



Hidrogênio Verde: Estudo de Caso do Brasil

José Victor da Silva Garcia
Julia Finamor Carvalho

Monografia em Engenharia de Bioprocessos

Orientador

Profa. Clarice Campelo de Melo Ferraz, D.Sc

Agosto de 2022



HIDROGÊNIO VERDE: ESTUDO DE CASO DO BRASIL

José Victor da Silva Garcia

Julia Finamor Carvalho

Monografia em Engenharia de Bioprocessos submetida ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Bacharelado.

Aprovado por:

Marcelo Mendes Viana, D. Sc.

Renato Pinto de Queiroz, M.Sc

Fabio Pereira dos Santos, D. Sc

Orientado por:

Clarice Campelo de Melo Ferraz, D. Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil
Agosto de 2022



Garcia, José Victor. Carvalho, Julia.

Hidrogênio verde: estudo de caso do Brasil / José Victor da Silva Garcia, Julia Finamor Carvalho. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2022.

xiv; 117p.; il

(Monografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2022.

Orientadora: Clarice Campelo de Melo Ferraz.

1. Neutralidade de carbono. 2. Hidrogênio verde 3. Brasil 4. Monografia. (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Clarice Campelo de Melo Ferraz. I. Hidrogênio verde: estudo de caso do Brasil.



AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos nossos pais pelo carinho, atenção e suporte que nos deram durante toda a nossa vida e principalmente nos momentos mais difíceis. Aos nossos irmãos por todo o apoio e paciência.

Somos gratos à Professora Clarice Ferraz por todo o apoio técnico e psicológico para elaboração deste trabalho. Foi essencial contar com o apoio de alguém que admiramos tanto. Também gostaríamos de agradecer a cada professor que passou por nós durante toda essa jornada que nos ensinaram muito além de conteúdo, não formaram apenas profissionais e sim, seres humanos.

E, por fim, gostaríamos de agradecer àqueles que estão presentes todos os dias, ouvindo nossas dores, nos fazendo rir e incentivando, obrigada por tudo, amigos. Em especial, um agradecimento à minha dupla que me deu força para continuar.

Resumo da Monografia apresentada à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Bacharelado.



HIDROGÊNIO VERDE: ESTUDO DE CASO DO BRASIL

José Victor da Silva Garcia
Julia Finamor Carvalho

Agosto, 2022

Orientador: Profa. Clarice Campelo de Melo Ferraz, D.Sc.

Recentemente, o desenvolvimento da cadeia do hidrogênio como vetor energético tornou-se objetivo estratégico de diversos países no contexto da descarbonização de suas economias. O hidrogênio verde (H₂V), aquele produzido por meio de fontes renováveis de energia, é atualmente reconhecido como elemento chave para o cumprimento das metas de redução de emissões dos gases de efeito estufa (GEE) assumidas pelos países no Pacto de Glasgow, em 2021. O presente estudo analisou a conjuntura atual da cadeia de H₂V no Brasil e o seu potencial de aplicação no país, tendo como base as iniciativas nacionais e internacionais em curso. No Brasil, o desenvolvimento atual da cadeia brasileira de H₂V está sendo guiado principalmente pela finalidade de exportação do produto. Ao priorizar o uso do excedente de energia elétrica para a produção de H₂V com destino à exportação, o Brasil deixa de lado a possibilidade de utilizar o produto para: descarbonizar setores de difícil eletrificação; conferir maior resiliência à sua matriz elétrica e impulsionar a penetração adicional de fontes renováveis intermitentes.



ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	15
2. METODOLOGIA	19
2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.2 REVISÃO BIBLIOMÉTRICA	20
2.2.1 VOSviewer	21
3. O HIDROGÊNIO	22
3.1. A MOLÉCULA E SUAS PROPRIEDADES	22
3.2. FORMAS DE PRODUÇÃO	23
3.2.1 O hidrogênio cinza	25
3.2.2 O hidrogênio verde	27
3.3. APLICAÇÕES DO HIDROGÊNIO	29
3.3.1 O uso na indústria	30
3.3.1.1 Indústria de refino	30
3.3.1.1.1 O hidrocraqueamento	31
3.3.1.1.2 O hidrotreatamento	31
3.3.1.2 Indústria química	32
3.3.1.2.1 A produção de NH ₃	32
3.3.1.2.2 A produção de metanol	33
3.3.1.3 Outros usos industriais	33
3.3.2 O uso na matriz energética	34
4. O HIDROGÊNIO NO CAMINHO PARA A NEUTRALIDADE DE CARBONO	36
4.1 O HIDROGÊNIO NO ROTEIRO PROPOSTO PELA AIE	38
4.2 O HIDROGÊNIO SEGUNDO O HYDROGEN COUNCIL	42
4.3 OS DESAFIOS ATUAIS NA CADEIA DE H ₂	44
4.3.1. O armazenamento de H ₂	44
4.3.2 A transmissão e distribuição de H ₂	45
5. INICIATIVAS INTERNACIONAIS EM H ₂ V	49
5.1 A UNIÃO EUROPEIA	54
5.2 A CHINA	56
5.3 OS ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA	59
6. HIDROGÊNIO VERDE NO BRASIL	63
6.1 PANORAMA NACIONAL DE EMISSÕES	63



6.2 MERCADO DE HIDROGÊNIO NO BRASIL	65
6.3 POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE H ₂ V NO BRASIL	71
6.3.1 A matriz elétrica brasileira	71
6.3.2 O perfil de consumo de energia no Brasil	75
6.3.3 O excedente de eletricidade	76
6.4 POTENCIAL DE APROVEITAMENTO DE H ₂ V NO BRASIL	78
6.4.1 Produção de Fertilizantes Nitrogenados	82
6.4.2 Produção de Aço de Baixo Carbono	84
7. CONCLUSÃO	90
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92
APÊNDICE A - A COP XXVI	111
APÊNDICE B - AS IMPLICAÇÕES DO AQUECIMENTO GLOBAL	112



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Gráficos da evolução temporal da concentração de gases de efeito estufa.....	15
Figura 2. Contribuição de diferentes fontes de emissão de GEE.....	16
Figura 3. Índice Anual de Gases de Efeito Estufa (AGGI)	16
Figura 4. Comparação de energia específica para diferentes combustíveis.....	23
Figura 5. Reações de formação de H ₂ por reforma a vapor.....	26
Figura 6. Representação do processo industrial de reforma a vapor com remoção de CO ₂ por solventes.....	26
Figura 7. Esquema operacional dos diferentes eletrolisadores.....	27
Figura 8. Ciclo produtivo do hidrogênio verde.....	29
Figura 9. Evolução da demanda global anual por hidrogênio (1975 - 2018e).....	30
Figura 10. Representação da cadeia do hidrogênio.....	30
Figura 11. Reação de hidrocraqueamento simples.....	31
Figura 12. Reações de hidrodessulfurização de compostos sulfurados	32
Figura 13. Reações de síntese de amônia pelo processo de Haber-Bosch	33
Figura 14. Reações de síntese de metanol pelo processo de gás de síntese.....	33
Figura 15. Esquema simplificado de uma célula a combustível tipo PEMFC	35
Figura 16. Usos de H ₂ V na descarbonização da economia	37
Figura 17. Economia anual de emissões de CO ₂ em relação a 2020 no caminho para a neutralidade de emissões	38
Figura 18. Principais marcos para a neutralidade de emissões.....	40
Figura 19. Demanda global de hidrogênio e combustíveis a base de hidrogênio segundo a AIE.....	41
Figura 20. Demanda global de hidrogênio e combustíveis a base de hidrogênio segundo Hydrogen Council.....	43
Figura 21. Custo de armazenamento e transporte de H ₂	47
Figura 22. Custos de transporte de hidrogênio com base em distâncias e volume	48
Figura 23. Mapa de cooperação entre os países em pesquisas sobre hidrogênio verde nos últimos 5 anos	49
Figura 24. Panorama das ações em H ₂ por país.....	52
Figura 25. Mapa de co-ocorrência de palavras-chaves sobre hidrogênio verde.....	53
Figura 26. Emissões acumuladas em 100 anos.....	57
Figura 27. Redução de emissões para o atingimento da neutralidade de carbono nos EUA até 2050	60
Figura 28. Custo de H ₂ de baixa intensidade produzido por eletrólise	63



Figura 29. Evolução das emissões brutas em tCO ₂ e/ano (2000-2020)	64
Figura 30. Evolução da NDC firmada pelo Brasil desde 2016. Eixo horizontal corresponde ao ano no horizonte da NDC	65
Figura 31. Ações governamentais para o H ₂ no Brasil	68
Figura 32. Seis eixos temáticos do PNH2. Adaptado de EPE, 2021.	69
Figura 33. Participação de renováveis na matriz elétrica nos anos de 2020 e 2021	71
Figura 34. Matriz energética brasileira em 2020 vs. 2021. Fonte: EPE, 2022	72
Figura 35. Distribuição geográfica geração eólica e de geração solar fotovoltaica	73
Figura 36. Evolução da capacidade instalada de energia eólica no Brasil	74
Figura 37. Consumo de energia por setor	75
Figura 38. Participação das fontes de produção ao final de 2016 e 2022	77
Figura 39. Custo nivelado da produção de hidrogênio a partir de fonte renovável de energia em 2050	78
Figura 40. Diferentes rotas de produção do aço.	86
Figura 41. Prospectividade para o armazenamento de CO ₂	88
Figura 42. Infraestrutura de produção e movimentação de gás natural	89
Figura 43. Mudanças na temperatura da superfície terrestre nos últimos 170 anos	112
Figura 44. Emissões futuras de CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O e SO ₂	114
Figura 45. Simulação dos efeitos do aumento da temperatura média da superfície terrestre	115



ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Classificação do hidrogênio em escala de cores.....	24
Tabela 2. Emissões de dióxido de carbono no ciclo de vida da produção de hidrogênio por rota tecnológica.....	25
Tabela 3. Tipos de eletrolisadores utilizados na produção de H ₂	27
Tabela 4. Vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de eletrolisadores.....	28
Tabela 5. Outras aplicações industriais de hidrogênio atuais ou potenciais.....	34
Tabela 6. Iniciativas de uso de hidrogênio no setor de transporte.....	35
Tabela 7. Resumo das definições de <i>Power-to-X</i> descritas na literatura.....	37
Tabela 8. Produção de H ₂ entre 2020-50 por tipo segundo AIE.....	41
Tabela 9. Consumo de H ₂ entre 2020-50 por setor segundo AIE.....	42
Tabela 10. Consumo de H ₂ entre 2020-50 por segmento.....	43
Tabela 11. Vantagens e desvantagens de transportadores de hidrogênio para longas distâncias.....	47
Tabela 12. Países com publicações na área de Hidrogênio Verde nos últimos 5 anos.....	50
Tabela 13. 10 países com maiores números de citações do tema hidrogênio verde.....	51
Tabela 14. Publicações mais influentes dos clusters obtidos a partir da análise de co-ocorrência.....	54
Tabela 15. Consumo H ₂ atual e futuro nos EUA (MMt/ano).....	62
Tabela 16. Emissões de GEE no Brasil entre 2019 e 2020 (tCO ₂ e - GWP-AR5).....	63
Tabela 17. Principais atores na cadeia brasileira produtiva de hidrogênio.....	66
Tabela 18. Representatividade de geração de energia eólica por região no Brasil.....	74
Tabela 19. Saldo entre Geração de energia e Consumos Totais (GWh).....	76
Tabela 20. Projeto de H ₂ V Anunciados no Brasil.....	80
Tabela 21. Aumento da temperatura média da superfície global em relação a 1850-1900.....	114



NOMENCLATURA

ACL - Ambiente de Contratação Livre

ACR - Ambiente de Contratação Regulada

AGGI - *Annual Greenhouse Gas Index*

AHK - Câmara de Comércio e Indústria Brasil-Alemanha

AIE - Agência Internacional de Energia

Al₂O₃ - Óxido de alumínio

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

AR6 - *Assessment Report 6*

AWE - *Alkaline Water Eletrolysis*

BNDES - Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social

CCEE - Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

CCUS - Captura e Armazenamento de Carbono

CEPAL - Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe

CFC-11 - Tricloromonofluorometano

CFC-12 - Diclorodifluorometano

CGEE - Centro de Gestão de Estudo Estratégicos

CH₃OH - Metanol

CH₄ - Metano

CNTP - Condições Normais de Temperatura e Pressão

CO₂ - Dióxido de Carbono

CO₂e - Dióxido de Carbono Equivalente

COP - Conferência das Partes

Cu - Cobre

DOE - *U.S. Department of Energy*

EERE - *U.S. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy*



EPE - Empresa de Pesquisa Energética

EUA - Estados Unidos da América

FNDCT - Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

GEE - Gases do Efeito Estufa

GW - Gigawatt

H - Hidrogênio atômico

H₂ - Hidrogênio molecular

H₂O - Água

H₂S - Sulfeto de hidrogênio

H₂V - Hidrogênio verde

HCC - Hidrocraqueamento

HCFC-134a - 1,1,1,2-Tetrafluoroetano

HCFC-22 - Clorodifluorometano

HDT - Hidrotratamento

IPCC - *The Intergovernmental Panel on Climate Change*

IPHE - *International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy*

Ir - Iridio

ISI - *Institute for Scientific Information*

kWh - Quilowatt-hora

LH₂ - Hidrogênio liquefeito

LOHC - Transportador de Hidrogênio Orgânico Líquido

MCTI - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações

MERICS - *Mercator Institute for China Studies*

MJ - Megajoule

MMA - Ministério do Meio Ambiente

MME - Ministério de Minas e Energia



Mt - Megatonelada

MUT - Mudança do Uso da Terra

MWh - Megawatt-hora

N/A - *Not available*

N₂O - Óxido Nitroso

NDC - *Nationally Determined Contributions*

NH₃ - Amônia

NOAA - *U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration*

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico

ONU - Organização das Nações Unidas

PCH - Pequena Central Hidrelétrica

PD&D - Pesquisa, Desenvolvimento e Demonstração

PD&I - Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação

PEM - *Polymer Electrolyte Membrane Electrolysis*

PNH₂ - Programa Nacional do Hidrogênio

Pt - Prata

PtX - *Power-to-X*

RSC - *Royal Society of Chemistry*

Ru - Rutênio

SAF - Combustível Sustentável de Aviação

SIN - Sistema Interligado Nacional

SO₂ - Dióxido de Enxofre

SO₃ - Trióxido de Enxofre

SOE - *Solid Oxide Electrolyzer cell*

TLP - Taxa de Longo Prazo

TWh - Terawatt-hora



WGI - *AR6's Working Group I*

WGII - *AR6's Working Group II*

WRI - *World Resources Institute*

ZnO - Óxido de Zinco



1. INTRODUÇÃO

A população mundial tem aumentado significativamente a emissão de gases do efeito estufa (GEE), já que possui uma economia centrada no fornecimento de energia por meio da queima de combustíveis fósseis como o gás natural, o petróleo e o carvão mineral. Desde a Primeira Revolução Industrial, as emissões de GEE crescem acentuadamente, conforme mostrado na Figura 1 (LACERDA e NOBRE, 2010).

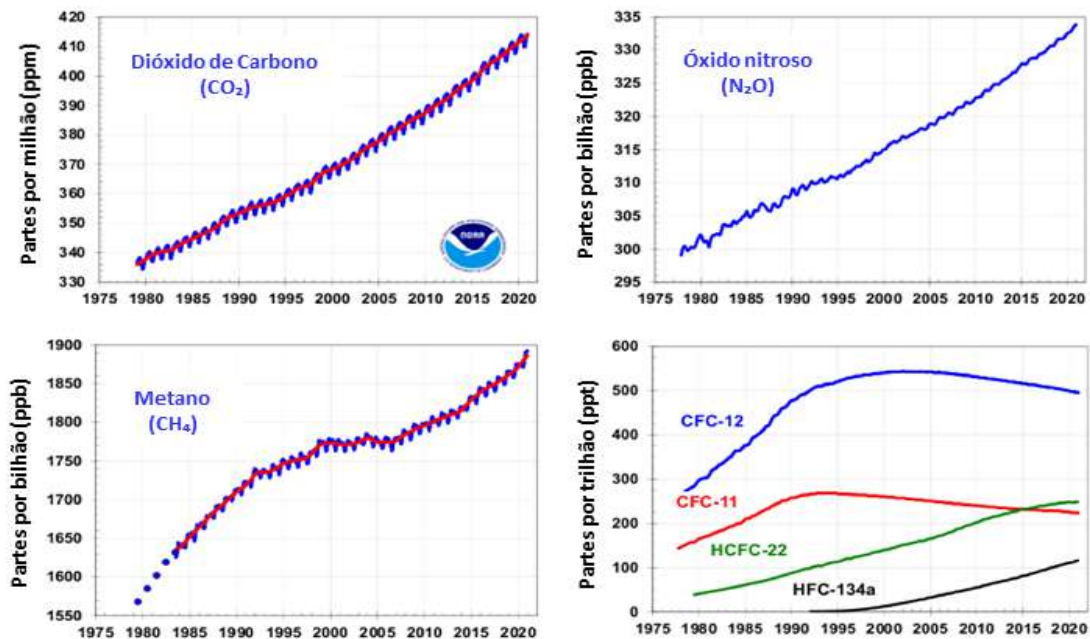


Figura 1. Gráficos da evolução temporal da concentração de gases de efeito estufa. Os gases CO₂, N₂O, CH₄, CFC-11, CFC-12, HCFC-22 e HCFC-134a são responsáveis por 96% do aumento do calor retido na atmosfera devido a ação humana desde 1750. Fonte: Adaptado de NOAA, 2022.

De acordo com a *Climate Watch*¹, cerca de 60% dos GEE emitidos têm origem em apenas dez países, sendo o Brasil o sexto maior emissor. Dividindo as emissões setorialmente, a plataforma aponta que três quartos vêm do setor energético, seguido da agricultura, como ilustrado pela Figura 2. Dentro do setor energético, a área com maior nível de emissões é a de geração elétrica e de calor, seguido por transportes e manufatura.

¹ Climate Watch é uma plataforma online projetada para capacitar formuladores de políticas, pesquisadores, mídia com dados climáticos abertos, visualizações e recursos necessários para o progresso nacional e global das mudanças climáticas. A plataforma reúne dezenas de conjuntos de dados para permitir que os usuários analisem e comparem as Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs) sob o Acordo de Paris.

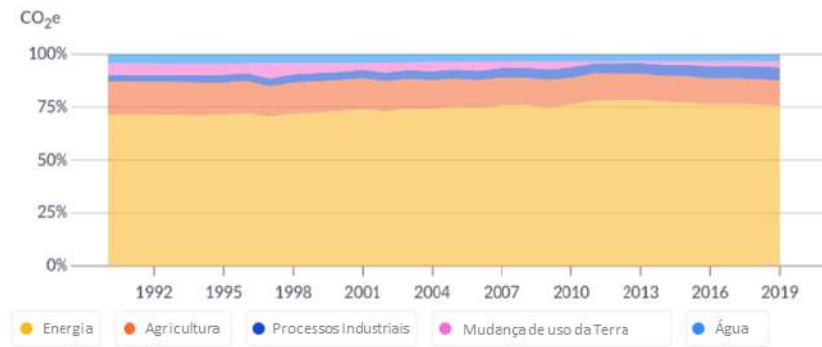


Figura 2. Contribuição de diferentes fontes de emissão de GEE. Fonte: Adaptado de *Climate Watch*, 2022.

A maior concentração desses gases na atmosfera possui uma relação direta com o aumento da temperatura média da superfície terrestre, já que há aumento da força radiante com consequente aumento do aprisionamento de calor, vide Figura 3 (NOAA, 2022).

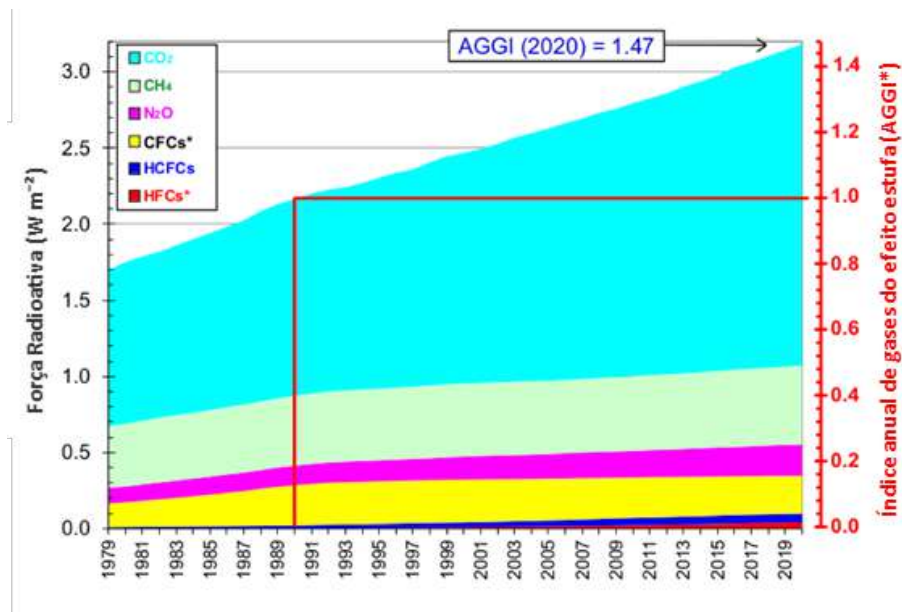


Figura 3. Índice Anual de Gases de Efeito Estufa (AGGI, na sigla em inglês). O gráfico mostra a influência dos gases de efeito estufa no aprisionamento de calor (força radiante) relativo a 1750, ou seja, o quanto de calor extra foi preso na atmosfera desde a Primeira Revolução Industrial. O valor de 0.0 é atribuído a 1750 e o valor de 1.0 a 1990, o ano do Protocolo de Kyoto. Em 2020, o AGGI atingiu o seu máximo histórico em 1.47, o que indica que 47,0% a mais de calor foi capturado pela atmosfera terrestre em 2020 comparado a 1990. Fonte: Adaptado de NOAA, 2022.

Diante desse problema, foram realizadas conferências organizadas pela Organização das Nações Unidas (ONU) entre diversos países desde 1972, ano da Conferência de Estocolmo. A partir desses encontros foram firmados acordos multilaterais em prol do combate às mudanças climáticas. Dentre os acordos mais emblemáticos estão: a Agenda 21 firmada em 1992 na Eco-92; O Protocolo de Quioto



firmado em 1997 na COP III; o Acordo de Paris firmado em 2016 na COP XXI e o Pacto de Glasgow firmado em 2021 na COP XXVI (ONU, 2021).

De acordo com o Sexto Relatório de Avaliação (AR6, na sigla em inglês), do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, na sigla em inglês) (2021), as emissões do passado já trouxeram um aumento da temperatura média da superfície global de 1.09 °C e tornaram irreversíveis algumas consequências do aquecimento global, como o degelo, o aumento do nível do mar e mudanças nos oceanos. O relatório conclui que caso haja a continuidade do aquecimento global, todas as regiões do planeta sofrerão mudanças climáticas, como elevação de temperatura, estações quentes maiores, ondas de calor e menores extremos de frio. Por fim, o AR6 prevê que se o limite de elevação de temperatura de 1,5 °C for atingido em 2050, haverá grandes consequências para a economia e saúde humana, bem como para o meio ambiente (MASSON-DELMOTTE et al, 2021).

Diante deste cenário, os países vêm anunciando metas nacionais de cortes de emissões de GEE a fim de cumprirem seus respectivos compromissos assumidos à luz do Pacto de Glasgow. Dentro dos programas nacionais, o uso do Hidrogênio (H₂) está ganhando forças. A molécula é considerada um importante elo na descarbonização de setores de difícil emprego da eletrificação (HYDROGEN COUNCIL e MCKINSEY&COMPANY, 2021). Dentre as opções de rotas tecnológicas disponíveis para a produção do H₂, a que emprega fontes renováveis de energia é a de maior destaque atualmente. Através desta, é obtido o hidrogênio verde (H₂V).

O H₂V permite que a queda dos custos de capital das fontes renováveis de geração de energia percebida nos últimos anos seja utilizada para a redução de emissões das áreas de transporte, de indústria e de aquecimento domiciliar (HYDROGEN COUNCIL e MCKINSEY&COMPANY, 2021). Entretanto, para que essa visão se torne realidade, é necessário assegurar fontes e estratégias de produção de um hidrogênio neutro em carbono, assim como superar os desafios do transporte, armazenamento e distribuição do produto.

O presente estudo tem como principal objetivo trazer um panorama da cadeia de H₂V no Brasil. Para atender o objetivo principal, buscou-se atingir alguns objetivos específicos, tais como:



- Entender o potencial do H₂V na descarbonização da economia mundial e brasileira;
- Prospectar iniciativas internacionais no desenvolvimento da cadeia do produto e suas respectivas finalidades e;
- Analisar a pertinência da produção de H₂V no Brasil, avaliando as suas iniciativas nacionais de produção, suas respectivas finalidades e desafios.

Após essa breve introdução, a estrutura do trabalho está dividida em 5 capítulos. O Capítulo 2 aborda a metodologia adotada para o desenvolvimento do trabalho. O Capítulo 3 traz informações técnicas sobre a molécula de H₂, suas formas de produção e aplicações. O Capítulo 4, por sua vez, reporta o potencial uso do H₂ de baixa intensidade de carbono no combate às mudanças climáticas. Posteriormente, no Capítulo 5, é estudado o panorama mundial da indústria de H₂V e iniciativas nacionais no tema. No Capítulo 6, o caso do Brasil é analisado, tendo como perspectiva os projetos já anunciados, suas finalidades e o potencial do H₂V na descarbonização da economia brasileira não explorado por tais iniciativas. Por fim, no Capítulo 7 é feita uma conclusão sobre a problemática das ideias trazidas ao longo do estudo.



2. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do presente trabalho, foram realizadas uma revisão bibliográfica e uma revisão bibliométrica tendo como base artigos científicos notas técnicas e publicações oficiais.

2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para o terceiro capítulo, foram utilizadas as seguintes fontes: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), publicações do escritório de Eficiência Energética e Energia Renovável dos EUA (EERE, na sigla em inglês) e do Departamento de Energia dos EUA (DOE, na sigla em inglês), publicações das instituições *Hydrogen Council*² e da Agência Internacional de Energia (AIE).

No quarto capítulo foram utilizados relatórios técnicos da AIE, do *Hydrogen Council* em conjunto com a consultoria estratégica *McKinsey&Company*, e também as publicações do *World Resources Institute*³ (WRI, na sigla em inglês).

No quinto capítulo, a revisão bibliográfica tomou como base artigos científicos e publicações da *Climate Watch*, do *Hydrogen Council*, da *Hydrogen Europe*⁴, da *European Files*⁵, da *H₂GreenTech*⁶, do *Mercator Institute for China Studies*⁷, do Centro de Estudos Estratégicos e Internacionais⁸ (CSIS, na sigla em inglês), do DOE, do Departamento de Estado dos EUA, do Conselho Europeu e da Comissão Europeia.

² O Hydrogen Council foi criado em 17 de janeiro de 2017 em Davos na Suíça, na presença de CEOs e executivos da indústria dos Estados Unidos, Ásia e Europa, com objetivo de apoiar e alavancar o papel do hidrogênio na transformação energética mundial. O grupo inicial era composto por 13 parceiros dos setores industrial e de energia e hoje são mais de 100 empresas participantes. Estima-se que cerca de 90% das empresas participantes no Hydrogen Council possuem subsidiárias no Brasil.

³ Fundada em 1982, a WRI é uma organização global sem fins lucrativos que trabalha com líderes governamentais, empresariais e da sociedade civil para pesquisar, projetar e executar soluções práticas que melhorem simultaneamente a vida das pessoas e garantam que a natureza possa prosperar (WRI, 2022).

⁴ Organização europeia representando companhias baseadas na Europa e partes interessadas que estão comprometidas em avançar para uma economia neutra em carbono através do desenvolvimento da indústria europeia de H₂. A Hydrogen Europe conta com mais de 350 companhias, 20 regiões do Bloco e 30 associações nacionais como membros (HYDROGEN EUROPE, 2022).

⁵ Revista europeia que conta com colaboração editorial de instituições públicas e privadas. A European Files realiza quatro publicações ao ano, a maioria em colaboração com a Comissão Europeia (EUROPEAN FILES, 2022).

⁶ Projeto sediado na Câmara de Comércio de Estíria em Graz, na Áustria, que reúne três parceiros da Eslovênia e quatro parceiros da Áustria a fim de fortalecer a cooperação regional e a pesquisa e inovação no campo das tecnologias de H₂ (H2GREENTECH, 2022).

⁷ Instituto de pesquisa europeu que reúne pesquisadores da Europa, Estados Unidos, Austrália e Singapura com foco na análise da China contemporânea e suas relações com o Mundo (MERICS, 2022).

⁸ Organização de pesquisa estadunidense dedicada ao avanço de ideias práticas para endereçar os principais desafios mundiais (CSIS, 2022)



Por fim, no sexto capítulo foram utilizados artigos científicos, publicações e estudos das seguintes fontes: Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG); Política por Inteiro; Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE); Câmara de Comércio e Indústria Brasil-Alemanha (AHK); EPE; Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe (CEPEA), Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE); Ministério de Minas e Energia (MME); Agência Epbr; Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI); jornal Estado de São Paulo; consultoria *McKinsey&Company*; Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica); Associação Brasileira de Energia Solar (ABSolar); *BloombergNEF* (BNEF); Energias do Brasil (EDP); Diário do Nordeste; Eletrobrás; Canal Energia; Complexo do Porto de Pecém; Shell; Ceará Portal; Banco Central do Brasil; BNAméricas; Jornal da USP; Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) e Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCC, na sigla em inglês).

2.2 REVISÃO BIBLIOMÉTRICA

No quinto capítulo, paralelamente à revisão bibliográfica, foi realizada uma revisão bibliométrica. Para a pesquisa de artigos, foi escolhido um conjunto de base de dados, a *Web of Science*, compiladas pelo ISI⁹ (*Institute for Scientific Information*). Por se tratar de uma pesquisa sobre um assunto relativamente novo na comunidade acadêmica, a análise foi realizada para um período recente, de forma a prospectar as novas tecnologias e comportamento das publicações entre países.

Inicialmente, o parâmetro utilizado para a pesquisa no *Web of Science* foi a palavra-chave “*green hydrogen*” entre aspas, de forma a obter o panorama geral das publicações. Adicionalmente, foram utilizados os seguintes filtros:

- Período: 2018 - Jul/2022
- Idioma: Inglês
- Tipos de documento: Artigo e Artigo de revisão
- Retirado Filtro rápido: Acesso antecipado¹⁰

⁹ Trata-se de bases de referências bibliográficas, que não contêm o texto integral dos documentos, mas que possuem uma característica específica: é possível verificar quantas vezes um artigo foi citado e por quem de forma a prospectar os estudos mais influentes e com alto fator de impacto.

¹⁰ Artigos já aprovados, mas ainda não publicados.



Para auxiliar a análise bibliométrica, foi utilizado o programa *VOSviewer*, desenvolvido pela Universidade de Leiden, na Holanda. O *VOSviewer* é um software desenvolvido para construir e visualizar mapas bibliométricos. Tais mapas ilustram os aspectos estruturais e dinâmicos da pesquisa científica (COBO et al., 2011).

O estudo utiliza acoplamentos bibliográficos para examinar a evolução temporal dos temas publicados em hidrogênio verde. O programa foi usado para análises de co-ocorrência¹¹ de palavras-chave, de forma a determinar como as pesquisas sobre o tema estão se comportando.

2.2.1 VOSviewer

A partir da pesquisa obtida no *Web of Science*, a base de dados foi exportada e, em seguida, analisada no programa *VOSviewer* por meio da opção criar um mapa baseado em dados da bibliografia.

Para a análise de países e anos de publicações, foi escolhido o tipo de análise “*co-authorship*” com a unidade de análise “*countries*”. Foi utilizado o método de contagem total sem limitações de máximo de países por documento. Em seguida foram analisados apenas os países com mais de 5 publicações por país, sem limitar o número de citações.

Já para análise de divisão dos temas entre clusters por palavras-chave foram escolhidos os mesmos parâmetros, com exceção do tipo de análise e mínimo de ocorrências, foi escolhido o de co-ocorrência com a unidade em “*keywords*” e 25 ocorrências mínimas, respectivamente.

Após análise no *VOSviewer*, a pesquisa foi repetida para todos os principais países e os artigos mais influentes foram analisados. As palavras-chaves referentes ao cluster foram reintroduzidas na pesquisa de modo a analisar detalhadamente cada cluster e suas aplicações.

¹¹ O desenvolvimento temático do tópico de pesquisa de análise de palavras-chave é usado para mapeamento científico (STROZZI et al., 2017). As palavras-chave do autor e do índice são extraídas neste artigo e agrupadas com base em suas semelhanças temáticas (CANCINO et al., 2017; MARTÍNEZ-LÓPEZ et al., 2018) para investigar a evolução dos tópicos publicados sobre hidrogênio verde entre 2018 e 2022.



3. O HIDROGÊNIO

3.1. A MOLÉCULA E SUAS PROPRIEDADES

O H é o elemento mais simples da tabela periódica sendo composto por apenas um próton e um elétron. Na Terra, o H é geralmente encontrado em compostos com outros elementos como o oxigênio, carbono e nitrogênio. Normalmente, quando puro, existe sob a sua forma diatômica H_2 , a qual em condições normais de pressão e temperatura (CNTP) é um gás incolor, insípido, inodoro e não venenoso (RSC, 2015).

O H_2 possui 1/14 da densidade do ar e pode ser encontrado na atmosfera em uma concentração de 1:1.000.000 (v/v). A forma liquefeita da molécula possui ponto de ebulição de $-252,88\text{ }^\circ\text{C}$ e um ponto de fusão de $-259,16\text{ }^\circ\text{C}$ quando em estado sólido. O H_2 reage facilmente com a molécula de O_2 formando H_2O e liberando calor (ABE, 2007).

Um dos destaques do H_2 é a sua concentração de energia por unidade mássica de $120,0\text{ MJ/kg}$, o que representa $33,6\text{ kWh}$ de energia utilizável por kg. A título de comparação, o diesel possui uma concentração de energia de $45,5\text{ MJ/kg}$ e a gasolina de $45,8\text{ MJ/kg}$. Como a mistura de H_2 e ar pode facilmente sofrer ignição, a molécula se torna um vetor energético promissor em termos mássicos (ABE, 2007).

Entretanto, a situação se reverte por unidade de volume. O H_2 líquido possui uma densidade energética de 8 MJ/L e a gasolina de 32 MJ/L , um pouco abaixo do diesel como mostrado pela Figura 4. Esta disparidade confere ao hidrogênio uma energia utilizável por litro aproximadamente cinco vezes menor do que os combustíveis fósseis em questão (EERE, 2022).

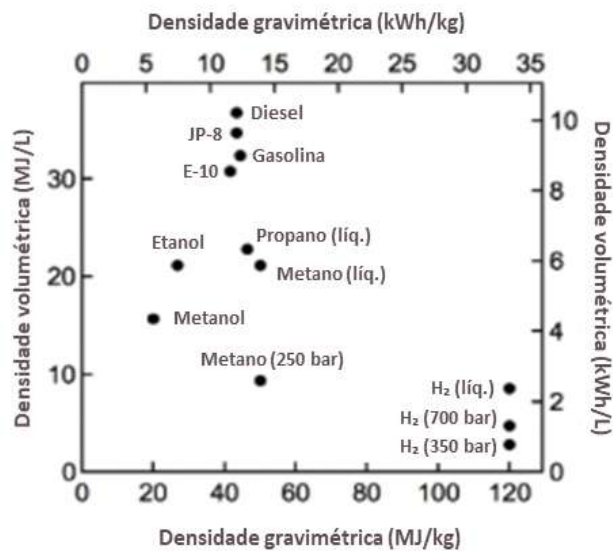


Figura 4. Comparação de energia específica para diferentes combustíveis. Fonte: Adaptado e traduzido de EERE, 2022.

O fato de o hidrogênio ser leve, armazenável, reativo, ter alta concentração de energia por unidade mássica e poder ser produzido industrialmente confere a ele um amplo mercado consumidor potencial (AIE, 2019).

3.2. FORMAS DE PRODUÇÃO

A obtenção de H₂ na sua forma pura passa necessariamente pela sua separação das moléculas nas quais normalmente é encontrado. O produto obtido pode ser dividido em oito categorias, as quais são nomeadas por cores dependentes da rota tecnológica utilizada para a sua obtenção, conforme Tabela 1 (SADIK-ZADA, 2021).



Tabela 1. Classificação do hidrogênio em escala de cores.

Classificação do Hidrogênio em escala de cores	
Cor	Processo
Preto	Gaseificação do carvão mineral (antracito), sem CCUS ¹²
Marrom	Gaseificação do carvão mineral (hulha), sem CCUS
Cinza	Reforma a Vapor do gás natural, sem CCU
Azul	Reforma a Vapor do gás natural, ou de outros combustíveis fósseis, com CCUS
Verde	Eletrólise da água com fonte renovável (principalmente solar e eólica)
Branco	Extração de H ₂ natural ou geológico
Turquesa	Pirólise do metano, sem gerar CO ₂
Musgo	Reformas catalíticas, gaseificação de plásticos residuais ou biodigestão anaeróbica de biomassa ou biocombustível
Rosa	Eletrólise da água com fonte nuclear

Fonte: Elaboração própria com base em EPE, 2022.

Cada um dos processos disponíveis para a obtenção do H₂ puro possui uma intensidade de carbono correspondente como apontado pela Tabela 2 (EPE, 2022).

¹² Captura e armazenamento de carbono.



Tabela 2. Emissões de dióxido de carbono no ciclo de vida da produção de hidrogênio por rota tecnológica.

Emissões de CO ₂ na produção de H ₂ por rota tecnológica	
Tecnologia	Intensidade de Carbono (kg CO ₂ /kg H ₂)
Reforma a vapor do metano	10,1 – 17,2
Gaseificação do carvão	14,7 – 26,1
Pirólise do metano	4,2 – 9,1
Biomassa	0,3 – 8,6
Eletrólise (Gás Natural Ciclo Combinado)	23,0
Eletrólise (Eólica)	0,5 – 1,1
Eletrólise (Solar)	1,3 – 2,5
Eletrólise (Nuclear)	0,5 – 1,0

Fonte: Elaborada pelos autores com base em EPE, 2022

Hoje em dia, mais de 95,0% das fontes utilizadas para a produção de hidrogênio são de origem fóssil. O principal processo utilizado é o de reforma a vapor do gás natural, responsável pela emissão média de 13,7 kg de CO₂ para cada kg de H₂ produzido. Uma das fronteiras tecnológicas de maior interesse atualmente é a produção de H₂ de baixa intensidade de carbono¹³, principalmente o hidrogênio verde (EPE, 2022).

3.2.1 O hidrogênio cinza

O gás natural é a principal fonte utilizada hoje em dia para a obtenção de hidrogênio, correspondendo a 75,0% da produção mundial da molécula. O processo é realizado principalmente a partir de reforma a vapor do gás natural, sendo esta uma rota de elevada eficiência térmica, cerca de 80%, e elevado rendimento, cerca de 74%. O H₂ obtido através desse processo é denominado hidrogênio cinza (EPE, 2022).

¹³ Hidrogênio produzido a partir de eletrólise com fonte renovável ou nuclear, bem como a partir da reforma a vapor de carvão e gás natural com CCUS ou abordagens biológicas.



Na reforma a vapor, entre 30,0% e 40,0% do gás natural é utilizado como combustível para a obtenção de elevadas temperaturas, o restante é empregado como matéria prima. A obtenção de H₂ se dá por um processo contínuo de reação catalítica formado basicamente por duas equações, uma altamente endotérmica e outra exotérmica como mostrado pela Figura 5 (EPE, 2022).

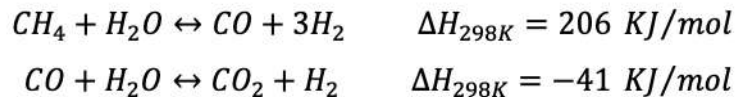


Figura 5. Reações de formação de H₂ por reforma a vapor. Fonte: Adaptado de EPE, 2022

O processo industrial de produção de H₂ (Figura 6) envolve inicialmente a purificação do gás natural a ser utilizado, removendo o enxofre que possa existir na corrente de entrada. Posteriormente, há a pré-reforma do gás com a conversão de hidrocarbonetos mais pesados em H₂, CH₄, CO₂ e H₂O. Em seguida, o gás passa pela etapa de reforma, onde 90% a 92% de todo o H₂ gerado no processo é obtido com o auxílio de catalisadores (EPE, 2022).

A corrente de saída do reformador contendo H₂, CO₂ e CO passa por uma bateria de conversores de *shift* e absorvedores de CO₂. Nos conversores de *shift*, o CO remanescente é reagido com vapor d'água e convertido em CO₂ e H₂, enquanto nos absorvedores de CO₂, há a purificação do produto de interesse com utilização de solvente. A corrente final ainda passa por uma etapa de metanação, a fim de converter o CO e o CO₂ residuais em CH₄ e purificar ainda mais o H₂ (EPE, 2022).

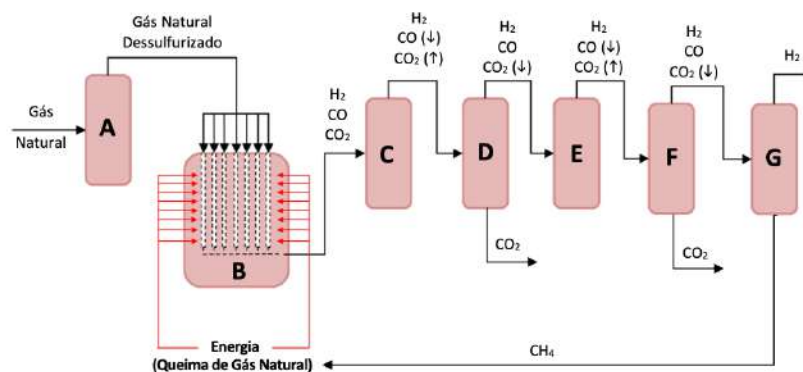


Figura 6. Representação do processo industrial de reforma a vapor com remoção de CO₂ por solventes. (A): Dessulfurizador; (B): Reformador; (C): Convertor de *shift* (primeiro estágio); (D): Absorvedor de CO₂ (primeiro estágio); (E): Convertor de *shift* (segundo estágio); (F): Absorvedor de CO₂ (segundo estágio); (G): Metanador; (seta para cima): Redução da concentração; (seta para baixo): Aumento da concentração. Fonte: Adaptado de EPE, 2021.



3.2.2 O hidrogênio verde

Em termos de sustentabilidade e impactos ambientais, a eletrólise da água é considerada a técnica mais promissora na obtenção de H_2 puro. Neste processo, a molécula de água é dissociada em H_2 e O_2 sob a ação de corrente elétrica. A reação é realizada em eletrolisadores, equipamentos que consistem em um anodo e um catodo separados por um eletrólito. Os diferentes eletrolisadores são classificados de acordo com o material empregado como eletrólito, as condições de operação e os íons transportados pela membrana, conforme identificado na Tabela 3 e na Figura 7 (KUMAR; HIMABINDU, 2019).

Tabela 3. Tipos de eletrolisadores utilizados na produção de H_2

Tipo	Eletrólito	Funcionamento
Alcalinos (AWE)	KOH/NaOH	A aplicação de corrente gera a movimentação de íons hidróxidos através do eletrólito do cátodo para o ânodo, gerando bolhas de $H_2(g)$ no lado do cátodo e $O_2(g)$ no lado do ânodo.
Óxido Sólido (SOE)	Membrana cerâmica	Vapor de água a alta temperatura ($500-850^\circ C$) se combina com elétrons da corrente externa no cátodo, formando $H_2(g)$ e íons O^{2-} . Os íons formados são transportados pela membrana e reagem no anodo, formando O_2 .
Membrana com troca de prótons (PEM)	Membrana polimérica	Água reage no anodo, formando $O_2(g)$ e prótons H^+ . Os prótons formados se deslocam através da membrana para o cátodo, onde se combinam com elétrons da corrente externa para a formação de $H_2(g)$

Fonte: Elaborada pelos autores com base em KUMAR e HIMABINDU, 2019; WANG, CAO e JIAO, 2022.

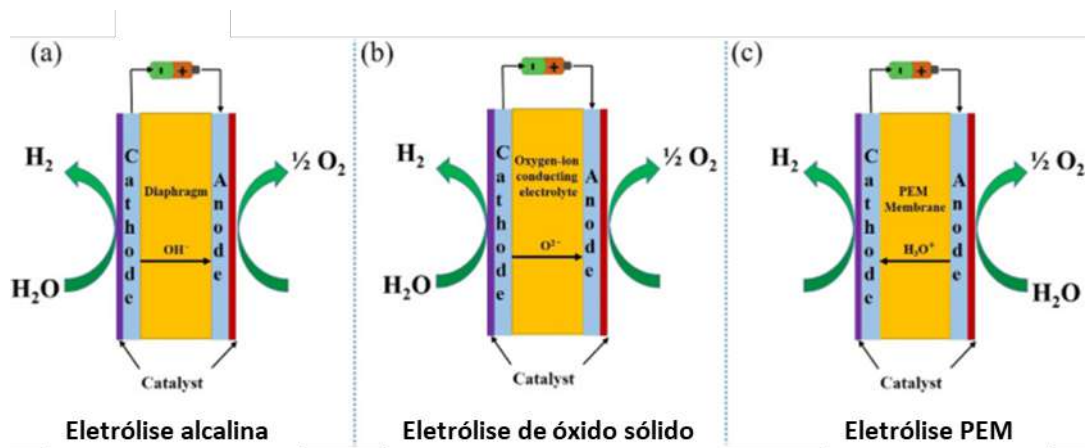


Figura 7. Esquema operacional dos diferentes eletrolisadores. Da esquerda para a direita: (a) Eletrolisador alcalino (AWE, na sigla em inglês) (b): Eletrolisador de óxido sólido (SOE, na sigla em inglês); (c): Eletrolisador por membrana com troca de prótons (PEM, na sigla em inglês). Fonte: Adaptado e traduzido de Kumar e Himabindu, 2019.



Dentre os eletrolisadores mencionados, o de maior interesse para a produção de H₂ verde é o de membrana com troca de prótons devido a suas vantagens tecnológicas, como evidenciado pela Tabela 4.

Tabela 4. Vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de eletrolisadores

Tipo	Vantagens	Desvantagens
Alcalinos (AWE)	<ul style="list-style-type: none">• Tecnologia bem estabelecida;• Não há necessidade de eletrocatalisadores nobres e;• Baixo investimento e custo operacional.	<ul style="list-style-type: none">• Baixa densidade de corrente (200-400 mA.cm⁻²);• H₂ de pureza média;• Equipamento volumoso;• Baixa flexibilidade de operação e;• Baixa eficiência energética (62,0%-82,0%) quando comparado aos demais.
Óxido Sólido (SOE)	<ul style="list-style-type: none">• Não há necessidade de eletrocatalisadores nobres e;• Alta eficiência energética (90-100%).	<ul style="list-style-type: none">• Alta pressão de operação;• Altas temperaturas de operação (500-850 °C);• Rápida deterioração do eletrocatalisador;• Necessidade de etapa de separação da mistura de vapor e H₂ e;• Fase laboratorial de desenvolvimento.
Membrana com troca de prótons (PEM)	<ul style="list-style-type: none">• Design compacto;• Boa eficiência energética (80,0-90,0%);• Produção de H₂ de alta pureza (99,99%);• Baixa permeabilidade de gás através da membrana;• Intervalo de temperatura largo (20,0-80,0%) e;• Mais adequados para se acoplarem à variabilidade de energias renováveis.	<ul style="list-style-type: none">• Eletrocatalisadores nobres (Pt, Ir, Ru);• Alto custo de investimento comparado ao AWE e;• Ambiente de operação de baixo pH.

Fonte: Elaboração própria. Adaptado de Wang, Cao e Jiao (2022)

A fonte escolhida para obtenção da corrente elétrica a ser utilizada no processo de eletrólise é a responsável por dar a característica de baixa intensidade de carbono ao H₂ produzido. O hidrogênio verde, especificamente, é aquele produzido a partir de fontes renováveis de energia, principalmente a solar e a eólica, como esquematizado na Figura 8 (HYDROGEN COUNCIL e MCKINSEY&COMPANY, 2021).



Figura 8. Ciclo produtivo do hidrogênio verde. Fonte: Adaptado de LUIZ (2022).

3.3. APLICAÇÕES DO HIDROGÊNIO

O H₂ pode ser utilizado tanto na sua forma pura, com baixos níveis de contaminante, quanto como parte da composição de mistura de gases. De 1975 até 2018, a demanda global por hidrogênio puro e em mistura aumentou de 30 Mt/ano para 115 Mt/ano aproximadamente (Figura 9). O H₂ pode ser utilizado (AIE, 2019):

- Na indústria de refino;
- Na indústria da mineração;
- Na indústria química;
- Na indústria do cimento;
- Na indústria siderúrgica;
- Na indústria de vidros;
- Para geração de calor e eletricidade e;
- No setor de transportes.

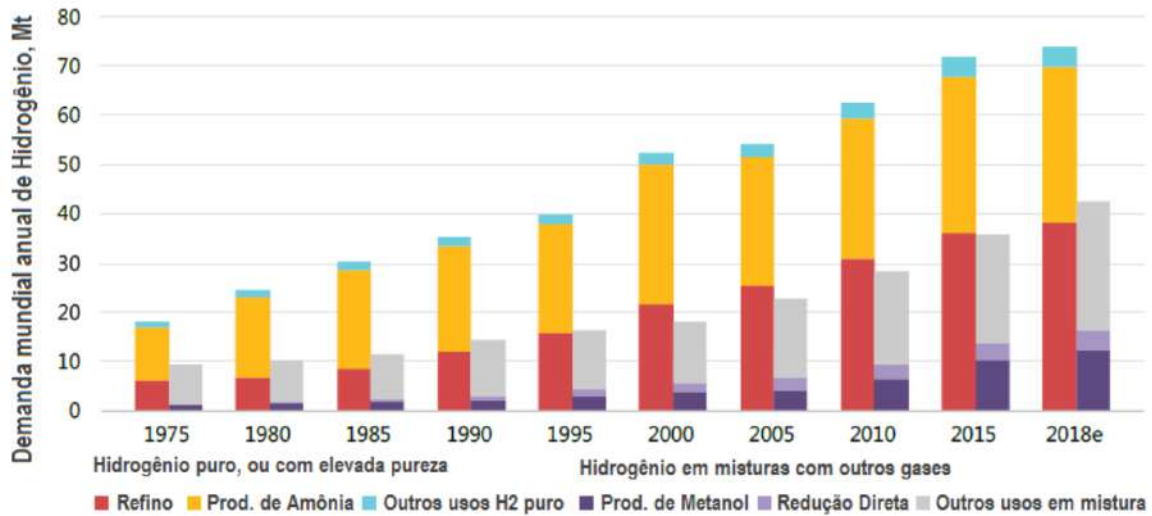


Figura 9. Evolução da demanda global anual por hidrogênio (1975 - 2018e). Fonte: Adaptado de AIE, 2019.

A conjuntura atual da cadeia de H₂ é ilustrada pela Figura 10 abaixo, onde são identificadas principais formas de produção e aplicações.

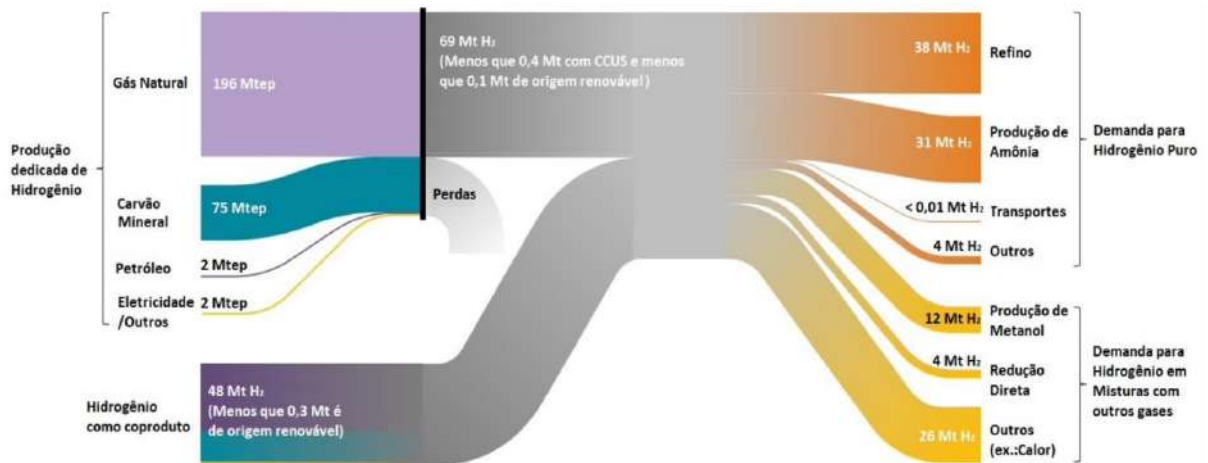


Figura 10. Representação da cadeia do hidrogênio. O Diagrama de Sankey mostra toda a cadeia de H₂, desde as fontes utilizadas para a produção e os respectivos volumes (esquerda) até as aplicações finais por quantidade demandada (direita). Fonte: Adaptado de EPE, 2021.

3.3.1 O uso na indústria

3.3.1.1 Indústria de refino

No setor petroquímico, o hidrogênio puro é muito utilizado para a obtenção de frações leves e intermediárias por hidrocraqueamento (HCC) e no hidrotreatamento



(HDT) de cortes de petróleo (DA CRUZ, 2010). A indústria é responsável por 33% da demanda global de H₂, o que corresponde a 38 Mt de H₂ por ano (AIE, 2019).

3.3.1.1.1 O hidrocraqueamento

O processo de hidrocraqueamento (HCC) consiste na conversão de frações pesadas do petróleo bruto em outras de massas molares menores. O interesse pelo HCC se dá por conta da alta demanda de derivados leves¹⁴ e intermediários¹⁵ do petróleo, comparado ao baixo consumo de frações mais pesadas (ABADIE, 2002).

O HCC é um processo de craqueamento catalítico realizado sob alta concentração de hidrogênio e alta pressão e temperatura. No HCC, o H₂ tem como finalidades facilitar a decomposição de compostos aromáticos, aumentar a estabilidade do produto por hidrogenação de olefinas e diolefinas formadas no processo de craqueamento e proteger o catalisador do processo. As condições reacionais severas proporcionam também a hidrogenação e remoção de componentes nitrogenados e sulfurados, conforme ilustrado pela Figura 11 (ABADIE, 2002).



Figura 11. Reação de hidrocraqueamento simples. Fonte: Adaptado de Abadie, 2002.

3.3.1.1.2 O hidrotratamento

O H₂ puro é também utilizado no HDT de frações de petróleo, a fim de remover heteroátomos¹⁶ por hidrogenação e melhorar as propriedades dos combustíveis produzidos. Durante a HDT, há a ocorrência de reações simultâneas como: hidrodessulfurização (HDS); hidrodesnitrificação (HDN); hidrodessoxigenação (HDO) e hidrodessmetalização (HDM) (ABADIE, 2002).

A hidrodessulfurização (HDS) é a remoção do enxofre contido no petróleo bruto. Este processo é cada vez mais importante tendo em vista que ele reduz a

¹⁴ Gás liquefeito de petróleo (GLP) e nafta.

¹⁵ Querosene e diesel.

¹⁶ Enxofre, nitrogênio, fósforo e metais



emissão dos gases poluentes SO_2 e SO_3 na queima de diesel e gasolina. O HDS é um processo catalítico em que o óleo bruto é aquecido e é alimentado a um reator em conjunto com o H_2 puro e um catalisador. Na reação, ocorre a remoção do enxofre em alta temperatura e pressão convertendo-o em ácido sulfídrico (H_2S) como ilustrado pela Figura 12 (ABADIE, 2002).

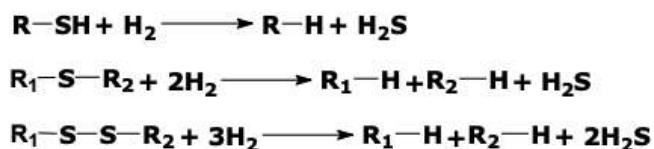


Figura 12. Reações de hidrodessulfurização de compostos sulfurados. Fonte: Adaptado de Abadie, 2002.

Conforme a demanda por derivados de petróleo aumenta e a concentração permitida de enxofre diminui, a demanda por H_2 para o hidrotreatamento de frações de óleo bruto tende a aumentar (AIE, 2019).

3.3.1.2 Indústria química

Na indústria química, o H_2 é utilizado principalmente para a produção de metanol (CH_3OH) e de amônia (NH_3), que correspondem a 27,0% e 10,0% da demanda global, respectivamente. O total demandado pela indústria química chega a 48 Mt H_2 anualmente, o que representa 40,0% da demanda global de H_2 (AIE, 2019).

3.3.1.2.1 A produção de NH_3

A NH_3 é sintetizada principalmente pelo processo Haber-Bosch, criado em 1909 por Fritz Haber e industrializado por Carl Bosch em 1910. No processo, a NH_3 é obtida através da reação de H_2 e N_2 na presença de um catalisador a alta pressão e temperatura (Figura 13) (RIBEIRO, 2013). Atualmente, são produzidas mais de 180 milhões de toneladas de amônia anualmente para fabricação de fertilizantes agrícolas, produtos farmacêuticos, têxteis, explosivos e refrigeração (AIE, 2019). Vale destacar que a fixação industrial de N_2 na forma de NH_3 foi de extrema importância para a garantia da segurança alimentar mundial, devido à sua utilização na produção de fertilizantes nitrogenados (RIBEIRO, 2013).

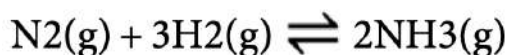


Figura 13. Reações de síntese de amônia pelo processo de Haber-Bosch. Fonte: Adaptado de Ribeiro, 2013.

Hoje em dia, a maior parte do H_2 utilizado na produção de NH_3 é obtido pela reforma a vapor do gás natural, processo com alta intensidade de carbono. Dessa forma, a produção de amônia corresponde a 1,8% das emissões globais de GEE. A síntese do composto é o processo químico de maior emissão de CO_2e^{17} (AIE, 2019).

3.3.1.2.2 A produção de metanol

A produção de CH_3OH é realizada predominantemente pela reforma a vapor do gás natural ou pela gaseificação do carvão. Em ambos os processos é obtido o gás de síntese, o qual é composto principalmente por CO , CO_2 e H_2 (ANP, 2022). No processo por gás de síntese (Figura 14), o metanol é produzido na presença de catalisadores à base de $\text{Cu/ZnO/Al}_2\text{O}_3$, que viabilizam a utilização de pressões mais baixas a moderadas (JUNIOR, 2021).

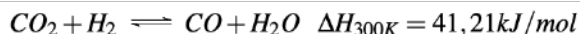
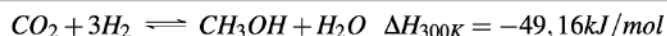


Figura 14. Reações de síntese de metanol pelo processo de gás de síntese. Fonte: Adaptado de Junior, 2021.

O metanol é utilizado para uma variedade de aplicações industriais, como a manufatura de formaldeído, metil-acrilato e outros solventes. O CH_3OH é ainda usado para a produção de combustível e químicos de alto valor agregado como plásticos (AIE, 2019).

3.3.1.3 Outros usos industriais

O H_2 pode ainda ser utilizado para uma variedade de outros processos industriais, conforme apontado pela Tabela 5.

¹⁷ Medida internacionalmente padronizada para expressar a quantidade dos demais gases com efeito de estufa em termos equivalente da quantidade de CO_2 (IPAM, 2015).



Tabela 5. Outras aplicações industriais de hidrogênio atuais ou potenciais.

Tipo de Indústria	Descrição do uso do hidrogênio
Alimentícia	Transformação de gorduras insaturadas em óleos e gorduras saturadas.
Metalúrgica	Múltiplas aplicações, incluindo ligas metálicas e calcinação flash do minério de ferro.
Soldagem	Soldagem a arco em atmosfera de hidrogênio.
Vidros	Mistura de H ₂ com N ₂ como agente redutor para evitar falhas e inclusões.
Eletrônica	Utilizado como agente redutor na fabricação de semicondutores, LEDs, displays, equipamentos fotovoltaicos e outros.
Medicina	Utilizado na produção de peróxido de hidrogênio (H ₂ O ₂) ou como gás terapêutico.
Criogenia	Utilizado no estado líquido como meio refrigerador para temperaturas abaixo de -150 °C.

Fonte: Adaptado de *WHA Internacional* (2021) e *EPE* (2021)

3.3.2 O uso na matriz energética

Uma pequena fração de H₂ é utilizada como combustível para o transporte, o seu uso como um vetor energético é possibilitado pela tecnologia das células de combustível. O equipamento é responsável pela conversão de energia química em energia elétrica através da reação entre um combustível gasoso, como o hidrogênio, e uma substância oxidante, como o oxigênio presente no ar (STAMBOULI e TRAVERSA, 2002).

Conforme demonstrado na Figura 15, a célula de combustível é formada por dois eletrodos (ânodo e cátodo) e um eletrólito situado entre eles, assim como o eletrolisador. No processo de obtenção de energia elétrica, o H₂ passa através do ânodo e é oxidado em cátions hidrônios (H⁺) com a liberação de elétrons. Os cátions H⁺ se movimentam através do eletrólito e reagem com as moléculas de O₂ que entram pelo cátodo da célula formando água (H₂O) (COSTA, 2007).

Os tipos de célula de combustível variam de acordo com o tipo de eletrólito utilizado. É a partir deste parâmetro que são determinadas a temperatura de operação da célula, o combustível apropriado para a sua utilização e as reações químicas que



ocorrerão no interior dela. As células a combustível são divididas em cinco grupos: Alcalina (AFC, na sigla em inglês); Eletrólito Polimérico (PEMFC, na sigla em inglês); Ácido Fosfórico (PAFC); Carbonato Fundido (MCFC, na sigla em inglês) e Óxido Sólido (SOFC, na sigla em inglês) (JUNIOR *et al.*, 2022).

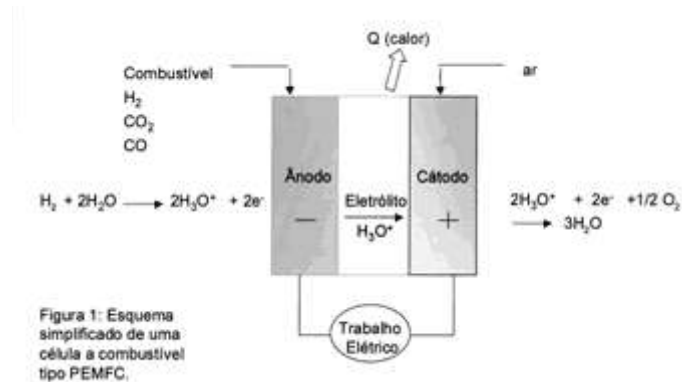


Figura 15. Esquema simplificado de uma célula a combustível tipo PEMFC. Fonte: Adaptado de Wendt e Götz (1999)

As iniciativas hoje envolvendo o setor de transporte são elencadas na Tabela 6 abaixo:

Tabela 6. Iniciativas de uso de hidrogênio no setor de transporte

Meio	Papel Atual
Rodoviário - Veículos Leves	11.200 veículos movidos a célula de combustível. Maior parte na Califórnia (EUA), Europa e Japão
Rodoviário - Veículos Pesados	Demonstração em nichos de mercado: 25.000 empilhadeiras; 500 ônibus; 400 caminhões; 100 vans.
Marítimo	Demonstração limitada em projetos de pequenos navios e abastecimento de eletricidade interna em grandes cargueiros
Ferrovia	Dois trens movidos a hidrogênio na Alemanha
Aviação	Demonstração limitada em projetos e estudos de viabilidade econômica

Fonte: Adaptado de AIE, 2019



4. O HIDROGÊNIO NO CAMINHO PARA A NEUTRALIDADE DE CARBONO

Atualmente, há a ambição de descarbonizar os setores da economia através do uso do H₂ de baixa intensidade de carbono (AIE, 2019). O papel primário do H₂ na transição energética é a sua utilização como um vetor de descarbonização em setores com maior dificuldade de eletrificação (HYDROGEN COUNCIL e MCKINSEY&COMPANY, 2021).

No setor industrial, o H₂ produzido a partir de eletrólise com fontes renováveis ou de combustíveis fósseis com CCUS pode ser empregado na redução da intensidade de emissões de aplicações como aquelas citadas anteriormente no capítulo 3.3.1. Enquanto isso, na matriz energética, o uso do H₂ como combustível já vem sendo estudado conforme mencionado no capítulo 3.3.2 e pode ser escalado de forma a descarbonizar principalmente transportes pesados e de longa distância¹⁸ (AIE, 2019).

Além disso, o H₂ pode ainda ser aplicado para conferir resiliência ao setor energético. Ao ser produzida por fontes renováveis, a molécula pode armazenar energia excedente e ser utilizada no balanceamento dos perfis de oferta e demanda da rede elétrica. Assim, o H₂ tem o potencial de impulsionar a penetração de fontes intermitentes na matriz elétrica. O produto é também aplicável para o transporte de energia renovável de regiões com recursos energéticos atrativos para outras que não possuam grande capacidade energética renovável. O uso de H₂ para este fim dispensa a construção de linhas de transmissão, uma vez que pode ser movimentado por gasodutos, navios ou caminhões (HYDROGEN COUNCIL e MCKINSEY&COMPANY, 2021). O panorama geral de descarbonização da economia pelo H₂ é ilustrado pela Figura 16.

¹⁸ Transporte rodoviário de longa distância, transporte marítimo e aéreo.

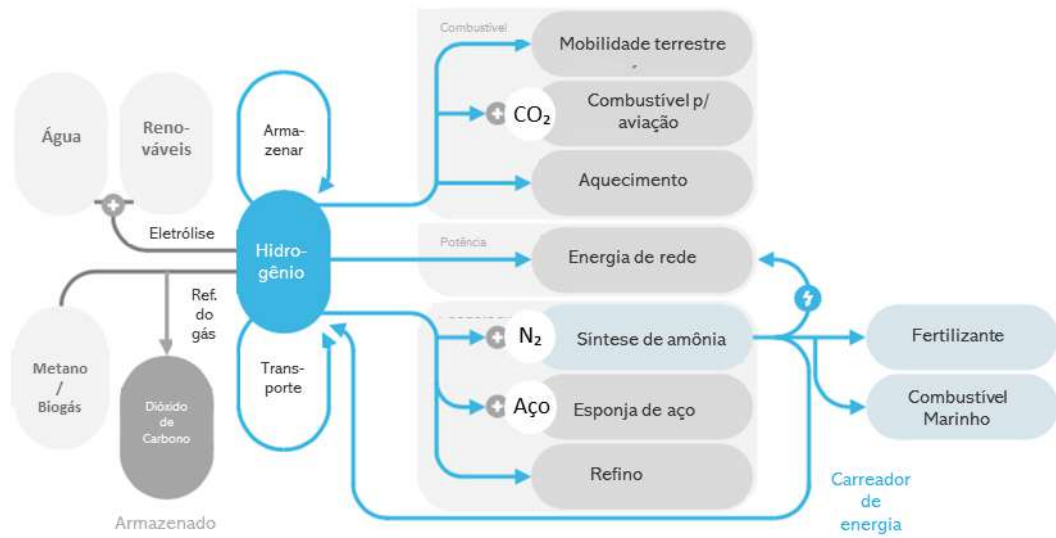


Figura 16. Usos de H₂V na descarbonização da economia. Fonte: Adaptado de McKinsey&Company (2021)

O *Power-to-X* (PtX) é um dos conceitos que exploram o uso do H₂V para a descarbonização da economia. O PtX se refere a todos os processos que convertem energia elétrica¹⁹ em energia química²⁰ para o armazenamento de eletricidade, produção de combustíveis ou matéria prima para a indústria química (Tabela 7) (AHK, 2021).

Tabela 7. Resumo das definições de *Power-to-X* descritas na literatura.

Tecnologia	Definição
Power-to-Power	Reconversão do hidrogênio verde na rede elétrica, via pilhas a combustível, turbinas ou geradores a hidrogênio.
Power-to-Gas	Hidrogênio verde para produção de gases como o metano sintético, a partir da combinação de H ₂ e CO ₂ , ou ainda injeção diretamente na rede de gás natural
Power-to-Mobility	Utilização de energia elétrica para abastecer carros elétricos direto por carregamento de baterias ou o uso de hidrogênio verde com abastecimento em veículos elétricos movidos a pilhas a combustível. O veículo necessita de hidrogênio e oxigênio para produzir eletricidade e água.
Power-to-Fuel	Hidrogênio verde para a produção de combustíveis líquidos sintéticos (e-fuel). O hidrogênio em conjunto de CO ₂ passa por uma série de processos envolvidos na produção do chamado óleo sintético (syncrude) e posterior refino em combustíveis como diesel sintético, gasolina sintética ou ainda querosene de aviação sintético (jet fuel).
Power-to-Ammonia	Hidrogênio verde para a geração química de amônia (NH ₃).

Fonte: Adaptado de AHK, 2021.

¹⁹ Referida pelo termo "Power"

²⁰ Referida pelo termo "X", o qual varia de acordo com a forma de energia ou o uso pretendido.



4.1 O HIDROGÊNIO NO ROTEIRO PROPOSTO PELA AIE

Como apontado pela *Climate Watch* (2022), cerca de três quartos das emissões de GEE têm origem no setor energético, o qual compreende o uso de combustíveis fósseis pelo setor de transporte, pelas indústrias e edifícios.

Em estudo preparado em outubro de 2021, a AIE aponta um roteiro para formuladores de políticas do setor global de energia alcançarem a neutralidade de emissões. Conforme apontado pela Figura 17, no cenário contido no relatório "Neutralidade de Carbono até 2050 - Um Roteiro Para o Setor Energético Global", a economia mundial será 40,0% maior do que atualmente em 2030, porém terá um consumo de energia 7,0% inferior (AIE, 2021).

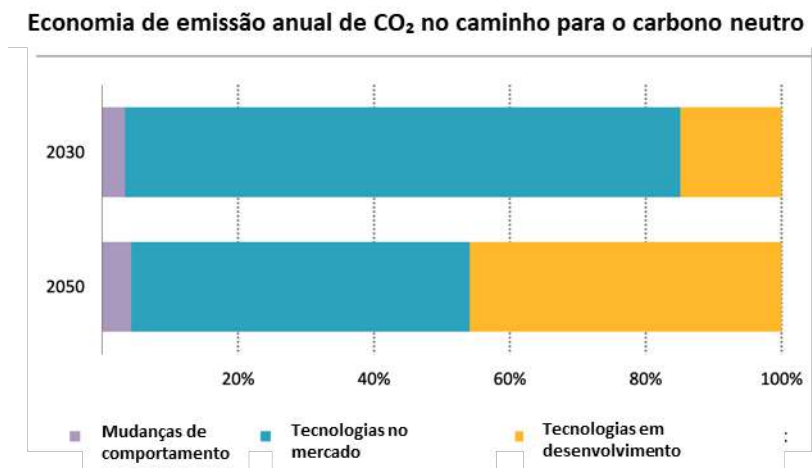


Figura 17. Economia anual de emissões de CO₂ em relação a 2020 no caminho para a neutralidade de emissões. Adaptado de AIE, 2021.

De acordo com a Agência, até 2030, a maior parte das reduções de emissões vêm de tecnologias já disponíveis no mercado, como o emprego de energia solar e eólica e a eletrificação de meios de transporte. Entretanto, em 2050, o estudo aponta a necessidade de tecnologias que ainda não foram testadas em grande escala, como eletrolisadores para produção de hidrogênio e captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS). Os gastos dos governos ao redor do Mundo devem aumentar dos atuais US\$25 bilhões para US\$90 bilhões por ano o quanto antes a fim de completar um portfólio de projetos pilotos até 2030 que viabilize o uso de novas tecnologias (AIE, 2021).



O foco inicial do uso do H₂ seria a conversão da energia hoje baseada em combustível fóssil em energia baseada em hidrogênio com baixa intensidade de carbono. Isso inclui o uso do H₂ na indústria, em refinarias, em plantas de geração de eletricidade e a sua mistura com gás natural para consumidores finais. O H₂ pode ser estocado e utilizado como reserva de energia a fim de resolver os desequilíbrios sazonais entre oferta e demanda de energia, dando maior flexibilidade ao sistema elétrico. No setor de transportes, a Agência projeta que o H₂ proverá cerca de 33,33% do combustível utilizado por veículos pesados e 60,0% do utilizado por embarcações em 2050 (AIE, 2021).

Para que essas metas sejam atingidas, o investimento anual em infraestrutura para unidades de CCUS e hidrogênio deverá aumentar dos atuais US\$ 1 bilhão para US\$40 bilhões em 2030. Até a próxima década, serão necessários 850 GW de capacidade em eletrolisadores, o que será responsável pela produção de 150 Mt de H₂ de baixo carbono anualmente. Em 2045, a capacidade instalada de eletrolisadores aumentará para 3.000 GW e o volume anual produzido para 435 Mt (AIE, 2021).

Os principais marcos para o atingimento da neutralidade de carbono da economia Mundial segundo AIE (2021) estão demonstrados na Figura 18.

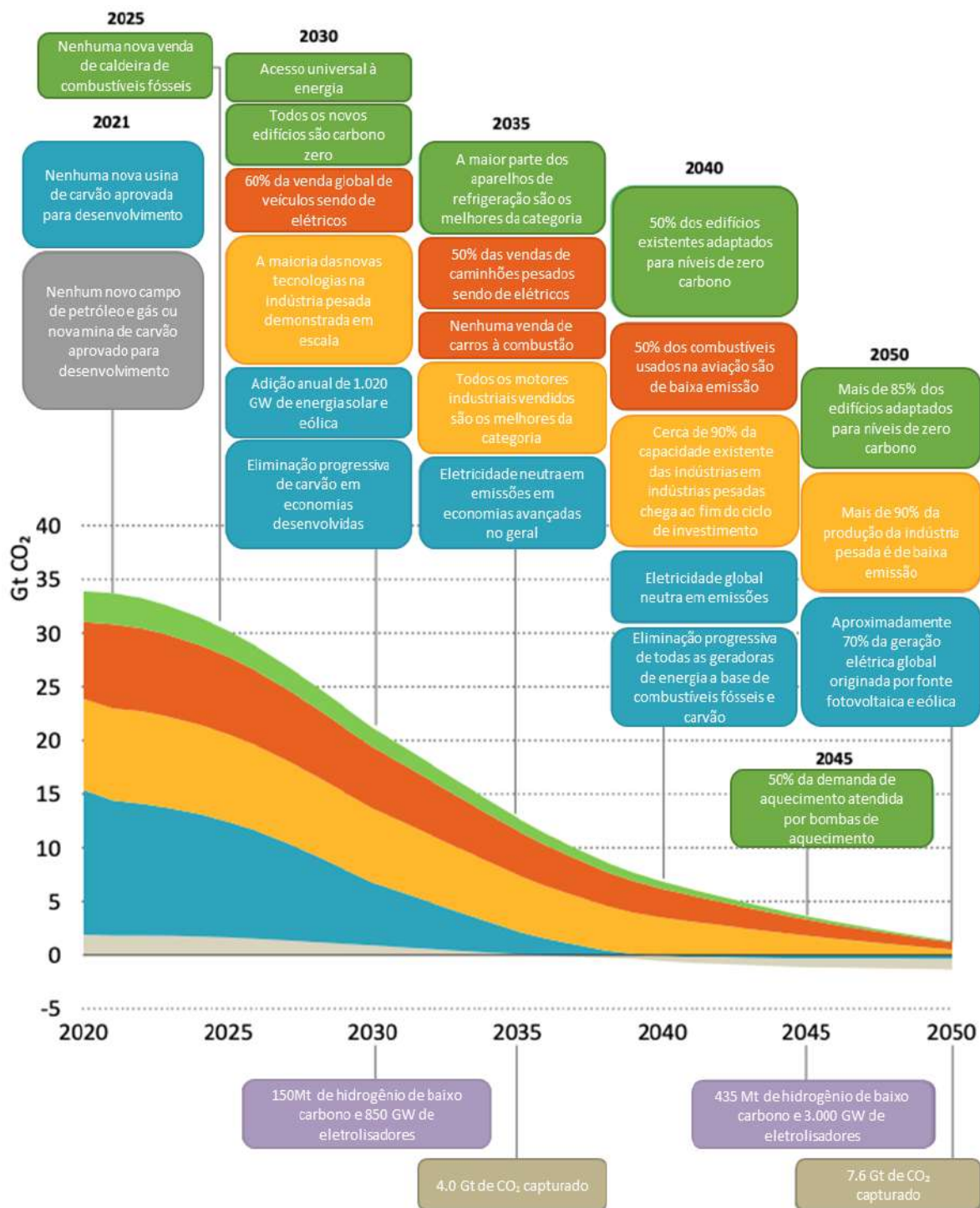


Figura 18. Principais marcos para a neutralidade de emissões. Fonte: Adaptado de AIE, 2021.

Segundo a AIE, a demanda global de H₂ expandirá de menos de 90 Mt em 2020 para mais de 200 Mt em 2030. O foco inicial é a conversão de aplicações existentes de H₂ com origem fóssil para o uso da molécula com baixa intensidade de carbono, trazendo o aumento da participação desta de 10% em 2020 para 70% em 2030 do total demandado, conforme apontado pela Tabela 8 e pela Figura 19.



Tabela 8. Produção de H₂ entre 2020-50 por tipo segundo AIE.

Tipo de Produção	2020	2030	2050	
Total de combustível a base de H₂ produzido (Mt)	87	212	528	
Produção de H ₂ de baixo carbono	Baseado em Combustível fóssil com CCUS	8,6	69	197,6
	Baseado em eletrólise	0,4	81	322,4
Produção de H ₂ remanescente	78	62	8	

Fonte: Elaboração própria. Adaptado de AIE, 2021

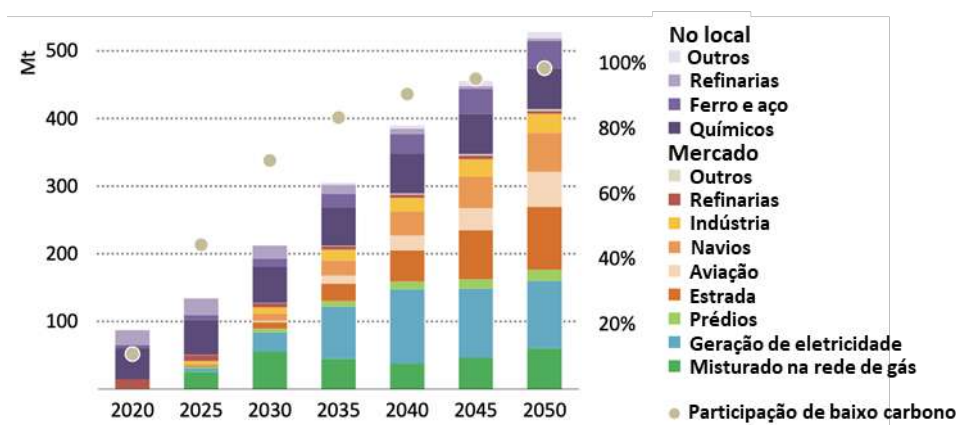


Figura 19. Demanda global de hidrogênio e combustíveis a base de hidrogênio segundo a AIE (2020-2050). Fonte: Adaptado de AIE, 2021.

Até 2030, o H₂ passaria a ser misturado em até 15,0% v/v com o gás natural, reduzindo a emissão de CO₂ em aproximadamente 6,0% no seu consumo. Além disso, haveria aproximadamente 15,0 milhões de veículos movidos a célula de combustível até o final da década (AIE, 2021).

Até 2050, o gás seria responsável pela oferta de aproximadamente 2,0% da geração global de energia. A aplicação se tornaria possível através da reforma de termelétricas a gás natural ou a carvão para a co-geração de energia pelo combustível fóssil com H₂ ou NH₃ respectivamente. Enquanto isso, no setor de transportes, o H₂ proverá cerca de um terço do combustível utilizado por veículos pesados e mais de 60,0% do total de combustível utilizado no transporte marítimo (AIE, 2021).

Os volumes de H₂ a serem demandados por setor de aplicação de acordo com a AIE são apresentados na Tabela 9.



Tabela 9. Consumo de H₂ entre 2020-50 por setor segundo AIE.

Setor de Aplicação		2020	2030	2050
Consumo total de combustíveis a base de H₂ (Mt)		87	212	528
Eletricidade	por H ₂	0	43	88
	por NH ₃	0	8	13
Refino		36	25	8
Prédios e Agricultura		0	17	23
Transporte	por H ₂	0	11	106
	por NH ₃	0	8	44
	por combustível sintético	0	5	56
Indústria		51	93	187

Fonte: Elaboração própria. Adaptado de AIE, 2021

4.2 O HIDROGÊNIO SEGUNDO O HYDROGEN COUNCIL

As estimativas do Hydrogen Council para a utilização de H₂ de baixa intensidade de carbono alcançam valores além daqueles previstos pela AIE. Conforme apontado pela Figura 20 e pela Tabela 10, de acordo com a iniciativa de CEOs, a demanda global pela commodity verde pode passar de 90,0 Mt em 2020 a aproximadamente 660,0 Mt em 2050. Na projeção, o volume corresponderia a 22,0% de toda a energia consumida mundialmente²¹. Se atingida, a meta seria capaz de abater 7 Gt de emissões de CO₂e. No acumulado de 2020 até 2050, o uso do H₂ de baixa intensidade de carbono pode abater até 80 Gt CO₂e (HYDROGEN COUNCIL e MCKINSEY&COMPANY, 2021).

²¹ Assume cenário de neutralidade de carbono em 2050 divulgado pela AIE onde a demanda global de energia é de 340 EJ.



Demanda do uso final de hidrogênio por segmento

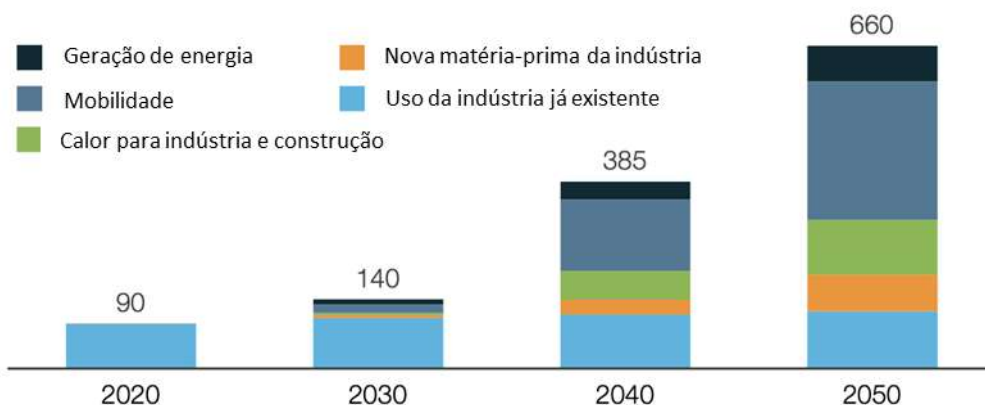


Figura 20. Demanda global de hidrogênio e combustíveis a base de hidrogênio segundo Hydrogen Council (2020-2050). Adaptado de HYDROGEN COUNCIL e MCKINSEY&COMPANY (2021).

Tabela 10. Consumo de H₂ entre 2020-50 por segmento.

Consumo total de H ₂ por segmento (Mt)		2020	2050
Consumo total de H ₂ (Mt)		90	660
Transporte	Rodoviário Longa Distância	0	110
	Marítimo e Aéreo	0	110
	Outros	0	65
Matéria Prima	Usos existentes	90	105
	Novas aplicações	0	40
Indústria de Aço		0	35
Geração de eletricidade		0	65
Geração de Calor	Industrial	0	70
	Edifícios	0	40

Fonte: Adaptado de HYDROGEN COUNCIL e MCKINSEY&COMPANY (2021).



4.3 OS DESAFIOS ATUAIS NA CADEIA DE H₂

Hoje em dia, o H₂ é majoritariamente armazenado e distribuído como gás comprimido ou liquefeito. A maior parcela do volume demandado (aproximadamente 85,0%) é consumida no próprio local de produção, enquanto que o restante é transportado por caminhões ou dutos. À medida que a aplicação de H₂ para a descarbonização da economia ganhe escala, será necessária uma gama maior de opções de armazenamento e transporte (AIE, 2019).

4.3.1. O armazenamento de H₂

A fim de endereçar o desafio de armazenamento do H₂ são estudadas opções como o estoque geológico do produto, bem como o seu armazenamento em tanques (AIE, 2019).

O estoque geológico consiste no aprisionamento do gás em cavernas de sal, em reservatórios esgotados de gás natural e petróleo ou em aquíferos subterrâneos. Esta técnica é hoje utilizada para o armazenamento de gás natural e promove ganhos significativos de escala, alta eficiência²², baixos custos operacionais e baixos custos fundiários. Dessa forma, o estoque geológico tem o potencial de ser o método de armazenamento de mais baixo custo (AIE, 2019).

Dentre os meios disponíveis para a técnica, os reservatórios de óleo e gás já esgotados são tipicamente maiores que cavernas de sal, porém são também mais permeáveis e contém contaminantes que precisam ser retirados do H₂ antes do uso deste em células de combustível. Enquanto isso, o armazenamento em aquíferos subterrâneos é o método menos maduro dentre as opções disponíveis e pode gerar perda do H₂ devido a reações com microrganismos, fluidos e rochas (AIE, 2019).

Como ainda não foi investigada para ser utilizada no armazenamento de hidrogênio puro, a técnica de estoque geológico implica ainda em custos de exploração e de desenvolvimento. Além disso, ela é mais aplicável ao armazenamento de longo prazo e em larga escala do H₂. Dessa forma, para o estoque de curto prazo

²² medida pela quantidade de gás injetado dividida pela quantidade que pode ser extraída (AIE, 2019).



e de pequena escala do gás, os tanques de armazenamento são mais promissores (AIE, 2019).

Os tanques passíveis de serem utilizados para o estoque de H₂ liquefeito ou comprimido têm altas taxas de descargas e, portanto, eficiências elevadas. Entretanto, como apontado pelo Capítulo 3.1, o H₂ comprimido²³ possui apenas 15,0% da densidade de energia da gasolina. Portanto, para que seja armazenada uma mesma capacidade energética de H₂ equivalente àquela de gasolina, seria necessário um espaço aproximadamente sete vezes maior. A transformação do H₂ em NH₃ resolveria parte desse problema, pois a amônia tem maior densidade em MJ/L e necessita, portanto, de menor espaço físico para armazenar a mesma quantidade de energia.

Dessa forma, é possível afirmar que o armazenamento do H₂ é ainda um obstáculo a ser superado hoje em dia para que o produto ganhe escala e seja passível de ser empregado na descarbonização de setores da economia.

4.3.2 A transmissão e distribuição de H₂

A transmissão e distribuição do H₂ pode se dar tanto por rotas locais como internacionais. Em casos de disponibilidade e viabilidade de exploração de fontes renováveis locais para a produção de hidrogênio verde, a demanda de consumidores de grande porte (indústria), assim como de pequeno e médio porte (postos de abastecimento ou residências) pode ser suprida pela produção *onsite* de hidrogênio ou ainda regional (HYDROGEN COUNCIL e MCKINSEY&COMPANY, 2021).

Entretanto, diversas restrições²⁴, de forma isolada ou somadas, podem resultar em uma produção de hidrogênio insuficiente e, portanto, incompatível com a demanda de tais consumidores, abrindo oportunidade para rotas de distribuição internacionais (HYDROGEN COUNCIL e MCKINSEY&COMPANY, 2021).

O modo de transporte de H₂ ideal varia de acordo com a distância, terreno e uso final. O hidrogênio final pode ser transportado globalmente usando três formas de

²³ Pressão de 700 bar (AIE, 2019).

²⁴ As principais restrições para a produção de hidrogênio de forma local e regional são a indisponibilidade de fontes renováveis e a inexistência de infraestrutura adequada (HYDROGEN COUNCIL, 2021).



transporte - caminhões, gasodutos e navios - com uma variedade de transportadores diferentes. Embora a escolha ideal de transporte seja dependente do uso final visado e da distância a ser percorrida, algumas regras gerais sobre soluções preferíveis para diferentes distâncias se aplicam (AIE, 2021).

Para curtas e médias distâncias, os dutos adaptados podem atingir custos de transportes de H₂ próximos a US \$0,1/kg em até 500 Km. No entanto, para atingir esses baixos custos, as redes de dutos devem ter passado por retrofit²⁵ e há a necessidade de escala nos volumes de H₂ a serem transportados, garantindo altas taxas de utilização do ativo. Enquanto isso, em um cenário com menor demanda ou onde seja altamente variável, o desenvolvimento de plantas que já contém uma completa de rede de dutos para H₂ é a opção mais atraente para transporte, podendo atingir o custo médio de US \$1,2/km por 300 km (HYDROGEN COUNCIL e MCKINSEY&COMPANY, 2021).

Em maiores distâncias, os dutos subaquáticos fornecem transporte em escala mais barato do que o transporte marítimo por navios, entretanto, o seu uso é dependente da viabilidade geográfica da região de destino. Paralelamente, como o hidrogênio gasoso não é adequado para transporte de longa distância, os fornecedores podem liquefazer o hidrogênio (LH₂), convertê-lo em amônia (NH₃) ou ligá-lo a um transportador de hidrogênio orgânico líquido (LOHC, sigla em inglês). As três formas apresentam custos dependentes do meio de transporte a ser utilizado e de seus respectivos custos de conversão. Uma análise comparativa entre os três transportadores de H₂ é mostrada na Tabela 11 e na Figura 21 (HYDROGEN COUNCIL e MCKINSEY&COMPANY, 2021).

²⁵ Retrofit é um termo utilizado principalmente em engenharia para designar o processo de modernização de algum equipamento já considerado ultrapassado ou fora de norma (Diesel Retrofits Help Clean Regions' Air - Maryland Department of Environment).



Tabela 11. Vantagens e desvantagens de transportadores de hidrogênio para longas distâncias.

	Vantagens	Desvantagens	Aplicável a
LH₂	Alta pureza Não requer desidrogenação e craqueamento	Densidade de energia volumétrica baixa vs. amônia Baixa temperatura de liquefação Perdas por ebulição	Postos de abastecimento para carros ou caminhões
NH₃	Alta densidade de energia volumétrica	Necessita de craqueamento para obter H ₂ Baixos níveis de pureza Alta toxicidade	Fertilizantes, Combustíveis de transporte, Co-queima ou combustão de amônia para gerar energia
LOHC	Podem usar a infraestrutura de combustíveis comuns do mercado Fácil armazenamento por longos períodos sem grandes perdas	Necessita de processo de desidrogenação Capacidade de transporte limitada vs. LH ₂ e NH ₃	Abastecimentos utilizando a estrutura do diesel e gasolina

Fonte: Elaboração própria. Adaptado de HYDROGEN COUNCIL e MCKINSEY&COMPANY (2021).

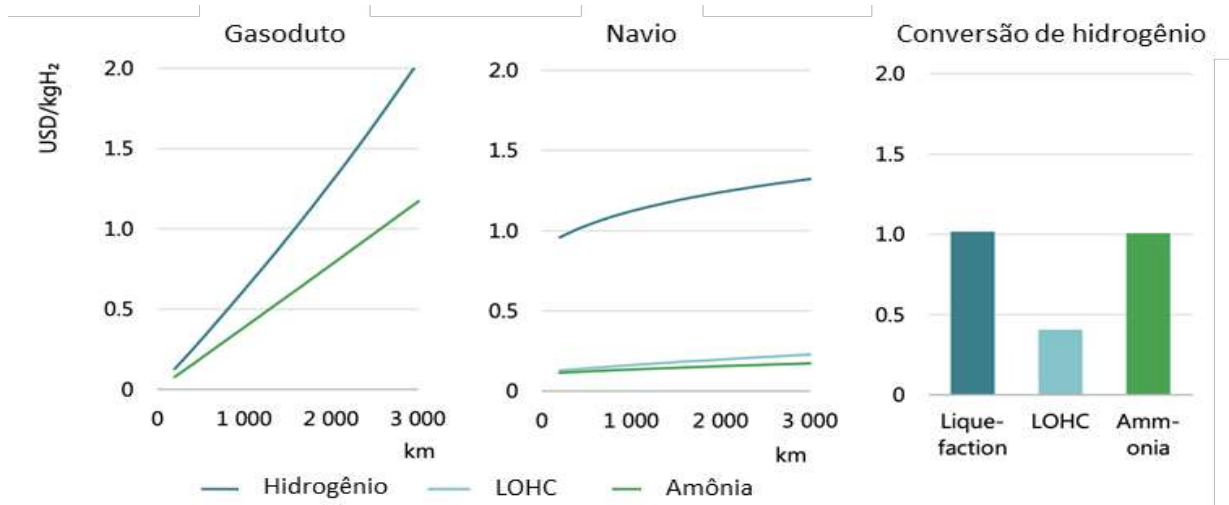


Figura 21. Custo de armazenamento e transporte de H₂ por gasodutos e navios e custos de liquefação e conversão da molécula. Fonte: Adaptado de AIE, 2019.

A Figura 22 mostra um panorama geral do transportador e meio de transporte de menor custo em US\$/kg com base na distância e volume a ser movimentado.

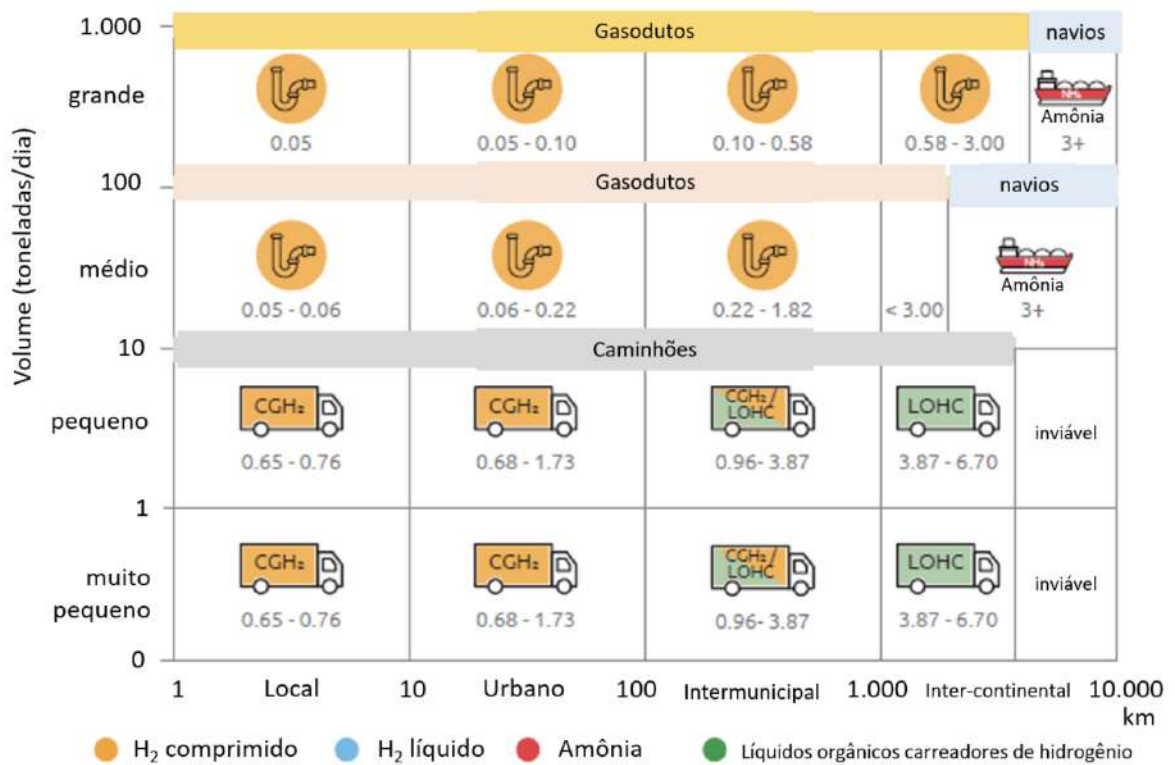


Figura 22. Custos de transporte de hidrogênio com base em distâncias e volume. Os custos estão expressos em US\$/kg (2019 como ano base); CGH₂ – gás hidrogênio comprimido; LOHC – líquidos orgânicos carreadores de hidrogênio. A análise inclui os custos de compressão e estocagem de 20% do volume de gás natural, considerando uma caverna de sal como referência de custo. A amônia foi considerada inadequada para uso em pequena escala por sua toxicidade. Fonte: Adaptado de EPE (2021).



5. INICIATIVAS INTERNACIONAIS EM H₂V

Embora a primeira publicação no Web of Science sobre o tema seja de 1997, o número de publicações nessa área só passou de dois dígitos após 2010 e as pesquisas realmente se intensificaram após 2018, uma vez que o ano de 2017 foi marcado pelo primeiro estudo detalhado sobre hidrogênio, o “*Hydrogen - Scaling Up*”, no qual foi traçado um roteiro abrangente e quantificado para o desenvolvimento de economias de hidrogênio pelo *Hydrogen Council (2017)*. O estudo aponta a relevância do hidrogênio como um vetor de energia e solução mais promissora para setores de difícil descarbonização tais como de transportes e industrial (HYDROGEN COUNCIL, 2017).

A figura 23, elaborada com o auxílio do software *VOSviewer*, resume os 817 artigos encontrados em forma de mapa de cooperação entre os países em relação ao tempo, sendo o tamanho dos círculos referente ao número de publicações e as linhas, as cooperações entre as pesquisas. Por meio da densidade de cores do mapa é possível observar a concentração das publicações a partir de 2020, com uma tendência de acúmulo maior em 2021 e 2022 (dados coletados até 30/07). De 2019 para 2020, o número de publicações praticamente dobrou e de 2020 para 2021, esse número foi ainda maior, sendo superior ao triplo de publicações de 2020. Logo, é possível concluir uma forte tendência de crescimento de pesquisas sobre o tema, alinhado às novas estratégias adotadas em prol da descarbonização econômica.

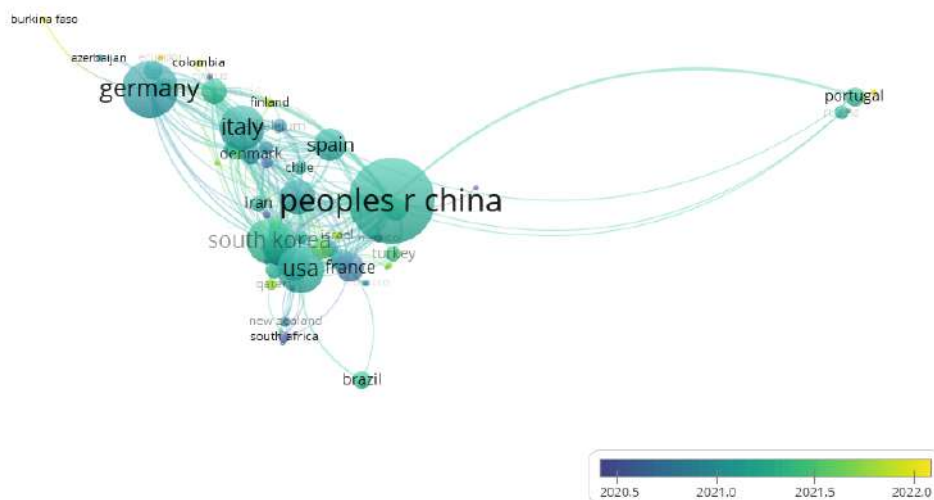


Figura 23. Mapa de cooperação entre os países em pesquisas sobre hidrogênio verde nos últimos 5 anos. Fonte: Elaboração própria (VOSviewer)



A tabela 12 mostra detalhadamente todos os países que tiveram publicações referentes ao hidrogênio verde. Do total de 817 artigos encontrados, 385 estão concentrados na União Europeia, 204 na China e 74 nos Estados Unidos, ou seja, 81% de toda a pesquisa científica sobre o tema está concentrada em apenas três blocos econômicos. O Brasil aparece em 20º lugar, com apenas 15 publicações.

Tabela 12. Países com publicações na área de Hidrogênio Verde nos últimos 5 anos.

Nº	País	Nº de Artigos	Nº de Citações	Nº	País	Nº de Artigos	Nº de Citações
1	China	204	2658	22	Irã	12	188
2	Alemanha	102	866	23	Noruega	12	141
3	Estados Unidos	74	616	24	Turquia	12	47
4	Itália	69	801	25	Suécia	11	58
5	Coréia do Sul	69	763	26	Suíça	11	235
6	Inglaterra	44	406	27	Bélgica	10	117
7	Austrália	41	791	28	Áustria	9	88
8	Espanha	40	262	29	Chile	9	86
9	Índia	37	252	30	Irlanda	9	41
10	França	31	412	31	Rússia	9	51
11	Holanda	26	254	32	Singapura	9	138
12	Canadá	23	172	33	Emirados Árabs	8	59
13	Japão	22	71	34	Qatar	7	41
14	Arábia Saudita	21	192	35	Escócia	7	98
15	Egito	18	49	36	África do Sul	7	92
16	Paquistão	17	396	37	Vietnã	7	184
17	Polônia	17	93	38	Nova Zelândia	6	17
18	Dinamarca	16	92	39	Taiwan	6	22
19	Portugal	16	61	40	Finlândia	5	15D
20	Brasil	15	72	41	México	5	51
21	Malásia	15	117	42	Tailândia	5	68

Fonte: Elaboração própria por meio dos dados obtidos na pesquisa com auxílio do VOSviewer.



Paralelamente, a citação também é considerada uma métrica essencial para medir o impacto de um artigo ou de uma revista (SVENSSON, 2010; TSAY, 2009). Conforme apontado pela tabela 13, quando analisada a prospecção pelo número de citações, se pode observar uma mudança parcial no perfil de países. A China continua ocupando o primeiro lugar devido ao alto número de artigos e pesquisas e o país com o segundo maior número de citações é a República do Chipre, com apenas 3 artigos publicados, mas com um deles sendo citado 902 vezes. Publicado em 2016 por Nikolaidis, o artigo em questão é uma revisão intitulada “*A comparative overview of hydrogen production processes*”. O trabalho é um dos principais pioneiros e traz um panorama geral do contexto do hidrogênio e suas principais formas de produção.

Ainda por meio da análise do número de citações, o Paquistão se encontra no top 10 países com artigos mais citados, no entanto com poucas conexões²⁶ mostrando um perfil de citações focalizado dentro do próprio país. Nas últimas duas décadas, o Paquistão tem enfrentado uma crise energética, onde mais de 145 milhões de pessoas sofrem com o acesso à eletricidade. Neste contexto, o hidrogênio apresenta uma boa solução para o país. Entretanto, não existem incentivos governamentais concretos até o momento, auxiliando o desenvolvimento da cadeia de H₂V.

Tabela 13. 10 países com maiores números de citações do tema hidrogênio verde

Nº	País	Nº de Artigos	Nº de Citações
1	China	204	2658
50	Chipre	3	901
2	Alemanha	102	866
4	Itália	69	801
7	Austrália	41	791
5	Coréia do Sul	69	763
3	Estados Unidos	74	616
10	França	31	412
6	Inglaterra	44	406
16	Paquistão	17	396

Fonte: Elaboração própria com auxílio do VOSviewer

²⁶ Referente a força de ligações obtidas através do VOSviewer



Com o auxílio da figura 24, é possível analisar o cenário mundial em projetos e ações sobre H₂, que apresenta um padrão muito próximo ao obtido através da prospecção deste estudo. De forma geral, as nações que estão em maior evidência nas análises de número de publicações e citações são aquelas que possuem estratégias de H₂ disponíveis ou em elaboração.

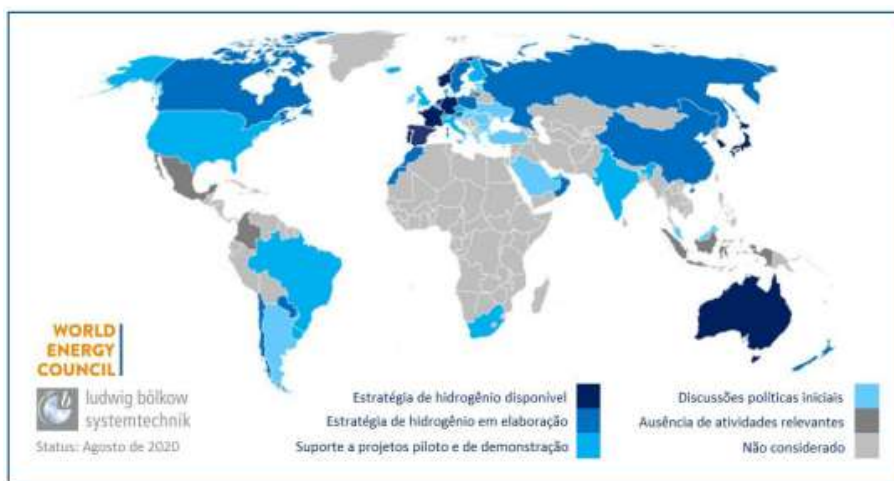


Figura 24. Panorama das ações em H₂ por país. Fonte: World Energy Council/LBS GmbH (2020).

De maneira geral, as estratégias nacionais e regionais de hidrogênio verde possuem como principais objetivos: redução das emissões de GEE, utilização de H₂V como vetor energético e crescimento econômico sustentável. No entanto, os objetivos específicos de cada país possuem grandes variações, uma vez que as estratégias são definidas conforme interesses nacionais, bem como as suas disponibilidades de recursos financeiros e limitações de sua matriz energética.

A análise de co-ocorrência com o *VOSviewer* foi utilizada nesse estudo para examinar a rede de palavras-chave, exibir suas relações e a organização intelectual dos temas da pesquisa (VAN-ECK e WALTMAN, 2014). Por meio do mapa é possível analisar a formação de “agrupamentos” por tema e direcionamento das pesquisas (DONTHU, 2021).

A técnica de palavras-chave demonstra dois grupos de pesquisa sobre hidrogênio verde, representados na figura 25, onde são resumidas 42 palavras-chaves com ocorrência mínima de 25 publicações. As palavras-chave em cada cluster são organizadas para transmitir uma narrativa coerente que explica a essência e o escopo do cluster (DONTHU, 2021), e a explicação para cada um destes é desenvolvida com



base no *sensemaking*²⁷. Esse critério para análise de co-ocorrência de palavras-chave é consistente com os estudos de Donthu et al. (2021) e Srivastava e Sivaramakrishnan (2021).

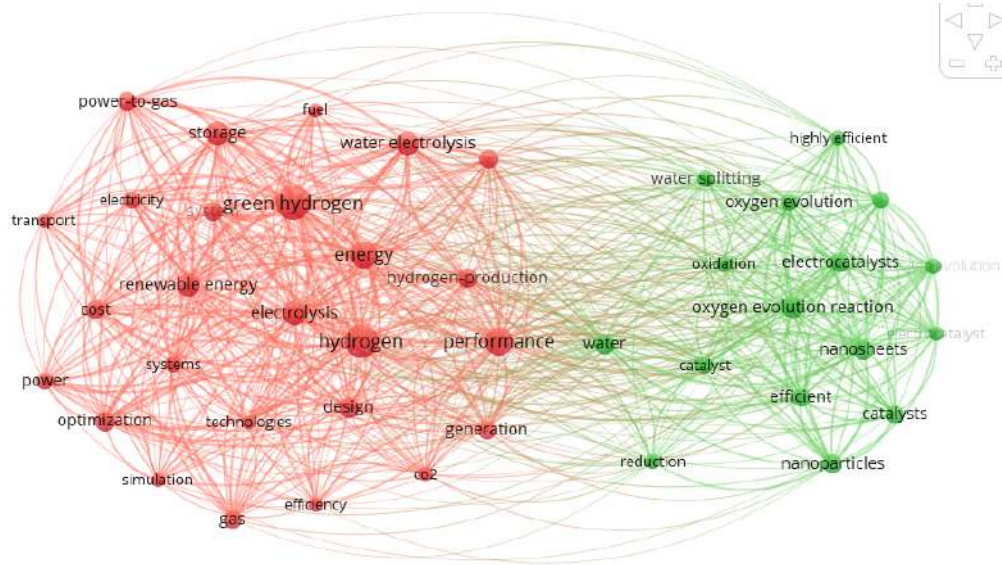


Figura 25. Mapa de co-ocorrência de palavras-chaves sobre hidrogênio verde nos últimos 5 anos. Fonte: Elaboração própria (VOSviewer)

O primeiro cluster, representado em vermelho, apresenta palavras chaves relacionadas à otimização/performance dos processos e das tecnologias, direcionado para uma análise de mercado e tecnologias atuais, reduzindo custos e aumentando a eficiência dos mesmos. Já o segundo cluster se refere a pesquisas em busca de processos técnicos de produção de hidrogênio verde com altas eficiências e cada vez mais próximos do caminho para a neutralidade de carbono.

²⁷ Sensemaking é o processo pelo qual o ser humano cria sentido acerca do mundo que o rodeia para tomar decisões. É uma competência em evidência por causa do aumento exponencial de dados e informações desde o advento da era digital. Envolve entender e se fazer entender Weick (1995).



Tabela 14. Publicações mais influentes dos clusters obtidos a partir da análise de co-ocorrência com auxílio do software VOSviewer.

Cluster	Nº de palavras-chave	Principais Palavras-Chaves	Nº de Ocorrências	Publicações mais influentes	Ano	Citações
1	26	green hydrogen, hydrogen, performance, energy, water electrolysis, renewable energy, storage, electrolysis, otimização	1592	Metal-Free 2D/2D Phosphorene/g-C3N4 Van der Waals Heterojunction for Highly Enhanced Visible-Light Photocatalytic H ₂ Production	2018	533
				Robust scheduling of hydrogen based smart micro energy hub with integrated demand response	2020	75
				The Role of Green and Blue Hydrogen in the Energy Transition-A Technological and Geopolitical Perspective	2021	75
				The role of new energy in carbon neutral	2021	59
				Green hydrogen in Europe - A regional assessment: Substituting existing production with electrolysis powered by renewables	2021	74
2	16	oxygen evolution reaction, nanosheets, water, nanoparticles, electrocatalysts	700	Bifunctional Heterostructured Transition Metal Phosphides for Efficient Electrochemical Water Splitting	2020	168
				Nanoporous Zn-doped CO ₂ O ₄ sheets with single-unit-cell-wide lateral surfaces for efficient oxygen evolution and water splitting	2018	110
				Potential and economic viability of green hydrogen production by water electrolysis using wind energy resources in South Africa	2019	63
				Renewable hydrogen implementations for combined energy storage, transportation and stationary applications	2020	59
				Principles of Water Electrolysis and Recent Progress in Cobalt-, Nickel-, and Iron-Based Oxides for the Oxygen Evolution Reaction	2021	46

Fonte: Elaboração própria com auxílio do programa VOSviewer

Tendo em foco o cluster 1 da análise de co-ocorrência, serão apresentados detalhes dos respectivos objetivos nacionais de cortes de emissões de GEE dos países e regiões mais relevantes encontrados na análise bibliométrica por citação e por número de artigos.

5.1 A UNIÃO EUROPEIA

Em 2019, a União Europeia (UE) foi responsável por 6,81% do total de emissões de GEE. Do total emitido pelo bloco, 86,67% dos poluentes têm origem no setor energético (CLIMATE WATCH, 2022). Em julho de 2021, a UE adotou o "Fit for 55", um pacote de medidas para o alcance da neutralidade de carbono através da redução de 55,0% das emissões líquidas do bloco até 2030, quando comparado aos níveis de 1990 (CONSELHO EUROPEU, 2022).



Em 2020, a Comissão Europeia publicou o documento intitulado "A estratégia de hidrogênio para uma Europa carbono-neutra", o qual coloca o H₂ como um pilar para a construção de uma economia sem poluição em 2050. De acordo a avaliação de Biebuyck (2022), a União Europeia é hoje a líder global em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias de hidrogênio de baixo carbono, argumento corroborado pelo presente estudo em que o bloco econômico é responsável por 47% das publicações analisadas. O foco principal do Bloco é a descarbonização da sua matriz energética de forma a empregar o produto nos setores de transporte, nas indústrias e edifícios, além de utilizá-lo no sistema elétrico (BIEBUYCK, 2022).

A estratégia europeia para o hidrogênio prevê que o gás passe de 2.0% de participação na matriz energética que tem hoje para 14.0% em 2050. Uma das maneiras de promover o H₂ são os acordos a serem realizados pelo Bloco com países e regiões vizinhas a fim de estabelecer seu mercado global (H₂GREENTECH, 2021).

Atualmente, a Europa possui vales de hidrogênio de baixo carbono, que são regiões que combinam projetos para a produção, estocagem, distribuição e aplicação do gás em condições reais. O projeto pioneiro foi o HEAVEN, hub tecnológico localizado ao norte dos Países Baixos, construído com um orçamento de € 90 milhões e que conta com dois eletrolisadores alimentados pela energia eólica offshore da região. O H₂ produzido no HEAVEN tem como finalidade o uso na indústria, no transporte público, em moradias e para a estocagem subterrânea. O objetivo da Europa é estabelecer mais 100 vales de hidrogênio como este até 2030 em coalizão com diferentes países (BIEBUYCK, 2022).

No dia 18 de maio de 2022, a Comissão Europeia anunciou o RePowerEU como forma de se tornar independente da energia de origem fóssil proveniente da Rússia. O plano apresentado busca diversificar o suprimento europeu de energia, acelerar a implantação de fontes renováveis, diminuir a demanda e substituir combustíveis fósseis no aquecimento e na geração de eletricidade (COMISSÃO EUROPEIA, 2022).

Até 2030, a Comissão Europeia almeja a produção de 10 milhões de toneladas de hidrogênio verde em território europeu e a importação de 10 milhões de toneladas adicionais de forma a substituir combustíveis fósseis em indústrias e transportes de



difícil descarbonização. Para acelerar a tecnologia do H₂V, a Comissão disponibilizou € 200 milhões em financiamento à pesquisa (COMISSÃO EUROPEIA, 2022).

Em maio de 2022, a *Hydrogen Europe*, associação líder de hidrogênio e célula-combustível para economias europeias, se tornou o primeiro membro associado à Parceria Africana de Hidrogênio, associação continental dedicada ao desenvolvimento de H₂V e H₂ de origem natural. Dessa forma, a associação europeia irá ajudar no desenvolvimento da indústria africana de hidrogênio verde e na formação de uma cadeia global do produto. Em troca, terá parte dos seus 10.0 milhões de toneladas do produto a serem importadas vindas do continente (HEYNES, 2022).

Dentro da UE, a Alemanha se mantém à frente nos investimentos e pesquisas conforme a Estratégia Nacional do Hidrogênio (NWS), lançada em junho de 2020, em que detalha metas concretas para o setor de hidrogênio com forte incentivo em pesquisa e desenvolvimento (GOVERNMENT STRATEGY ON HYDROGEN, 2021). O país sozinho, apresenta 102 artigos publicados, correspondendo a 12% de toda a produção científica pesquisada e 25% em relação ao grupo.

5.2 A CHINA

A China é um agente de extrema relevância para o atingimento da neutralidade de carbono e cujo interesse impacta diretamente o êxito do combate ao aquecimento global. Atualmente, o país é o maior emissor de GEE no Mundo (Figura 26), sendo responsável por 28% do total de emissões (*Climate Watch*, 2022). Do total emitido pela China, 80% têm origem no setor de geração de energia e fontes industriais (LIU et al., 2022).

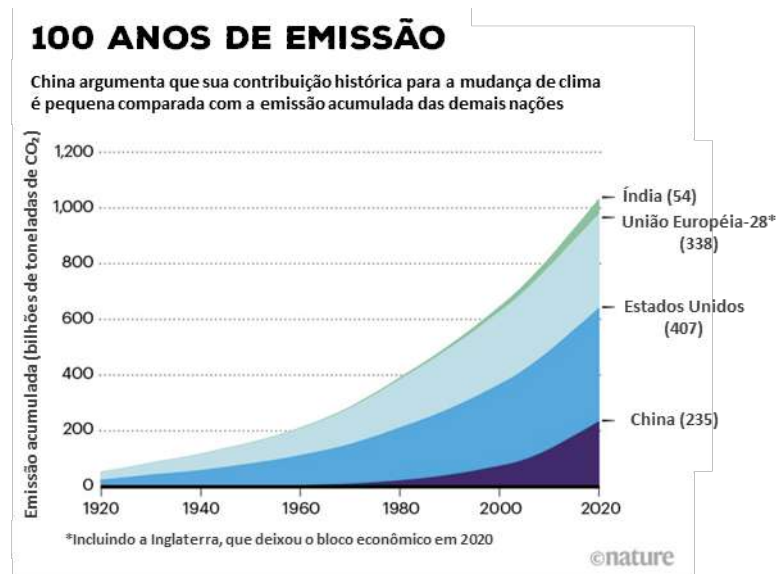


Figura 26. Emissões acumuladas em 100 anos. A China argumenta que sua contribuição histórica às mudanças climáticas é relativamente pequena quando comparada ao acumulado de longo prazo da maioria das nações ocidentais. EU-28 inclui as 27 nações pertencentes ao Bloco e o Reino Unido, que deixou a UE em janeiro de 2020. Fonte: Adaptado de Tay (2022)

Em setembro de 2020, em uma Assembleia Geral da ONU, o presidente chinês anunciou que o país tem como meta atingir seu pico de emissões até 2030 e, posteriormente, a neutralidade de carbono em 2060. De acordo com a *Climate Action Tracker*, organização independente que monitora os compromissos nacionais em função do Acordo de Paris, se atingida, a meta chinesa pode reduzir o aquecimento global em 0,2 °C a 0,3 °C em 2060 (TAY, 2022).

Para que o país possa atingir a sua meta de neutralidade de carbono em 2060, são necessários investimentos maciços em fontes renováveis, armazenamento de energia e remoção de CO₂. Desde 2010, a China aumentou a participação das energias renováveis em sua matriz energética de 18,0% para 29,0%. Além disso, o país tenta se posicionar como um mercado relevante na promoção e aplicação de tecnologias renováveis. Um indicativo desse posicionamento é a emissão de US \$17 bilhões de títulos verdes em 2021. O ativo, que conta com incentivos fiscais, permite a captação de recursos para o financiamento de projetos de fontes renováveis de energia (TAY, 2022).

Hoje em dia, a China é o maior produtor de hidrogênio no Mundo, com uma produção de 33 milhões de toneladas anuais. O processo produtivo do H₂ chinês tem uma alta emissão de CO₂, uma vez que tem origem em grande parte em combustíveis



fósseis. Em março de 2022, a China anunciou o seu plano de desenvolvimento de energia a base de hidrogênio para o período de 2021-35 como uma de suas iniciativas para neutralidade de carbono (BROWN e GRÜNBERG, 2022).

De acordo com o anunciado, a produção anual atingirá de 100 a 200 mil toneladas H₂ à base de energia renovável em 2025 com uma capacidade instalada de 3.3 a 6.7 TWh de eletrolisadores. Se atingida, a meta seria capaz de reduzir as emissões de dióxido de carbono de um a dois milhões de toneladas por ano (CSIS, 2022). Vale ressaltar, no entanto, que o objetivo chinês se mostra tímido se contraposto ao da Alemanha que visa ter capacidade instalada de 14 TWh de eletrolisadores em 2025 (BROWN e GRÜNBERG, 2022).

Analisando a produção científica sobre hidrogênio verde, a China lidera em publicações e citações, o que é resultado do financiamento majoritariamente público do desenvolvimento da cadeia chinesa de hidrogênio. O Estado financia as universidades públicas e os institutos de pesquisas para produzir conhecimento tecnológico, enquanto empresas privadas e públicas atuam diretamente em pesquisa e desenvolvimento em áreas de alta prioridade. Enquanto o foco inicial do governo federal é o desenvolvimento da indústria e tecnologia ao redor do produto sem uma rota específica, os entes locais priorizam majoritariamente a rota do hidrogênio verde (BROWN e GRÜNBERG, 2022). Na revisão bibliométrica conduzida pelos autores, a China teve 204 publicações sobre o tema e 2.658 citações, sendo 3 vezes mais citada que o segundo país melhor colocado, a Alemanha.

O crescimento da indústria do H₂ na China é hoje alavancado principalmente por políticas provinciais²⁸. Dez das vinte e três províncias chinesas já adotaram estratégias focadas em H₂ e há uma tendência crescente de regiões ricas em energias renováveis a integrar estas tecnologias na cadeia produtiva do hidrogênio. Enquanto isso, as províncias costeiras tendem a ser mais agnósticas quanto a rota a ser utilizada na produção do H₂ (BROWN e GRÜNBERG, 2022).

²⁸ Em 2021, a China teve 78 políticas provinciais citando o Hidrogênio verde, no entanto, no âmbito nacional, foram publicadas apenas 11 notas provinciais. É possível observar que o avanço da indústria e pesquisa da China estão diretamente ligados ao investimento estadual do que o nacional.



A província da Mongólia Interior anunciou sete grandes projetos de H₂V em 2021. A região rica em recursos para produção de energia renovável eólica e solar planeja ter um total de 2.2 GW de capacidade instalada de eletrolisadores até 2023, o que seria capaz de produzir 67 mil toneladas de H₂V. O objetivo para 2025 é escalar a capacidade de produção inicial para 500 mil toneladas do produto (BROWN e GRÜNBERG, 2022).

Na esfera local, a grande parte das políticas chinesas se concentram no uso do H₂ para a ampliação dos veículos a célula-combustível no curto prazo. As províncias de Pequim, Shanghai, Hebei, Mongólia Interior e Shandong têm como meta possuírem 10 mil veículos a célula-combustível cada até 2025 (BROWN e GRÜNBERG, 2022). Posteriormente, até 2030, o governo central chinês busca a ampliação das aplicações residenciais e industriais do hidrogênio com baixa pegada de carbono. Em 2035, a China almeja que o gás seja significativamente mais usado na produção de energia para consumo. Dessa forma, o desenvolvimento da cadeia de H₂ no país tem como principal alvo o mercado interno. A exportação do H₂V não é, por enquanto, uma meta chinesa (NAKANO, 2022).

5.3 OS ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA

Os Estados Unidos são o segundo maior emissor de gases de efeito estufa de acordo com a *Climate Watch*. Em 2019, o país foi responsável por 5.77 Gt dos GEE emitidos mundialmente, o que corresponde a 11,60% do total. Das emissões dos EUA em 2019, 91,0% tiveram origem no setor energético, já que ele é majoritariamente dependente de combustíveis fósseis (CLIMATE WATCH, 2022).

Em abril de 2021, os EUA se comprometeram, através de sua NDC, a reduzir as suas emissões de CO₂ em 26,0% a 28,0% em 2025 quando comparado aos níveis de 2005 e em 50,0% a 52,0% em 2030 em relação ao mesmo período. Posteriormente, o país tem a meta de atingir a neutralidade de carbono em 2050 (US DEPARTMENT OF STATE, 2021).

Para cumprir a NDC, os EUA colocaram como objetivo ter 100% de sua eletricidade originada em fontes renováveis de energia até 2035. Além disso, tem como objetivo a implantação de eficiência energética em larga escala a fim de reduzir



a demanda total, minimizando custos da rede elétrica e abrindo espaço para mais investimentos em geração neutra de carbono. O roteiro desenhado pelos EUA para o atingimento desses objetivos pode ser verificado na Figura 27 (US DEPARTMENT OF STATE, 2021).

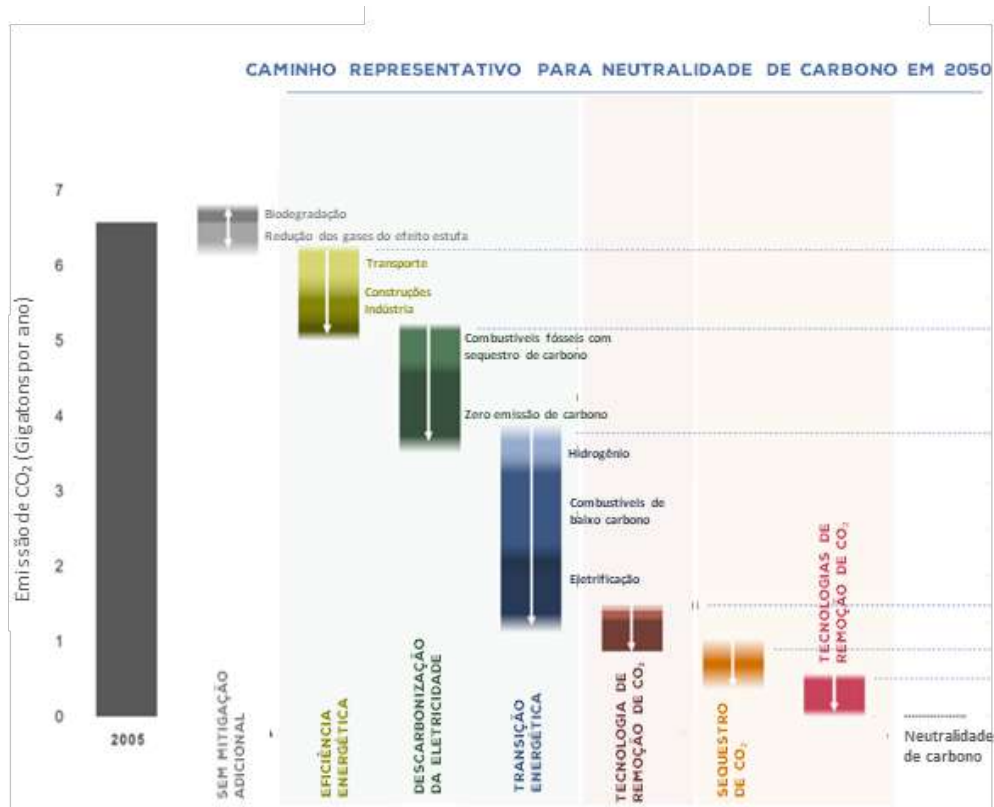


Figura 27. Redução de emissões para o atingimento da neutralidade de carbono nos EUA até 2050. O atingimento da neutralidade de carbono na economia dos EUA requer contribuições de todos os setores incluindo, eficiência energética, geração de energia limpa, e eletrificação; redução de emissões de metano e outros gases poluentes que não o CO₂; e aumento da captura natural e tecnológica de CO₂. Fonte: Adaptado de U.S. Department of State (2021).

O país tem como meta a eletrificação de todos os fins onde este tipo de tecnologia seja aplicável, desde automóveis até usos em edifícios e indústrias. Dessa forma, os EUA desejam que metade de todos os veículos leves vendidos em 2030 sejam livres de emissão de carbono. Para meios de difícil eletrificação, como na aviação e transporte marítimo de longa distância, é posto à disposição outros combustíveis, como o hidrogênio e biocombustíveis neutros em carbono. (US DEPARTMENT OF STATE, 2021)

O documento denominado “*Road Map to a US Hydrogen Economy*” enfatiza que o hidrogênio, além crucial para uma matriz energética de baixo carbono e redução



das emissões de GEE, irá fortalecer a segurança energética norte-americana. Os EUA aparecem em terceiro lugar com 74 artigos publicados na área de hidrogênio verde no ranking por número de publicações científicas.

Em novembro de 2020, o Departamento de Energia dos EUA (DOE, na sigla em inglês) lançou o Plano do Programa de Hidrogênio que tem como missão pesquisar, desenvolver e validar tecnologias de produção, armazenamento, distribuição e aplicação de H₂ em diferentes setores. O DOE trabalha em parceria com partes interessadas de forma a:

- Reduzir custos e melhorar o desempenho e a durabilidade dos sistemas de produção, entrega, armazenamento e conversão de hidrogênio;
- Abordar as barreiras tecnológicas, regulatórias e de mercado que limitam a integração do hidrogênio com sistemas convencionais de energia e reduzem as oportunidades de exportação de hidrogênio;
- Explorar oportunidades para alcançar adoção e uso em larga escala agregando diferentes fontes de oferta e demanda de hidrogênio;
- Desenvolver e validar sistemas integrados de energia utilizando hidrogênio;
- Demonstrar a proposta de valor para usos novos e inovadores do hidrogênio

No Plano, o gás será utilizado no setor de transporte, como matéria-prima para a indústria, aquecimento de sistemas industriais e prédios, armazenamento e geração de energia. Conforme a Tabela 15, o volume anual de H₂ passaria de 10.0 MMt/ano em 2020 para 41.0 MMt/ano até 2050 caso o Programa tenha sucesso no desenvolvimento de eletrolisadores de baixo custo (EERE, 2022).



Tabela 15. Consumo H₂ atual e futuro nos EUA (MMt/ano)

	2020	Sucesso do Plano	
Demanda por aplicação (ton)	Refino de petróleo	6	7
	Refino de metais	insignificante	4
	Produção de Amônia	3	4
	Produção de biocombustíveis e combustíveis sintéticos	1	9
	Transporte (Célula-Combustível)	insignificante	17
	Mercado Total de Hidrogênio	10	41

Fonte: Elaboração própria. Adaptado de EERE, 2022

O Plano do Programa de Hidrogênio conta com a participação dos Escritórios de Energia Fóssil e Gestão de Carbono; de Ciência; de Eficiência Energética e Energia Renovável; de Energia Nuclear; de Eletricidade e da Agência de Projetos de Pesquisa Avançada em Energia. Cada uma destas partes é responsável pelo seu plano de pesquisa e desenvolvimento anual focado em sua respectiva expertise para o atingimento da meta comum. Dessa forma, o Plano não tem uma rota de interesse única para a produção de hidrogênio, podendo obter o gás através de energias não-renováveis e renováveis. (EERE, 2022).

Em junho de 2021, o DOE lançou o "*Hydrogen Shot*"²⁹, o qual estabeleceu como meta a redução de 80,0% do custo do H₂ produzido por tecnologias limpas em uma década. Portanto, é esperado que o quilo do H₂ de baixa intensidade de carbono custe US\$1,00/kg em uma década. Conforme figura 28, o objetivo viria através de uma redução do custo de energia de US\$50/MWh para US\$30/MWh em 2025 e para US\$20/MWh em 2030, em conjunto com uma queda do custo de capital de no mínimo 80% e uma queda dos custos de operação e manutenção em pelo menos 90% (EERE, 2022).

²⁹ Atualmente, o DOE conta com o Escritório de Tecnologias de Hidrogênio e Células de Combustível (HFTO, na sigla em inglês). O HFTO possui um programa de oito iniciativas denominadas "Energy Earthshots". Até o momento foram divulgadas três iniciativas: Hydrogen Shot; Long-Duration Shot; Energy Shot (U.S. Department of Energy, 2022).

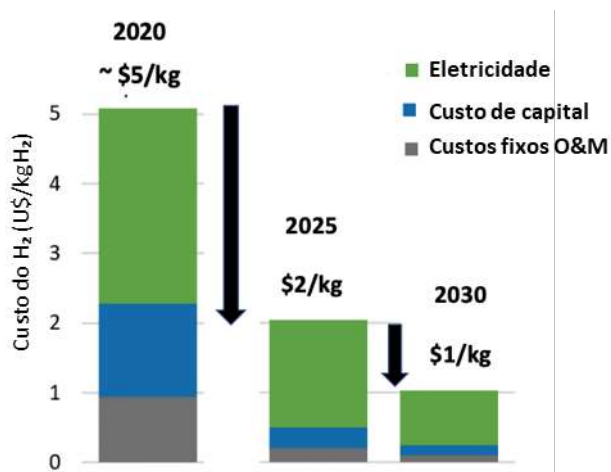


Figura 28. Custo de H₂ de baixa intensidade produzido por eletrólise. Em verde a parcela do custo do H₂ com origem na eletricidade. Em azul a parcela do custo do H₂ com origem no custo de capital. Em cinza a parcela do custo do H₂ com origem em custos fixos de operação e manutenção. Fonte: Adaptado de EERE (2022)

6. HIDROGÊNIO VERDE NO BRASIL

6.1 PANORAMA NACIONAL DE EMISSÕES

Em 2020, durante a pandemia, as emissões brasileiras brutas cresceram 9,5% frente a 2019, enquanto no restante do Mundo foram reduzidas em 7,0% devido à menor atividade econômica. A elevação anual se deu por conta do setor agropecuário, do setor de resíduos e pelo setor de mudança do uso da terra (MUT), conforme apontado pela Tabela 16 (SEEG, 2021).

Tabela 16. Emissões de GEE no Brasil entre 2019 e 2020 (tCO₂e - GWP-AR5)

Emissões de GEE no Brasil 2019 e 2020					
Setores	2019	%	2020	%	Varição 2019-2020
Agropecuária	562.987.702	29%	577.022.998	27%	2.5%
Energia	412.466.747	21%	393.705.260	18%	-4.5%
Processos Industriais	99.472.616	5%	99.964.389	5%	0.5%
Resíduos	90.399.714	5%	92.047.812	4%	1.8%
MUT	806.996.124	41%	997.923.296	46%	23.7%
Emissões Brutas	1.972.322.903		2.160.663.755		9.5%
Emissões Líquidas	1.336.613.309		1.524.954.161		14.1%

Fonte: Elaboração própria. Adaptado de SEEG, 2021



Conforme Figura 29, o perfil de emissões de CO₂e por ano no Brasil, mostra uma tendência de alta desde 2018 (SEEG, 2021).

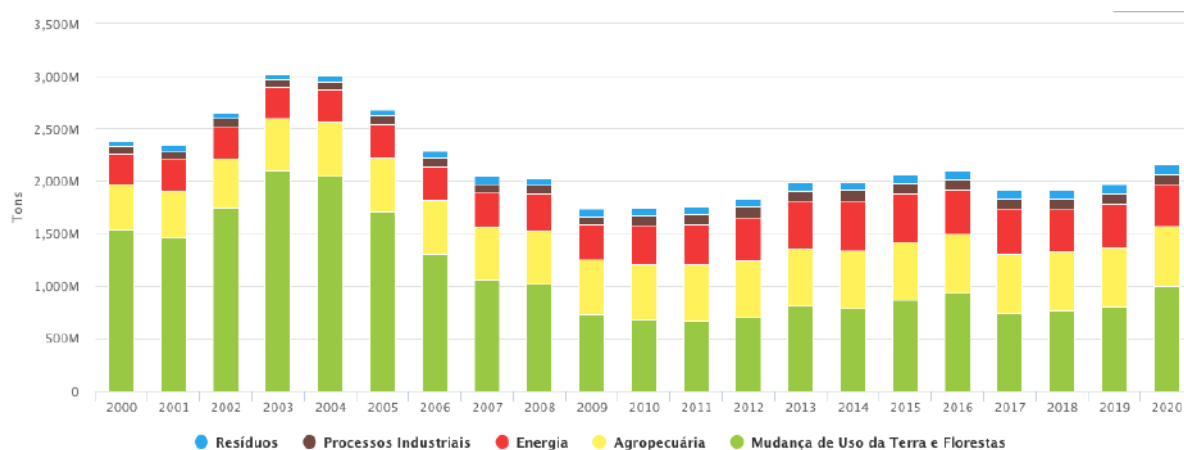


Figura 29. Evolução das emissões brutas em tCO₂e/ano (2000-2020). Fonte: Adaptado de SEEG, 2021.

No âmbito do Pacto de Glasgow, em março de 2022, o governo brasileiro revisou a sua NDC. Na terceira revisão realizada pelo Governo Federal desde 2016, o Brasil se comprometeu a reduzir suas emissões de GEE em -37,0% até 2025 e em -50,0% até 2030, frente ao registrado em 2005. Dessa forma, de acordo com a NDC atual, o Brasil chegaria à neutralidade de carbono até 2050 (UNTERSTELL e MARTINS, 2022).

O problema das NDCs anunciadas pelo Brasil reside no fato que, nas suas últimas duas revisões, o país reajustou a base de emissões de 2005 acima do patamar inicialmente calculado em 2016, conforme ilustrado pela Figura 30. Mesmo com o aumento da base de cálculo para o corte de emissões, a meta de redução de emissões do Brasil para 2025 permaneceu constante em -37.0% desde 2016. Enquanto isso, para 2030, a NDC de 2022 aumentou a ambição climática de um corte de -43,0% previsto nas NDCs de 2016 e 2020 para -50,0%. Com todas as suas atualizações, o NDC 2022 permite ao Brasil emitir 310 milhões de tCO₂e em 2025 e 80 milhões em 2030 a mais do que o inicialmente previsto em 2016 (UNTERSTELL e MARTINS, 2022).



METAS DE EMISSÃO NO BRASIL

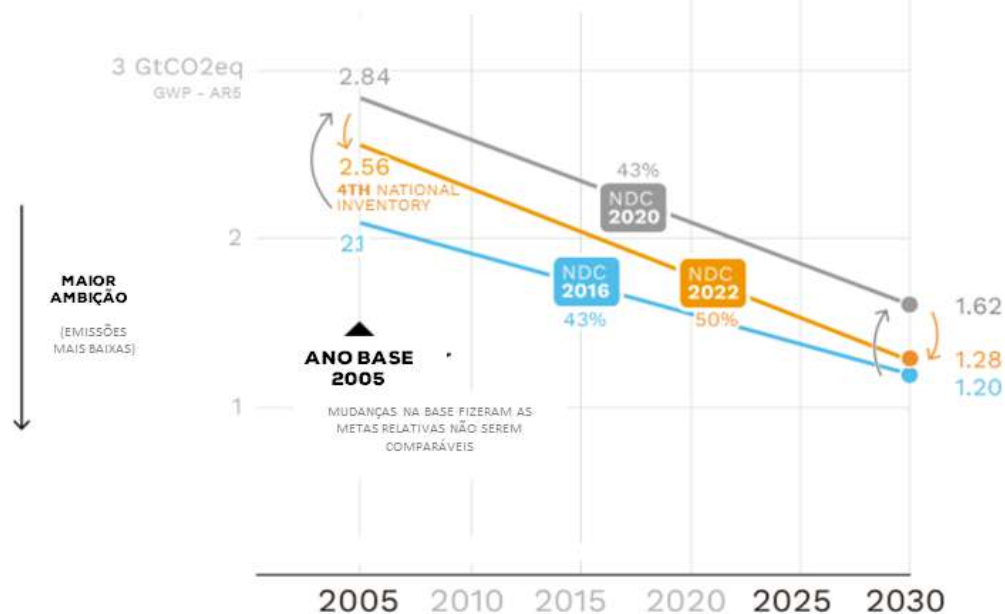


Figura 30. Evolução da NDC firmada pelo Brasil desde 2016. Eixo horizontal corresponde ao ano no horizonte da NDC. Eixo vertical corresponde ao volume de emissões em toneladas de CO₂e. Mudanças na base de cálculo de 2005 para o corte de emissões provocaram o aumento do volume de emissões permitidas por manutenção da meta a ser atingida. Fonte: Adaptado de UNTERSTELL e MARTINS (2022).

Tendo em vista o princípio do Acordo de Paris de que os países não devem regredir em suas ambições de corte de GEE, o Brasil deveria rever sua NDC atual e aumentar sua meta de corte de emissões para pelo menos -49,0% em 2025 e -53,0% em 2030 em relação a 2005 (UNTERSTELL e MARTINS, 2022). A matriz energética brasileira deve ser um ponto de atenção para o atingimento de metas mais ambiciosas do que as atualmente previstas na NDC 2022, já que 18,0% do total de emissões brutas de GEE do Brasil vêm do setor (SEEG, 2021).

6.2 MERCADO DE HIDROGÊNIO NO BRASIL

Atualmente, a aplicação de H₂ no Brasil se dá na síntese de produtos e em processos industriais para fins como os mencionados no capítulo 3.3.1. O maior mercado consumidor do produto no país é a indústria de refino. A Petrobras é responsável por 95% de toda a produção do país, sendo ela também, a consumidora final do produto, aplicando-o no hidrotreatamento de frações do petróleo (IBGE, 2020).

A parcela remanescente da produção nacional de hidrogênio, equivalente a 5%, são produzidos pelas indústrias de gases industriais, em que em média a



produção de hidrogênio confere ao setor um volume de vendas total no valor de aproximadamente R\$ 280 milhões (IBGE, 2021).

O relatório “Mapeamento do setor de Hidrogênio Brasileiro” elaborado em parceria entre Brasil e Alemanha para o Ministério de Minas e Energia mapeou os principais players de forma a identificar os atores atuantes ou com potencial de atuação futura na cadeia produtiva do hidrogênio no Brasil. Foram identificados um total de 203 atores no país mostrando o potencial do tema no Brasil, divididos em 7 subgrupos: produtores³⁰, consumidores³¹, fornecedores de Tecnologia³², prestadores de serviços³³, representações setoriais³⁴, Universidades e centros de P&D³⁵. A tabela 17 resume os principais atores mapeados.

Tabela 17. Principais atores na cadeia brasileira produtiva de hidrogênio.

Subgrupo	Empresa	Categoria / Descrição	Site
Produtor	Air Liquide	Produtor de H ₂	https://industrial.airliquide.com.br
Produtor	Air Products	Produtor de H ₂	http://www.airproducts.com.br
Produtor	Linde/Praxair/White Martins	Produtor de H ₂	http://www.praxair.com.br
Produtor	Messer	Produtor de H ₂	www.messer.com.br
Produtor	Petrobras	Produtor de H ₂	https://petrobras.com.br/pt
Consumidor	BRF	Alimentação	https://www.brf-global.com
Consumidor	Eletronuclear	Energia	https://www.eletronuclear.gov.br
Consumidor	Braskem	Químico	https://www.braskem.com.br
Consumidor	Oxiten	Químico	http://www.oxiteno.com
Consumidor	CSN	Siderurgia	www.gerdau.com.br
Consumidor	AcerlorMittal	Siderurgia	https://brasil.arcelormittal.com
Fornecedor de tecnologia	Siemens Energy	Integrador de Sistemas	https://www.siemens-energy.com/br/pt.html
Fornecedor de tecnologia	TechnipFMC	Integrador de Sistemas	https://www.technipfmc.com/en/about-us
Fornecedor de tec	Hytron	Integrador de Sistemas	https://www.hytron.com.br

³⁰ empresas produtoras de hidrogênio que possam transformar sua base atual de produção de hidrogênio cinza em produtores de hidrogênio verde para fins energéticos no futuro

³¹ empresas que hoje enquadram-se na categoria de consumidoras de hidrogênio e empresas de setores que apresentam potencial no futuro para utilização do hidrogênio verde no seu processo produtivo

³² empresas que podem fornecer sistemas ou componentes tecnológicos ao longo da cadeia de valor

³³ empresas de consultorias e de engenharia que trabalham com o tema de descarbonização e possuem experiência com estudos de viabilidade ou gerenciamento de projetos relacionados ao setor.

³⁴ associações de representação setorial por se tratarem de potenciais interlocutores do tema de hidrogênio verde no Brasil

³⁵ Universidades e Centros de Pesquisa e Desenvolvimento: universidades que dentro do seu corpo acadêmico mantém pesquisas relacionados ao tema do hidrogênio verde e possuem publicações a respeito, centros de pesquisa que atuam em pelo menos uma área no desenvolvimento de hidrogênio.



Subgrupo (cont.)	Empresa (cont.)	Categoria / Descrição (cont.)	Website (cont.)
Prestadores de Serviços	FGV Energia	A FGV Energia desenvolve pesquisas, estudos e análises no setor energético, auxiliando nas aplicações de recursos energéticos de maneira sustentável.	https://fgvenergia.fgv.br/fgv-energia
Prestadores de Serviços	Hexagon	Mapeamento geográfico e integração de sistemas energéticos	https://hexagon.com.br/about/hexagon
Representações Setoriais	ABEEOLICA	Associação Brasileira de Energia Eólica	https://abeeolica.org.br
Representações Setoriais	ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica	http://www.absolar.org.br
Universidades e Centros de P&D	Parque Tecnológico Itaipu	Núcleo de Pesquisa em Hidrogênio	https://www.pti.org.br/pt-br
Universidades e Centros de P&D	Universidade Federal do Rio de Janeiro/COPPE	LabH2 - Laboratório de Hidrogênio da COPPE	http://www.labh2.coppe.ufrj.br/index
Universidades e Centros de P&D	Universidade Federal de São Paulo	Research Center for Gas Innovation	https://www.rcgi.poli.usp.br/pt-br

Fonte: Adaptado de AHK (2021).

Por meio do mapeamento realizado, pode-se concluir que o Brasil possui relevantes atores nacionais e internacionais em toda cadeia produtiva de hidrogênio. É possível observar que no subgrupo de mercado consumidor há prevalência da indústria química, siderúrgica e alimentícia, enquanto o uso do hidrogênio para a indústria de fertilizantes e energia aparecem apenas como atores em potencial.

Com o crescimento da demanda global por hidrogênio verde, juntamente com os desenvolvimentos de arcabouços técnicos, regulatórios e tecnológicos adequados, a cadeia de produção brasileira poderá se desenvolver e se especializar continuamente nas tecnologias de hidrogênio e PtX. Dessa forma, espera-se uma redução de custos e ganho de competitividade das rotas tecnológicas do hidrogênio a partir de ganhos de escala e aprimoramento de uma cadeia de fornecimento nacional (AHK, 2021).

Tanto no Plano Nacional de Energia 2050 quanto no Plano Decenal de Energia 2030, o H₂ é considerado como um vetor energético alternativo para a descarbonização de setores como agricultura, mineração e siderurgia ou como reserva de energia na geração por fontes intermitentes. O Brasil desenvolve uma estratégia de pesquisa, desenvolvimento e inovação de hidrogênio há quase 20 anos, como mostrado pela Figura 31 (EPE, 2021).

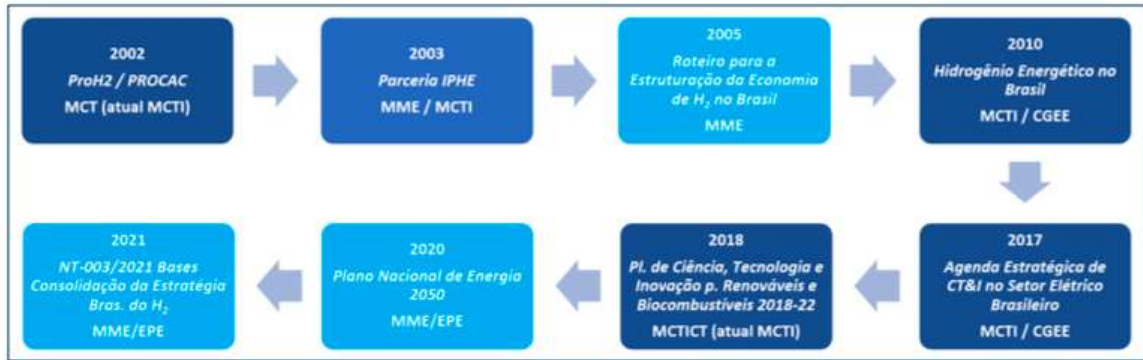


Figura 31. Ações governamentais para o H₂ no Brasil. Adaptado de German-Brazilian Energy Partnership, 2021.

Entre 2010 e 2018, a ABNT normatizou tecnologias de hidrogênio através da Comissão de Estudo Especial de Tecnologias de Hidrogênio (ABNT/CEE-067) (ABNT, 2021). De acordo com a *Energy Big Push*³⁶, entre 2013 e 2018, os investimentos públicos acumulados P&D³⁷ em H₂ e células-combustíveis somaram R\$35,56 milhões. A tecnologia correspondeu a apenas 0.9% dos investimentos públicos no último ano da série em questão (CEPAL & CGEE, 2020).

Em fevereiro de 2021, o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), através da Resolução nº2/2021, apontou o H₂ como um dos temas do setor energético a serem priorizados pela ANEEL e ANP na destinação dos recursos de PD&I³⁸ regulados por elas (BRASIL, 2022).

Nesse contexto, em junho de 2022, o CNPE aprovou o Programa Nacional de Hidrogênio (PNH₂) e sua respectiva governança. O PNH₂ visa o desenvolvimento da economia do hidrogênio no Brasil no longo prazo, com foco no seu potencial energético e desenvolvimento conjunto de políticas públicas, tecnologia e mercado. O Programa tem suas diretrizes estruturadas em seis eixos temáticos (Figura 32) e aposta nas múltiplas rotas de fabricação de H₂, incluindo fontes fósseis. Com a aprovação da governança do PNH₂, será instituído um comitê técnico representativo das partes interessadas que se reunirá periodicamente a fim de monitorar a evolução do desenvolvimento do setor (CHIAPPINI, 2022).

³⁶ Parceria entre EPE, MME, CGEE, CEPAL e diversos parceiros nacionais e internacionais, como a AIE, que visa apoiar a promoção de mais e melhores investimentos públicos e privados em energia sustentáveis, com ênfase em inovação, contribuindo para um grande impulso energético no Brasil (CEPAL, 2020).

³⁷ Pesquisa, Desenvolvimento e Demonstração

³⁸ Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação.



Figura 32. Seis eixos temáticos do PNH2. Adaptado de EPE, 2021.

Ainda em junho de 2022, o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) anunciou uma seleção pública, através da Financiadora de Estudos e Projetos (Finep), com o objetivo de conceder recursos para projetos de inovação com foco em combustíveis sustentáveis para motores de ignição por compressão, combustíveis sustentáveis de aviação (SAF) ou hidrogênio sustentável no setor de transporte. O edital prevê o compromisso de recursos do Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FNDCT) até o limite de R\$15 milhões para projetos de produção, armazenamento e uso de H₂ sustentável no setor de transportes. A Seleção se destina a iniciativas de empresas brasileiras onde cada pode receber de R\$ 1 milhão a R\$ 7,5 milhões (BRASIL, 2022). Iniciativas de fomento como esta são essenciais para o teste em escala piloto de fontes energéticas que ainda não foram testadas em larga escala, como o hidrogênio verde.

Em julho de 2022, o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) anunciou uma linha de crédito de até R\$300 milhões em apoio a projetos pilotos de produção ou utilização de hidrogênio verde. Parte do orçamento para a nova linha de crédito virá do Fundo Clima, fundo administrado pelo BNDES e vinculado ao Ministério do Meio Ambiente (MMA), que possui como objetivo o financiamento de forma não reembolsável de projetos com foco na mitigação das mudanças climáticas. De acordo com a diretora de Garantia à Infraestrutura do Banco, Solange Vieira, o grande diferencial da nova linha de crédito do BNDES são as taxas de juros abaixo



do mercado, o que corresponderia à Taxa de Longo Prazo (TLP) sem a remuneração do BNDES ou menos (CHIAPPINI, 2022).

O BNDES ainda estuda expandir suas linhas de financiamento para, em breve, apoiar também projetos de produção de hidrogênio verde em larga escala e com destino à exportação (CHIAPPINI, 2022). A iniciativa traria taxas de financiamento de 1% a 2% ao ano para projetos público-privados (NEDER, 2022).

Enquanto isso, de acordo com estudo da consultoria *McKinsey*, para viabilizar o crescimento da cadeia de H₂V no Brasil, a tecnologia precisaria de US\$ 200 bilhões em investimentos, incluindo 180 GW de capacidade de geração de eletricidade renovável adicional, volume maior que a capacidade de geração instalada no país atualmente (HYDROGEN COUNCIL e MCKINSEY&COMPANY, 2021).

Paralelamente às ações governamentais, o Brasil ainda possui parcerias internacionais e projetos com o objetivo de fomentar a cadeia nacional de hidrogênio:

- Parceria Internacional para o Hidrogênio e as Células a Combustível na Economia (IPHE, na sigla em inglês);
- *Hydrogen Initiative* - iniciação voluntária multilateral coordenada pela AIE com o objetivo de acelerar a comercialização e a aplicação de H₂ e células-combustível (AIE, 2019);
- H2Brasil³⁹ - Expansão do Hidrogênio Verde. Parceria entre o Ministério de Desenvolvimento e Cooperação Econômica da Alemanha e o MME que tem como objetivo apoiar o desenvolvimento do mercado de H₂V no Brasil (EPE, 2021);
- Grupo de Trabalho Brasil-Chile - parceria para a realização de estudo sobre o potencial de cooperação bilateral em H₂ (EPE, 2021).

³⁹ O H₂Brasil prevê o investimento de € 34 milhões para apoiar a expansão da cadeia de hidrogênio verde no Brasil por meio de 5 frentes. 1. Realização de ajustes no marco regulatório atual e criação de certificação de sistemas de certificação de H₂V no Brasil. 2. Divulgação do tema e engajamento de parceiros e da sociedade. 3. Formação e capacitação profissional inclusiva. 5. Desenvolvimento de estudos e tecnologia para produção de H₂V. 5. Aprimoramento da viabilidade econômica da aplicação industrial de H₂V no país (MME, 2021).



6.3 POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE H₂V NO BRASIL

6.3.1 A matriz elétrica brasileira

O Brasil possui uma das matrizes elétricas mais limpas do Mundo, dessa forma, a produção de hidrogênio verde no Brasil a partir de fontes renováveis possui elevado potencial. Como ilustrado pela figura 33, a participação das fontes renováveis na matriz elétrica em 2021 foi de aproximadamente 78,0% (EPE, 2022).

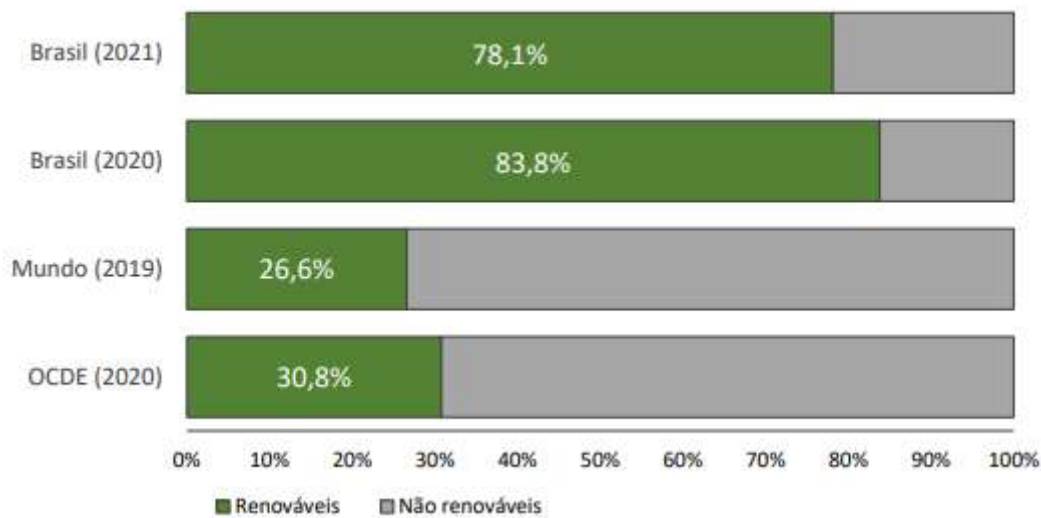


Figura 33. Participação de renováveis na matriz elétrica nos anos de 2020 e 2021. Fonte: EPE, 2022

Conforme Figura 34⁴⁰, do total de fontes renováveis, aproximadamente 53,4% correspondem à fonte hidráulica, 8,2% à biomassa, 10,6% à eólica e 2,5% à solar centralizada (EPE, 2022).

⁴⁰ É possível observar uma redução de 8,5% na oferta hidráulica, enquanto a oferta total teve um aumento de 3,9%. A escassez de chuvas em 2021 provocou uma redução do nível dos reservatórios das principais hidrelétricas do país e a consequente redução da oferta de hidreletricidade. A partir da Figura 34, esta queda foi compensada pelo aumento anual da oferta de outras fontes, como o carvão vapor (+47,2%), gás natural (+46,2%), eólica (+26,7%) e solar fotovoltaica (+55,9%) (EPE, 2022).

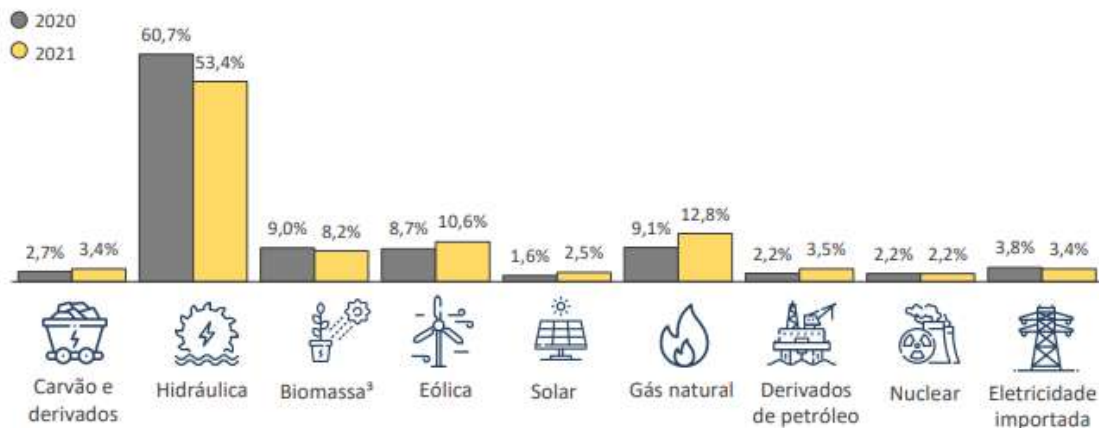


Figura 34. Matriz energética brasileira em 2020 vs. 2021. Fonte: EPE, 2022

O grande potencial e disponibilidade, a preços competitivos, de recursos renováveis para a geração elétrica está na base da competitividade e das oportunidades para o Brasil na estruturação da economia do H₂V (DE CASTRO et al., 2021). Além disso, o país conta com ações e mecanismos que favoreceram o ambiente técnico, regulatório e a competitividade das energias renováveis no Brasil, como:

- i. A política energética com planejamento de longo prazo, descrito no EPE;
- ii. Operação centralizada do sistema elétrico pelo Operador Nacional do Sistema (ONS), que atende a carga espacialmente dispersa no território brasileiro;
- iii. O sistema de compensação de contratos organizado pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica; e
- iv. Padrão de financiamento consolidado pelo BNDES (DE CASTRO et al., 2021).

A fim de identificar o potencial da geração de H₂V, é necessário verificar a distribuição geográfica das fontes renováveis com potencial para a sua geração no país (MACEDO et. al, 2021). Dessa forma, a figura 35 apresenta a distribuição geográfica da geração eólica e da energia solar fotovoltaica no Brasil.



Figura 35. Distribuição geográfica geração eólica (representado em pontos azuis) e de geração solar fotovoltaica (representada por pontos amarelos). Fonte: SIGA, ANEEL 2022.

Com mais de 1.500 GW de potencial em geração eólica⁴¹ e ocupando o sexto lugar no Ranking Global de Capacidade Instalada *onshore*, a indústria eólica brasileira poderá ter um papel crucial na produção de H₂V (ABEEólica, 2022). Na figura 36, é possível identificar a expansão já contratada via leilões regulados e mercado livre da capacidade de geração elétrica e eólica no Brasil.

⁴¹ *onshore* e *offshore* (ABEEólica, 2022).

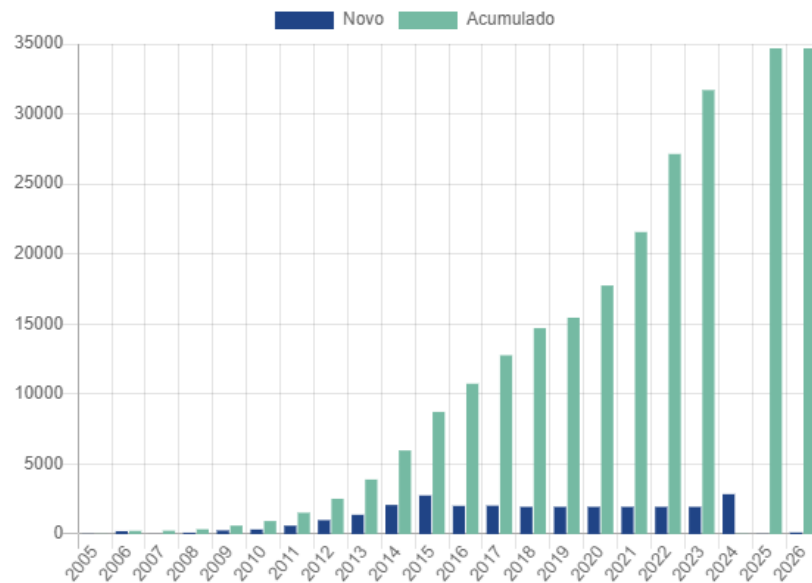


Figura 36. Evolução da capacidade instalada de energia eólica no Brasil (em MW). O gráfico representa a capacidade de geração eólica brasileira em função das contratações já realizadas nos leilões regulados e no mercado livre. Fonte: ABEEólica, 2022

Conforme a Tabela 18, em 2021, as regiões Nordeste e Sul foram responsáveis pelos maiores volumes de geração de energia eólica no país. Os cinco estados com maior geração foram Rio Grande do Norte (21,23 TWh), Bahia (21,15 TWh), Piauí (9,10 TWh), Ceará (7,91 TWh) e Rio Grande do Sul (5,63 TWh) (ABEEólica, 2021).

Tabela 18. Representatividade de geração de energia eólica por região no Brasil.

Região	2020		2021		% de crescimento
	Geração (TWh)	Representatividade	Geração (TWh)	Representatividade	
Sudeste	0,05	0,10%	0,06	0,10%	4%
Sul	6,33	11,50%	6,2	8,70%	-2%
Nordeste	47	85,60%	63,2	88,70%	34%
Norte	1,5	2,70%	1,76	2,50%	17%
Total	54,89	100%	71,22	100%	29,70%

Fonte: ABEEólica, 2021

Em relação à energia solar fotovoltaica, a capacidade instalada é ainda incipiente no Brasil, todavia em rápido crescimento. Como pode ser visto na figura 40, há uma elevada concentração de usinas geradoras de energia solar fotovoltaica nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste do país, com destaque para os estados do Mato Grosso, Pará, Amapá e Ceará (ABSolar, 2022). No entanto, diferentemente da



distribuição geográfica da fonte eólica, a fonte solar apresenta boa distribuição ao longo de todos os estados e regiões do país.

Dadas as condições favoráveis de irradiação solar, é natural que a instalação de plantas fotovoltaicas e heliotérmicas aconteça em regiões específicas, nas quais pode ser obtido um fator de capacidade mais elevado. Entretanto, praticamente todo território brasileiro é elegível à expansão do aproveitamento deste recurso⁴² (EPE, 2020).

6.3.2 O perfil de consumo de energia no Brasil

Conforme a Figura 37, o maior consumo de energia no Brasil em 2021 se deu nos setores industrial e de transporte de carga e de passageiros, com aproximadamente 65% do total. Houve um aumento de 3,4% da demanda de energia em 2021 em relação a 2020 (EPE, 2022).



Figura 37. Consumo de energia por setor. Fonte: EPE, 2022.

O consumo de energia na indústria, além de apresentar 3,6% de crescimento em relação a 2020, teve 58% de renovabilidade na sua matriz energética, mostrando uma tendência de mudança de fontes de energia nesse setor. Enquanto isso, o setor

⁴² Considerando que a faixa de variação da irradiação global horizontal anual do Brasil seja de 1.500 a 2.200 kWh/m² (EPE, 2020)



de transportes apresentou uma recuperação de 7,3% em relação a 2020, mas com grande participação de fontes não-renováveis⁴³ (EPE, 2022).

6.3.3 O excedente de eletricidade

Considerando o saldo entre a geração elétrica nacional e o consumo total, é possível constatar que para o período (2020- 2021), sem considerar perdas, houve um excedente de energia elétrica gerada (Tabela 19). O volume gerado não utilizado pode potencialmente ser empregado na geração de hidrogênio verde no país, uma vez que a matriz elétrica brasileira é majoritariamente renovável como já mencionado (EPE, 2022).

Tabela 19. Saldo entre Geração de energia e Consumos Totais (GWh)

Fonte	Unidade	2020	2021	21/20 (%)
Geração de Energia Elétrica	TWh	628,8	656,1	4,30%
Consumo de Energia Elétrica	TWh	547,7	570,8	4,20%
Saldo	TWh	81,1	85,3	5,18%

Fonte: EPE, 2022

Destaca-se ainda a contínua expansão de Outras Fontes Renováveis (OFR) de eletricidade – biomassa, PCH e eólica – no SIN, o que dá maior robustez para a tese em análise. Conforme Figura 38, o grupo OFR aumentou a sua participação no parque de geração de 18%, no início de 2017, para 21%, em dezembro de 2022, distribuídos entre as regiões Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e Sul (EPE, 2022).

⁴³ Aumento ano contra ano de 32,8% do querosene de aviação, de 9,8% da gasolina e de 9,1% do óleo diesel. Enquanto o consumo de Etanol sofreu uma redução de 3,2% e o crescente consumo de biodiesel (+6,5%) acompanhou em parte o aumento de sua contraparte fóssil. Durante o ano de 2021, houve diferentes mandatos de adição do biodiesel no diesel fóssil, variando de 10% em volume (B 10) a 13% (B13) (EPE, 2022).

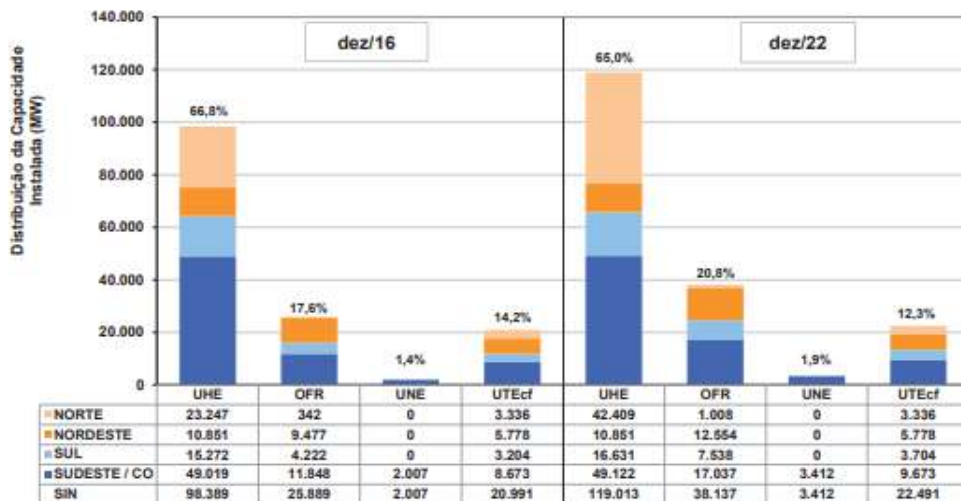


Figura 38. Participação das fontes de produção ao final de 2016 e 2022. Legenda: UHE - usinas hidrelétricas; OFR - outras fontes renováveis; UNE - usinas nucleares; UTEcf - usinas termelétricas. Fonte: EPE, 2022.

Geograficamente, constata-se uma excelente distribuição de unidades geradoras de energia a partir de fontes renováveis em todas as regiões do país. Dessa forma, para atendimento da demanda futura de H₂V no mercado interno, a produção pode se dar de forma semi-centralizada, ou seja, nas proximidades dos grandes centros econômicos e parques industriais consumidores do produto (AHK, 2021).

Para os sistemas isolados⁴⁴, há a possibilidade de geração de H₂V no próprio local de consumo através de sistemas híbridos (MACEDO, 2021) em que alguns estudos já demonstraram a viabilidade de um custo nivelado de produção de hidrogênio por meio de um sistema híbrido renovável. O estudo de McDonagh (2020) sobre um sistema híbrido eólico offshore associado apenas à produção de hidrogênio mostra a redução de 10% nos custos da produção de hidrogênio. Por outro lado, Gutierrez-Martins (2021) mostra uma redução nos custos para a produção de hidrogênio conectada aos sistemas solares fotovoltaicos, alcançando o custo de US\$ 4,07 por kg, valor 7% acima do encontrado por McDonagh.

Diante do exposto, o Brasil se posiciona como um dos países mais competitivos no Mundo para a produção de H₂ de baixa intensidade de carbono. Como mostrado pela Figura 39, o custo nivelado de produção de hidrogênio no Brasil é o menor dentre os países analisados para o longo prazo (BNEF, 2021).

⁴⁴ No Brasil, existem atualmente cerca de 235 localidades com geração de energia isolada, como nos estados do Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará, Rondônia e Roraima, além da ilha de Fernando de Noronha.

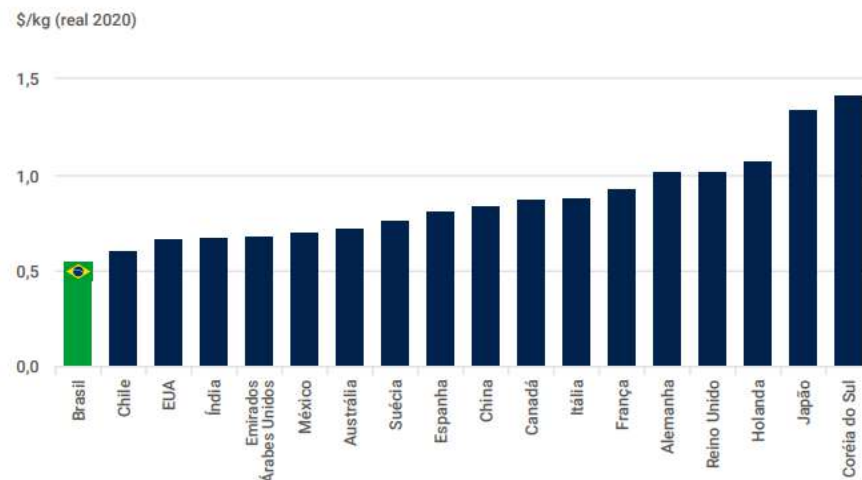


Figura 39. Custo nivelado da produção de hidrogênio⁴⁵ a partir de fonte renovável de energia em 2050. Fonte: BNEF ,2021.

Conforme mencionado no capítulo 4, países da União Europeia e Ásia demandarão hidrogênio de baixo carbono em larga escala em um horizonte de 30 anos. No entanto, como mostrado na figura 33, a maior parte desses países não possui em sua matriz energética fontes renováveis suficientes para suprir suas demandas internas do produto, o que situa o H₂ brasileiro em uma posição de destaque no seu fornecimento (CASTRO et. al, 2021).

As iniciativas governamentais aliadas à competitividade brasileira, têm gerado um ambiente de negócios atraente. O país está conquistando o interesse de empreendedores nacionais e internacionais para o desenvolvimento da cadeia do H₂V. Grande parte do foco é no desenvolvimento de projetos que tem como objetivo a exportação do produto, seja na forma pura ou na forma de amônia verde e metanol verde (EPE, 2021).

6.4 POTENCIAL DE APROVEITAMENTO DE H₂V NO BRASIL

As análises de caminhos para a descarbonização das economias, discutidas neste trabalho, apontam para um papel central do hidrogênio verde na descarbonização da economia. Como já citado, são diversos os processos de produção do hidrogênio, bem como seus usos. O desafio, contudo, é que a grande

⁴⁵ Métrica adaptada a partir do Levelized Cost of Energy (LCOE). O LCOE é definido como a divisão de custos totais do projeto, incluindo não somente o capital investido (Capex), mas também os custos operacionais (Opex), pela energia gerada ao longo de toda a operação da usina geradora (CANALSOLAR, 2020).



maioria dos países, com destaque para a União Europeia, não detém um potencial de recursos renováveis suficiente para atingir as metas, cada vez mais agressivas, de descarbonização e, muito menos, para atender a demanda interna de energia (MACEDO et. al, 2021).

Ao estruturar programas e planos da transição energética com foco no H₂V na União Europeia, a oferta deste novo recurso virá de países que podem produzir energia elétrica de fontes renováveis (ZHAO, 2019), como Brasil, Argentina, Chile, Austrália, África do Sul, Níger, Mali e Namíbia que por sua vez ganham destaque como destino para os investimentos. Assim, a estratégia do bloco europeu está bem definida na direção de interagir com um conjunto muito maior de países que possa produzir e exportar o H₂V para atender a demanda europeia (ANGELO, 2022).

Um estudo de pesquisadores da Universidade de São Paulo (USP), publicado no International Journal of Hydrogen Energy, por meio de um modelo matemático, corroborou com a iniciativa do bloco europeu e concluiu que a venda do H₂V no Brasil é mais lucrativa do que sua transformação em energia:

“Além disso, o modelo conclui que comercializar hidrogênio é mais lucrativo do que transformá-lo novamente em energia. Uma dessas razões é que o CAPEX ainda é muito caro para o sistema. Além disso, as opções de armazenamento à base de hidrogênio sofrem com a baixa eficiência de ida e volta na conversão de eletricidade por meio de eletrólise em hidrogênio, depois hidrogênio de volta em eletricidade. A produção de hidrogênio torna-se economicamente viável apenas a partir de usinas operando a partir de 3000 h para eletrolisadores com CAPEX de USD 650/kWe”. (MACEDO et. al, 2021)

Segundo artigo publicado pelo Observatório Brasileiro de Política Externa (2022), o que une os poucos projetos nacionais de hidrogênio verde é “o fato de serem controlados por empresas estrangeiras com foco na exportação para a Europa”. A tabela 20 mostra uma lista não exaustiva dos projetos de hidrogênio verde no Brasil, dos 11 projetos mostrados, 9 são com objetivos voltados para o mercado externo.

**Tabela 20.** Projeto de H₂V Anunciados no Brasil⁴⁶

Projetos de H ₂ V Anunciados no Brasil						
Empresa	Local	Fonte	Investimento (R\$ milhões)	Volume H ₂ (mil ton/ano)	Mercado	Início
EDP Brasil ⁴⁷	Porto de Pecém (CE)	Solar	41,9	195,3 ⁴⁸	Interno	2025
Furnas ⁴⁹	UHE Itumbiara (MG)	Solar	45,0	N/A ⁵⁰	Interno	2022
Fortescue	Porto de Pecém (CE)	Solar e eólica	31.200,0 ⁵¹	N/A ⁵²	Externo	2025
Shell	Porto do Açu (RJ)	Eólica offshore	310,0 - 624,0	N/A ⁵³	Interno/ Externo	2025
Qair Brasil	Porto de Pecém (CE)	Eólica offshore	36.140,0 ⁵⁴	296,0	Externo	2023
Enegix Energy ⁵⁵	Porto de Pecém (CE)	Solar e eólica	28.080,0 ⁵⁶	N/A	Externo	2025
AES Brasil ⁵⁷	Porto de Pecém (CE)	N/A	10.400,0	100,0 ⁵⁸	Externo	2025
CTG Brasil	Porto de Suape (PE)	N/A	45,0	N/A	Externo	2026
White Martins ⁵⁹	Porto de Pecém (CE)	N/A	N/A	N/A	Interno/ Externo	N/A
TransHydrogen Alliance	Porto de Pecém (CE)	N/A	10.400,0 ⁶⁰	500,0	Externo	2025
Cactus Energia Verde ⁶¹	Porto de Pecém (CE)	Solar e eólica	26.000,0	10,5	Externo	2023

N/A: não disponível. Fonte: Elaboração própria a partir de sites das companhias e da EPBR.

⁴⁶ Lista não exaustiva. O Porto de Pecém possui Memorandos de Entendimento ainda com: Enel Green Power, Neoenergia, Eneva, Diferencial, Hytron, H2Helium, Engie, Total Eren e Casa dos Vento (CEARÁ PORTAL, 2022).

⁴⁷ Em parceria com GESEL, Hytron e Instituto Avançado de Tecnologia e Inovação (IATI) (EDP, 2021).

⁴⁸ Calculado com base na taxa de produção divulgada pela empresa de 22.3kg/h de H₂V (EDP, 2021).

⁴⁹ Em parceria com Barbosa e Barbosa Engenharia Elétrica, o Centro de Tecnologia em Energia da Universidade de Brandenburgo, a Fundação de Ensino, Pesquisa e Extensão de Ilha Solteira – Fepisa, o Instituto Senai de Tecnologia em Automação, o Laboratório de Hidrogênio da Universidade Estadual de Campinas – LH2/Unicamp e o Cepe (FURNAS, 2021).

⁵⁰ Não disponível. A Companhia inicialmente terá uma planta fotovoltaica de 1000 kWp para abastecer a produção (FURNAS, 2021).

⁵¹ US\$6,0 bilhões (EPBR, 2021). Câmbio R\$5.20/US\$ - Boletim Focus no dia 22 de julho de 2022 (BCB, 2022).

⁵² Não disponível. O objetivo da empresa é produzir 15,0 milhões de toneladas de H₂V entre 2025 e 2030 (EPBR, 2021).

⁵³ Não disponível. A planta terá uma capacidade inicial de 10 MW, podendo chegar a 100 MW no futuro (Shell, 2022).

⁵⁴ US\$6.95 bilhões (EPBR, 2021). Câmbio R\$5.20/US\$ - Boletim Focus no dia 22 de julho de 2022 (BCB, 2022).

⁵⁵ Em parceria com a empresa de engenharia e construção norte-americana Black & Veatch

⁵⁶ US\$5,4 bilhões. Câmbio de R\$5.20/US\$ - Boletim Focus no dia 22 de julho de 2022 (BCB, 2022).

⁵⁷ Subsidiária brasileira da AES Corp.

⁵⁸ O projeto terá a capacidade de produção de 500 mil toneladas de NH₄ verde (EPBR, 2021).

⁵⁹ Em parceria com a Linde (EPBR, 2021).

⁶⁰ US\$2,0 bilhões (Diário do Nordeste, 2021). Câmbio R\$5.20/US\$ - Boletim Focus no dia 22 de julho de 2022 (BCB, 2022).

⁶¹ Em parceria com BI Energia e Uruquê Energias Renováveis (BNAMERICAS, 2022)



De acordo com uma projeção do *HydrogenCouncil* com a *McKinsey & Company* (2021), o uso de hidrogênio verde poderia evitar a emissão de 75 milhões de toneladas de CO₂ em 2040 no Brasil. Mas, para que esse fator seja alcançado, segundo a consultoria, o país precisa assumir compromissos mais claros em relação à tecnologia e realizar os investimentos necessários para sua implantação.

No Porto de Pecém, em São Gonçalo do Amarante, o estado do Ceará deseja construir o “maior hub de H₂V do Brasil”. O projeto foi lançado em fevereiro de 2021 pelo Complexo do Pecém, Federação das Indústrias do Estado do Ceará e Universidade Federal do Ceará (UFC). O HUB de H₂V quer transformar o estado em um grande exportador do combustível e tem planos para iniciar a sua produção em 2025, com meta de atingir um volume de 1,3 milhões de toneladas anuais até 2030. O complexo portuário conta com uma Zona de Processamento de Exportação (ZPE) que tem como objetivo atrair investimentos através de benefícios fiscais⁶² que podem trazer economias de 30.0 a 40.0% aos gastos operacionais e de capital do investidor (COMPLEXO DO PECÉM, 2021).

Os impactos socioambientais de toda a cadeia do hidrogênio verde não são considerados nos contratos e memorandos do Hub do Ceará. A competição entre os estados, muito forte na energia eólica e solar, gera incentivos fiscais e facilidade de financiamento por bancos públicos, incluindo a flexibilização de legislação (CALDEIRA e SERRANO, 2022).

Diante dos fatos apresentados a “sustentabilidade” do hidrogênio verde no Brasil é questionável uma vez que a maior parte dos investimentos estão voltados apenas para exportação do H₂V sem um planejamento de incorporação do produto a processos já existentes no Brasil, sem a garantia que o hidrogênio realmente será de fonte renovável e principalmente, sem análise de impactos socioambientais à comunidade local (ANGELO, 2022).

⁶² Isenção de Imposto de Renda de Pessoa Jurídica (IRPJ) por até 10 anos pelo Sudene; até 75% de redução de Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) por até 10 anos; possibilidade de redução do Imposto Sobre Serviços (ISS); suspensão de Imposto de Importação (II), Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI), Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social Cofins, Cofins-Importação, PIS/Pasep, PIS/Pasep-Importação e Adicional de Frete para Renovação da Marinha Mercante (AFRMM) para importações ou aquisições no mercado interno de bens e serviços (COMPLEXO DE PECÉM, 2021)



Em seguida, serão apresentados dois exemplos em que o Brasil pode incorporar a produção de hidrogênio para utilização no mercado interno, agregando valor ao produto, deixando de exportar commodities, levando em consideração o desenvolvimento local e capacitação de profissionais brasileiros.

6.4.1 Produção de Fertilizantes Nitrogenados

O Brasil é um dos maiores produtores e exportadores agrícolas do Mundo e, portanto, um importante consumidor de fertilizantes. Em 2021, o agronegócio brasileiro exportou US\$120,59 bilhões, responsabilizando-se por 40,6% das vendas externas do País. Mais um resultado que consolidou a imagem do Brasil como potencial celeiro do Mundo. No início de 2022, o agronegócio, um dos alicerces do PIB, deparou-se com um obstáculo imprevisto, a guerra entre Rússia e Ucrânia, que está desorganizando inúmeras cadeias de comercialização globais, especialmente a de fertilizantes, da qual a agricultura brasileira é dependente (CEPEA, 2022).

Os fertilizantes são elementos essenciais para a produção agrícola, uma vez que possibilitam o aumento da produtividade por hectare e reduzem a degradação do solo agricultável. Em 2021, o País consumiu 43 milhões de toneladas de fertilizantes. O Brasil é o quarto maior consumidor de fertilizantes do Mundo, atrás dos Estados Unidos, da Índia e da China, e o consumo brasileiro corresponde a 8% de todo o produto no Mundo (IPEA, 2022). O diferencial é que os demais três países são grandes produtores de fertilizantes, enquanto o Brasil não.

O obstáculo imprevisto da atual guerra faz com que o governo brasileiro corra atrás de alternativas que supram, a curto prazo, os fertilizantes tradicionalmente fornecidos pela Rússia e Belarus. Em uma entrevista ao jornal da USP, o professor do Instituto de Energia e Ambiente da USP, Ildo Sauer, afirma que a questão dos fertilizantes tem sido tratada de forma inadequada nas últimas décadas no Brasil. A demanda total de fertilizantes necessitaria de três principais grupos:

- Macronutrientes: como fósforo, potássio e nitrogenados;
- Mesanutrientes: como enxofre, magnésio e cálcio, e;
- Micronutrientes como boro, zinco, bismuto, cobalto e outros.



O Brasil tem importado entre 75% e 85% dos fertilizantes (IPEA, 2022). Desta forma, a melhor opção é tratar separadamente os três macronutrientes, sendo o primeiro e de mais fácil produção atual, os nitrogenados.

O nitrogênio é a matéria prima básica para os fertilizantes nitrogenados, como a amônia e a ureia. Conforme mencionado no Capítulo 3 do presente estudo, para a obtenção da amônia é altamente dependente do gás natural.

Em relação ao mercado de fertilizantes no Brasil, a partir da década de 1990, houve um grande movimento de fusões e aquisições no setor. Recentemente, um dos últimos movimentos foi a saída da Vale Fertilizantes do setor, com a venda das plantas de produção de nitrogênio para a norueguesa Yara e de fosfato e potássio para a norte-americana Mosaic (FARIAS et al., 2020). As duas adquirentes são líderes globais no mercado de fertilizantes.

O “Plano de Negócios e Gestão 2017-2021” e posteriores da Petrobras previu a hibernação e venda de 100% de suas unidades de fertilizantes no Brasil por meio de uma decisão analisada em curto prazo prevendo rentabilidade. A Fábrica de Fertilizantes Nitrogenados (FAFEN) de Sergipe e Bahia, usava o gás natural para a fabricação dos fertilizantes, enquanto a fábrica de Araucária, no Paraná, usava um processo com resíduos de refinaria. No momento não fazia sentido importar gás natural, regaseificá-lo e depois convertê-lo em amônia e ureia, enquanto seria mais barato importar o gás via GNL ou importar amônia diretamente.

Com a elevação nos preços do gás natural no Brasil aliada aos fluxos globais de fusões e aquisições, a produção nacional de fertilizantes foi se tornando cada vez menos expressiva, ocasionando uma elevada dependência do fornecimento internacional e deixando o setor agrícola extremamente vulnerável às flutuações cambiais, aos custos logísticos intercontinentais e a escassez de insumos básicos (FARIAS et al., 2020).

A amônia verde é produzida a partir de hidrogênio sustentável por meio de reação do mesmo com o nitrogênio. Dessa forma, o hidrogênio verde pode substituir o gás natural como insumo na produção dos fertilizantes nitrogenados, apresentando



uma alternativa plausível para a redução da dependência das importações para esse item (ARMIJO, 2020).

Mesmo diante da positiva agenda de abertura do mercado de gás natural para a economia brasileira, ainda será possível utilizar o hidrogênio verde para a diminuição da dependência internacional do insumo de duas formas alternativas e complementares: geração de amônia diretamente a partir do hidrogênio verde e/ou mistura de hidrogênio verde no gás natural, promovendo o fornecimento de um gás com menos emissões de GEE e contribuindo para as metas de descarbonização do país (AHK, 2021).

6.4.2 Produção de Aço de Baixo Carbono

O aço é o metal mais utilizado na economia industrial e tem grande relevância para a construção da infraestrutura para a transição energética. No entanto, a grande quantidade liberada de gases do efeito estufa na sua produção não é compatível com esse papel estratégico. A siderurgia é o setor industrial que mais emite CO₂, responsável por cerca de 9% do total global de emissões diretas de combustíveis fósseis, de acordo com a *World Steel Association*. A maior parte das emissões do processo ocorre na etapa de redução do minério de ferro para a produção do ferro-gusa, na qual o ferro é separado do oxigênio com uso de um agente redutor. Na rota dominante a reação ocorre em alto-fornos usando coque de carvão mineral como agente redutor, o que responde pela emissão global de cerca de 2,5 bilhões de tCO₂ por ano para a atmosfera (UNFCCC, 2020).

Para que os esforços para redução das emissões sejam efetivos, melhorias de eficiência no alto-forno não são suficientes (*Energiewende and Wuppertal Institute*, 2021). A alternativa tecnológica mais promissora é a redução direta, em que o minério é transformado em ferro metálico através de reações químicas envolvendo o minério e os gases redutores. O produto da redução direta é o ferro-esponja, ou DRI (*Direct Reduced Iron*). O ferro-esponja pode ser briquetado para produzir HBI (*Hot Briqueted Iron*), um produto facilmente estocável e transportável (BOLL, 2021).



A produção de DRI com gás natural é uma tecnologia consolidada que oferece uma redução de 60% das emissões quando comparado com o processo padrão no alto-forno. Dependendo da configuração da planta, o processo facilita o sequestro e o uso ou a estocagem do CO₂ residual gerado no processo com gás natural ou biogás. Além disso, o processo permite a substituição do gás natural por hidrogênio, permitindo assim uma produção sem emissões relevantes de CO₂. (BOLL, 2021).

Como o DRI ou HBI é um produto intermediário sólido, seu beneficiamento demanda a fundição num forno elétrico a arco (EAF), que também é usado para o processo de conversão em aço. Sendo assim, a combinação do processo de redução direta do hidrogênio verde com a produção de aço em fornos elétricos representa uma estratégia de eletrificação do processo de produção de aço que é capaz de substituir o processo tradicional à base de coque metalúrgico. Se a energia elétrica usada no processo vier de fontes exclusivamente renováveis, essa transformação representa uma forma eficaz de descarbonizar a produção do aço (IRENA, 2019). A figura 40 ilustra as diferenças entre a rota de produção de aço mais difundida, utilizando alto-forno, e a rota HYBRIT de produção de aço utilizando hidrogênio verde como combustível e agente redutor. O processo HYBRIT, da empresa SSAB, está sendo testado em uma planta piloto na Suécia, em operação desde agosto de 2020.

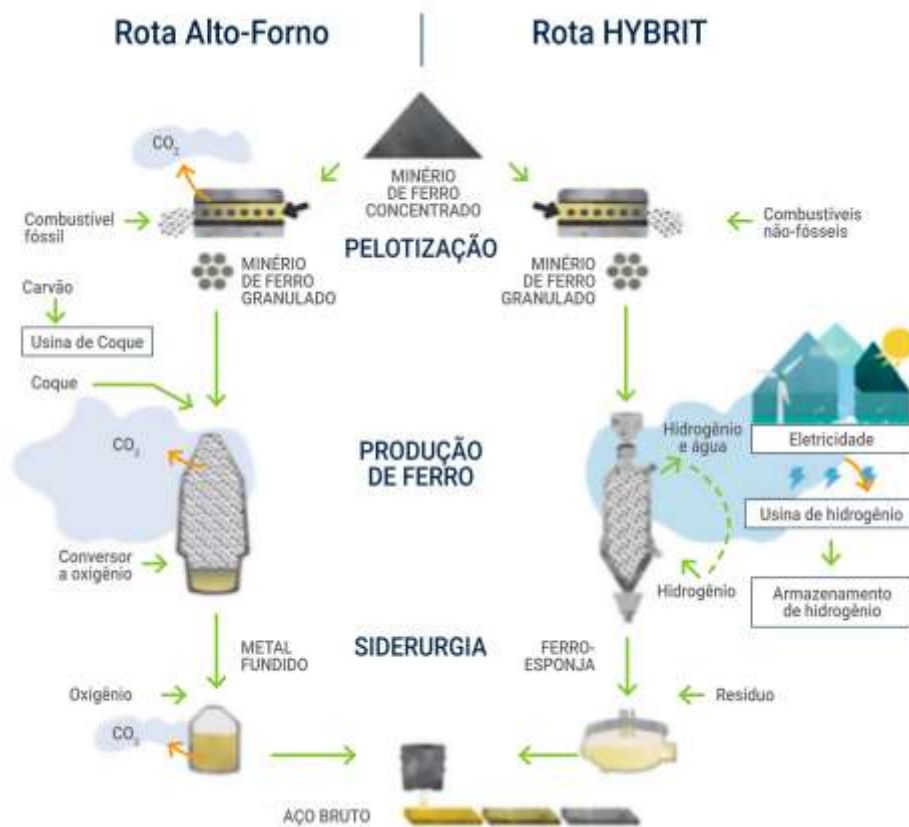


Figura 40. Diferentes rotas de produção do aço. Fonte: IRENA (2019).

O Brasil também tem vantagens comparativas extraordinárias para participar no processo da descarbonização da indústria siderúrgica global. O país tem papel de destaque mundial no suprimento de minério de ferro, ocupando o segundo lugar entre os países produtores e em reservas. Somada a isso, a abundância de energias renováveis, conforme detalhado no item 6.3, e água dá ao país o potencial de produzir hidrogênio verde a custos menores. Os investimentos para produzir HBI ou aço de baixo carbono para o mercado internacional podem ser uma excelente oportunidade para o setor, uma vez que um produto de maior valor agregado seria exportado, atraindo investimentos e gerando empregos na economia interna brasileira (RESET, 2022).

5.4.3. O transporte e a armazenagem de H₂V no Brasil

A tecnologia de armazenagem a ser utilizada em uma potencial cadeia de H₂V no Brasil deve ser norteadada pelo uso final da molécula. Portanto, conforme mencionado no Capítulo 4.3.1, para volumes pequenos e de utilização no curto prazo, haverá a priorização de tanques de armazenamento e para volumes maiores e a



serem utilizados no longo prazo, é possível que se lance mão do estoque geológico do produto.

Os principais estudos de armazenamento geológico de gás no Brasil têm como foco o aprisionamento de CO₂ para o emprego em âmbito nacional da tecnologia de CCUS (EPE, 2022). Entretanto, respeitando as diferenças entre as propriedades químicas do gás carbônico e do hidrogênio, é possível ter um norte para a avaliação do potencial brasileiro de estoque geológico de H₂. De acordo com a EPE (2022), os trabalhos iniciais de avaliação da técnica no Brasil incluem:

"(...)avaliação de aquíferos salinos (KETZER et al., 2009; LIMA et al., 2011; DALLA VECCHIA et al., 2020), de camadas de carvão (SOARES et al., 2007; WENIGER et al., 2010; KALKREUTH et al., 2013; SANTAROSA et al., 2013), e folhelhos na Bacia do Paraná (MASULINO, 2020; DE OLIVEIRA et al., 2021; PELISSARI, 2021; ROCHA, 2021), recuperação avançada de óleo na Bacia do Recôncavo (DINO & GALLO, 2009; Câmara et al., 2020), e também nas Bacias de Campos (ROCKETT et al., 2012; ROCKETT et al., 2013) e Santos (MELO et al., 2011; CIOTTA & TASSINARI, 2020; GODOI & MATAI, 2021). " (EPE, 2022)

Dentro dos estudos conduzidos pela comunidade científica brasileira no tema, as bacias sedimentares foram classificadas de acordo com a sua prospectividade para o armazenamento de CO₂. Conforme a Figura 41, destacam-se as bacias do Paraná, Campos, Santos, Potiguar e Recôncavo.

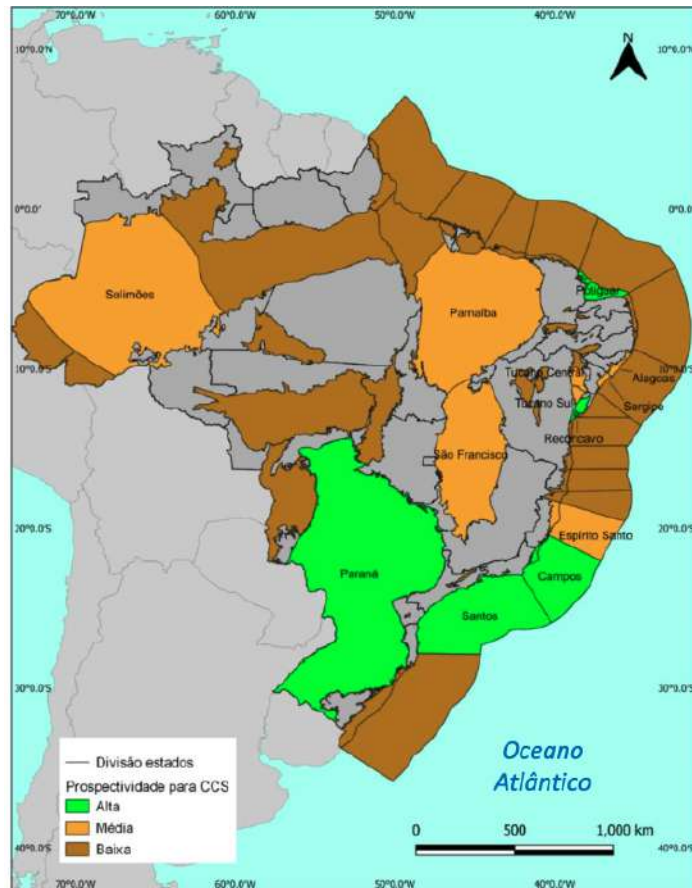


Figura 41. Prospectividade para o armazenamento de CO₂. Adaptado de EPE, 2021 apud KETZER et al. (2016).

Enquanto isso, o transporte de H₂ é feito atualmente na forma comprimida exclusivamente via modal rodoviário, o que encarece o custo do produto principalmente para longas distâncias. Como exemplo, hoje em dia, uma usina termelétrica localizada em Manaus tem o seu abastecimento de H₂ com origem na Bahia e no Ceará feito via caminhão, o que traz uma distância de mais de 4.000 km a ser percorrida entre o fornecedor e o consumidor do produto. O mercado brasileiro de H₂ ainda carece de falta de escala para que seja economicamente viável o emprego da liquefação no transporte do produto por longas distâncias.

Paralelamente, o Brasil já conta com iniciativas que visam a injeção de H₂ nos gasodutos nacionais. Em março de 2022, o Senador Jean Paul Prates (PT/RN) apresentou o Projeto de Lei nº 725/2022, onde propõe inserir o hidrogênio na lei nº 9.478/1997, a Lei do Petróleo. No texto, o hidrogênio sustentável no Brasil é definido como sendo aquele produzido a partir de fonte solar, eólica, biomassa, biogás e hidráulica. Além disso, o PL propõe em seu artigo 4º inserir o H₂ nos gasodutos nacionais:



I – 5%, a partir de 1º de janeiro de 2032; II – 10%, a partir de 1º de janeiro de 2050. §1º O volume de que trata o caput deverá conter proporção obrigatória de hidrogênio sustentável de no mínimo 60%, no caso do inciso I, e de no mínimo 80%, no caso do inciso II. §2º. O percentual de que trata o caput poderá ser escalonado de forma incremental em parcelas, de acordo com a capacidade de segurança de transporte e abastecimento. (BRASIL, 2022)

Caso haja a aprovação do Projeto de Lei e ele seja posteriormente posto em prática, o H₂V produzido nas regiões mais competitivas será introduzido na infraestrutura de gás natural (figura 42) e utilizado para a redução de emissões de CO₂ de térmicas a gás. Vale destacar, que as usinas térmicas são hoje fontes que oferecem lastro ao SIN, ou seja, conferem a ele resiliência frente à matriz elétrica majoritariamente renovável e cada vez mais intermitente. Dessa forma, o H₂V conseguiria aumentar ainda mais a renovabilidade da matriz elétrica brasileira.

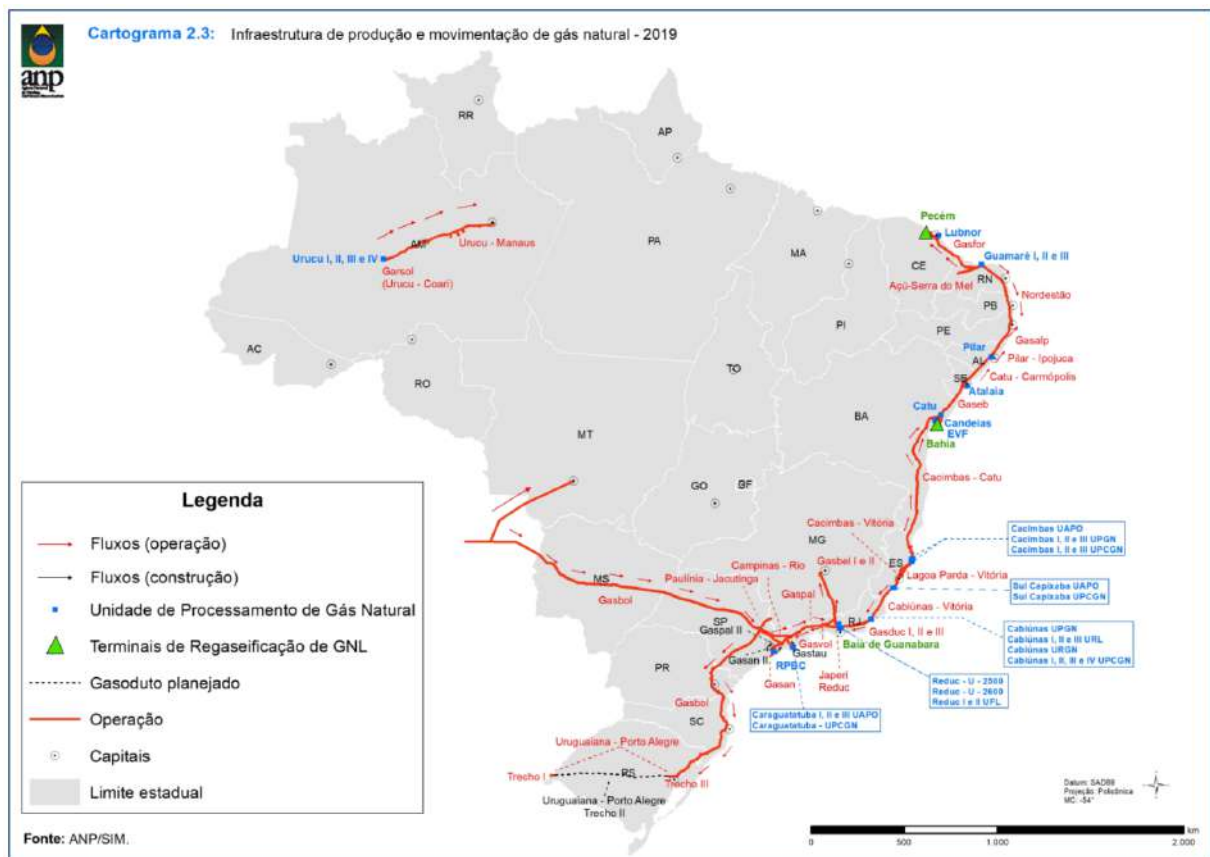


Figura 42. Infraestrutura de produção e movimentação de gás natural. Fonte: ANP, 2019.



7. CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo analisar a oportunidade de desenvolvimento atual da cadeia de H₂V no Brasil e avaliar o seu potencial de expansão e de geração de emprego interno, tendo como base o potencial da molécula na descarbonização da economia e as iniciativas internacionais em curso. Através do estudo de caso, foi possível concluir que o Mundo se encontra em um ponto crucial para alavancar medidas de cortes de emissões de CO₂e e frear o aquecimento global. Nesse sentido, o emprego de H₂V na descarbonização de setores de difícil eletrificação e no impulso da renovabilidade de matrizes elétricas vem ganhando destaque.

Atualmente, o Brasil se figura como um país com forte potencial de produção de hidrogênio verde, uma vez que possui uma matriz elétrica majoritariamente renovável e cuja produção de eletricidade excede o consumo em 85,3 TWh (EPE, 2022). O País ainda possui o menor custo nivelado de produção para a molécula no longo prazo (BNEF, 2022).

Tendo como base as iniciativas nacionais e internacionais em curso, o desenvolvimento atual da cadeia brasileira de H₂V está sendo guiado principalmente pela finalidade de exportação do produto. Dessa forma, os incentivos fiscais, bem como os recursos naturais e sociais brasileiros estão sendo empregados em prol da descarbonização de economias externas.

Nesse cenário, a indústria e a rica matriz energética brasileira permanecerão com potenciais internos não explorados, o que é condizente com as metas pouco ambiciosas do país expostas na sua NDC de 2022 e com o histórico do país de falta de investimento no desenvolvimento interno econômico e social.

Ao priorizar o uso do excedente de energia elétrica para a produção de H₂V com destino à exportação, o Brasil não só deixa de lado a possibilidade de utilizar o produto para dar maior resiliência à sua matriz elétrica, como também se mantém como apenas um exportador de commodity, sem agregar valor ao produto e à comunidade local.



Mesmo que os estudos apontem para a exportação como a atividade fim de maior viabilidade econômica e lucratividade (CASTRO et al., 2021), a produção de H₂V só trará benefícios concretos para o país se os investimentos públicos forem utilizados tanto para a viabilização do uso interno do produto quanto para a criação de empregos e formação de profissionais qualificados.

Diante dos fatos apresentados a “sustentabilidade” do hidrogênio verde no Brasil pode ser questionada, uma vez que a maior parte dos investimentos estão voltados apenas para exportação do H₂V sem um planejamento de incorporação do produto a processos já existentes no Brasil, sem a garantia que o hidrogênio realmente será de fonte renovável e principalmente, sem análise de impactos sócio-ambientais à comunidade local.

O trabalho apresenta duas indústrias no Brasil que têm grandes oportunidades de implementar o H₂V de forma a incorporar a produção para utilização no mercado interno, na produção de fertilizantes e no aço. Desta forma, é possível agregar valor ao produto, e, principalmente, deixar de ser um exportador de commodities, investindo no desenvolvimento local e capacitação dos brasileiros.

Enquanto isso, países como as nações da União Europeia importarão o produto brasileiro para a descarbonização de suas próprias economias. Este movimento será feito através do desenvolvimento de uma cadeia de valor interna ao redor do produto nessas Nações, algo que o Brasil não vislumbra nos projetos com maiores aportes financeiros anunciados até então.

Vale destacar que o tema da produção, aplicação e distribuição do H₂V é recente e demanda mais estudos para que possa ser compreendido na sua totalidade. Dessa forma, algumas sugestões de estudos futuros são:

- Estudos de casos setoriais mostrando potenciais aplicações do H₂V no Brasil, suas viabilidades econômicas, desafios e potenciais de geração de emprego;
- Exploração dos desafios referentes aos elos de armazenagem e distribuição do H₂V no Brasil e;
- Elaboração de estudos que quantifiquem o impacto socioambiental nas comunidades locais em que os projetos de exportação estão sendo instalados.



8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEEÓLICA, Boletim anual 2021. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2022/07/424_ABEEOLICA_RELATORIO-ANUAL-2021_V3.pdf>.

Acesso em: 10 de julho

ABSOLAR, Estudo de Inserção de Tecnologia de Armazenamento ao SIN. Disponível em: <Resumo executivo: ABSOLAR Inside - Estudo de Inserção de Tecnologia de Armazenamento ao SIN - ABSOLAR Inside>. Acesso em: 12 de julho.

ABADIE, E. **Processos de Refino**. Apostila do Curso de Formação de Operadores de Refinaria, 2002. Brasil, 2002. Disponível em: <http://www.ifba.edu.br/professores/iarasantos/ENG%20504%20_%20Processos%20Qu%C3%ADmicos/literaturas/Apostilas%20Petrobrás/processosderefino.pdf>. Acesso em: 21 mai. 2022.

ABDIN, Z.; MERIDA, W. **Hybrid energy systems for off-grid power supply and hydrogen production based on renewable energy: a techno-economic analysis**. Energy Conversion and Management, v.196, p.1068-1079, 15 set. 2019.

ABE, I. **Physical and Chemical Properties of Hydrogen**. Energy Carriers and Conversion Systems, v.1, 2007.

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA. **Energy Fact Sheet: Why does Russian oil and gas matter?**. International Energy Agency. [S. l.], 21 mar. 2022. Disponível em: <<https://www.iea.org/articles/energy-fact-sheet-why-does-russian-oil-and-gas-matter>>. Acesso em : 14 mai. 2022

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA. **Hydrogen - more efforts needed**. International Energy Agency. [S. l.], 2021. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/hydrogen>>. Acesso em: 10 jul. 2022.

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA. **Net Zero by 2050 - A Roadmap for the Energy Sector**. International Energy Agency. [S. l.], 17 mai. 2021. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>> . Acesso em : 30 jul. 2022.



AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA. **The Future of Hydrogen**. International Energy Agency. [S. l.], jun. 2019. Disponível em < <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen> >. Acesso em : 18 mai. 2022

AHK. **Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro - Panorama Atual e Potenciais para o Hidrogênio Verde**. Câmara de Comercio e Indústria Brasil-Alemanha, 2021. Disponível em: <https://www.energypartnership.com.br/fileadmin/user_upload/brazil/media_elements/Mapeamento_H2_-_Diagramado_-_V2h.pdf>. Acesso em: 02 ago. 2022.

ANEEL. **Matriz Elétrica Brasileira**. Agência Nacional de Energia Elétrica, Brasília, 2022. Disponível em: <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoibm9kaW50YjYjYjYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2liwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9>>. Acesso em: 7 ago. 2022.

ANEEL. **Sistema de Informações de Geração da Aneel**. Agência Nacional de Energia Elétrica, Brasil, 14 ago. 2022. Disponível em: <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoibm9kaW50YjYjYjYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2liwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9>> . Acesso em: 18 jul. 2022.

ANGELO, M. **Hub de hidrogênio verde no Ceará tem parceria com mineradora australiana, generosos incentivos fiscais e impactos desconsiderados**. Observatório da Mineração. Brasil, 07 jul. 2022. Disponível em: <<https://observatoriodamineracao.com.br/hub-de-hidrogenio-verde-no-ceara-tem-parceria-com-mineradora-australiana-generosos-incentivos-fiscais-e-impactos-desconsiderados/?fbclid=IwAR2kEK6khQAQmNPKIn1fRTt7gpvdIFRCMrVHhDUbHSxv3IKel6iGVCKYnEc>>. Acesso em: 31 jul. 2022.

ANP. **Metanol**. Ministério de Minas e Energia. Brasil, 09 nov. 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/metanol>>. Acesso em : 25 mai. 2022



ARMIJO, J; PHILIBERT, C. **Flexible production of green hydrogen and ammonia from variable solar and wind energy: Case study of Chile and Argentina.** International Journal of Hydrogen Energy, v.45, Issue 3, 13 jan. 2020, p.1541-1558

BBARROS, R. **Com 85% dos fertilizantes importados, Brasil lança plano de produção local.** Poder 360, São Paulo, 2022. Disponível em: <<https://www.poder360.com.br/agronegocio/com-85-dos-fertilizantes-importados-brasil-lanca-plano-de-producao-local/>>. Acesso em: 02 ago. 2022.

BCB. **Boletim Focus: Relatório de Mercado.** Banco Central do Brasil. Distrito Federal, 22 jul. 2022. Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/content/focus/focus/R20220722.pdf>>. Acesso em: 31 jul. 2022

BNEF; TENGLER. 1 H 2021 Hydrogen Levelized Cost Update, 2021.

BIEBUYCK, B. **Europe forges ahead with clean hydrogen.** The European Files. [S.l.], 11 mar. 2022. Disponível em: <<https://www.europeanfiles.eu/non-classe/europe-forges-ahead-with-clean-hydrogen#:~:text=Europe%20is%20promoting%20more%20hydrogen,information%20to%20accelerate%20the%20process>>. Acesso em: 07 ago. 2022.

BNAMÉRICAS. **Os planos de hidrogênio verde do porto de Pecém, no Brasil.** BNAméricas, [S.l.], 26 nov. 2021. Disponível em: <<https://www.bnamericas.com/pt/entrevistas/os-planos-de-hidrogenio-verde-do-porto-de-pecem-no-brasil>>. Acesso em: 31 jul. 2022.

BNAMÉRICAS. **Por que a Cactus Energia verde planeja investir em hidrogênio verde no Brasil.** BNAméricas, [S.l.], 08 fev. 2022. Disponível em: <<https://www.bnamericas.com/pt/entrevistas/por-que-a-cactus-energia-verde-planeja-investir-em-hidrogenio-verde-no-brasil>>. Acesso em: 31 jul. 2022.

BÖLL, H. **Desafios e oportunidades para o Brasil com o Hidrogênio verde.** e+Energia, Brasil, 2021. Disponível em: <https://br.boell.org/sites/default/files/2021-05/Relatorio_Hidrogenio_Verde_Boll_FINAL.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2022



BRASIL. **Lançado o Plano Nacional de Fertilizantes**. Ministério da Economia, Brasília, 20 abr. 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/economia/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/principais-acoes-na-area-economica/acoes-2022/lancado-o-plano-nacional-de-fertilizantes-202220132050>>. Acesso em: 10 ago. 2022.

BRASIL. **Lei Nº 14.299, de 5 de janeiro de 2022**. Diário Oficial da União, Poder Legislativo, Brasília, DF, 05 jan. 2022. Disponível em: <https://in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.299-de-5-de-janeiro-de-2022-372226134?utm_source=newsletters+epbr&utm_campaign=5b0443c825-epbr-comece-seu-dia_20220106&utm_medium=email&utm_term=0_5931171aac-5b0443c825-183400681>. Acesso em: 16 jul. 2022.

BRASIL. **Projeto de Lei nº725/2022**. Senado Federal, Poder Legislativo, Brasília, DF, 28 mar. 2022. Disponível em: <<https://www25.senado.leg.br/web/atividade/materias/-/materia/152413>>. Acesso em: 10 ago. 2022.

BRASIL. **Resolução nº2, de 10 de fevereiro de 2022**. Diário Oficial da União, Poder Executivo, Brasília, DF, 10 fev. 2022. Disponível em: < <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/cnpe-aprova-resolucoes-sobre-governanca-do-programa-nacional-do-hidrogenio-e-exploracao-de-petroleo/resolucao2cnpe.pdf> >. Acesso em: 17 jun. 2022

BROWN, A; GRÜNBERG, N. **China's Nascent Green Hydrogen Sector: How policy, research and business are forging a new industry**. Mercator Institute for China Studies. Alemanha, 28 jun. 2022. Disponível em: <<https://merics.org/en/report/chinas-nascent-green-hydrogen-sector-how-policy-research-and-business-are-forging-new>>. Acesso em:

CALDEIRA, C. e SERRANO, L. R. **O Brasil tem capacidade de ser autossuficiente na produção de fertilizantes**. Jornal da USP, São Paulo, 2022. Disponível em : <<https://jornal.usp.br/atualidades/o-brasil-tem-capacidade-de-ser-autossuficiente-na-producao-de-fertilizantes/>>. Acesso em: 02 ago. 2022.



CANAL ENERGIA. **Enegix assina com Ceará memorando para projeto de hidrogênio verde de UeS\$ 5,4 bi.** Canal Energia. Disponível em: <<https://www.canalenergia.com.br/noticias/53165231/enegix-assina-com-ceara-memorando-para-projeto-de-hidrogenio-verde-de-us-54-bi>>. Acesso em: 31 jul. 2022

CARVALHO L. **Veja o que planejam as empresas para o hub de hidrogênio verde no Ceará.** Diário do Nordeste, 28 nov. 2022. Disponível em: <<https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/negocios/veja-o-que-planejam-as-empresas-para-o-hub-de-hidrogenio-verde-no-ceara-1.3163489>>. Acesso em: 31 jul. 2022.

CASTRO, N.; CHAVES; A. e DORES, A.. **O Brasil na Transição Energética para o Hidrogênio Verde.** Valor Econômico, Rio de Janeiro, 21 jan. 2021. Disponível em: <<https://valor.globo.com/opiniao/coluna/o-brasil-na-transicao-energetica-para-o-hidrogenio-verde.ghtml>>. Acesso em 22 jun. 2022.

CEKINSKI, E. **A situação dos fertilizantes no Brasil.** Diário do Comércio, Minas Gerais, 2022. Disponível em: <<https://diariodocomercio.com.br/opiniao/a-situacao-dos-fertilizantes-no-brasil/>>. Acesso em: 02 de ago. 2022.

CEPAL; CGEE. **Panorama dos investimentos em inovação em energia no Brasil: dados para um grande impulso energético.** Organização das Nações Unidas: Cepal. Chile, 2020. Disponível em: <http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/45908/1/S2000343_pt.pdf>. Acesso em: 31 jul. 2022

CEPAL. **Energy Big Push (Grande Impulso Energia) Brasil.** Organização das Nações Unidas: Cepal. [S.l.], 2020. Disponível em: <<https://www.cepal.org/pt-br/proyectos/energy-big-push-grande-impulso-energia-brasil>>. Acesso em: 08 ago. 2022.

CEPEA. **Perspectivas de 2022.** Cepea-Esalq, São Paulo, 07 jan. 2021. Disponível em: <<https://www.cepea.esalq.usp.br/br/releases/cepea-perspectivas-de-2022.aspx>>. Acesso em : 11 ago. 2022



CGEE. **Grande Impulso Energia (Energy Big Push)**. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. [S./], 11 jul. 2019. Disponível em: <https://www.cgee.org.br/projetos/-/asset_publisher/W0hl4EIAHtL5/content/projeto-grande-impulso-energia-energy-big-push-?inheritRedirect=false>. Acesso em: 31 jul. 2022.

CHIAPPINI, G. **CNPE aprova governança do Programa Nacional do Hidrogênio**. Epbr. [S. /], 23 jun. 2022. Disponível em: < <https://epbr.com.br/cnpe-aprova-governanca-do-programa-nacional-do-hidrogenio/> >. Acesso em: 04 ul. 2022

CHIAPPINI, G. **Demanda de hidrogênio deve superar 200 milhões de toneladas em 2030, diz IEA**. Epbr, [S. /], 2021. Disponível em: <<https://epbr.com.br/demanda-de-hidrogenio-deve-superar-200-milhoes-de-toneladas-em-2030-diz-iea/>>. Acesso em: 25 jul. 2022.

CHIAPPINI, G. **Fortescue anuncia US \$6 bi para produção de hidrogênio verde no Ceará**. Epbr. Brasil, 29 abr. 2022. Disponível em: <<https://epbr.com.br/fortescue-anuncia-us-6-bi-para-producao-de-hidrogenio-verde-no-ceara/>>. Acesso em: 31 jul. 2022.

CLIFFORD, C. **How higher and more volatile energy prices will affect the move to clean energy**. CNBC. [S. /], 17 mar. 2022. Disponível em < <https://www.cnbc.com/2022/03/17/what-higher-volatile-energy-prices-mean-for-clean-energy-transition.html> >. Acesso em : 21 mai. 2022

CLIMATE WATCH. GHG Emissions. **Climate Watch: GHG Emissions**. Climate Watch. [S. /], 2020. Disponível: <https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?end_year=2019&start_year=1990>. Acesso em: 3 abr. 2022.

COMISSÃO EUROPEIA. **EU Emissions Trading System (EU-ETS)**. *European Commission website*. [S./], [20–]. Disponível em: <https://ec.europa.eu/clima/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets_en>. Acesso em: 10 de julho de 2022.

COMISSÃO EUROPEIA. **REPowerEU: Ação europeia conjunta para uma energia mais acessível, segura e sustentável**. *European Commission website*. França, 08 mar. 2022. Disponível em:



<https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/pt/ip_22_1511>. Acesso em : 14 mai. 2022

COMISSÃO EUROPEIA. **Russia's war on Ukraine: EU adopts sixth package of sanctions against Russia.** *European Commission website*. Bélgica, 03 jun. 2022. Disponível em: <https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_22_2802>. Acesso em: 06 jul. 2022

COMPLEXO DO PECÉM. **Orientações sobre incentivos fiscais.** Complexo Industrial e Portuário do Pecém. Disponível em: <<https://www.complexodopecem.com.br/orientacoes-sobre-incentivos-fiscais/>>. Acesso em: 31 jul. 2022.

CONSELHO EUROPEU. **Fit for 55.** *European Council, [S.]*, 30 jun. 2022. Disponível em: <<https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/>>. Acesso em: 05 ago. 2022

COSTA, D.. **Células Combustíveis: Uma Abordagem Contemporânea.** Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Católica de Brasília, Brasil, nov. 2007. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/9180276-Daniel-alves-costa-celulas-combustiveis-uma-abordagem-contemporanea.html>>. Acesso em: 01 ago. 2022.

DA CRUZ. **Produção de Hidrogênio em Refinarias de Petróleo: Avaliação Exergética e Custo de Produção.** Dissertação de Mestrado - Universidade de São Paulo, Brasil, 2010. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3150/tde-17082010-123008/publico/Dissertacao_Flavio_Eduardo_da_Cruz.pdf>. Acesso em: 01 ago. 2022

DE ALENCAR, J.F. **Avaliação do efeito da temperatura na morfologia do ferro metálico e na formação da colagem em diferentes tipos de pelos de redução direta.** Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Minas Gerais. Brasil, 2015. Disponível em: < https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUBD-A9DGRZ/1/disserta__o_final_jean_alencar.pdf >. Acesso em: 25 mai. 2022



DE CASTRO, N. *et al.* **Perspectivas da Economia do Hidrogênio no Setor Energético Brasileiro.** Grupo de Estudos do Setor Elétrico UFRJ, Texto de Discussão do Setor Elétrico, nº100, jun. 2021.

DEUTSCHE WELLE. **O Protocolo de Kyoto foi marco na proteção climática, mas insuficiente.** G1, Globo. Brasil, 16 fev. 2020. Disponível em: <<https://g1.globo.com/mundo/noticia/2020/02/16/protocolo-de-kyoto-foi-marco-na-protecao-climatica-mas-insuficiente.ghtml>>. Acesso em: 09 jul 2022.

DIÁRIO DO NORDESTE. **O Ceará assina primeiro pré-contrato para Hub de Hidrogênio Verde no Pecém.** Diário do Nordeste, 15 jun. 2022. Disponível em: <<https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/negocios/ceara-assina-primeiro-pre-contrato-para-hub-de-hidrogenio-verde-no-pecem-1.3244486>>. Acesso em: 17 jul. 2022

DONTHU, N. *et al.* **How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines.** Journal of Business Research, v.133, p. 285-296, 2021.

EDP BRASIL. **P&D Pecém H2V.** [S.], set. 2021. Disponível em: <<https://brasil.edp.com/sites/edpbr/files/2022-03/P%26D%20Pec%C3%A9m%20H2V%20-%20Desenvolvimento%20de%20roadmap%20e%20projeto%20piloto.pdf>>. Acesso em: 17 jul. 2022

ENGIE. **Hidrogênio verde pode posicionar o Brasil como potência energética.** Engie, Além da Energia, São Paulo, 2022. Disponível em: <<https://www.alemداenergia.engie.com.br/hidrogenio-verde-pode-posicionar-brasil-como-potencia-energetica/#:~:text=Em%20um%20relat%C3%B3rio%20publicado%20na,fontes%20impas%2C%20%C3%A9%20um%20diferencial>>. Acesso em: 14 jul. 2022.

EPE. **Bases para a consolidação da estratégia brasileira do hidrogênio.** Ministério de Minas e Energia, Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados->



abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/Hidroge%CC%82nio_23Fev2021NT%20(2).pdf>. Acesso em: 20 jun. 2022.

EPE. Hidrogênio Azul:Produção a partir da reforma do gás natural com CCUS. Ministério de Minas e Energia, Brasília, 2022. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-654/NT%20Hidrogenio%20Azul.pdf>>. Acesso em: 20 jun. 2022.

EPE. Hidrogênio Cinza:Produção a partir da reforma a vapor do gás natural. Ministério de Minas e Energia, Brasília, 2022. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-654/NT%20Hidrogenio%20Cinza.pdf>>. Acesso em: 20 jun. 2022.

EPE. MME apresenta ao CNPE proposta de diretrizes para o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2). Ministério de Minas e Energia. Brasília, 04 ago. 2022. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/mme-apresenta-ao-cnpe-proposta-de-diretrizes-para-o-programa-nacional-do-hidrogenio-pnh2->>>. Acesso em: 23 mai. 2022

EPE. Plano Decenal de Energia 2031. Ministério de Minas e Energia. Brasília, 2022. p.341-366. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/PDE%202031_RevisaoPosCP_rvFinal.pdf>. Acesso em: 17 jul. 2022.

EPE. Sistema de informações geográficas do Setor Energético Brasileiro. Webmap Empresa de Pesquisa Energética - EPE, 2022. Disponível em: <<https://gisepeprd2.epe.gov.br/WebMapEPE/>>. Acesso em: 12 jul. 2022.

FORMIGONI, I. A importação de fertilizantes pelo Brasil foi recorde para abril. Farm News, São Paulo, 2022. Disponível em: <<https://www.farmnews.com.br/mercado/importacao-de-fertilizantes-pelo-brasil-foi-recorde-para-abril-em->>



GUTIERREZ-MARTÍN, F.; AMODIO, L; PAGANO, M. **Hydrogen production by water electrolysis and off-grid solar PV**. *International Journal of Hydrogen Energy*, v.46, 57, p.29038-29048, 18 ago. 2021

H2GREENTECH. **A Hydrogen Strategy for A Climate-Neutral Europe**. *H2GreenTech*, [S.l.], 08 jan. 2021. Disponível em: <<https://www.h2greentech.eu/a-hydrogen-strategy-for-a-climate-neutral-europe/#:~:text=The%20EU%20Hydrogen%20Strategy%20will,the%20EU's%20greenhouse%20gas%20emissions.>>. Acesso em: 02 jul. 2022

HEYNES, G. **Hydrogen Europe joins the African Hydrogen Partnership in order to scale the hydrogen supply chain**. *H2View*, [S.l.], 03 mai. 2022. Disponível em: <<https://www.h2-view.com/story/hydrogen-europe-joins-the-african-hydrogen-partnership-in-order-to-scale-the-hydrogen-supply-chain/>> Acesso em: 14 ago. 2022

HYDROGEN COUNCIL; MCKINSEY&COMPANY. **Hydrogen for Net-Zero**. *Hydrogen Council*, [S.l.], nov. 2021. Disponível em: <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2021/11/Hydrogen-for-Net-Zero_Full-Report.pdf>. Acesso em: 09 jul. 2022

HYDROGEN COUNCIL. **Hydrogen Council Membership Grows to More Than 130 Members, With Eleven New Companies Committing to Foster Development of The Hydrogen Economy**. *Hydrogen Council*, Bélgica, 26 jan. 2022. Disponível em: <<https://hydrogencouncil.com/en/hydrogen-council-membership-grows-to-more-than-130-members-with-twelve-new-companies-committing-to-foster-development-of-the-hydrogen-economy/>>. Acesso em: 30 jun. 2022

HYDROGEN COUNCIL. **Hydrogen Scaling Up: A Sustainable Pathway for the Global Energy Transition**. *Hydrogen Council*, [S.l.], 13 nov. 2017. Disponível em: <<https://www.h2knowledgecentre.com/content/policypaper1201?crawler=redirect&mime-type=application/pdf>> . Acesso em: 05 ago. 2022

IEMA. **Na contramão do Mundo, Brasil aumentou emissões em plena pandemia**. Instituto de Energia e Meio Ambiente. Disponível em:



<<http://energiaeambiente.org.br/na-contramao-do-mundo-brasil-aumentou-emissoes-em-plena-pandemia-20211028>>. Acesso em: 05 jul. 2022.

INCER-VALVERDE, J. **Hydrogen-driven Power-to-X: State of the art and multicriteria evaluation of a study case**. *Energy Conversion and Management*, v. 266, 15 ago. 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **PIB cresce 3,2% no 4º tri, mas fecha 2020 com queda de 4,1%, a maior em 25 anos**. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencianoticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/30166-pibcresce-3-2-no-4-tri-mas-fecha-2020-com-queda-de-4-1-amaior-em-25-anos>>. Acesso em 15 de julho de 2021.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **IPCC**. IPCC. [S. l.], 2022. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch>>. Acesso em: 02 abr. 2022

INTERREG. **Interreg Slovenia-Austria**. Interreg Slovenia-Austria European Commission, Eslovênia, [20—]. Disponível em: <<https://interreg.eu/programme/interreg-slovenia-austria/>>. Acesso em: 07 ago. 2022

IPEA. **Ipea participa da construção do Plano Nacional de Fertilizantes**. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, Brasília, 18 mar. 2022. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=39026>. Acesso em: 18 jul. 2022.

JUNIOR, S. *et al.* **Células a combustível: possibilidades e limitações**. *Research, Society and Development*, v. 11, n.5, 2022.

JUNIOR. **Síntese de Metanol Via Hidrogenação do Dióxido de Carbono: Modelagem e Otimização no Simulador DWSIM**. Trabalho de Graduação - Universidade Federal de São Carlos, Brasil, 2021. Disponível em: <<https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/14537/TCC-ADILSON%20DE%20OLIVEIRA%20LEANDRO%20JUNIOR.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 02 ago. 2022



KABINET WATERSTOF. **Government Strategy on Hydrogen. Kabinet Waterstof, Países Baixos, 15 jul. 2022.** Disponível em <https://1fa05528-d4e5-4e84-97c1-ab5587d4aabf.filesusr.com/ugd/45185a_f22f45f329cf4841b7604f0c4e6d9c0b.pdf>.

Acesso em: 18 jul. 2022

KHOUJA, A. **Hydrogen production costs of a polymer electrolyte membrane electrolysis powered by a renewable hybrid system.** International Journal of Hydrogen Energy, v. 46, 27, p.14005-14023, 19 abr. 2021

KIKUMOTO, B. **O que é o LCOE e como utilizar nos projetos fotovoltaicos?.** Canal Solar, Brasil, 22 dez. 2020. Disponível em: <[Acesso em: 02 ago. 2022](https://canalsolar.com.br/o-que-e-o-lcoe-e-como-utilizar-nos-projetos-fotovoltaicos/#:~:text=C%C3%A1culo%20do%20LCOE,%20LCOE%C3%A9%20definido%20como%20a%20divis%C3%A3o%20dos%20custos%20totais,toda%20a%20opera%C3%A7%C3%A3o%20da%20usina.>>.</p></div><div data-bbox=)

KUMAR, S; HIMABINDU, V. **Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review.** Material Science for Energy Technologies, v.2, 3, p442-454, dez. 2019.

LACERDA, F.; NOBRE, P. **Aquecimento global: conceituação e repercussões sobre o Brasil.** Revista Brasileira de Geografia Física, v. 03, p.14-17, 2010.

LIU, Z. et al. **Challenges and opportunities for carbon neutrality in China.** Nature Reviews Earth & Environment, v.3, p.141-155, 2022.

LUIZ, M. **Saiba o que é o hidrogênio verde, o combustível do futuro.** IstoÉ. [S.l.], 2022. Disponível em: <<https://istoe.com.br/hidrogenio-verde-vira-realidade/>>. Acesso em: 03 ago. 2022.

MACEDO, S.; PEYEL, D. **Prospects and economic feasibility analysis of wind and solar photovoltaic hybrid systems for hydrogen production and storage: A case study of the Brazilian electric power sector.** Hydrogen Energy, 2022.

MACHADO, N. **Qair Brasil vai investir US\$ 6,95 bi em hidrogênio verde no Ceará.** Epbr. Brasil, 21 jul. 2021. Disponível em: <<https://epbr.com.br/qair-brasil-vai-investir-us-695-bi-em-hidrogenio-verde-no-ceara/>>. Acesso em: 03 ago. 2022



MARENGO, J. **Água e mudanças climáticas**. Estudos Avançados USP, v. 22, n.63, p. 83-96, 2008.

MASSON-DELMOTTE, V. et al. **Summary for Policymakers Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Sixth Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>>. Acesso em: 20 jun 2022.

MATSUMURA, E. *et al.* **Opinião: O Brasil pode liderar a descarbonização da siderurgia**. RESET, São Paulo, 2022. Disponível em: <<https://www.capitalreset.com/opinioao-o-brasil-pode-liderar-a-descarbonizacao-da-siderurgia/>>. Acesso em: 03 ago. 2022.

MCDONAGH, S. *et al.* **Hydrogen from offshore wind: investor perspective on the profitability of a hybrid system including for curtailment**. Applied Energy, v.265, 01 mai. 2020.

MEIRELLES, T. **Acordo de Paris completa cinco anos com lições aprendidas**. World Wide Fund for Nature. [S. l.], 12 dez. 2020. Disponível em: <<https://www.wwf.org.br/?77471/Acordo-de-Paris-completa-cinco-anos-com-licoes-aprendidas>>. Acesso em: 09 jul. 2022

NAKANO, J. **China Unveils its First Long-Term Hydrogen Plan**. Center for Strategic and International Studies. [S. l.], 28 mar. 2022. Disponível em: <<https://www.csis.org/analysis/china-unveils-its-first-long-term-hydrogen-plan>>. Acesso em: 14 mai. 2022

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **The NOAA Annual Greenhouse Gas Index (AGGI)**. U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration. Estados Unidos, 2022. Disponível em: <<https://gml.noaa.gov/aggi/aggi.html>>. Acesso em : 02 abr. 2022

NEDER, V. **Nova diretora assumiu área do BNDES para assumir mais riscos no financiamento à infraestrutura**. O Estado de São Paulo, Brasil, 01 jul. 2022. Disponível em: <<https://economia.estadao.com.br/noticias/geral,nova-diretora-bndes-mais-risco-financiamento-infraestrutura,70004107155>>. Acesso em: 02 ago. 2022



NIKOLAIDIS, P.; POULLIKKAS, A. **A comparative overview of hydrogen production processes.** Department of Electrical Engineering, Cyprus University of Technology, Renewable and Sustainable Energy Reviews, v.67, p.597-611, 09 set. 2016..

OFFICE OF ENERGY EFFICIENCY AND RENEWABLE ENERGY. **Hydrogen Production: Electrolysis.** U.S. Department of Energy. Estados Unidos, [20–]. Disponível em: <<https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-electrolysis>>. Acesso em: 03 ago. 2022

OFFICE OF ENERGY EFFICIENCY AND RENEWABLE ENERGY. **Hydrogen Shot.** U.S. Department of Energy. Estados Unidos, 31 set. 2021. Disponível em: <<https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-shot>>. Acesso em: 14 jul. 2022

OFFICE OF ENERGY EFFICIENCY AND RENEWABLE ENERGY. **Hydrogen Storage.** U.S. Department of Energy. Estados Unidos, 2022. Disponível em: <<https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>>. Acesso em: 15 mai. 2022

ONS. **Evolução da capacidade instalada do SIN - Agosto2022/Dez2026.** Operador Nacional do Sistema Elétrico, Brasília, 2022. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>>. Acesso em: 02 ago. 2022.

ONS. **Mapa dos quantitativos de margens para os leilões de energia.** Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS, Brasília, 2022. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas>>. Acesso em: 18 jul. 2022.

ONU. **Conferências ambientais: quais foram as principais da história?.** Estadão. Brasil, 27 dez. 2021. Disponível em: <<https://summitmobilidade.estadao.com.br/sustentabilidade/conferencias-ambientais-quais-foram-as-principais-da-historia/>>. Acesso em: 09 jul 2022.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE. **Declaração de Estocolmo.** Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional. Suécia, 1972. Disponível em:



<<http://portal.iphan.gov.br/uploads/ckfinder/arquivos/Declaracao%20de%20Estocolmo%201972.pdf>>. Acesso em: 09 jul. 2022.

OSAKI, M. **Gasto médio com fertilizantes para produção de grãos dobra em um ano.** Esalq, USP, São Paulo, 10 mai. 2022. Disponível em: <<https://www.cepea.esalq.usp.br/br/opinia0-cepea/gasto-medio-com-fertilizantes-para-producao-de-graos-dobra-em-um-ano.aspx>>. Acesso em: 01 ago. 2022

PASSARINHO, N. **COP26: Na contramão do Mundo, Brasil teve aumento de emissões de CO2 em ano de pandemia.** Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/brasil-5906536>>. Acesso em: 30 jul. 2022

PÖRTNER, H.-O. *et. al.* **Summary for Policymakers Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability.** Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [S.l.], 2022. Disponível em: <https://report.ipcc.ch/ar6wg2/pdf/IPCC_AR6_WGII_SummaryForPolicymakers.pdf>. Acesso em: 23 jul. 2022.

RIBEIRO, D. **Processo de Haber-Bosch.** Revista de Ciência Elementar, v.1, p. 1-2, 2013.

ROYAL SOCIETY OF CHEMISTRY. **Hydrogen.** Royal Society of Chemistry. [S. l.], [20–]. Disponível em: < <https://www.rsc.org/periodic-table/element/1/hydrogen> >. Acesso em: 15 mai. 2022

SADIK-ZADA. **Political Economy of Green Hydrogen Rollout: A Global Perspective.** Sustainability, 13, 13464, 2021.

SAMORA, R. **Importação de fertilizante pelo Brasil deve saltar quase 200% no 2º trimestre.** Forbes, São Paulo, 2022. Disponível em: <<https://forbes.com.br/forbesagro/2022/04/importacao-de-fertilizante-pelo-brasil-deve-saltar-quase-200-no-2o-trimestre/>>. Acesso em: 02 ago. 2022.



SEEG. **Total emissions**. Observatório do Clima: Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa. Brasil, 2021. Disponível em: <https://plataforma.seeg.eco.br/total_emission#>. Acesso em: 30 jul. 2022.

SHELL. **SHELL BRASIL E PORTO DO AÇU ANUNCIAM PROJETO INÉDITO EM HIDROGÊNIO VERDE**. Shell. [S.l.], 19 mai. 2022. Disponível em: <<https://www.shell.com.br/imprensa/comunicados-para-a-imprensa-2022/shell-brasil-e-porto-do-acu-anunciam-projeto-inedito-em-hidrogenio-verde.html>>. Acesso em: 31 jul. 2022

SLATERRY, G. **Australia's Fortescue eyes Brazil plant amid green hydrogen push**. Reuters. [S. l.], 15 mar. 2021. Disponível em: <<https://www.reuters.com/article/fortescue-brazil-idUSL1N2LD1TS>> . Acesso em: 31 jul. 2022.

SRIVASTAVA, M.; SIVARAMAKRISHNAN, S. **Mapping the themes and intellectual structure of customer engagement: a bibliometric analysis**. Marketing Intelligence & Planning, 29 abr. 2021.

STAMBOULI, A.B.; TRAVERSA, E. **Solid oxide fuel cells (SOFCs): a review of an environmentally clean and efficient source of energy**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v.6, p.433-455, 2002.

SVENSSON, G. **SSCI and its impacts factors: a “prisoner’s dilemma”?**. European Journal of Marketing 44, p. 23 - 33, 2010.

TAN, Weizhen. **Oil prices jump again on Russia-Ukraine fears, as IEA calls for a cut in energy usage**. CNBC. [S. l.], 21 mar. 2022. Disponível em: <<https://www.cnbc.com/2022/03/21/russia-ukraine-war-oil-prices-jump-iea-calls-for-cut-in-energy-usage.html>>. Acesso em : 14 mai. 2022

TANAKA, F. **Revisão dos métodos alternativos à hidrodessulfurização de diesel: desafios e perspectivas**. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Brasil, 2018. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/11564/2/FB_COENQ_2018_1_06.pdf>. Acesso em : 24 mai. 2022.



TAY, A. **By the numbers: China's net-zero ambitions**. Nature. [S.l.], 05 abr. 2022. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/d41586-022-00802-3>>. Acesso em: 11 jul. 2022

TEIXEIRA, S. **ArcelorMittal avança no 'aço verde'**. RESET, São Paulo, 2022. Disponível em: <<https://www.capitalreset.com/arcelormittal-avanca-no-aco-verde/>>. Acesso em: 04 ago. 2022.

TSAY, M. **A bibliometric analysis of hydrogen energy literature**, Scientometrics 75, p. 421 - 438, 2008.

UNFCCC. **Greenhouse gas inventory data – Flexible Queries Annex I Parties**. United Nations - Climate Change, [S.l.], [20]. Disponível em: <https://di.unfccc.int/flex_annex1>. Acesso em: 02 ago. 2022

UNTERSTELL, N.; MARTINS, N. **NDC: Analysis of the 2022 update submitted by the Government of Brazil. Analysis Report**. Talanoa. Brasil, 2022. Disponível em <https://www.politicaporinteiro.org/wp-content/uploads/2022/04/Brazils-NDC-2022-analysis_V0.pdf>. Acesso em: 05 jul. 2022

US DEPARTMENT OF ENERGY. **Department of Energy Hydrogen Program Plan**. U.S. Department of Energy. Estados Unidos, 2020. Disponível em: <<https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/hydrogen-program-plan-2020.pdf>>. Acesso em: 30 jul. 2022

US DEPARTMENT OF STATE. **The Long-Term Strategy of The United States - Pathways to Net-Zero Greenhouse Gas Emissions by 2050**. US Department of State, Estados Unidos, nov. 2021. Disponível em: <<https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2021/10/US-Long-Term-Strategy.pdf>>. Acesso em: 14 ago. 2022

VAN-ECK, N.; WALTMAN, L. **Visualizing Bibliometric Networks**. Measuring scholarly impact: Methods and practice, Países Baixos, 2014.

WALTENBERG, D.; NEGRÃO, H. **O hidrogênio verde, o Brasil e a transição energética mundial**. ESTADÃO, São Paulo, 2022. Disponível em: <<https://www.siqueiracastro.com.br/noticias/o-hidrogenio-verde-o-brasil-e-a-transicao-energetica-mundial/>>. Acesso em: 30 jul. 2022.



WANG, T; CAO, X.; JIAO, L. **PEM water electrolysis for hydrogen production: fundamentals, advances, and prospects.** Carbon Neutrality, v.1, 21, 02 jun. 2022.

WENDT, H.; GÖTZ, M. **Tecnologia de Células a Combustível.** Química Nova, 23, [S.l.], 29 jul. 1999. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/qn/a/NYnZ6bbM7TY6RKRGGTJTmqr/?lang=pt&format=pdf>>. Acesso em: 01 ago. 2022

WHA INTERNATIONAL. **Hydrogen Industry Applications: Past, Present, and Future.** WHA, [S.l.], 2021. Disponível em: <<https://wha-international.com/hydrogen-in-industry/>> . Acesso em: 01 ago. 2022

ZHAO, J. *et al.* **The determinants of renewable energy sources for the fueling of green and sustainable economy.** Energy, v. 238, Part C, 01 jan. 2022.

DA FONSECA, B. *et al.* **O Brasil diante da corrida global pelo hidrogênio verde.** Observatório de Política Externa e da Inserção Internacional do Brasil, Brasil, 17 mai. 2022. Disponível em: <<https://opeb.org/2022/05/17/o-brasil-diante-da-corrída-global-pelo-hidrogenio-verde/>>. Acesso em: 10 ago. 2022



APÊNDICE A - A COP XXVI

Entre outubro e novembro de 2021, foi realizada a COP XXVI em Glasgow, Escócia. O evento organizado pela ONU ocorreu em meio a pressões sobre líderes nacionais para avançar com metas ambiciosas de redução de emissões em 2030. A COP culminou na assinatura do Pacto de Glasgow que definiu a meta de limitação do aumento da temperatura global em até 1.5 °C até a metade do século. Para o atingimento deste objetivo, o Pacto reconhece que é necessária a redução das emissões globais em 45% até 2030 em relação ao nível de 2010, bem como a obtenção de emissões zero líquidas até 2050. Portanto, a emissão de GEE deverá ser balanceada com a retirada desses mesmos gases da atmosfera até a metade do século, obtendo-se assim a neutralidade de carbono (GENIN e FRASSON, 2021).

Os países foram ainda incentivados a usarem marcos temporais comuns para os seus compromissos climáticos. Dessa forma, ficou acordado o alinhamento das Contribuições Nacionais Determinadas (NDC, na sigla em inglês) em ciclos de 5 anos. O documento, criado na COP XXI, se trata de uma formalização de metas nacionais, onde cada país expõe suas metas de cortes de emissões de GEE para 2025 e 2030 em comparação às emissões de 2005. Assim, a NDC ajuda a entender o progresso da ambição e ação climática no curto prazo (GENIN e FRASSON, 2021).



APÊNDICE B - AS IMPLICAÇÕES DO AQUECIMENTO GLOBAL

De acordo com o AR6 do IPCC (2021), é inequívoco que a influência humana aqueceu a atmosfera, os oceanos e a superfície terrestre. Cada uma das últimas quatro décadas foi mais quente que todas as anteriores desde 1850. Como apontado pela Figura 43, a temperatura da superfície terrestre, entre 2011 e 2020, foi em média 1,09 °C maior que a observada no período entre 1850 - 1900. Desse total, 1,06 °C pode ser atribuído tem origem antrópica (MASSON-DELMOTTE et al, 2021).

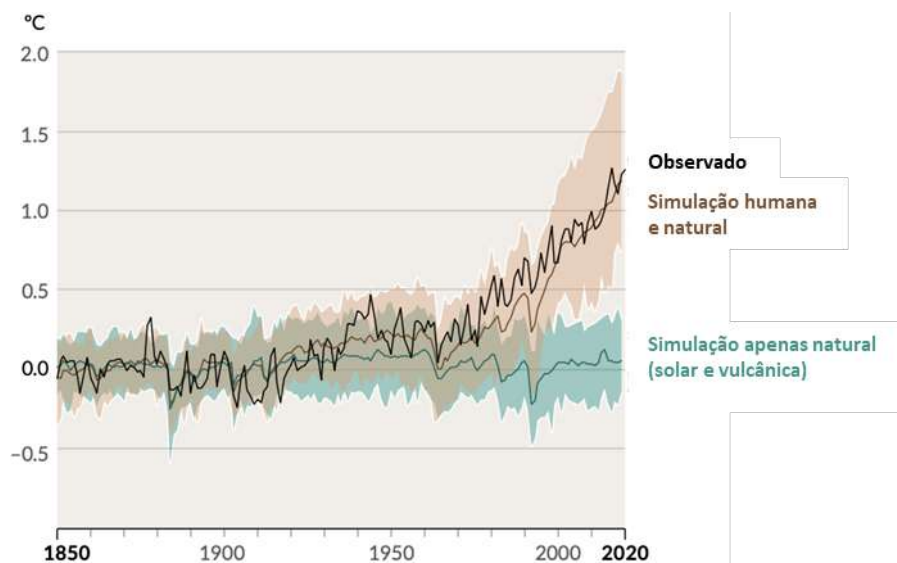


Figura 43. Mudanças na temperatura da superfície terrestre nos últimos 170 anos em relação a 1850-1900. A curva preta identifica o aumento da temperatura da superfície terrestre observada. A curva verde simula qual seria o aumento observado caso não houvesse a ação humana, apenas natural (solar e vulcânica). A curva marrom simula qual seria o aumento observando tanto o efeito natural quanto o antropogênico. O gráfico evidencia que o aumento observado coincide com o simulado para o caso que contabiliza os efeitos natural e antropogênico. Fonte: Adaptado de MASSON-DELMOTTE et al (2021).

De acordo com o AR6 (MASSON-DELMOTTE et al, 2021) o aumento da temperatura média da superfície terrestre em 1,09 °C gerou os seguintes efeitos:

- O Aumento da precipitação sobre o continente desde 1950;
- O Deslocamento de tempestades de latitudes médias para os polos desde 1980;
- A Redução do gelo do mar do Ártico entre 1979 - 1988 e entre 2010 - 2019;
- A subida do nível do mar na taxa mais alta dos últimos 3000 anos, aumentando 20 cm entre 1901 e 2018;



- O aquecimento, a mudança na salinidade e a acidificação da camada superior dos oceanos desde 1970, impactando negativamente a pesca e a aquicultura;
- Aumento da frequência e intensidade de extremos de calor na maior parte do globo⁶³ ;
- A queda da frequência e da severidade dos extremos de frio;
- O aumento de duas vezes da frequência das ondas de calor marinhas desde a década de 1980;
- A mudança na biosfera desde 1970 com migração de zonas climáticas em direção aos polos⁶⁴ e;
- Aumento da frequência de secas agrícolas e ecológicas em determinadas regiões⁶⁵.

O aquecimento global ultrapassará 1,5 °C antes do meio do século caso não haja a mudança na taxa de emissões de GEE, entretanto, o fenômeno pode ser reduzido caso haja uma ação imediata para frear as emissões globais de CO₂e (MASSON-DELMOTTE et al, 2021).

A fim de estudar os impactos do aquecimento global para além dos já constatados 1,09 °C, o AR6 simula cinco diferentes cenários de níveis de emissões de gases de efeito estufa, conforme ilustrado pela figura 44, obtendo-se assim os respectivos aumentos de temperatura (MASSON-DELMOTTE et al, 2021).

⁶³ Em todas as regiões, eventos extremos de calor resultaram em comorbidades e mortalidade na população, além de deslocamentos populacionais, insegurança alimentar e hídrica (IPCC, 2021).

⁶⁴ Tal efeito trouxe menor crescimento para a agricultura nos últimos 50 anos em comparação ao que seria observado sem o efeito da elevação da temperatura média da superfície global (IPCC, 2021).

⁶⁵ Aproximadamente metade da população mundial atualmente sofre de grave escassez de água por pelo menos uma parte do ano devido a fatores climáticos e não climáticos.

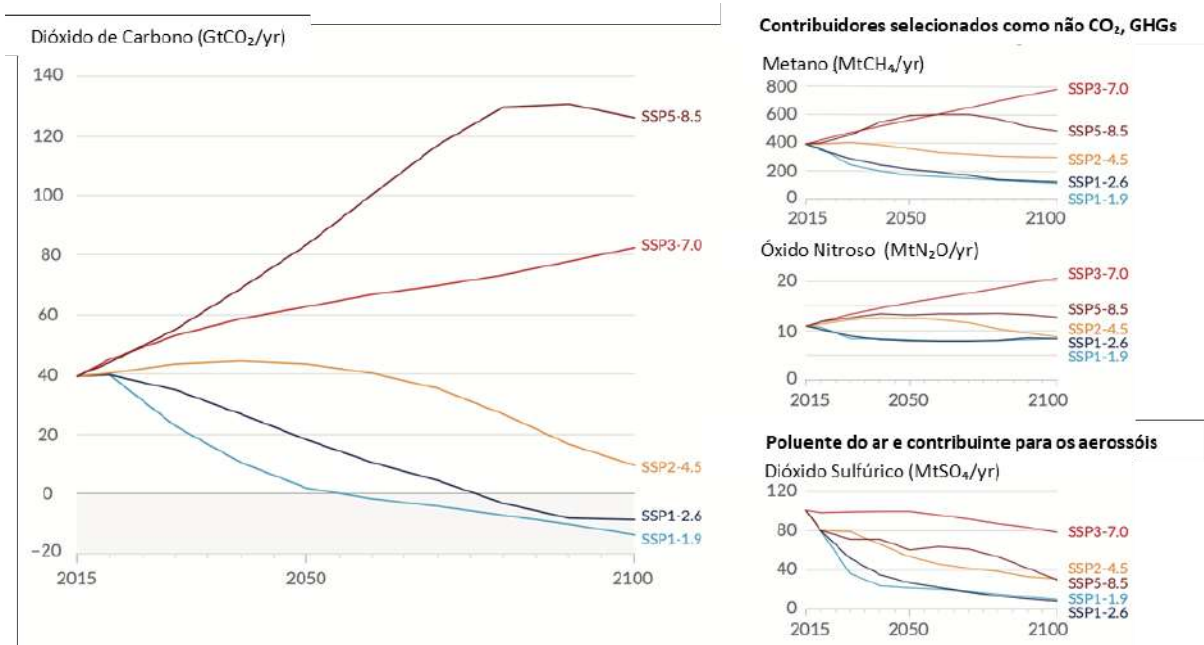


Figura 44. Emissões futuras de CO₂, CH₄, N₂O e SO₂ de acordo com cinco cenários simulados pela AIE. Os gráficos mostram as emissões futuras de gás carbônico (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) e dióxido de enxofre (SO₂) em Gt/ano sob cinco cenários simulados pela AIE: SSP5-8.5, SSP3-7.0, SSP2-4.5, SSP1-2.6 e SSP1-1.9. Fonte: Traduzido e Adaptado de PÖRTNER, H.-O. et. al (2022).

De acordo com o AR6, o aumento da temperatura média da superfície global atingirá o patamar de 1,5 °C em todos os cenários no curto prazo (2021-40). No médio (2041-2060) e longo prazo (2081-2100), o aumento pode variar de 1,6 °C a 2,4 °C e de 1,4 °C a 4,4 °C respectivamente, a depender do corte de emissões. Os aumentos de temperatura média da superfície global por cenário estão demonstrados pelas Tabela 21 (MASSON-DELMOTTE et al, 2021).

Tabela 21. Aumento da temperatura média da superfície global em relação a 1850-1900 para cinco cenários ilustrativos de emissões estudados pelo IPCC.

Cenário	Curto Prazo (2021-2040)		Médio Prazo (2041-2060)		Longo Prazo (2081-2100)	
	Melhor Estimativa	Faixa Muito Provável (°C)	Melhor Estimativa	Faixa Muito Provável (°C)	Melhor Estimativa	Faixa Muito Provável (°C)
SSP1-1.9	1,5	1,2 a 1,7	1,6	1,2 a 2,0	1,4	1,0 a 1,8
SSP1-2.6	1,5	1,2 a 1,8	1,7	1,3 a 2,2	1,8	1,3 a 2,4
SSP2-4.5	1,5	1,2 a 1,8	2,0	1,6 a 2,5	2,7	2,1 a 3,5
SSP3-7.0	1,5	1,2 a 1,8	2,1	1,7 a 2,6	3,6	2,8 a 4,6
SSP5-8.5	1,6	1,3 a 1,9	2,4	1,9 a 3,0	4,4	3,3 a 5,7



Fonte: Adaptado de MASSON-DELMOTTE et al (2021).

Cada meio grau a mais de aquecimento, aumenta a frequência e intensidade de eventos de calor, como temperaturas extremas, aumento de ondas de calor, elevada precipitação e secas que afetam a agricultura e o ecossistema. Mesmo com o aquecimento global se estabilizando em 1,5 °C acima do nível pré-industrial, eventos extremos sem precedentes no registro histórico deverão acontecer (MASSON-DELMOTTE et al, 2021).

Algumas regiões semiáridas e a chamada Região da Monção da América do Sul, que compreende parte do Centro-Oeste brasileiro, da Amazônia, da Bolívia e do Peru, deverão ter os maiores aumentos de temperatura nos dias mais quentes do ano – até duas vezes mais que a taxa de aquecimento global. Enquanto o Ártico deve ter a maior elevação de temperatura nos dias mais frios do ano – cerca de três vezes a taxa de aquecimento global. A simulação dos efeitos regionais do aumento da temperatura média da superfície terrestre em 1.5 °C, 2.0 °C e 4.0 °C é ilustrada pela Figura 45 (MASSON-DELMOTTE et al, 2021).

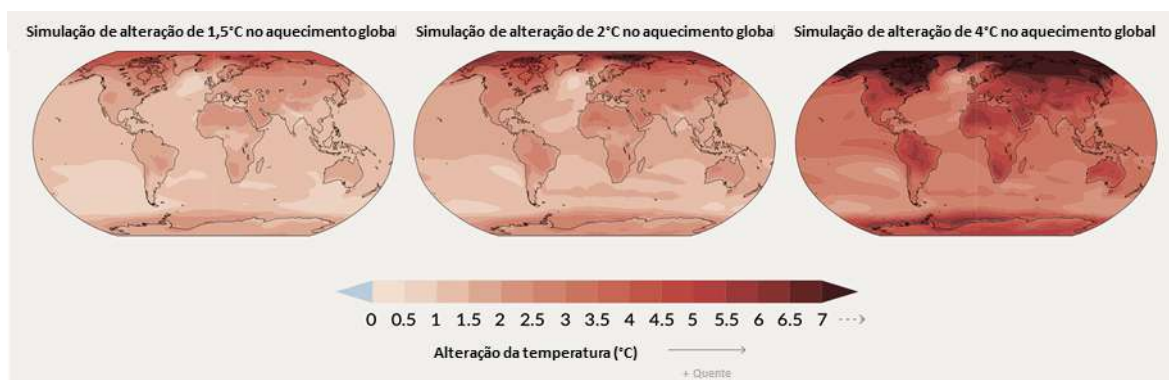


Figura 45. Simulação dos efeitos do aumento da temperatura média da superfície terrestre em 1.5 °C, 2.0 °C e 4.0 °C na temperatura de diferentes regiões. Da esquerda para a direita: mudança simulada no cenário de aquecimento global de 1.5 °C; mudança simulada no cenário de aquecimento global de 2.0 °C; mudança simulada no cenário de aquecimento global de 4.0 °C. A intensidade da cor vermelha identifica a mudança na temperatura em cada um dos cenários para as diferentes regiões em comparação a 1850-1900. Dessa forma, quanto mais claro for o tom de vermelho, mais próximo a 0.0 °C será a mudança da temperatura observada. Por outro lado, quanto mais escuro for o tom de vermelho, mais próximo a 7.0 °C ou mais será a variação da temperatura observada. Fonte: Adaptado de MASSON-DELMOTTE et al (2021).

De acordo com o WGI do AR6, o aquecimento do oceano pode ser de duas (SSP1-2.6) a oito vezes maior (SSP5-8.5) do que observado entre 1971 e 2018. Além disso, é virtualmente certo que o oceano continuará subindo, uma vez que a expansão térmica é irreversível. A elevação varia de 28 cm a 1,02 m, no melhor e pior cenário respectivamente (PÖRTNER, H.-O. et. al, 2022).



Com o aumento da temperatura, eventos até então de baixa probabilidade de ocorrência e alto impacto passam a ser mais frequentes, como o declínio da circulação meridional do Oceano Atlântico, o que impactaria nos padrões de tempo e no ciclo da água em grande parte do Mundo, alterando os padrões de chuva na África, Ásia e América do Sul (PÖRTNER, H.-O. *et. al*, 2022).

De acordo com o WGII, os impactos do aumento adicional da temperatura média da superfície terrestre além dos já verificados 1.09 °C são:

- Risco de perda de biodiversidade de muitos ecossistemas terrestres e aquáticos no curto prazo⁶⁶;
- Continuidade e aceleração do aumento do nível do mar no curto prazo;
- Danos à infraestrutura devido a enchentes, deslizamentos de terras, aumento do nível do mar, tempestades e erosão costeira;
- Risco provável de extinção de 3 a 14% das espécies terrestres estudadas em caso de aquecimento de 1,5° C no longo prazo⁶⁷;
- Risco na disponibilidade de água e perigos relacionados à água em todas as regiões;
- Aumento da insegurança alimentar especialmente em regiões mais vulneráveis⁶⁸;
- Aumento de doenças e morte prematura no curto e longo prazo.⁶⁹

A vulnerabilidade aos eventos decorrentes do aquecimento global é maior em locais onde se encontra: pobreza, inseguranças políticas, acesso limitado a serviços e recursos básicos e conflitos violentos. A título de exemplo, entre 2010 e 2020, a mortalidade humana por inundações, secas e tempestades foi quinze vezes maior em

⁶⁶ 2021-2040 (IPCC, 2022).

⁶⁷ 2081-2100 (IPCC, 2022).

⁶⁸ O aquecimento global irá progressivamente diminuir a saúde do solo, enfraquecer a polinização, aumentar a incidência de pestes e doenças vegetais e diminuir a biomassa marinha (IPCC, 2022)

⁶⁹ Prevê-se que os riscos de doenças transmitidas por alimentos, pela água e por vetores sensíveis ao clima podem aumentar sob todos os cenários. Para a América Latina é destacado o aumento da incidência de doenças como a dengue (IPCC, 2022).



regiões altamente vulneráveis, em comparação com regiões com vulnerabilidade muito baixa (PÖRTNER, H.-O. *et. al*, 2022).

Ações de curto prazo que limitem o aquecimento global a 1,5 °C podem diminuir substancialmente as perdas projetadas e os danos relacionados ao clima nos sistemas humanos e ecossistemas. Entretanto, não são capazes de eliminar todos os efeitos previstos (PÖRTNER, H.-O. *et. al*, 2022).