20by%2049%25%20since%201990.>>. Acesso em: 13 mar. 2024b.

GOLDEMBERG, J. **Tudo o que você precisa saber sobre energia**. Tradução: Francisco Araújo da Costa. Porto Alegre: Bookman, 2023.

GOMES, W. M. B. POTENCIALIDADES E DESAFIOS DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL: ANÁLISE DO PROGRAMA DE CERTIFICAÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL NO BRASIL. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 9, n. 2, p. 545, 17 jul. 2020.

H2BRASIL. **Portal Hidrogênio Verde**. Disponível em:

<<https://www.h2verdebrasil.com.br/h2brasil/>>. Acesso em: 22 set. 2023.

HYDROGEN COUNCIL. **There's no climate solution without clean hydrogen. And there's no clean hydrogen without action**. Disponível em:

<<https://hydrogencouncil.com/en/>>. Acesso em: 15 abr. 2024.

IEA, I. E. A. **WORLD ENERGY OUTLOOK 2019**. [s.l: s.n.]. Disponível em:

<www.iea.org/weo>.

IEA, I. E. A. **Global Methane Tracker 2023**. 2023a.

IEA, I. E. A. **Global Hydrogen Review 2023**. [s.l: s.n.]. Disponível em:

<<https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023>>. Acesso em: 22 set. 2023b.

IEA, I. E. A. **Greenhouse Gas Emissions from Energy Data Explorer**. Disponível em:

<<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/greenhouse-gas-emissions-from-energy-data-explorer>>. Acesso em: 18 mar. 2024a.

IEA, I. E. A. **Net Zero Emissions by 2050 Scenario (NZE)**. Disponível em:

<<https://www.iea.org/reports/global-energy-and-climate-model/net-zero-emissions-by-2050-scenario-nze>>. Acesso em: 29 abr. 2024b.

IPCC, I. P. ON C. C. **Climate Change 2014 Synthesis Report Summary for Policymakers Summary for Policymakers**. [s.l: s.n.]. Disponível em:

<https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/AR5_SYR_FINAL_SPM.pdf>. Acesso em: 9 mar. 2024.

IPCC, I. P. ON C. C. **Climate Change 2021 – The Physical Science Basis**. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 6 jul. 2021. Disponível em:

<https://report.ipcc.ch/ar6/wg1/IPCC_AR6_WGI_FullReport.pdf>. Acesso em: 18 mar. 2024.

IPCC, I. P. ON C. CHANGE. T. A. R. **Climate change 2001: the scientific basis**. [s.l: s.n.].

Disponível em:

<https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WGI_TAR_full_report.pdf>. Acesso em: 13 mar. 2024.

IPEA. **Revista tempo do mundo**. Disponível em:

<<https://www.ipea.gov.br/revistas/index.php/rtm/chamadaseguranca>>. Acesso em: 15 abr. 2024.

IRENA, I. R. E. A. **Economia do hidrogênio atinge uma nova dinâmica energética global**.

Disponível em: <<https://www.irena.org/news/pressreleases/2022/Jan/-/media/D84B4DF80B1347788F3734AC1B0651DC.ashx>>. Acesso em: 17 abr. 2024.

JORNAL DA USP. **Série Energia: Hidrogênio verde é importante vetor para o**

desenvolvimento econômico. Disponível em: <<https://jornal.usp.br/noticias/serie-energia-hidrogenio-verde-e-importante-vetor-para-o-desenvolvimento-economico/>>. Acesso em: 17 abr. 2024.

MASSON-DELMOTTE, V. et al. **Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty** Edited by Science Officer Science Assistant Graphics Officer Working Group I

Technical Support Unit. [s.l: s.n.]. Disponível em:

<https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/06/SR15_Full_Report_High_Res.pdf>. Acesso em: 8 mar. 2024.

MATHEZ, E. A.; SMERDON, J. E. **The science of global warming and our energy future**. 2. ed. [s.l.] Columbia University Press, 1998.

MAY, P. H. (ORG.). **Economia do Meio Ambiente: Teoria e Prática**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.

MME, M. DE M. E E.; EPE, E. DE P. E. **PNE 2050. Plano nacional de energia**. [s.l: s.n.].

Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/publicacoes/plano-nacional-de-energia/plano-nacional-de-energia-2050/relatorio-final/relatorio-final/relatorio-final-do-pne-2050.pdf/view>>. Acesso em: 2 out. 2023.

MORETTI, I.; WEBBER, M. E. Natural hydrogen: a geological curiosity or the primary energy source for a low-carbon future? *Hydrogen: Uses and Problems*. n. 34, p. 1–6, 2021.

NASA. **Global Warming**. Disponível em:

<<https://earthobservatory.nasa.gov/images/149321/2021-continued-earths-warming-trend>>. Acesso em: 22 set. 2023.

NASA. **Five Factors to Explain the Record Heat in 2023**. Disponível em:

<<https://earthobservatory.nasa.gov/images/152313/five-factors-to-explain-the-record-heat-in-2023>>. Acesso em: 9 mar. 2024.

ONU. **Organização das Nações Unidas (ONU). Perspectiva global reportagens humanas. Mundo teve o janeiro mais quentes já registrado.** Disponível em:

<<https://news.un.org/pt/story/2024/02/1827827>>. Acesso em: 24 fev. 2024.

OUR WORLD IN DATA. **CO₂ and greenhouse gas emissions.** Disponível em:

<<https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions>>. Acesso em: 22 set. 2023a.

OUR WORLD IN DATA. **CO₂ and greenhouse gas emissions.** Disponível em:

<<https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions>>. Acesso em: 22 set. 2023b.

OUR WORLD IN DATA. **Energy Production and Consumption.** Disponível em:

<<https://ourworldindata.org/energy-production-consumption>>. Acesso em: 8 mar. 2024a.

OUR WORLD IN DATA. **Greenhouse gas emissions. Which countries emit the most greenhouse gases each year? How do they compare per person?** Disponível em:

<<https://ourworldindata.org/greenhouse-gas-emissions#how-are-greenhouse-gases-measured>>. Acesso em: 18 mar. 2024b.

PORTAL DA INDÚSTRIA. **Na rota do hidrogênio sustentável.** Disponível em:

<<https://noticias.portaldaindustria.com.br/noticias/sustentabilidade/na-rota-do-hidrogenio-sustentavel/>>. Acesso em: 17 abr. 2024.

PREFEITURA DE MARICÁ. **Fontes de hidrogênio natural são encontradas em Maricá.**

Disponível em: <<https://www.marica.rj.gov.br/noticia/fontes-de-hidrogenio-natural-sao-encontradas-em-marica/>>. Acesso em: 8 maio. 2024.

RAÍZEN. **Sustentabilidade e energia.** Disponível em:

<<https://www.raizen.com.br/blog/transicao-energetica#:~:text=A%20transi%C3%A7%C3%A3o%20energ%C3%A9tica%20est%C3%A1%20associada,as%20fontes%20de%20baixo%20carbono>>. Acesso em: 15 abr. 2024.

RITCHIE, H. Sector by sector: where do global greenhouse gas emissions come from? 2020.

THOMAS, J. M. ; C. S. J. **Economia Ambiental: Fundamentos, Políticas e Aplicações.** São Paulo: Cengage Learning, 2010.

UN, U. N. **COP28: Methane pledge by the ‘giants behind the climate crisis’ falls short, says Guterres.** Disponível em: <<https://news.un.org/en/story/2023/12/1144282>>. Acesso em: 18 mar. 2024.

UNFCCC. **United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). The Paris Agreement.** Disponível em:

<<https://web.archive.org/web/20210319180727/https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>>. Acesso em: 8 mar. 2024.

UNFCCC, U. N. F. C. O N C. C. **United Nations Climate Change. The Paris Agreement. 2015.** Disponível em: <<https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>>. Acesso em: 22 set. 2023.

UNIÃO EUROPEIA. **Políticas energéticas: princípios gerais** **Fichas temáticas sobre a União Europeia. Parlamento Europeu.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.europarl.europa.eu/erpl-app-public/factsheets/pdf/pt/FTU_2.4.7.pdf>. Acesso em: 8 mar. 2023.

WIKIPÉDIA. **Charles Keeling.** Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Charles_Keeling#Bibliografia>. Acesso em: 12 mar. 2024.

YERGIN, D. **O novo mapa: energia, clima e conflito entre nações.** Tradução: Francisco Araújo da Costa. Porto Alegre: Bookman, 2023.