



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LISA ISABELLA FISCHER

PROSPECÇÕES E CONDICIONANTES DO USO DO HIDROGÊNIO VERDE NA
TRANSIÇÃO ENERGÉTICA NO BRASIL

CURITIBA

2023

LISA ISABELLA FISCHER

PROSPECÇÕES E CONDICIONANTES DO USO DO HIDROGÊNIO VERDE NA
TRANSIÇÃO ENERGÉTICA NO BRASIL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso de Engenharia Ambiental, Setor de
Tecnologia, Universidade Federal do Paraná
como requisito parcial à obtenção do Bacha-
rel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof^o Dr. Marcelo Risso Errera

CURITIBA

2023



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

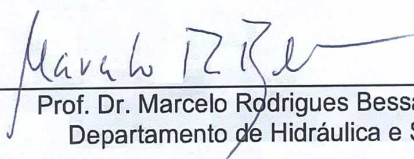
TERMO DE APROVAÇÃO DE PROJETO FINAL

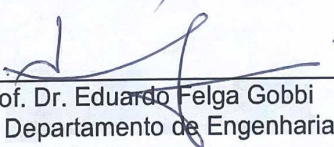
LISA ISABELLA FISCHER

PROSPECÇÕES E CONDICIONANTES DO USO DO HIDROGÊNIO VERDA NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA NO BRASIL

Projeto Final de Curso, aprovado como requisito parcial para a obtenção do Diploma de Bacharel em Engenharia Ambiental no Curso de Graduação em Engenharia Ambiental do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, com nota 100, pela seguinte banca examinadora:

Orientador: 
Prof. Dr. Marcelo Risco Errera
Departamento de Engenharia Ambiental/UFPR

Membro 1: 
Prof. Dr. Marcelo Rodrigues Bessa
Departamento de Hidráulica e Saneamento/UFPR

Membro 2: 
Prof. Dr. Eduardo Felga Gobbi
Departamento de Engenharia Ambiental/UFPR

Curitiba, 12 de dezembro de 2023

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, quero expressar minha gratidão aos amigos e familiares, cujo apoio constante sempre me impulsionou a buscar mais e acreditou no meu trabalho.

Em especial, desejo destacar o papel fundamental dos meus pais e do meu irmão, Kátia Beatriz Schuhmacher Fischer, Sven Erwin Enock Fischer e Timo Sven Fischer, em meu desenvolvimento, tanto no âmbito profissional quanto pessoal.

Aos colegas de profissão e amigos, Alexandre Sokoloski de A. D. de Macedo, Ana Lia Warcheski, Victoria Ferro Maestrelli e Vitor Kurten Feitosa, agradeço por terem compartilhado esta jornada acadêmica comigo. Suas presenças foram fontes inesgotáveis de inspiração e motivação, contribuindo significativamente para o meu crescimento.

Quero também dedicar um agradecimento especial a Yumi Sagawa Gouveia e João Guilherme de Lima Mariano, que estiveram ao meu lado todos os dias, fornecendo um apoio inestimável, que foi fundamental para enfrentar os desafios que surgiram.

Além disso, desejo expressar minha profunda gratidão ao meu orientador Marcelo Risso Errera. Sua orientação excepcional, paciência e *insights* valiosos foram as bases que moldaram este trabalho. Suas sugestões perspicazes e sua constante disponibilidade atuaram como um guia essencial em todos os estágios desta pesquisa.

Também, agradeço aos estimados membros da banca, Eduardo Gobbi e Marcelo Bessa, cujas contribuições enriquecedoras desempenharam um papel significativo na produção acadêmica deste trabalho.

Por fim, estendo meus agradecimentos a todas as pessoas que, de diversas formas, fizeram parte da minha trajetória na graduação e contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho acadêmico.

RESUMO

A transição energética global busca substituir fontes não renováveis por fontes renováveis e com baixas emissões de gases de efeito estufa. O desafio atual das energias renováveis, devido à sua natureza intermitente, é armazenar o excedente gerado a fim de atender picos de demanda. O hidrogênio verde (H2V) destaca-se como um vetor energético versátil, utilizado para armazenar energia, servir de matéria-prima industrial e como combustível para a mobilidade, oferecendo uma solução para a descarbonização de setores historicamente difíceis de descarbonizar. Este estudo visa descrever o atual cenário do H2V, investigando os desafios de sua integração na matriz energética e identificando oportunidades de produção e uso no Brasil, com foco no Paraná. Para isso, utilizou-se uma revisão bibliográfica detalhada, um estudo de caso sobre a Alemanha para compará-lo com a realidade brasileira e inquéritos com especialistas por meio de questionários e entrevistas. O estudo de caso sugere que o Brasil pode aprender com a abordagem alemã, adotando o conceito de "leapfrogging" ou salto tecnológico, evitando os desafios enfrentados pela Alemanha ao avançar diretamente para soluções já comprovadas. Por meio do questionário, identificaram-se questões cruciais sobre o H2V no Brasil: importância energética, estágio inicial, impacto na redução de emissões, ausência de parcerias público-privadas, necessidade de melhores políticas públicas, desafios regulatórios, demanda por subsídios na sua produção, alto interesse público-privado e discordâncias dos setores quanto à efetividade de políticas públicas, oportunidades tecnológicas e preparo do setor privado. Ao analisar as transcrições das entrevistas, identificaram-se as palavras mais frequentes: "hidrogênio", "setores", "produção", "renováveis" e "Brasil". Nas frases frequentes do questionário e das entrevistas, identificaram-se as seguintes tendências: versatilidade do H2 em setores difíceis de descarbonizar; alta densidade energética; potencial do H2V no nordeste brasileiro; potencial do H2 Musgo (biomassa) no Paraná; desenvolvimento econômico em regiões produtoras de H2; oportunidade de crescimento do setor privado; comercialização de produtos derivados do H2 (alto valor agregado); exploração de todas as rotas de conversão; foco na origem renovável ou de baixa emissão do H2, evitando classificações por cores; potencial abertura de mercado através da exportação; criação de *hubs* de H2; e desafios como regulação ausente ou ineficaz, viabilidade econômica, necessidade de subsídios e lacunas na infraestrutura. Os inquéritos abordaram o H2V, entretanto, suas respostas envolveram principalmente no H2 de origem renovável ou de baixa emissão, ressaltando a importância de explorar diversas rotas de conversão. Por último, ressalta-se que os resultados dependem dos dados e métodos utilizados; além disso, há um viés nos inquéritos, pois baseiam-se apenas em consultas a especialistas.

Palavras-chaves: Hidrogênio Verde; Hidrogênio; Transição Energética; Descarbonização

ABSTRACT

The global energy transition seeks to replace non-renewable sources with renewable and with low greenhouse gas emissions sources. The current challenge for renewable energies, due to their intermittent nature, is to store the surplus generated in order to meet peak demand. Green hydrogen (GH₂) stands out as a versatile energy vector, used to store energy, serve as an industrial raw material and as a fuel for mobility, offering a solution for decarbonizing sectors that have historically been difficult to decarbonize. This study aims to describe the current GH₂ scenario, investigating the challenges of integrating it into the energy matrix and identifying production and use opportunities in Brazil, with a focus on Paraná. To do this, a detailed literature review was done, as well as a case study on Germany to compare it with the Brazilian reality and surveys with experts using questionnaires and interviews. The case study suggests that Brazil can learn from the German approach by adopting the concept of "leapfrogging", avoiding the challenges faced by Germany by moving directly to proven solutions. Through the questionnaire, crucial issues about GH₂ in Brazil were identified: energetic importance, early stage, impact on reducing emissions, lack of public-private partnerships, need for better public policies, regulatory challenges, demand for subsidies in its production, high public-private interest and disagreements between the sectors about the effectiveness of public policies, technological opportunities and the preparedness of the private sector. When analyzing the transcripts of the interviews, the most frequent words were identified: "hydrogen", "sectors", "production", "renewables" and "Brazil". The following trends were identified in the frequent phrases in the questionnaire and interviews: H₂'s versatility in sectors that are difficult to decarbonize; high energy density; GH₂ potential in northeastern Brazil; H₂ Moss (biomass) potential in Paraná; economic development in H₂-producing regions; opportunity for private sector growth; commercialization of H₂-derived products (high added value); exploration of all conversion routes; focus on renewable or low-emission origin of H₂, avoiding color classifications; potential market opening through exports; creation of H₂ *hubs*; and challenges such as absent or ineffective regulation, economic viability, the need for subsidies and infrastructure gaps. The surveys addressed GH₂, however, their responses mainly involved H₂ from renewable or low-emission sources, highlighting the importance of exploring various conversion routes. Finally, it should be noted that the results depend on the data and methods used; in addition, there is a bias in the surveys, as they are based only on consultations with experts.

Key-words: Green Hydrogen; Hydrogen; Energy Transition; Decarbonization.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – TOTAL DE EMISSÕES ANTROPOGÊNICAS DE GEE (GTCO ₂ -EQ/ANO) 1990-2019	19
FIGURA 2 – REPRESENTAÇÃO DO EFEITO ESTUFA	20
FIGURA 3 – TOTAL ANUAL DE EMISSÕES ANTROPOGÊNICAS DE GEE POR SETOR ECONÔMICO PRINCIPAL E SUAS TENDÊNCIAS SUBJACENTES POR REGIÃO	24
FIGURA 4 – TENDÊNCIAS E FATORES DETERMINANTES DAS EMISSÕES GLOBAIS DO SETOR DE TRANSPORTES COM A ENERGIA MEDIDA COMO CONSUMO FINAL TOTAL DE ENERGIA	28
FIGURA 5 – FORNECIMENTO TOTAL DE ENERGIA (MTOE) NO MUNDO POR FONTE 1971-2018	30
FIGURA 6 – PARTICIPAÇÃO GLOBAL DO SUPRIMENTO TOTAL DE ENERGIA POR FONTE EM 2018	31
FIGURA 7 – PARTICIPAÇÃO NA PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE NO MUNDO POR FONTE 1985-2022	32
FIGURA 8 – ACRÉSCIMOS DE CAPACIDADE DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E EÓLICA NO CAMINHO DO ZERO LÍQUIDO, 2020-2030	34
FIGURA 9 – PORCENTAGEM DE PARTICIPAÇÃO DA CAPACIDADE ACUMULATIVA DE ENERGIA POR TECNOLOGIA, 2010-2027	36
FIGURA 10 – TENDÊNCIAS DE GERAÇÃO DE ELETRICIDADE POR MEIO DA ENERGIA EÓLICA	37
FIGURA 11 – FLUTUAÇÕES DA GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA AO LONGO DE UM DIA DE VERÃO E AS DEMANDAS DE ELETRICIDADE NO VERÃO E NO INVERNO EM ONTÁRIO - CANADÁ	38
FIGURA 12 – FORNECIMENTO GLOBAL DE BIOENERGIA NO CENÁRIO NET ZERO	40
FIGURA 13 – REDUÇÃO ACUMULATIVA DE EMISSÕES POR MEDIDA DE MITIGAÇÃO NO CENÁRIO NET ZERO 2021-2050	42
FIGURA 14 – CLASSIFICAÇÃO DO HIDROGÊNIO EM ESCALA DE CORES	43
FIGURA 15 – MATÉRIAS-PRIMAS E ROTAS DE CONVERSÃO DO HIDROGÊNIO	44
FIGURA 16 – PROCESSO DE ELETRÓLISE VIA ENERGIA RENOVÁVEL	45
FIGURA 17 – CATEGORIZAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO	46
FIGURA 18 – HIDROGÊNIO VERDE E APLICAÇÕES POWER-TO-X	48
FIGURA 19 – RESUMO DAS PRINCIPAIS TECNOLOGIAS PTX	49
FIGURA 20 – TOPOLOGIA DA CÉLULA DE COMBUSTÍVEL REGENERATIVA	50

FIGURA 21 – CARRO A CÉLULA DE COMBUSTÍVEL	51
FIGURA 22 – FUNCIONAMENTO DE UMA CÉLULA DE COMBUSTÍVEL A HIDROGÊNIO	52
FIGURA 23 – MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA - 2020	54
FIGURA 24 – MATRIZ ENERGÉTICA ALEMÃ - 2020	60
FIGURA 25 – EMISSÕES DE CO2 POR SETOR NA ALEMANHA, 1990-2020	62
FIGURA 26 – CONSUMO FINAL DE ENERGIA TOTAL POR FONTE NA ALEMANHA, 1990-2020	62
FIGURA 27 – POTENCIAL ENERGÉTICO DO HIDROGÊNIO ATÉ 2050	67
FIGURA 28 – O HIDROGÊNIO COMO FACILITADOR DA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA NA EUROPA	68
FIGURA 29 – BENEFÍCIOS DO HIDROGÊNIO PARA A UNIÃO EUROPEIA	70
FIGURA 30 – ESTADO DO PARANÁ	71
FIGURA 31 – ENTREVISTA - PRÓS E CONTRAS	77
FIGURA 32 – QUESTIONÁRIO ELETRÔNICO - PRÓS E CONTRAS	77
FIGURA 33 – RELAÇÃO ENTRE AS PERGUNTAS DA ENTREVISTA E OS RESULTADOS ESPERADOS	84
FIGURA 34 – RELAÇÃO ENTRE AS PERGUNTAS DO QUESTIONÁRIO E OS RESULTADOS ESPERADOS	88
FIGURA 35 – PALAVRAS-CHAVE NAS ENTREVISTAS	94
FIGURA 36 – RESULTADO PERGUNTA DE CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA 1100	
FIGURA 37 – RESULTADO PERGUNTA DE CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA 2101	
FIGURA 38 – RESULTADO PERGUNTA DE CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA 3102	
FIGURA 39 – RESULTADO PERGUNTA DE CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA 4102	
FIGURA 40 – RESULTADO PERGUNTA DE CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA 5103	
FIGURA 41 – RESULTADO PERGUNTA 1	104
FIGURA 42 – RESULTADO PERGUNTA 2	104
FIGURA 43 – RESULTADO PERGUNTA 3	105
FIGURA 44 – RESULTADO PERGUNTA 4	106
FIGURA 45 – RESULTADO PERGUNTA 5	106
FIGURA 46 – RESULTADO PERGUNTA 6	107
FIGURA 47 – RESULTADO PERGUNTA 7	108
FIGURA 48 – RESULTADO PERGUNTA 8	109
FIGURA 49 – RESULTADO PERGUNTA 9	110
FIGURA 50 – RESULTADO PERGUNTA 10	111
FIGURA 51 – RESULTADO PERGUNTA 11	112
FIGURA 52 – RESULTADO PERGUNTA 12	113
FIGURA 53 – CATEGORIZAÇÃO DA AMOSTRA	119

FIGURA 54 – ANÁLISE PERGUNTA 4 DE CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA	120
FIGURA 55 – ANÁLISE PERGUNTA 5 DE CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA	120
FIGURA 56 – ANÁLISE PERGUNTA 1	121
FIGURA 57 – ANÁLISE PERGUNTA 2	122
FIGURA 58 – ANÁLISE PERGUNTA 3	123
FIGURA 59 – ANÁLISE PERGUNTA 4	124
FIGURA 60 – ANÁLISE PERGUNTA 5	124
FIGURA 61 – ANÁLISE PERGUNTA 6	125
FIGURA 62 – ANÁLISE PERGUNTA 7	126
FIGURA 63 – ANÁLISE PERGUNTA 8	126
FIGURA 64 – ANÁLISE PERGUNTA 11	127

LISTA DE ABREVIATURAS E DE SIGLAS

- ABH2** Associação Brasileira do Hidrogênio
- ABNT** Associação Brasileira de Normas Técnicas
- AFNOR** Association Française de Normalisation
- AFOLU** Agriculture, Forestry, and Other Land Use
- ANEL** Agência Nacional de Energia Elétrica
- ANP** Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
- BEV** Battery Electric Vehicle
- BNDES** Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
- CCEE** Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
- CCS** Carbon Capture and Storage
- CCUS** Carbon Capture Utilisation and Storage
- CE** Ceará
- CENEH** Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio
- CH4** Metano
- CO2** Dióxido de Carbono
- Copel** Companhia Paranaense de Energia
- E30** 30% de etanol na gasolina
- EPE** Empresa de Pesquisa Energética
- EPI** Environmental Performance Index 2022
- EUA** Estados Unidos da América
- FC** Fuel Cells
- FFI** Fossil Fuel Combustion and Industrial Processes
- FMI** Fundo Monetário Internacional

GBEP German Brazilian Energy Partnership

GEE Gases de Efeito Estufa

GH2 Green Hydrogen

GW Gigawatts

H2 Hidrogênio

H2LAC Latin America & the Caribbean

H2O Água

H2V Hidrogênio Verde

HFCVs Hydrogen Fuel Cell Vehicles

HFCs Hidrofluorcarbonetos

ICMS Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Prestação de Serviços

IEA International Energy Agency

IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change

IRENA International Renewable Energy Agency

ISO International Organization for Standardization

LH2 Laboratório do Hidrogênio

LH2 Laboratório do Hidrogênio

LOHC Liquid Organic Hydrogen Carrier

LULUCF Land Use, Land Use Change and Forestry

Labmater Laboratório de Materiais e Energias Renováveis

MCTI Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação

MME Ministério de Minas e Energia

MoU Memorandum of Understanding

N2O Óxido Nitroso

NZE Net Zero Emissions

O2 Oxigênio

O3 Ozônio

ODS Objetivo de Desenvolvimento Sustentável

ONU Organização das Nações Unidas

P&D Pesquisa e Desenvolvimento

PAC Programa de Aceleração do Crescimento

PCHs Pequenas Centrais Hidroelétricas

PD&I Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação

PEM Proton Exchange Membrane

PFCs Perfluorocarbonetos

PNH2 Plano Nacional de Hidrogênio

PR Paraná

PROCaC Programa Brasileiro de Sistemas Célula a Combustível

ProH2 Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio

PtX Power-to-X

REDII Renewable Energy Directive

RFC Regenerative Fuel Cell

SAF Sustainable Aviation Fuel

SF6 Hexafluoreto de enxofre

Sanepar Companhia de Saneamento do Paraná

UE União Europeia

UFPR Universidade Federal do Paraná

UNFCC United Nations Framework Convention on Climate Change

ZPE Zona de Processamento de Exportação

hab Habitantes

kWh Quilowatt-hora

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	JUSTIFICATIVA	16
1.2	OBJETIVOS	17
1.2.1	Objetivo Geral	17
1.2.2	Objetivos Específicos	17
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	MUDANÇAS CLIMÁTICAS	18
2.1.1	Efeito Estufa	19
2.1.2	Resfriamento Estratosférico	21
2.1.3	Caminhos de Mitigação	22
2.2	TRANSIÇÃO ENERGÉTICA	22
2.2.1	Setor Energético	23
2.2.2	Setor Industrial	26
2.2.3	Setor de Transportes	27
2.2.4	Matriz Energética Global	30
2.2.5	Matriz Elétrica Global	31
2.3	DESCARBONIZAÇÃO	32
2.4	CENÁRIO DE EMISSÕES LÍQUIDAS NULAS	33
2.5	RECURSOS ENERGÉTICOS RENOVÁVEIS	35
2.5.1	Energia Solar	35
2.5.2	Energia Eólica	36
2.5.3	Bioenergia	38
2.6	HIDROGÊNIO	40
2.6.1	Importância	41
2.6.2	Classificação do Hidrogênio por Cores	42
2.6.3	Rotas de Conversão	44
2.6.3.1	Processo de Eletrólise	45
2.6.4	Armazenamento, Transporte e Distribuição	46
2.6.5	Aplicações e Tecnologias Power-to-X	48
2.6.5.1	Células de Combustível	49
2.7	BRASIL	53
2.7.1	Matriz Energética	53
2.7.2	Transição Energética	54

2.7.3	Políticas Públicas - Hidrogênio	56
2.7.3.1	Plano Nacional do Hidrogênio	57
2.7.4	Paraná	58
2.8	ALEMANHA	59
2.8.1	Matriz Energética	60
2.8.2	Transição Energética	61
2.8.3	Metas Climáticas	63
2.8.4	Políticas Públicas	64
2.8.4.1	Plano Nacional do Hidrogênio	65
2.8.5	Roteiro do Hidrogênio na Europa	66
3	METODOLOGIA	71
3.1	ÁREA DE ESTUDO	71
3.2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	72
3.3	ESTUDO DE CASO - ALEMANHA	73
3.4	INQUÉRITO DE ESPECIALISTAS	74
3.4.1	Abordagem	75
3.4.2	Estrutura	75
3.4.3	Coleta de Dados	77
3.4.4	Perfil do especialista	77
3.4.5	Meio de contato	78
3.4.6	Definição da amostra	79
3.4.7	Informações a coletar	79
3.4.7.1	Introdução	80
3.4.7.2	Entrevista	80
3.4.7.3	Questionário eletrônico	84
3.4.8	Análise de Dados	88
3.4.8.1	Entrevista	88
3.4.8.2	Questionário	89
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	91
4.1	ESTUDO DE CASO - ALEMANHA	91
4.2	ENTREVISTA	93
4.3	QUESTIONÁRIO	100
4.4	SÍNTESE DOS RESULTADOS	128
4.5	LIMITAÇÕES DA PESQUISA	129
5	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	130

REFERÊNCIAS	132
------------------------------	------------

APÊNDICES	148
------------------	------------

APÊNDICE A	ENTREVISTA	149
-------------------	-----------------------------	------------

A.1	MENSAGEM LINKEDIN	149
-----	-----------------------------	-----

A.2	CONVITE ENTREVISTA - PESQUISA H2V	149
-----	---	-----

A.3	TRANSCRIÇÃO DAS ENTREVISTAS	151
-----	---------------------------------------	-----

APÊNDICE B	QUESTIONÁRIO	173
-------------------	-------------------------------	------------

B.1	MENSAGEM LINKEDIN	173
-----	-----------------------------	-----

B.2	MENSAGEM E-MAIL	173
-----	---------------------------	-----

B.3	CONVITE QUESTIONÁRIO - PESQUISA H2V	173
-----	---	-----

B.4	RESPOSTAS QUESTIONÁRIO - PERGUNTAS ABERTAS	175
-----	--	-----

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho trata do emprego do Hidrogênio Verde (H2V) como vetor energético na transição energética¹ atual no Brasil.

Atualmente, há políticas globais em direção à transição da matriz energética, com a substituição progressiva das fontes de energia não renovável por fontes de energia renovável ou de baixa emissão de gases de efeito estufa (GEE). A transição energética tem como objetivo principal a mitigação das rápidas mudanças climáticas atuais, quando comparadas ao período pré-industrial (IRENA, 2022a).

As mudanças climáticas atuais são resultados da intensificação do efeito estufa em um relativamente curto período de tempo, ocasionado pela significativa emissão de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera devido a atividades antrópicas (IPCC, 2022). Em decorrência da intensificação do efeito estufa observa-se o aumento da temperatura média do planeta em relação ao período pré-industrial (HOSSFELDER, SABINE, 2023).

A emissão de GEE oriunda do setor energético representa 34% do total de emissões (DHAKAL et al., 2022). Assim, é essencial reduzir as emissões provenientes desse setor visando à descarbonização. Uma abordagem eficaz consiste no fomento e na adoção de fontes de energia renovável (IRENA, 2022a).

As energias renováveis, como a solar e eólica, possuem uma característica de intermitência em relação à capacidade de geração de energia, a qual está diretamente ligada à disponibilidade temporária dessas fontes. O desafio atual reside na estabilização e armazenamento eficiente da produção de energia, a fim de atender à demanda em momentos posteriores à sua geração (LEADBETTER; SWAN, 2012).

Embora as baterias sejam amplamente utilizadas para armazenar energia, elas apresentam limitações significativas quando se trata de armazenar grandes quantidades de energia por longos períodos de tempo. As baterias são adequadas para armazenamento em escala local ou para uso imediato, porém, não são tão eficientes para armazenamento em larga escala (LEADBETTER; SWAN, 2012). É nesse contexto que o Hidrogênio Verde (H2V) surge como uma opção promissora.

O H2V é um vetor energético promissor na transição energética global devido às suas diversas vantagens. O H2V pode ser produzido a partir de fontes renováveis, como a eletrólise da água utilizando energia solar e eólica (EPE, 2021). Essa flexibilidade na produção permite o aproveitamento de diferentes recursos e aumenta a viabilidade

¹ Termos como transição energética, mudanças climáticas, aquecimento global, temperatura média do planeta e outros afins são utilizados no contexto do IPCC.

do H2V como uma forma limpa de energia. O H2V como meio de armazenamento de energia elétrica é preferível em comparação as baterias tradicionais, uma vez que o hidrogênio supera as limitações relacionadas aos procedimentos de carga e descarga elétrica, bem como às restrições para o armazenamento eficiente de grandes quantidades de energia elétrica (MATOS; NEVES; PIMENTA, 2008). Além disso, o H2V pode ser facilmente distribuído e transportado por meio de infraestruturas existentes, como gasodutos, possibilitando sua utilização em diversos setores, como transporte, indústria e geração de eletricidade. Adicionalmente, o H2V pode ser utilizado como matéria-prima para a produção de outros combustíveis, como metanol ou amônia, por meio de tecnologias *Power-to-X* (PtX) (GBEP, 2021). Essas características tornam o H2V uma solução versátil e eficaz para a descarbonização e transição para uma matriz energética mais sustentável² (IEA, 2021a).

1.1 JUSTIFICATIVA

O presente estudo sobre as prospecções e condicionantes do uso do H2V na transição energética no Brasil está alinhado ao Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) número 7 - “Energia Acessível e Limpa” e ao Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) número 13 - “Ação Contra a Mudança Global do Clima” estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU).

A escolha deste tema está vinculada ao contexto atual da transição energética de fontes de energia não renovável em fontes de energia renovável a fim de mitigar as emissões de GEE e conseqüentemente as mudanças climáticas, conforme o compromisso estabelecido no Acordo de Paris de atingir zero emissões líquidas de carbono até 2050; e devido à sua grande versatilidade como vetor energético, o hidrogênio (H2) é uma opção promissora para a descarbonização de diversos setores, como indústria, transporte e geração de energia elétrica.

Para um planejamento energético mais eficiente e adequado às necessidades do Brasil, é essencial analisar as oportunidades futuras e potenciais desafios do uso do hidrogênio (H2). Nesse contexto, a análise do caso de implantação de H2V na Alemanha, país que se encontra em estágio mais avançado nesse assunto, apresenta uma oportunidade significativa para obter conhecimentos relevantes acerca das viabilidades e obstáculos relacionados à produção, armazenamento, distribuição e aplicação em larga escala de H2V no Brasil.

² O termo “sustentável” significa causar pouco ou nenhum dano ao meio ambiente e, portanto, ser capaz de continuar por um longo tempo. E o termo “mais sustentável” refere-se a uma opção energética mais sustentável do que outras alternativas.

1.2 OBJETIVOS

Com base nas questões abordadas, definiram-se os seguintes objetivos.

1.2.1 Objetivo Geral

Descrever o atual cenário do H2V e analisar as condicionantes para introduzi-lo na matriz energética brasileira, tomando como base o estado do Paraná, e realizar uma análise prospectiva das oportunidades de produção e uso do H2V no país.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar o estado da arte da produção (conversão), transporte e aplicação do H2V no Brasil;
- Levantar o papel atual do uso do H2 na matriz energética no Paraná;
- Conhecer os prós e contras, relacionados à produção, armazenamento, distribuição e aplicação de H2V no Brasil;
- Conhecer o estado atual da inserção do H2V na matriz energética da Alemanha como referência para o Brasil.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este documento está dividido em 5 partes. Apresentou-se no capítulo 1 uma introdução sobre o assunto e os objetivos geral e específicos. No capítulo 2, tem-se a revisão bibliográfica, a qual abrange os temas: mudanças climáticas atuais, transição energética nos países Brasil e Alemanha, o uso de H2V como vetor energético universal e suas aplicações. No capítulo 3, descreve-se a metodologia a ser utilizada para a realização deste trabalho. No capítulo 4, são mostrados os resultados obtidos, seguidos da sua discussão. Tem-se, no capítulo 5, as conclusões gerais e recomendações para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo aborda o estado da arte em questões como mudanças climáticas, transição energética, recursos energéticos e H2. Alguns leitores podem optar por pular seções de revisão dependendo de sua familiaridade com o tema.

2.1 MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Mudança climática refere-se a uma alteração no estado do clima que pode ser identificada (por exemplo, por meio de testes estatísticos) por alterações na média e/ou na variabilidade de suas propriedades e que persiste por um período prolongado, normalmente décadas ou mais (IPCC, 2022).

No contexto deste trabalho, a fim de fazer uma distinção entre a mudança climática atribuída a atividades humanas que alteram a composição atmosférica e a variabilidade climática atribuída a causas naturais a Convenção-Quadro sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC¹), define mudança climática como “uma mudança climática atribuída direta ou indiretamente à atividade humana que altera a composição da atmosfera global e que se soma à variabilidade climática natural observada em períodos de tempo comparáveis” (IPCC, 2022).

De acordo com BARBIN (2006) a comunidade científica atribui à Revolução Industrial, que se processou em meados do Século XVIII, o marco inicial para as alterações antrópicas do clima induzidas pelas atividades humanas. Portanto, o termo “mudanças climáticas atuais” refere-se às significativas transformações climáticas ocorridas nesse curto período de tempo (da Revolução Industrial ao presente), principalmente impulsionadas pela atividade humana, que resultou no aumento das emissões de GEE na atmosfera.

Na Figura 1, são apresentadas as emissões antropogênicas totais de GEE no período de 1990 a 2019. No painel (a), estão representadas as tendências agregadas de emissões de GEE por grupos de gases relatadas em GtCO₂-eq² convertidas com base em potenciais de aquecimento global com um horizonte de tempo de 100 anos (GWP100) do Sexto Relatório de Avaliação (AR6³) do IPCC. No painel (b), estão apresentados os diagramas em cascata que justapõem as emissões de GEE para o ano mais recente (2019) em unidades equivalentes de dióxido de carbono (CO₂)

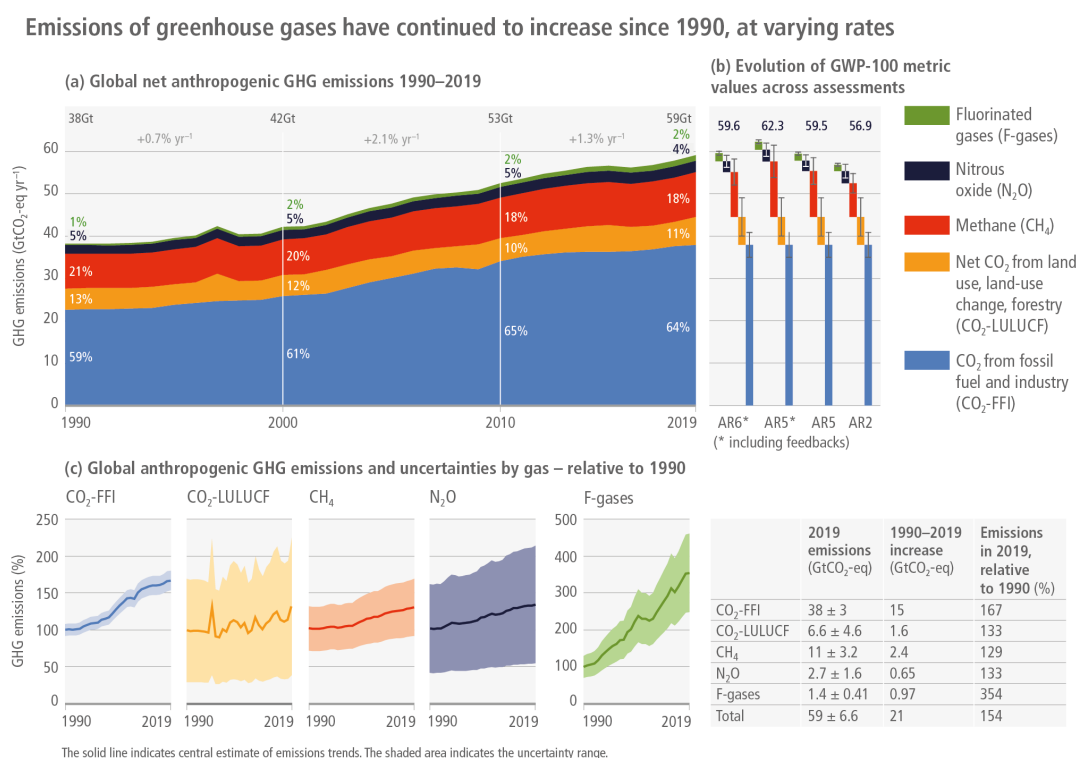
¹ UNFCCC: Sigla para “*United Nations Framework Convention on Climate Change*” e significa “Convenção-Quadro sobre Mudanças Climáticas”.

² CO₂-eq significa a quantidade de emissão de CO₂ que causaria o mesmo forçamento radiativo integrado ou mudança de temperatura, em um determinado horizonte de tempo, que uma quantidade emitida de um GEE ou uma mistura de GEEs (IPCC, 2022).

³ AR6: Sigla para “*Sixth Assessment Report*” e significa “Sexto Relatório de Avaliação” do IPCC.

usando valores de GWP100 do Segundo, Quinto e Sexto Relatórios de Avaliação do IPCC, respectivamente. As barras de erro mostram as incertezas associadas em um intervalo de confiança de 90%. E no painel (c), estão representadas as tendências individuais nas emissões de CO₂-FFI⁴, CO₂-LULUCF⁵, metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) e gás fluorado para o período 1990-2019, normalizadas para 1 em 1990 (MINX et al., 2021).

FIGURA 1 – TOTAL DE EMISSÕES ANTROPOGÊNICAS DE GEE (GTCO₂-EQ/ANO) 1990-2019



FONTE: Dhakal et al. (2022).

Destaca-se que a predominância das emissões antropogênicas de GEE é atribuída ao dióxido de carbono (CO₂), incluindo as emissões provenientes de combustíveis fósseis e processos industriais, e do uso da terra e mudanças no uso da terra e silvicultura (CO₂-FFI + CO₂-LULUCF).

2.1.1 Efeito Estufa

Os GEEs são os constituintes gasosos da atmosfera, tanto naturais quanto antropogênicos, que absorvem e emitem radiação em comprimentos de onda específicos

⁴ FFI: Sigla para “Fossil Fuel combustion and Industrial” e significa “combustão de combustíveis fósseis e processos industriais”.

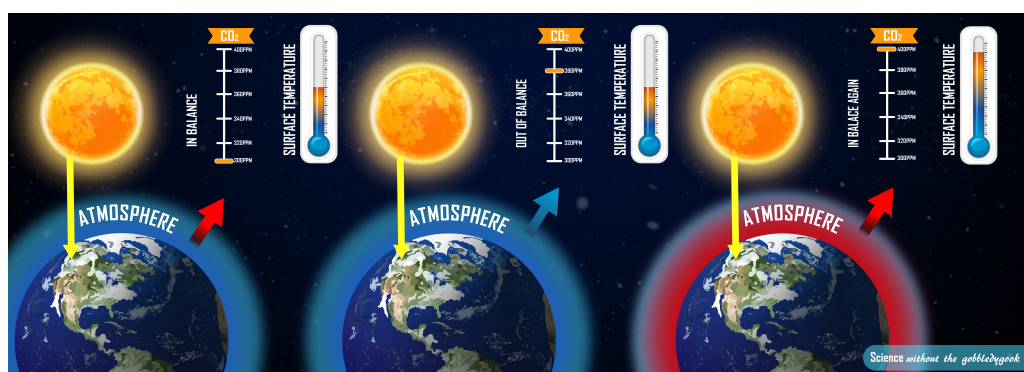
⁵ LULUCF: Sigla para “Land Use, Land-Use Change, and Forestry” e significa “uso da terra, mudança no uso da terra e silvicultura”.

dentro do espectro da radiação terrestre emitida pela superfície da Terra, pela própria atmosfera e pelas nuvens. Essa propriedade causa o efeito estufa (IPCC, 2022).

O vapor de água (H₂O), o CO₂, o óxido nitroso (N₂O), o metano (CH₄) e o ozônio (O₃) são os principais GEEs na atmosfera da Terra. Além disso, há uma série de GEEs na atmosfera totalmente produzidos pelo homem, como os halocarbonos e outras substâncias que contêm cloro e bromo, tratados no Protocolo de Montreal. Além do CO₂, N₂O e CH₄, o Protocolo de Kyoto trata dos GEEs hexafluoreto de enxofre (SF₆), hidrofluorcarbonos (HFCs) e perfluorocarbonos (PFCs) (IPCC, 2022).

De maneira simplificada e didática, Hossenfelder, Sabine (2023) explica como os GEEs causam o aquecimento global, conforme a FIGURA 2. Inicialmente a luz solar passa pela atmosfera e atinge a superfície da Terra. A superfície se aquece e emite radiação infravermelha. A radiação é retida pelos GEE na atmosfera. O GEE mais importante é o CO₂.

FIGURA 2 – REPRESENTAÇÃO DO EFEITO ESTUFA



FONTE: Hossenfelder, Sabine (2023).

A FIGURA 2 ilustra três etapas sucessivas do efeito estufa: o efeito estufa normal, o aumento dos níveis de CO₂ e o efeito estufa aprimorado.

- I) EFEITO ESTUFA NORMAL - A radiação infravermelha emitida aquece a atmosfera por baixo. Em grandes altitudes, ela escapa para o espaço sideral. A energia total de saída é determinada pela temperatura da atmosfera na altitude de emissão. O sistema está em equilíbrio enquanto a energia total de entrada for igual à energia total de saída;
- II) OS NÍVEIS DE DIÓXIDO DE CARBONO AUMENTAM - Mais dióxido de carbono na atmosfera dificulta a fuga da luz infravermelha. Agora, em média, a luz infravermelha é emitida em altitudes mais altas do que antes, e a temperatura da atmosfera é mais baixa. A Terra perde menos calor. O calor que sai é maior do que o que entra. O sistema está fora de equilíbrio;

III) EFEITO ESTUFA APRIMORADO - Como a energia que sai é menor do que a que entra, a superfície da Terra se aquece e a atmosfera é aquecida ainda mais por baixo. A atmosfera em grandes altitudes também se aquece, e a energia total emitida aumenta. O sistema entra em equilíbrio novamente, mas agora a temperatura da superfície está mais alta.

Portanto, o aumento dos níveis de CO₂ na atmosfera intensifica o efeito estufa, levando a um desequilíbrio térmico da atmosfera e ao aquecimento global.

2.1.2 Resfriamento Estratosférico

Segundo Hossenfelder, Sabine (2023) e Simon Clark (2022) o aquecimento da troposfera pode ser atribuído tanto ao aumento da incidência de luz solar quanto ao aumento das concentrações de gases que absorvem radiação de comprimento de onda longa, como o CO₂. No entanto, nota-se que, embora um aumento na luz solar também deva aquecer a estratosfera, observa-se o fenômeno conhecido como resfriamento estratosférico, no qual a estratosfera esfria em vez de se aquecer.

De acordo com ESPERE Climate Encyclopaedia (s.d.) os dois principais motivos pelos quais a estratosfera está esfriando são a redução do ozônio (O₃) estratosférico e o aumento do CO₂. O resfriamento resultante da destruição da camada de O₃, causada pela emissão de GEE, não será abordado em detalhes neste estudo. No entanto, de maneira sucinta, o resfriamento decorrente da destruição do O₃ é o resultado da diminuição da absorção da radiação ultravioleta, levando a uma redução no aquecimento.

Conforme Simon Clark (2022) a temperatura da superfície é determinada pela quantidade de luz solar incidente e pela capacidade da atmosfera em reter a radiação de onda longa. A troposfera está se aquecendo devido à atmosfera ter melhorado na absorção da radiação térmica de ondas longas, o que se deve ao aumento das concentrações de CO₂ na atmosfera, uma vez que o CO₂ é capaz de absorver radiação de onda longa. Como resultado, a troposfera absorve toda essa radiação, o que leva a uma redução na quantidade de radiação que se desloca verticalmente da superfície terrestre em direção à estratosfera. Consequentemente, menos calor é transferido para a estratosfera, enquanto a mesma quantidade de radiação é emitida para o espaço, levando ao seu resfriamento.

Consequentemente, a comprovação do resfriamento estratosférico evidencia que o aumento dos GEE, especialmente o CO₂, é a causa do aquecimento global atual na superfície da Terra. Portanto, destaca-se a importância de reduzir a emissão desses gases, um processo já em curso na transição energética.

2.1.3 Caminhos de Mitigação

De acordo com IPCC (2022) as medidas de mitigação climática incluem tecnologias, processos e práticas que contribuem para reduzir as emissões de GEE, como energia renovável, minimização de resíduos e transporte público.

Esses caminhos de mitigação, em inglês *mitigation pathways*, são caracterizados por reduções na demanda de energia, descarbonização da eletricidade e de outros combustíveis, eletrificação do uso final de energia, reduções profundas nas emissões agrícolas e alguma forma de redução de CO₂ (CDR⁶) com armazenamento de carbono na terra ou sequestro em reservatórios geológicos (DHAKAL et al., 2022).

Portanto, a transição energética é essencial para impulsionar a adoção de fontes de energia limpa e renovável, substituindo gradualmente os combustíveis fósseis, e desempenha um papel fundamental na busca por soluções sustentáveis e na redução das emissões de GEE.

2.2 TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

A transição energética pode ser considerada uma transformação sociotécnica, que reconhece que as mudanças no sistema energético não se referem apenas à mudança tecnológica, utilizada para produzir e consumir energia, mas também à transformação dos sistemas sociais, políticos e econômicos que moldam a produção e o consumo de energia. Ela não é induzida apenas por incentivos, mas por políticas que envolvem a criação de novos mercados, organizações, instituições e cadeias de suprimentos, além de estimular políticas para mobilizar grupos de interesse e aceitação pública para evitar conflitos em torno de novas tecnologias (DASZKIEWICZ, 2020; SOVACOOOL et al., 2020; LAZARO et al., 2022).

O sucesso da transição energética depende da transformação do setor energético global de fontes baseadas em combustíveis fósseis para fontes que não emitam carbono até a segunda metade deste século, reduzindo as emissões de CO₂ relacionadas à energia para mitigar as mudanças climáticas e limitar o aumento na temperatura global a 1,5°C em relação aos níveis pré-industriais (IRENA, 2022a).

A mudança para fontes de energia renováveis pode diversificar a matriz energética do país e fortalecer sua segurança energética (adequada, acessível e confiável), enquanto reduz sua vulnerabilidade a flutuações no mercado internacional de energia (IEA, 2007). Adicionalmente, a transição pode estimular a inovação tecnológica e o desenvolvimento econômico, criando novas oportunidades de emprego e investimento em setores de energia limpa (UNITED NATIONS, s.d.). No entanto, um grande desafio

⁶ CDR: Sigla para “*Carbon Dioxide Removal*” e significa “remoção de dióxido de carbono”.

da transição energética é garantir a produção de energia suficiente para atender às demandas do mundo ao mesmo tempo em que se reduz as emissões de GEE.

As emissões de GEE continuaram a aumentar desde 2010 em todos os setores e subsetores, mais rapidamente na produção de eletricidade, na indústria e no transporte (DHAKAL et al., 2022). No entanto, a descarbonização do setor energético exige ações urgentes em escala global para acelerar a transição energética global e cumprir os compromissos nacionais e regionais (IRENA, 2022a). Conforme o IPCC (2020) a energia está no centro da solução para o desafio climático.

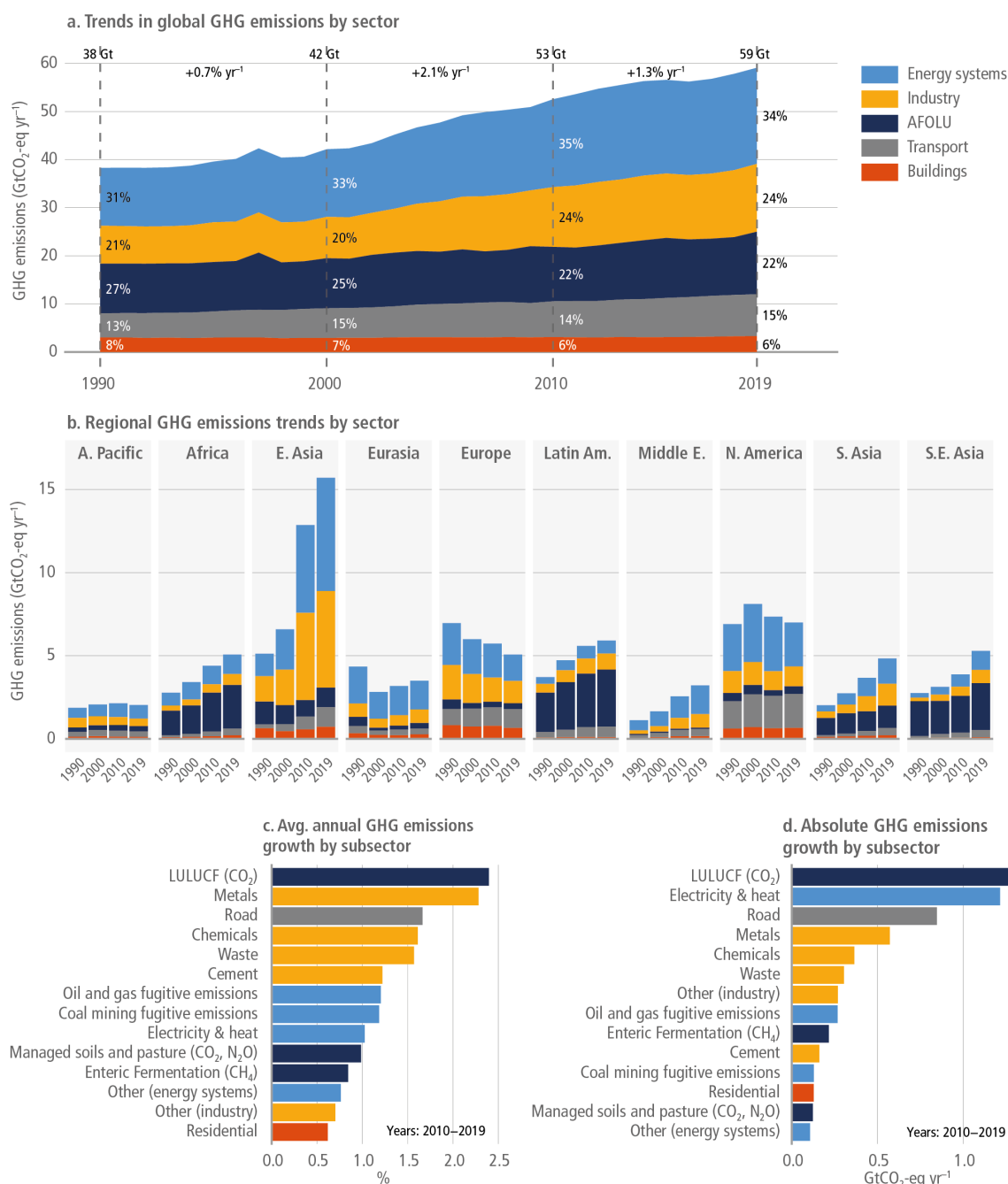
2.2.1 Setor Energético

O crescimento das emissões do sistema global de energia diminuiu nos últimos anos, mas o uso global de petróleo e gás ainda estava crescendo (JACKSON et al., 2019) e o setor continuou sendo o maior contribuinte individual para as emissões globais de GEE em 2019, com 20 GtCO₂-eq (34%) (FIGURA 3). A maior parte dos 14 GtCO₂-eq provenientes da geração de eletricidade e calor (23% das emissões globais de GEE em 2019) se deve ao uso de energia na indústria e em edifícios, tornando esses dois setores também alvos proeminentes de mitigação (DAVIS et al., 2018; CRIPPA; OREGGIONI et al., 2019).

Na FIGURA 3, é apresentado o total anual de emissões antropogênicas de GEE por setor econômico principal e suas tendências subjacentes por região. No painel (a), estão representadas as tendências do total anual de emissões antropogênicas de GEE (em GtCO₂-eq ano⁻¹) por setor econômico principal. No painel (b), estão apresentadas as tendências do total anual de emissões antropogênicas de GEE (em GtCO₂-eq ano⁻¹) por setor econômico principal e região. Nos painéis (c) e (d), estão representadas as maiores mudanças sub-setoriais nas emissões de GEE para o período de relatório 2010-2019 em termos relativos (% de mudança anual) e absolutos (GtCO₂-eq ano⁻¹). As emissões são convertidas em equivalentes de CO₂ com base nos potenciais de aquecimento global com um horizonte de tempo de 100 anos (GWP100) do Sexto Relatório de Avaliação do IPCC (LAMB; GRUBB et al., 2022). Note que AFOLU⁷ significa agricultura, silvicultura e outros usos da terra.

⁷ AFOLU: Sigla para "Agriculture, Forestry, and Other Land Use" e significa "agricultura, silvicultura e outros usos da terra".

FIGURA 3 – TOTAL ANUAL DE EMISSÕES ANTROPOGÊNICAS DE GEE POR SETOR ECONÔMICO PRINCIPAL E SUAS TENDÊNCIAS SUBJACENTES POR REGIÃO



FONTE: Dhakal et al. (2022).

O crescimento das emissões de CO₂ dos sistemas de energia acompanhou de perto o aumento do PIB per capita globalmente (LAMB; GRUBB et al., 2022), conforme a literatura substancial que descreve a relação mútua entre o crescimento econômico e a demanda por energia e eletricidade (KHANNA; RAO, 2009; STERN, 2011). Essa relação se desenvolveu fortemente nas regiões em desenvolvimento, particularmente na Ásia, onde um aumento massivo do fornecimento de energia acompanhou o cresci-

mento econômico - com aumentos médios anuais da demanda de energia entre 3,8 e 4,3% em 2010-2019 (FIGURA 3). O principal fator para desacelerar o crescimento das emissões de CO₂ dos sistemas de energia tem sido o declínio das intensidades de energia em quase todas as regiões. Anualmente, 1,9% menos energia por unidade de PIB foi usada globalmente entre 2010 e 2019 (DHAKAL et al., 2022).

A intensidade de carbono⁸ da geração de energia varia muito entre as regiões (e também dentro delas). Na América do Norte, uma mudança do carvão para o gás na geração de energia (PETERS; LE QUÉRÉ et al., 2017; FENG, 2019; MOHLIN et al., 2019), bem como um declínio geral na participação de combustíveis fósseis na produção de eletricidade (de 66% em 2010 para 59% em 2018) (MOHLIN et al., 2019) diminuiu a intensidade de carbono e as emissões de CO₂.

Desde 2007, as melhorias na intensidade de carbono da Europa têm sido impulsionadas pela expansão constante das energias renováveis na participação da geração de eletricidade (PETERS; LE QUÉRÉ et al., 2017; PETERS; ANDREW et al., 2020; LE QUÉRÉ et al., 2019; RODRIGUES et al., 2020). Alguns estudos atribuem esses efeitos às políticas climáticas, como o preço mínimo do carbono no Reino Unido, o esquema de comércio de emissões da UE e os generosos subsídios à energia renovável em todo o continente (DYRSTAD et al., 2019; WANG, H. et al., 2020).

Os países desenvolvidos do Sudeste Asiático e a Austrália, o Japão e a Nova Zelândia se destacam em contraste com outras regiões desenvolvidas, com um aumento da intensidade regional de carbono de 1,8 e 1,9% por ano, respectivamente (FIGURA 3). Em geral, o uso de gás natural para a produção de eletricidade está crescendo fortemente na maioria dos países e o gás contribuiu para o maior aumento nas emissões globais de CO₂ fóssil nos últimos anos (JACKSON et al., 2019; PETERS; ANDREW et al., 2020). Além disso, o gás traz o risco de aumento das emissões de CH₄ de fontes fugitivas, bem como grandes emissões cumulativas ao longo da vida útil das novas usinas de energia a gás que podem apagar as reduções precoces da intensidade de carbono (SHEARER et al., 2020).

O crescimento das emissões da energia a carvão desacelerou após 2010 e até mesmo diminuiu entre 2011 e 2019, principalmente devido a uma desaceleração do crescimento econômico e menos adições de capacidade de carvão na China (FRIEDLINGSTEIN et al., 2019; PETERS; ANDREW et al., 2020). As discussões sobre um "pico de carvão" global, no entanto, podem ser prematuras, pois um crescimento maior foi observado em 2019 (FRIEDLINGSTEIN et al., 2019; PETERS; ANDREW et al., 2020). Grandes aumentos de capacidade em andamento e planejados na Índia, na Turquia, na Indonésia, no Vietnã, na África do Sul e em outros países se tornaram

⁸ O termo "intensidade de carbono" refere-se a quantos gramas de CO₂ são liberados para produzir um quilowatt-hora (kWh) de eletricidade.

um impulsionador do uso de carvão térmico após 2014 (UNEP, 2017; EDENHOFER et al., 2018; STECKEL et al., 2020).

2.2.2 Setor Industrial

Quando as emissões indiretas da produção de eletricidade e calor são incluídas, a indústria se torna o setor que mais emite GEEs (20,0 GtCO₂-eq em 2019). Facilitado pela globalização, o Leste Asiático tem sido a principal fonte e o principal impulsionador do crescimento das emissões globais do setor desde 2000 (LAMB; WIEDMANN; PONGRATZ; ANDREW; CRIPPA; OLIVIER; WIEDENHOFER; MATTIOLI; AL KHOURDAJIE et al., 2021). No entanto, embora o Leste Asiático tenha emitido 45% das emissões de GEE do setor industrial mundial em 2019, uma notável redução de 5,0% por ano na intensidade energética e de 1,6% na intensidade de carbono ajudou a estabilizar as emissões diretas de CO₂ industrial nessa região (-0,3% por ano entre 2010 e 2019; FIGURA 3). As emissões diretas de CO₂ da indústria também diminuíram na América Latina, Europa e Austrália, Japão e Nova Zelândia e, em menor escala, na América do Norte. Em todas as outras regiões, elas estavam crescendo - mais rapidamente no sul da Ásia (+4,3% ao ano para emissões diretas de CO₂ desde 2010), conforme FIGURA 3.

O principal impulsionador global das emissões da indústria tem sido um aumento massivo na demanda por produtos que são indiretamente usados na produção, como cimento, produtos químicos, aço, alumínio, madeira, papel, plásticos, lubrificantes, fertilizantes e assim por diante. Essa demanda foi impulsionada pelo crescimento econômico, pelo aumento da riqueza e do consumo, bem como pelo rápido aumento das populações urbanas e pelo desenvolvimento da infraestrutura associada (KRAUSMANN; LAUK et al., 2018). Há fortes evidências de que o uso crescente de concreto, aço e outros materiais de construção está intimamente ligado a esses fatores (PAULIUK; WANG; MÜLLER, 2013; CAO et al., 2017; KRAUSMANN; WIEDENHOFER et al., 2017; PLANK et al., 2018; HABERL et al., 2020). Os estoques per capita de cimento e aço mostram um padrão típico de rápida decolagem à medida que os países se urbanizam e se industrializam, antes de desacelerar para um baixo crescimento em altos níveis de PIB. Portanto, em países que recentemente se industrializaram e urbanizaram, ou seja, no leste, sul e sudeste da Ásia, pode-se observar um aumento particularmente forte das emissões desses subsetores. Alguns países ricos parecem se estabilizar em níveis elevados de estoques per capita, embora não esteja claro se essas estabilizações persistem e se resultam em reduções absolutas significativas do uso de materiais (WIEDENHOFER et al., 2015; CAO et al., 2017; KRAUSMANN; LAUK et al., 2018). As oportunidades de prolongar a vida útil e melhorar a reciclagem no fim da vida útil para obter reduções absolutas nas atividades de extração ainda não foram exploradas (KRAUSMANN; WIEDENHOFER et al., 2017; ZINK; GEYER, 2017).

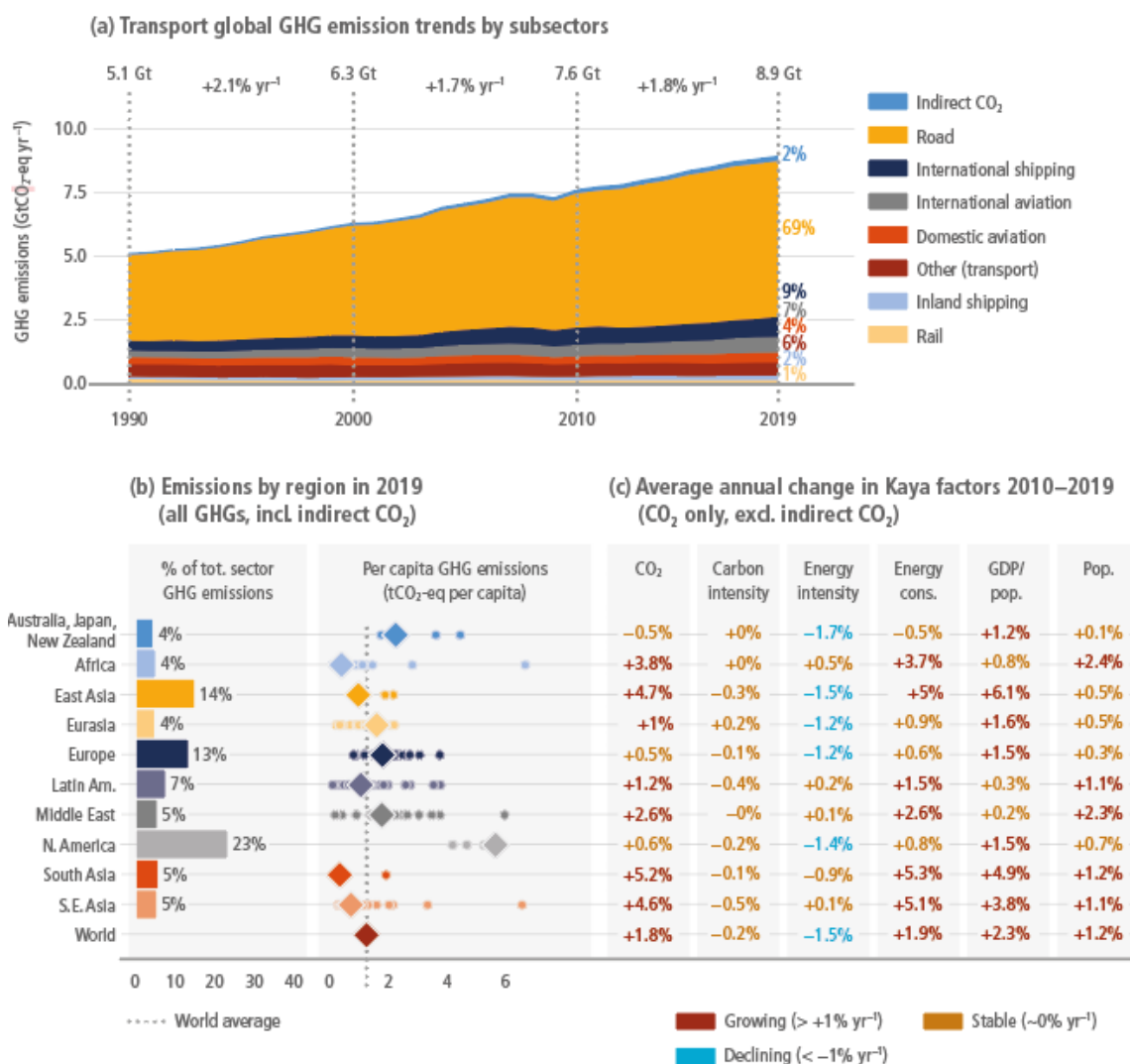
No lado da produção, as melhorias na eficiência da extração, processamento e fabricação de materiais reduziram o uso de energia industrial por unidade de produção (WANG, J. et al., 2019). Essas medidas, juntamente com a substituição aprimorada de materiais, projetos leves, vida útil prolongada de produtos e serviços, maior eficiência de serviços e maior reutilização e reciclagem, permitirão reduções substanciais de emissões no futuro (HERTWICH et al., 2019). Na ausência dessas melhorias na intensidade energética, o crescimento da população e do PIB per capita teria levado as emissões industriais de CO₂ a aumentar em mais de 100% até 2017 em comparação com 1990, em vez de 56% (LAMB; GRUBB et al., 2022). No entanto, muitos estudos apontam para diferenças regionais profundas nos níveis de eficiência e grandes potenciais globalmente inexplorados para melhorar a eficiência energética industrial por meio da adoção das melhores tecnologias e práticas disponíveis para a produção de metais, cimento e produtos químicos (GUTOWSKI et al., 2013; SCHULZE et al., 2016; HERNANDEZ et al., 2018; TALAEI; AHIDUZZAMAN; KUMAR, 2018).

2.2.3 Setor de Transportes

Com um crescimento anual médio constante de +1,8% por ano entre 2010 e 2019, as emissões globais de GEE do transporte atingiram 8,9 GtCO₂-eq em 2019 e representaram 15% de todas as emissões diretas e indiretas (FIGURA 4). As emissões de passageiros e frete do transporte rodoviário representaram, de longe, o maior componente e fonte desse crescimento (6,1 GtCO₂-eq, 69% de todas as emissões do transporte em 2019). As emissões do transporte marítimo nacional e internacional e da aviação representaram juntas 2,0 GtCO₂-eq ou 22% do total desse setor em 2019. A América do Norte, a Europa e o Leste Asiático se destacam como os principais contribuintes regionais para as emissões globais de transporte e, juntos, respondem por 50% do total do setor (DHAKAL et al., 2022).

Na FIGURA 4, são apresentadas as tendências e fatores determinantes das emissões globais do setor de transportes com a energia medida como consumo final total de energia. No painel (a), são apresentadas as tendências de emissões globais de GEE no transporte por setor entre 1990 e 2019. No painel (b), são apresentadas as emissões por região em 2019 (todos os GEEs, incluindo CO₂ indireto). E o painel (c), expõe a mudança média anual nos fatores Kaya 2010 a 2019 (incluindo apenas o CO₂, excluindo o CO₂ indireto).

FIGURA 4 – TENDÊNCIAS E FATORES DETERMINANTES DAS EMISSÕES GLOBAIS DO SETOR DE TRANSPORTES COM A ENERGIA MEDIDA COMO CONSUMO FINAL TOTAL DE ENERGIA



FONTE: Dhakal et al. (2022).

A proporção da energia final total utilizada no transporte (28%) e sua rápida expansão ao longo do tempo pesam muito sobre os esforços de mitigação do clima, já que 92% da energia do transporte vem de combustíveis derivados do petróleo (IEA, 2020b). Essas tendências colocam o transporte como um dos setores mais desafiadores para a mitigação da mudança climática. As emissões absolutas e per capita de transporte da América do Norte são as mais altas entre as regiões do mundo, mas as do Sul, Sudeste e Leste Asiático estão crescendo mais rapidamente (entre +4,6% e +5,2% por ano para CO₂ entre 2010 e 2019) (DHAKAL et al., 2022), conforme FIGURA 4.

Mais do que qualquer outro setor, o uso de energia no transporte acompanhou o crescimento do PIB per capita (FIGURA 4), (LAMB; WIEDMANN; PONGRATZ;

ANDREW; CRIPPA; OLIVIER; WIEDENHOFER; MATTIOLI; KHOURDAJIE et al., 1990). Os desenvolvimentos desde 1990 continuam uma tendência histórica de aumento das distâncias de viagem e uma mudança dos modos de transporte de baixa para alta velocidade que acompanha o crescimento do PIB (SCHAFER et al., 2009; GOTA et al., 2019). Melhorias modestas na eficiência energética foram realizadas entre 2010 e 2019, com uma média de -1,5% por ano na intensidade energética global, enquanto as intensidades de carbono do setor de transporte permaneceram estáveis em todas as regiões do mundo (FIGURA 4). De modo geral, os aumentos globais nos níveis de atividade de viagens de passageiros e de carga superaram as melhorias na eficiência energética e na economia de combustível, dando continuidade a uma tendência de longo prazo para o setor de transportes (GUCWA; SCHÄFER, 2013; GRÜBLER, 2003; MCKINNON, 2016).

Apesar de algumas conquistas políticas, o uso de energia no sistema global de transportes permanece até o momento profundamente enraizado nos combustíveis fósseis (evidência robusta, alta concordância) (FIGUEROA MEZA et al., 2014; IEA, 2019a). Em parte, isso se deve à crescente adoção de veículos maiores e mais pesados baseados em combustão em algumas regiões, que tendem a superar em muito as vendas de veículos elétricos e híbridos.

Embora a atividade global de passageiros tenha se expandido em todas as regiões do mundo, existem grandes disparidades entre regiões de baixa e alta renda e, dentro dos países, entre áreas urbanas e rurais (IVANOVA et al., 2017). As economias emergentes do Sul Global estão se tornando mais dependentes de carros, com o rápido crescimento da motorização, serviços de transporte privado sob demanda, expansão urbana e o surgimento da produção local de automóveis, enquanto o transporte público luta para oferecer serviços adequados (DARGAY; GATELY; SOMMER, 2007; HANSEN; NIELSEN, 2016; POJANI; STEAD, 2017).

A atividade de transporte de carga cresceu 68% em todo o mundo nas duas últimas décadas, impulsionada pelo aumento do PIB global, juntamente com a proliferação do comércio *on-line* e a entrega rápida (ou seja, no mesmo dia e no dia seguinte) ((SLOCAT), 2018). O crescimento tem sido particularmente rápido no transporte rodoviário de cargas pesadas (DHAKAL et al., 2022).

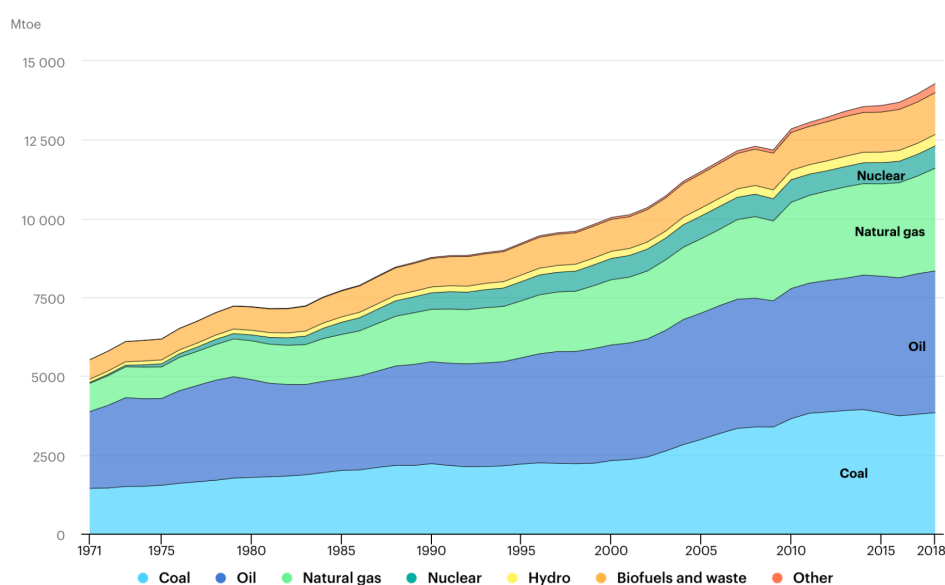
Embora representem uma pequena parcela do total de emissões de GEE, a aviação doméstica e internacional tem crescido mais rapidamente do que as emissões do transporte rodoviário, com taxas médias de crescimento anual de +3,3% e +3,4%, respectivamente, entre 2010 e 2019 (CRIPPA; GUIZZARDI et al., 2021; MINX et al., 2021). As melhorias de eficiência energética na aviação foram consideravelmente maiores do que no transporte rodoviário, mas foram superadas por aumentos ainda maiores nos níveis de atividade ((SLOCAT), 2018; LEE et al., 2021).

2.2.4 Matriz Energética Global

De acordo com MOREIRA, GRIMONI e ROCHA (s.d.) a matriz energética "é o panorama de distribuição real de aproveitamento dos recursos energéticos dentro de um país, de uma região ou do mundo".

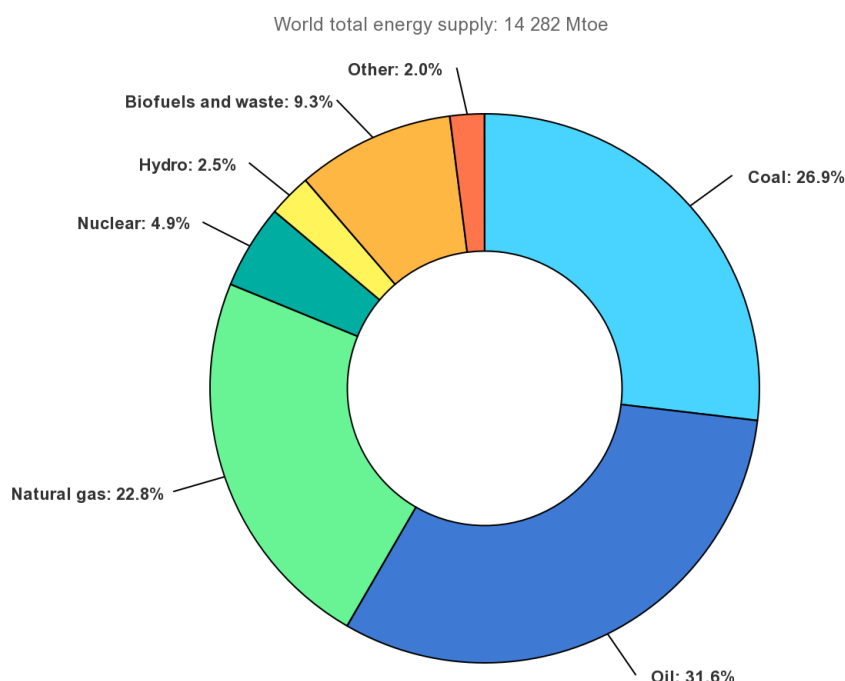
A matriz energética mundial é predominantemente composta por fontes não renováveis, como carvão, petróleo e gás natural (EPE, 2022). A FIGURA 5 ilustra o fornecimento de energia no mundo ao longo do período de 1971 a 2018. Durante esse intervalo, houve um crescimento expressivo de 259%, passando de 5.515 Mtoe em 1971 para 14.282 Mtoe em 2018. A FIGURA 6 detalha a participação relativa de cada fonte no suprimento global de energia em 2018, incluindo a aviação internacional e os bunkers marítimos internacionais. No percentual atribuído ao carvão, também são considerados a turfa e o xisto betuminoso.

FIGURA 5 – FORNECIMENTO TOTAL DE ENERGIA (MTOE) NO MUNDO POR FONTE 1971-2018



FONTE: IEA (2020a).

FIGURA 6 – PARTICIPAÇÃO GLOBAL DO SUPRIMENTO TOTAL DE ENERGIA POR FONTE EM 2018



FONTE: IEA (2020a).

Em 2018, a contribuição das fontes renováveis, como energia solar, eólica e geotérmica, para a matriz energética global era de apenas 2%, representadas como categoria "Outros" no gráfico. Ao considerar também a participação da energia hidrelétrica e da biomassa, a parcela das energias renováveis alcançava aproximadamente 13,8% da composição energética mundial. Esses números destacam a necessidade de um maior investimento e desenvolvimento de fontes de energia sustentáveis para reduzir a dependência das fontes não renováveis e promover uma transição energética mais equilibrada e ambientalmente consciente.

2.2.5 Matriz Elétrica Global

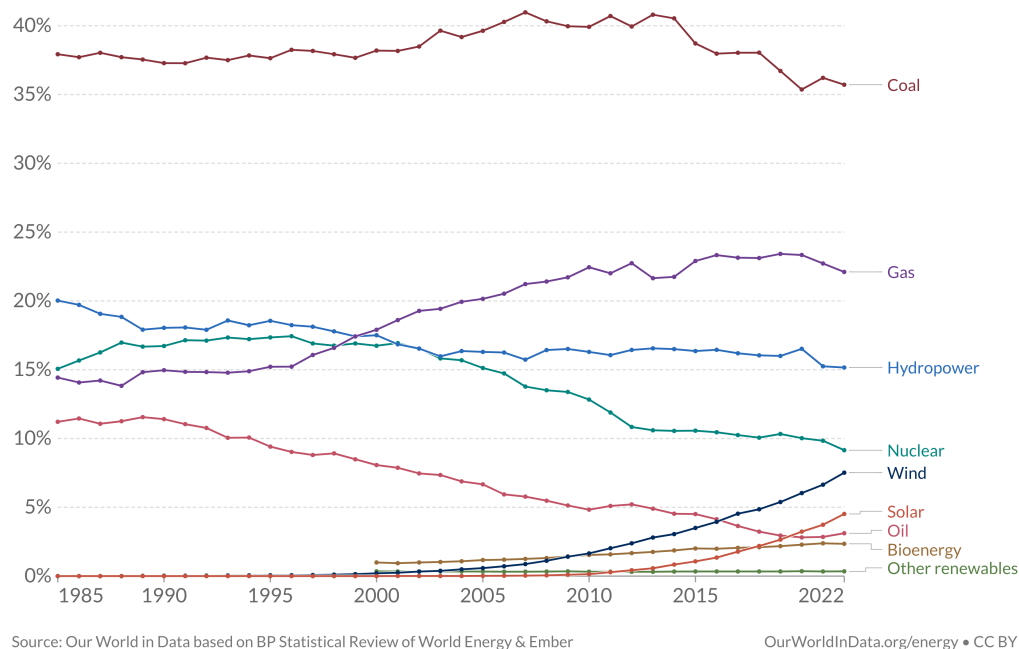
Atualmente, o setor de energia elétrica está buscando aumentar a disponibilidade, confiabilidade e segurança do fornecimento de energia aos consumidores. Essa busca aumentou consideravelmente a intenção de integração da energia renovável no setor de eletricidade como uma estratégia para reduzir o problema da deficiência de energia, especialmente em assentamentos isolados fora da rede. Entretanto, a variabilidade nas fontes de fornecimento de energia renovável juntamente com as mudanças condicionais no nível de consumo de energia com relação ao tempo a necessidade de sistemas de armazenamento de energia (ESSs⁹). O interesse na exploração de

⁹ ESSs: Sigla para "Energy Storage Systems" e significa "sistemas de armazenamento de energia".

energias renováveis como solar, eólica e hidrelétrica cresce continuamente devido à sua sustentabilidade e potencial para reduzir a dependência de fontes não renováveis.

O gráfico de linhas (FIGURA 7) mostra a participação de cada fonte no total e oferece uma perspectiva melhor de como cada uma está mudando ao longo do tempo.

FIGURA 7 – PARTICIPAÇÃO NA PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE NO MUNDO POR FONTE 1985-2022



FONTE: Ritchie, Roser e Rosado (2022).

Globalmente, vemos que o carvão, seguido pelo gás, é a maior fonte de produção de eletricidade. Das fontes de baixo carbono, a energia hidrelétrica e a nuclear fazem a maior contribuição, embora a energia eólica e a solar estejam crescendo rapidamente (RITCHIE; ROSER; ROSADO, 2022).

2.3 DESCARBONIZAÇÃO

O IPCC (2022) afirma que a "descarbonização" é o processo pelo qual países, indivíduos ou outras entidades têm como objetivo alcançar a emissão zero de carbono de origem fóssil. Normalmente, refere-se a uma redução das emissões de carbono associadas à eletricidade, ao setor industrial e ao transporte.

De acordo com Pereira (2022) a descarbonização busca reduzir a participação das fontes fósseis na matriz elétrica, contribuindo para a diminuição do aquecimento global. Outro objetivo é permitir o aumento da segurança energética dos países desenvolvidos e muito dependentes da importação de recursos energéticos.

Os principais pilares da descarbonização do sistema global de energia são a eficiência energética, as mudanças de comportamento, a eletrificação, as energias renováveis, o H₂ e os combustíveis à base de H₂, a bioenergia e a captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS¹⁰) (IEA, 2021b).

2.4 CENÁRIO DE EMISSÕES LÍQUIDAS NULAS

O IPCC (2022) afirma que as emissões líquidas nulas (NZE¹¹) serão alcançadas quando as emissões antropogênicas de GEE para a atmosfera serão equilibradas por remoções antropogênicas durante um período específico. Quando vários gases de efeito estufa estão envolvidos, a quantificação das emissões líquidas zero depende da métrica climática escolhida para comparar as emissões de diferentes gases (como o potencial de aquecimento global, o potencial de mudança da temperatura global e outros, bem como o horizonte de tempo escolhido).

No Acordo de Paris, os países concordaram em "alcançar um equilíbrio entre as emissões antropogênicas por fontes e as remoções por sumidouros de GEE na segunda metade do século". A redução das emissões globais de CO₂ a zero até 2050 é coerente com os esforços para limitar o aumento de longo prazo das temperaturas médias globais a 1,5°C. Isso exige nada menos que uma transformação completa da forma como produzimos, transportamos e consumimos energia (IEA, 2021b).

Segundo IEA (2021b) o caminho global para emissões líquidas zero até 2050 exige que todos os governos fortaleçam significativamente e, em seguida, implementem com sucesso suas políticas de energia e clima. O número de países que se comprometeram a atingir emissões líquidas zero cresceu rapidamente em 2020 e em 2021 abrange cerca de 70% das emissões globais de CO₂.

O caminho para as emissões líquidas zero exige a implantação imediata e massiva de todas as tecnologias de energia limpa e eficiente disponíveis. As reduções de emissões do setor de energia não se limitam ao CO₂: as emissões de CH₄ do suprimento de combustível fóssil caem 75% nos próximos dez anos, como resultado de um esforço global e conjunto para implantar todas as medidas e tecnologias de redução disponíveis (IEA, 2021b).

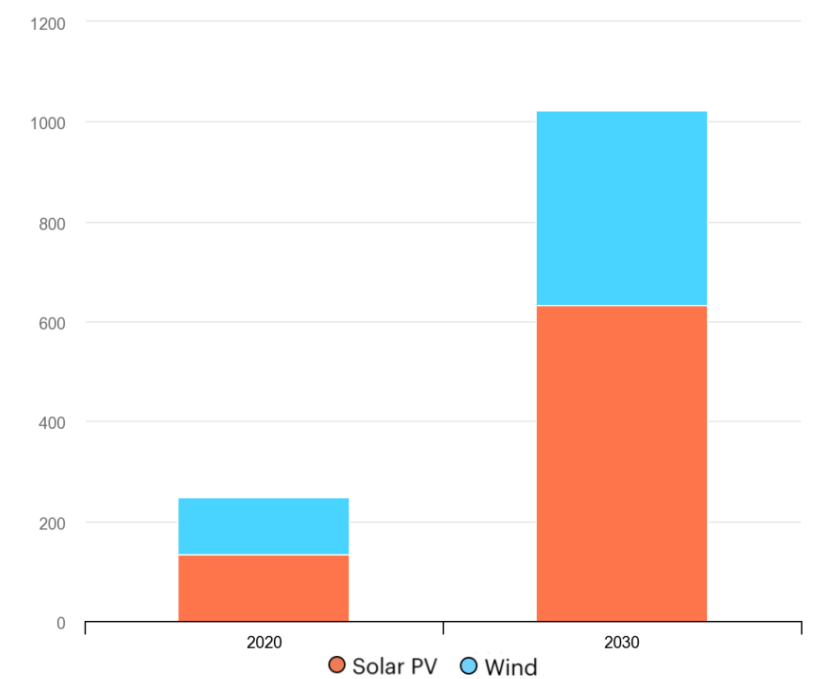
A IEA (2021b) reitera que tecnologias de energia renovável cada vez mais baratas dão à eletricidade a vantagem na corrida para o net zero. Nosso caminho exige o aumento rápido da energia solar e eólica nesta década, atingindo acréscimos anuais de 630 gigawatts (GW) de energia solar fotovoltaica (PV) e 390 GW de energia eólica até 2030, quatro vezes mais do que os níveis recordes estabelecidos em 2020 (135 GW

¹⁰ CCUS: Sigla para "Carbon Capture, Utilisation and Storage" e significa "Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono".

¹¹ NZE: Sigla para "Net Zero Emissions" e significa "Emissões Líquidas Nulas".

de energia solar fotovoltaica (PV) e 114 GW de energia eólica), conforme a FIGURA 8. No caso da energia solar fotovoltaica, atualmente isso equivale à instalação do maior parque solar do mundo, aproximadamente todos os dias. A energia hidrelétrica e a nuclear, as duas maiores fontes de eletricidade de baixo carbono atualmente, fornecem uma base essencial para as transições.

FIGURA 8 – ACRÉSCIMOS DE CAPACIDADE DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E EÓLICA NO CAMINHO DO ZERO LÍQUIDO, 2020-2030



FONTE: IEA (2021b).

As políticas devem ser fortalecidas para acelerar a implantação de tecnologias de energia limpa e eficiente. As metas e os leilões competitivos podem permitir que a energia eólica e solar acelerem a transição do setor elétrico. A eliminação gradual dos subsídios aos combustíveis fósseis, a precificação do carbono e outras reformas de mercado podem garantir sinais de preços adequados (IEA, 2021b).

A maior parte das reduções globais nas emissões de CO₂ até 2030 em nosso caminho vem de tecnologias prontamente disponíveis atualmente. No entanto, em 2050, quase metade das reduções será proveniente de tecnologias que estão atualmente em fase de demonstração ou protótipo. Na indústria pesada e no transporte de longa distância, a parcela de reduções de emissões provenientes de tecnologias que ainda estão em desenvolvimento é ainda maior (IEA, 2021b).

As maiores oportunidades de inovação dizem respeito a baterias avançadas, eletrolisadores de H₂ e captura e armazenamento diretos de ar. Juntas, essas três áreas tecnológicas fazem contribuições vitais para as reduções nas emissões de CO₂

entre 2030 e 2050 em nosso caminho. A inovação nos próximos dez anos - não apenas por meio de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) e demonstração, mas também por meio da implantação - precisa ser acompanhada pela construção em larga escala da infraestrutura de que as tecnologias precisarão. Isso inclui novos dutos para transportar as emissões de CO₂ capturadas e sistemas para movimentar o H₂ em torno e entre portos e zonas industriais (IEA, 2021b).

2.5 RECURSOS ENERGÉTICOS RENOVÁVEIS

As energias renováveis cresceram rapidamente nos últimos anos, impulsionadas pelo apoio de políticas e por reduções acentuadas de custos para a energia solar fotovoltaica e eólica, principalmente. O setor de eletricidade continua sendo o ponto focal para as energias renováveis, com o forte crescimento da energia solar fotovoltaica e da energia eólica nos últimos anos, além da contribuição já significativa da energia hidrelétrica (IEA, 2022f).

Entre os principais recursos energéticos renováveis, destacam-se a bioenergia, a energia hídrica, a energia eólica (*offshore* e *onshore*) e a energia solar (distribuída e centralizada). Essas fontes desempenham um papel fundamental na transição energética, abrangendo setores como eletricidade, transporte e aquecimento.

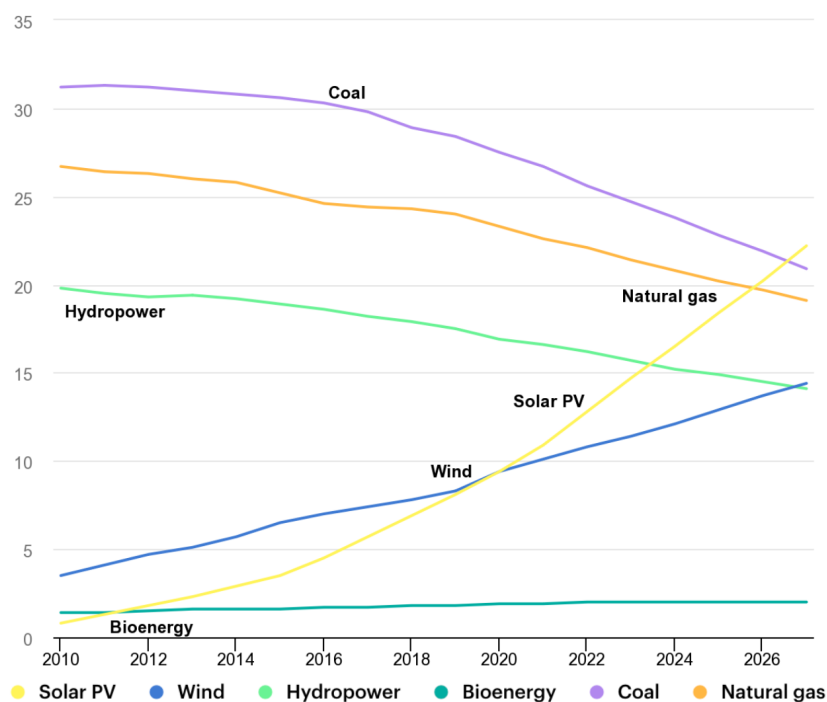
2.5.1 Energia Solar

A energia solar é a conversão da luz solar em energia. É utilizada em todo o mundo e é cada vez mais popular para gerar eletricidade e aquecer ou dessalinizar água (IRENA, 2022b).

A energia solar fotovoltaica (PV), a eletricidade térmica solar e o aquecimento e resfriamento solar são tecnologias solares bem estabelecidas. A energia solar fotovoltaica (PV) combina duas vantagens: a fabricação de módulos pode ser feita em grandes fábricas, o que permite economias de escala, e também é uma tecnologia muito modular e pode ser implantada em quantidades muito pequenas de cada vez. Isso permite uma ampla gama de aplicações. Os sistemas podem ser muito pequenos, desde eletrônicos pessoais ou aplicações fora da rede, até instalações de geração de energia em escala de serviços públicos (IEA, 2022c).

A energia solar fotovoltaica ainda domina os acréscimos de capacidade de energia renovável. De acordo com a previsão da IEA (2022c) a capacidade de energia instalada da energia solar fotovoltaica está pronta para superar a do carvão até 2027, tornando-se a maior do mundo, conforme a FIGURA 9. Nessa previsão a capacidade acumulada de energia solar fotovoltaica quase triplica, crescendo quase 1.500 GW durante o período (2010-2027), superando o gás natural em 2026 e o carvão em 2027.

FIGURA 9 – PORCENTAGEM DE PARTICIPAÇÃO DA CAPACIDADE ACUMULATIVA DE ENERGIA POR TECNOLOGIA, 2010-2027



FONTE: IEA (2022c).

Apesar dos atuais custos de investimento mais altos devido aos elevados preços das commodities, a energia solar fotovoltaica em escala de serviços públicos é a opção menos dispendiosa para a nova geração de eletricidade na maioria dos países. A energia solar fotovoltaica distribuída, como a energia solar em telhados de edifícios, também está preparada para um crescimento mais rápido, como resultado dos preços mais altos da eletricidade no varejo e do crescente apoio político para ajudar os consumidores a economizar dinheiro em suas contas de energia (IEA, 2022c).

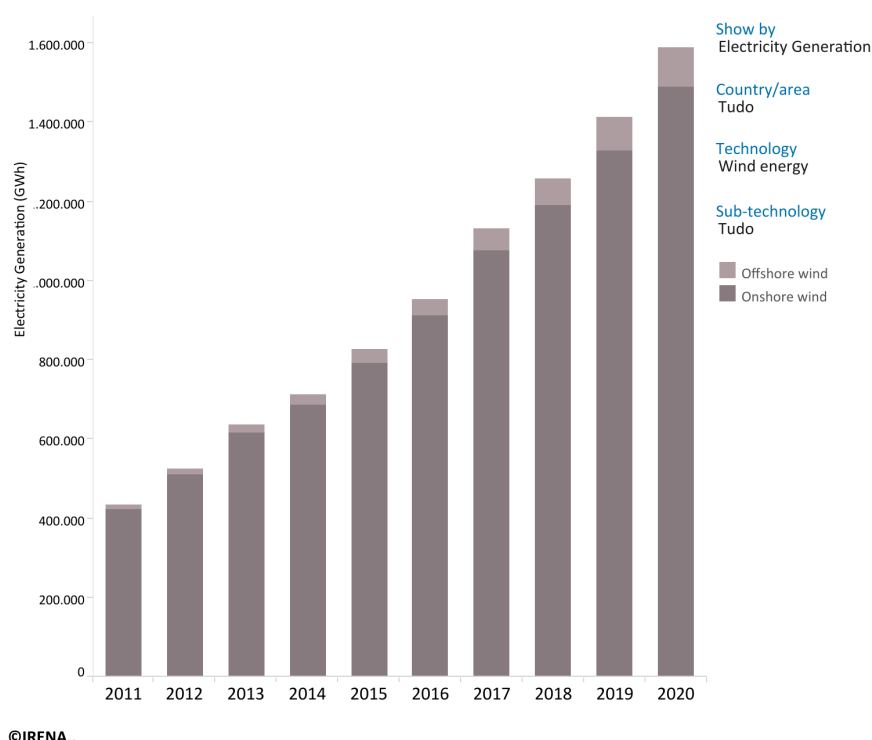
2.5.2 Energia Eólica

O vento é usado para produzir eletricidade, convertendo a energia cinética do ar em movimento em eletricidade. Nas turbinas eólicas modernas, o vento gira as pás do rotor, que convertem a energia cinética em energia rotacional. Essa energia rotacional é transferida por um eixo para o gerador, produzindo assim energia elétrica (IRENA, 2022c).

A energia eólica tem crescido rapidamente desde 2000, impulsionada por Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), políticas de apoio e redução de custos. A capacidade global instalada de geração eólica - tanto em terra quanto no mar - aumentou 98 vezes nas últimas duas décadas, saltando de 7,5 GW em 1997 para cerca de 733 GW em

2018, de acordo com os dados da *International Panel on Climate Change* (IRENA). A capacidade eólica *onshore* cresceu de 178 GW em 2010 para 699 GW em 2020, enquanto a eólica *offshore* cresceu proporcionalmente mais, mas a partir de uma base menor, de 3,1 GW em 2010 para 34,4 GW em 2020. A produção de energia eólica aumentou em um fator de 5,2 entre 2009 e 2019, chegando a 1412 TWh (IRENA, 2022c), conforme a FIGURA 10.

FIGURA 10 – TENDÊNCIAS DE GERAÇÃO DE ELETRICIDADE POR MEIO DA ENERGIA EÓLICA

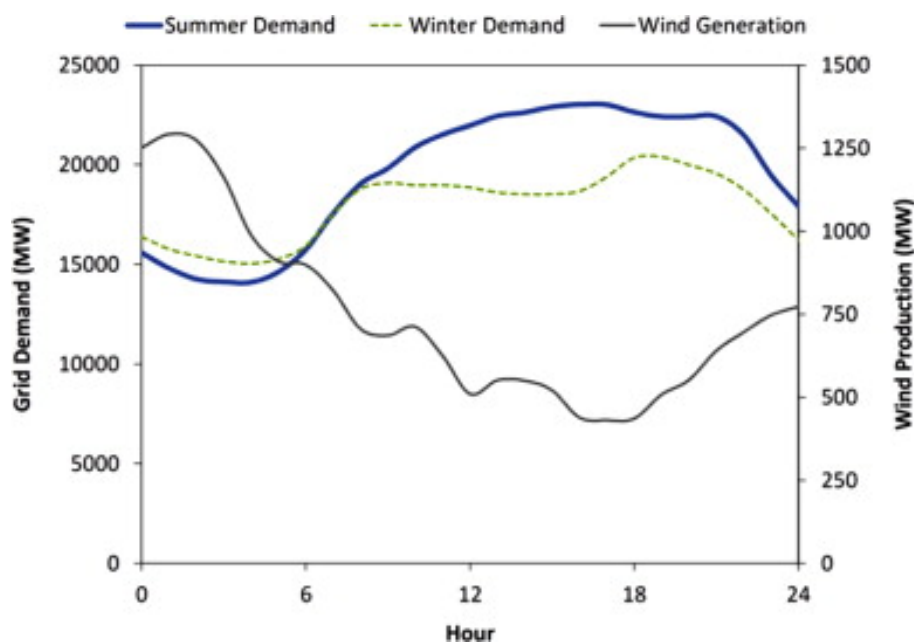


FONTE: IRENA (2022c).

A IRENA (2022c) ressalta que a energia eólica terrestre e marítima ainda tem um enorme potencial para maior implantação e aprimoramento em todo o mundo.

As fontes de energia renovável, apesar de inesgotáveis em quantidade, apresentam flutuação na produção de energia. A FIGURA 11 apresenta a demanda de eletricidade por um dia de verão e de inverno sobreposta à geração total de energia eólica para o dia de verão. De acordo com Leadbetter e Swan (2012), isto significa que a geração de energia eólica pode variar de forma aleatória, dependendo da disponibilidade do vento no local.

FIGURA 11 – FLUTUAÇÕES DA GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA AO LONGO DE UM DIA DE VERÃO E AS DEMANDAS DE ELETRICIDADE NO VERÃO E NO INVERNO EM ONTÁRIO - CANADÁ



FONTE: Leadbetter e Swan (2012).

Portanto, o armazenamento de energia renovável se torna crucial para equilibrar a oferta e a demanda de eletricidade, permitindo o uso contínuo e confiável dessas fontes, mesmo quando a geração é mais alta do que a demanda ou quando não há geração suficiente.

2.5.3 Bioenergia

De acordo com o IPCC (2022) a bioenergia é a energia derivada de qualquer forma de biomassa (material orgânico vivo ou morto recentemente) ou de seus subprodutos metabólicos. A biomassa contém carbono absorvido pelas plantas por meio da fotossíntese. Quando essa biomassa é usada para produzir energia, o carbono é liberado durante a combustão e simplesmente retorna à atmosfera, tornando a bioenergia moderna¹² um combustível promissor com emissão quase zero (IEA, 2022a).

Conforme a IEA (2022b) a bioenergia moderna é uma importante fonte de energia renovável, pois sua contribuição para a demanda final de energia em todos os setores é cinco vezes maior do que a energia eólica e solar fotovoltaica combinadas. Nos últimos anos, a bioenergia para eletricidade e biocombustíveis de transporte têm crescido rapidamente, impulsionado principalmente pelo apoio político. No entanto, o setor de aquecimento continua sendo a maior fonte de bioenergia.

¹² A bioenergia moderna não inclui o uso tradicional da biomassa para cozinhar e aquecer, usando fogueiras ineficientes ou fogões simples, o que causa impactos na saúde humana e no meio ambiente.

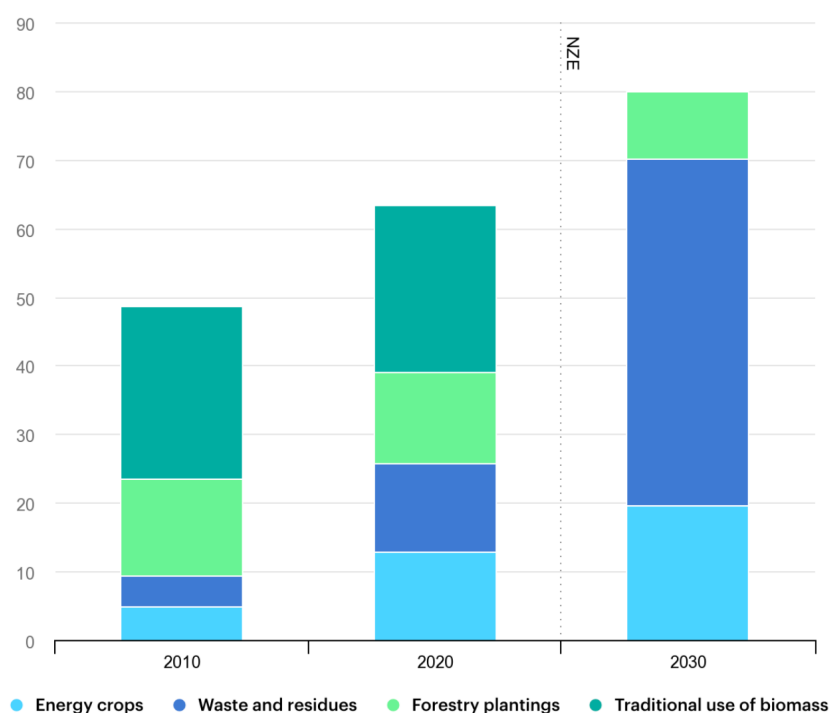
A bioenergia é útil porque há flexibilidade nos contextos e setores em que pode ser usada, desde a bioenergia sólida e os biogases queimados para gerar energia e calor em residências e plantas industriais até os biocombustíveis líquidos usados em carros, navios e aviões. Além disso, muitas vezes pode aproveitar a infraestrutura existente - por exemplo, o biometano pode usar os gasodutos de gás natural existentes e os equipamentos do usuário final, enquanto muitos biocombustíveis líquidos *drop-in* podem usar as redes de distribuição de petróleo existentes e ser usados em veículos com apenas pequenas alterações (IEA, 2022a).

Algumas fontes de bioenergia, como o licor negro da produção de papel, são o subproduto de um processo industrial que teria ocorrido de qualquer forma. Porém, mais comumente, a bioenergia é obtida de culturas ou árvores cultivadas para fins específicos em um processo altamente intensivo em relação a outras formas de energia. A produção insustentável de bioenergia pode ter consequências sociais, como impactos sobre os preços dos alimentos e a concorrência pelo uso da terra, além de externalidades ambientais negativas, como a piora da biodiversidade e o aumento líquido das emissões (IEA, 2022a).

Segundo IEA (2022a), a fim de alcançar o objetivo de Cenário Net Zero, é crucial aumentar a produção de bioenergia, porém, é fundamental adotar medidas cautelosas para evitar quaisquer efeitos negativos significativos na sociedade ou no meio ambiente. De acordo com as considerações de sustentabilidade, o Cenário Net Zero não contempla a expansão de terras cultiváveis para a produção de bioenergia, nem a conversão de áreas florestais existentes em plantações de culturas bioenergéticas.

Em 2030, de acordo com esse cenário, estima-se que 60% do suprimento de bioenergia será proveniente de resíduos e detritos, os quais não requerem o uso adicional de terra (IEA, 2022a), conforme a FIGURA 12.

FIGURA 12 – FORNECIMENTO GLOBAL DE BIOENERGIA NO CENÁRIO NET ZERO



FONTE: (IEA, 2022a).

A previsão desse cenário é de reduzir a zero o uso tradicional de biomassa para atividades como cozinhar e aquecer. Em 2020, a participação das culturas energéticas, resíduos e detritos, plantações florestais e uso tradicional de biomassa era de 12,9%, 12,8%, 13,3% e 24,4%, respectivamente. Já no cenário de Cenário Net Zero, espera-se que essas participações sejam de 19,6%, 50,6%, 9,8% e 0%, respectivamente.

2.6 HIDROGÊNIO

O H₂ é o elemento químico mais comum no universo e o terceiro elemento mais encontrado na superfície da Terra, sendo dessa forma, de disponibilidade abundante. Ele ocupa o primeiro lugar da tabela periódica e seu gás, formado por átomos de H₂, é 14,4 vezes mais leve que o ar (GBEP, 2021).

O H₂ é um transportador de energia versátil, que pode ajudar a enfrentar vários desafios energéticos críticos. O H₂ pode ser produzido a partir de quase todos os recursos energéticos, embora o uso atual de H₂ no refino de petróleo e na produção de produtos químicos seja coberto principalmente por H₂ proveniente de combustíveis fósseis, com significativas emissões de CO₂ associadas (IEA, 2021a).

A diferença crucial entre H₂ e a eletricidade é que o H₂ pode ser utilizado como um portador de energia química, composto de moléculas e não apenas elétrons, o que

facilita o armazenamento e o transporte de forma estável e similar a outras fontes tais como o petróleo, carvão, biomassa e gás natural (GBEP, 2021).

Neste sentido o H₂ pode apresentar uma grande vantagem para o sistema elétrico nacional e contribuir para o equilíbrio da demanda (consumo) e a oferta (geração) energética (BAETA, 2021). Atualmente, tal equilíbrio é realizado de forma ineficiente por meio da redução ou incremento na geração elétrica pelas usinas termelétricas e hidrelétricas. Além disso, o aumento nos últimos 20 anos da participação na matriz elétrica brasileira de fontes renováveis, como solar e eólica, contribuem ainda mais para a complexidade do setor, notadamente pela intermitência na capacidade de geração de acordo com a disponibilidade temporária de tais fontes. Alternativamente, a partir da utilização do H₂, o excedente da geração de um volume de energia superior à demanda atual pode ser redirecionado para eletrolisadores capazes de produzir H₂. Em momentos inversos, quando a demanda energética supera a capacidade da geração, o H₂ pode ser empregado para geração de energia elétrica por meio de pilha a combustível, suprimindo a diferença, com pouca perda de energia (GBEP, 2021).

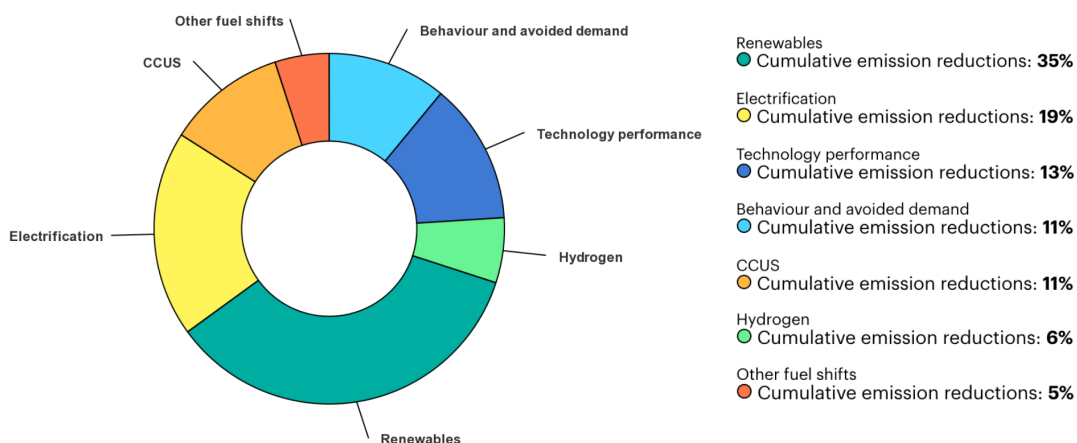
2.6.1 Importância

O H₂ está se tornando cada vez mais relevante no contexto da redução das emissões líquidas de GEE a zero até 2050. Neste sentido, IEA (2021a) afirma que os principais pilares da descarbonização do sistema energético global são a eficiência energética, a mudança de comportamento, a eletrificação, as energias renováveis, o H₂ e os combustíveis à base de H₂, e a captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS).

O H₂ limpo, produzido a partir de combustíveis renováveis, nucleares ou fósseis com a CCUS, pode ajudar a descarbonizar vários setores, inclusive o de transporte de longa distância, produtos químicos, ferro e aço, onde é comprovadamente difícil reduzir as emissões (IEA, 2021a).

A importância do H₂ no Cenário de Emissões Líquidas Nulas reflete em sua crescente participação nas reduções cumulativas de emissões. O forte crescimento da demanda de H₂ e a adoção de tecnologias mais limpas para sua produção permitem que o H₂ e os combustíveis à base de H₂ evitem até 60 Gt de emissões de CO₂ em 2021-2050 no cenário de emissões líquidas nulas (NZE), o que representa 6% do total das reduções de emissões acumuladas (IEA, 2021a), conforme a FIGURA 13.

FIGURA 13 – REDUÇÃO ACUMULATIVA DE EMISSÕES POR MEDIDA DE MITIGAÇÃO NO CENÁRIO NET ZERO 2021-2050



FONTE: (IEA, 2021a).










Ainda sobre a FIGURA 13, conforme destacado pela IEA (2021a), o termo *behaviour*, em português comportamento, refere-se a mudanças na demanda de serviços de energia ligadas a decisões do usuário (por exemplo, mudanças na temperatura do aquecimento). Já *avoided demand*, em português, demanda evitada, refere-se a mudanças na demanda de serviços de energia decorrentes de desenvolvimentos tecnológicos (por exemplo, digitalização). Além disso, *other fuel shifts*, em português Outras mudanças de combustível, refere-se à mudança de carvão e petróleo para gás natural, energia nuclear, hidrelétrica, geotérmica, energia solar concentrada ou energia marinha. Por fim, H2 inclui o H2 e os combustíveis à base de H2.

A IEA (2021a) afirma que o H2 também pode apoiar a integração de energias renováveis variáveis no sistema de eletricidade, sendo uma das poucas opções para armazenar eletricidade durante dias, semanas ou meses.

2.6.2 Classificação do Hidrogênio por Cores

No setor de energia, é afirmado por Panić, Cuculić e Ćelić (2022) que as cores são utilizadas para distinguir as categorias de H2, indicando a tecnologia de produção utilizada, conforme apresentado na FIGURA 14.

FIGURA 14 – CLASSIFICAÇÃO DO HIDROGÊNIO EM ESCALA DE CORES

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

FONTE: Adaptado de EPE (2021).

Atualmente, a maior quantidade de H₂ é o H₂ cinza, que representa o H₂ produzido pela reforma a vapor do gás natural ou pela gaseificação do carvão sem CCUS. O H₂ cinza é usado principalmente na indústria petroquímica e na produção de amônia. A principal desvantagem do H₂ cinza está associada às significativas emissões de CO₂ geradas durante a produção de H₂, que são estimadas em cerca de 830 Mt de CO₂ por ano (AJANOVIC; SAYER; HAAS, 2022).

O H₂ azul é o H₂ produzido pela reforma do metano a vapor com CCUS, usando gás natural. De acordo com Ajanovic, Sayer e Haas (2022), quando aplicado esse processo foram relatadas taxas de captura de até 90%, incluindo também a captura de CO₂ pós-combustão. Atualmente, o H₂ azul é considerado uma tecnologia de transição antes de uma transição completa para o H₂V. Apesar de resultar em menos emissões, a tecnologia ainda está longe de ser neutra para o clima. Mesmo quando as operações de captura e armazenamento de carbono (CCS¹³) foram alimentadas por eletricidade renovável, ocorreram emissões fugitivas substanciais de metano a montante da produção e do transporte de gás natural. Neste sentido, H₂ azul é semelhante ao H₂ cinza proveniente do gás natural, mas tem emissões reduzidas devido ao uso da captura e armazenamento de carbono (CCS) (AJANOVIC; SAYER; HAAS, 2022).

¹³ CCS: Sigla para “Carbon Capture and Storage” e significa “Captura e Armazenamento de Carbono”.

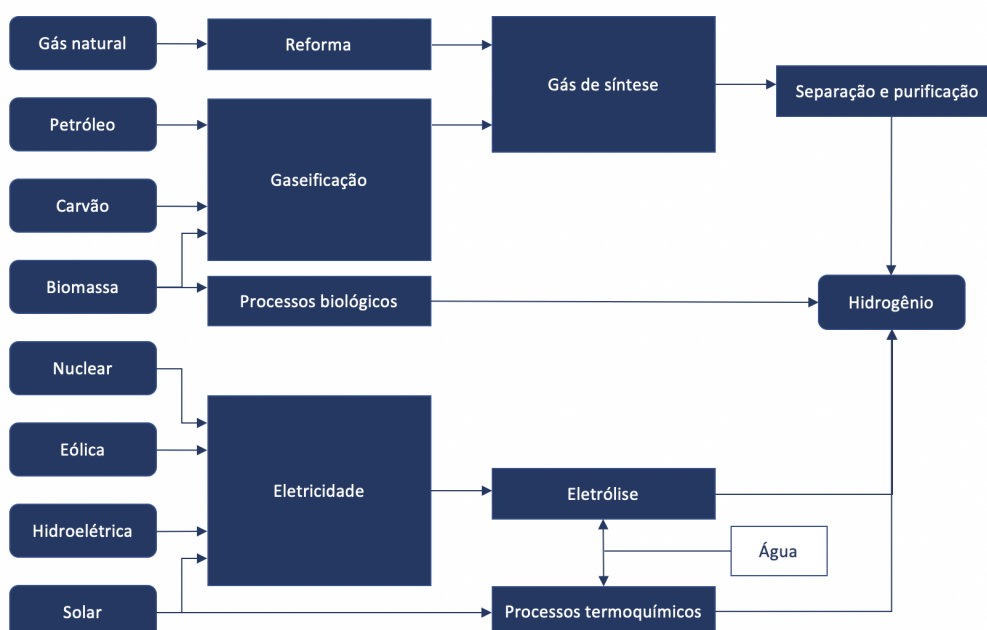
O H₂ cuja produção é livre de emissão de CO₂ é denominado H₂V. O mesmo pode ser produzido através da eletrólise da água, na qual a fonte de eletricidade empregada é integralmente proveniente de fontes de energias renováveis. Tal fato gera um H₂ sustentável e livre de emissões CO₂, independentemente da tecnologia de eletrólise escolhida. Alternativamente o H₂V também pode ser produzido através do emprego da biomassa como matéria prima. Dessa forma, o H₂V é considerado na atualidade uma das principais tecnologias-chave para economias comprometidas com as metas de descarbonização assinadas no Acordo de Paris (GBEP, 2021).

Neste estudo, não serão abordadas as demais cores de H₂, como preto, marrom, branco, turquesa, musgo e rosa.

2.6.3 Rotas de Conversão

A produção global de H₂ atualmente é dominada pelo uso de combustíveis fósseis. O H₂ eletrolítico, produzido a partir de água e eletricidade, desempenha apenas um papel menor – embora tenha sido uma importante fonte de H₂ industrial nas décadas de 1920 a 1960, usando eletricidade gerada a partir de hidrelétrica, antes de ser substituída pelo gás natural. Com custos decrescentes para energia renovável (em particular solar fotovoltaico e eólico), o interesse está crescendo na eletrólise da água para a produção de H₂ e sua conversão em combustíveis à base de H₂ ou matérias-primas, como hidrocarbonetos sintéticos e amônia, que são mais compatíveis que H₂ com a infraestrutura existente (IEA, 2019b). Na FIGURA 15, são apresentadas as diferentes matérias-primas e rotas de conversão (produção) de H₂.

FIGURA 15 – MATÉRIAS-PRIMAS E ROTAS DE CONVERSÃO DO HIDROGÊNIO



FONTE: Adaptado de GBEP (2021).

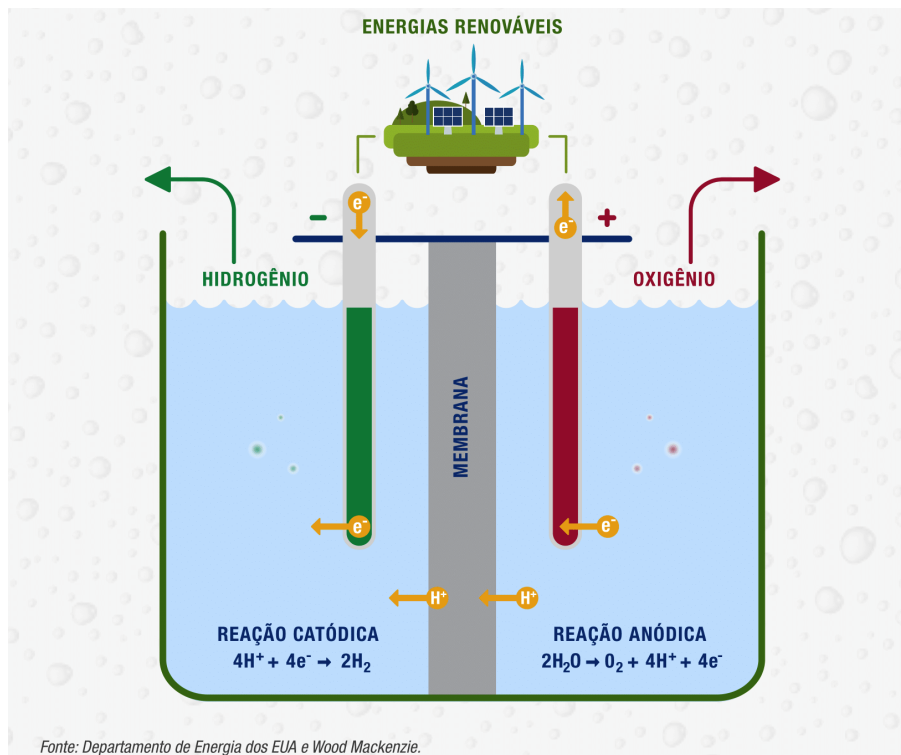
Em 2019, a IEA (2019b) identificou que cerca de 70 Mt de H₂ dedicado foram produzidos, sendo 76% de gás natural e quase todo o restante (23%) de carvão, tendo como consequência emissões anuais de CO₂ correspondentes a países como a Indonésia e do Reino Unido combinados. A eletrólise responde por 2% da produção global de H₂, mas há um escopo significativo para a eletrólise fornecer mais H₂ com baixo teor de carbono.

2.6.3.1 Processo de Eletrólise

Com custos decrescentes para energia renovável (em particular solar fotovoltaico e eólico), o interesse está crescendo na eletrólise da água para a produção de H₂ e sua conversão em combustíveis à base de H₂ ou matérias-primas, como hidrocarbonetos sintéticos e amônia, que são mais compatíveis que H₂ com a infraestrutura existente (IEA, 2019b).

A obtenção do H₂V por eletrólise a partir de fontes renováveis consiste na decomposição das moléculas de água (H₂O) em oxigênio (O₂) e H₂ (IBERDROLA, s.d.). A Figura 16 ilustra o processo de eletrólise utilizando energia renovável.

FIGURA 16 – PROCESSO DE ELETRÓLISE VIA ENERGIA RENOVÁVEL



FONTE: Adaptado de Wood Mackenzie (2019).

De acordo com a Iberdrola (s.d.), esse processo envolve as seguintes etapas:

- I) A água utilizada para a eletrólise deve conter **sais e minerais** para conduzir a eletricidade;
- II) Dois **eletrodos submersos na água** e conectados a uma fonte de energia aplicam uma corrente contínua;
- III) A dissociação do H₂ e o oxigênio (O₂) acontece quando os eletrodos atraem para si os **íons de carga oposta**;
- IV) Durante a eletrólise ocorre uma **reação oxidação-redução** pelo efeito da eletricidade.

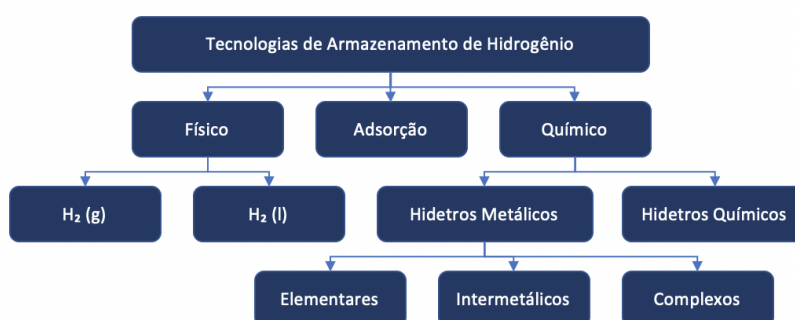
Assim, a eletrólise da água para obtenção de H₂V, através do uso de fontes renováveis, representa uma promissora tecnologia que possibilita a produção de um combustível limpo e sustentável.

2.6.4 Armazenamento, Transporte e Distribuição

Uma das principais preocupações no armazenamento de H₂ está relacionada à criação de sistemas de armazenamento que sejam seguros, confiáveis, eficientes e eficazes, considerando a baixa densidade de energia volumétrica do H₂, apesar de sua alta densidade de energia gravimétrica (ENERGY ASSETS DO BRASIL, GESEL/UFRJ E PUC-RIO, 2023).

Devido à ampla diversidade de métodos disponíveis para o armazenamento de hidrogênio, é pertinente classificá-los em categorias. A categorização de Andersson e Grönkvist (2019), ilustrada na FIGURA 17, é fundamentada na forma como o hidrogênio interage com o recipiente ou material utilizado no processo de armazenamento.

FIGURA 17 – CATEGORIZAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO



FONTE: Andersson e Grönkvist (2019).

As cavernas de sal já estão em uso para armazenamento em escala industrial nos Estados Unidos e no Reino Unido. Vários projetos de pesquisa estão em andamento

para a demonstração do ciclo rápido no armazenamento de hidrogênio em larga escala, como o HyCAVmobil, na Alemanha, e o HyPSTER, na França. A pesquisa e a demonstração também estão progredindo no desenvolvimento de outros tipos de locais de armazenamento subterrâneo (como campos de gás esgotados, aquíferos e cavernas de rocha dura revestidas). Em 2022, uma instalação de demonstração para armazenar hidrogênio em cavernas de rocha dura revestidas começou a operar na Suécia (IEA, 2023b).

Com o aumento da demanda por hidrogênio e o surgimento de novos usos distribuídos, é necessário desenvolver uma infraestrutura de hidrogênio que conecte os centros de produção e demanda. Os dutos são a maneira mais eficiente e menos dispendiosa de transportar o hidrogênio até uma distância de 2.500 a 3.000 km, para capacidades em torno de 200 kt por ano. Cerca de 2.600 km de tubulações de hidrogênio estão em operação nos Estados Unidos e 2.000 km na Europa, principalmente de propriedade de empresas privadas e usadas para conectar usuários industriais (IEA, 2023b).

Segundo Oliveira (2022), uma das formas de armazenamento do H₂ envolve processos de compressão ou liquefação do gás, permitindo sua distribuição direta por meio de gasodutos, transporte rodoviário ou transporte marítimo. O transporte em forma gasosa comprimida, a 350 ou 700 bar, é uma opção, assim como a liquefação a -252 °C. Adicionalmente, o H₂ pode ser convertido em amônia (NH₃) ou transportado por tecnologias *Liquid Organic Hydrogen Carrier* (LOHC) (GBEP, 2021).

Para o transporte de hidrogênio em longas distâncias, o transporte marítimo de hidrogênio e os transportadores de hidrogênio são mais competitivos em termos de custo do que os dutos de hidrogênio. Em fevereiro de 2022, o projeto Hydrogen Energy Supply Chain demonstrou pela primeira vez o transporte de hidrogênio liquefeito da Austrália para o Japão. No entanto, devido aos desafios técnicos do transporte de hidrogênio liquefeito, um número crescente de projetos está considerando a possibilidade de transportar amônia, embora todos esses projetos ainda estejam em estágios muito iniciais de desenvolvimento, com exceção do projeto NEOM, que alcançou o fechamento financeiro em março de 2023. No Cenário NZE, mais de 15 Mt de hidrogênio de baixa emissão (na forma de hidrogênio ou combustíveis à base de hidrogênio) serão transportados globalmente até 2030 (IEA, 2023b).

No entanto, de acordo com GBEP (2021), apenas 5% do volume total de H₂ produzido globalmente é efetivamente comercializado, indicando que o transporte desse gás ainda representa uma parcela relativamente pequena no mercado atual.

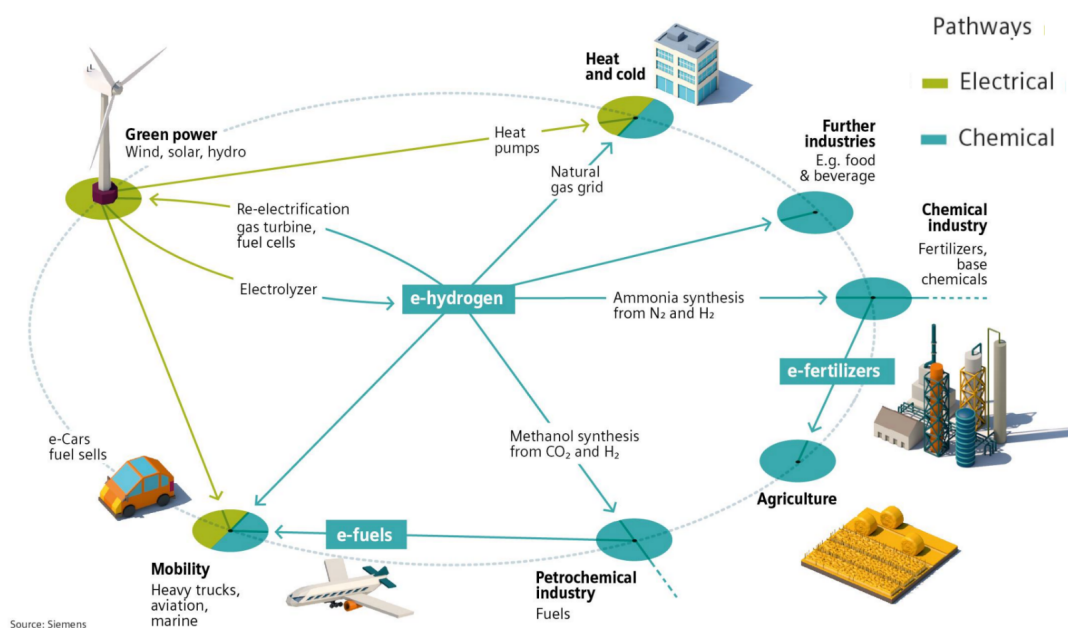
2.6.5 Aplicações e Tecnologias Power-to-X

Segundo a GBEP (2021) o H₂ pode assumir um papel integrador entre a geração de energia elétrica e outros usos e aplicações, como o energético e o químico. Este conceito é chamado *Power-to-X* (PtX).

De acordo com o organismo de certificação e inspeção alemão TÜV SÜD (2021), PtX refere-se a todos os processos que convertem eletricidade renovável em fontes de energia química para armazenamento de eletricidade, combustíveis à base de eletricidade para mobilidade ou matérias-primas para a indústria química. A tecnologia PtX pode ser utilizado para produzir H₂ para veículos movidos a pilha a combustível, ou querosene para aeronaves com baixo impacto climático e ambiental, por exemplo. O termo "*Power*" refere-se ao excedente temporário de energia elétrica acima da demanda e o termo "*X*" significa a forma de energia ou o uso pretendido.

Assim, as tecnologias PtX são, portanto, subdivididas de acordo com a forma de energia (*Power-to-Gas*, *Power-to-Heat*, *Power-to-Liquid*) ou finalidade (por exemplo, *Power-to-Fuel*, *Power-to-Chemicals* ou *Power-to-Ammonia*). A FIGURA 18 ilustra como a integração de diferentes setores da economia pode ser realizado usando energia elétrica renovável como fonte de energia e H₂ como o vetor para diferentes aplicações (GBEP, 2021).

FIGURA 18 – HIDROGÊNIO VERDE E APLICAÇÕES POWER-TO-X



FONTE: SIEMENS (2019).

A FIGURA 19 apresenta de forma resumida as principais tecnologias PtX, bem

como sua relevância.

FIGURA 19 – RESUMO DAS PRINCIPAIS TECNOLOGIAS PTX

Tecnologias e definição	Relevância
<p>Power-to-Power</p> <p>Reconversão do hidrogênio verde na rede elétrica, via pilhas a combustível, turbinas ou geradores a hidrogênio.</p>	<p>Integração de energias renováveis (intermitentes) e suporte à redução dos desbalanceamentos entre a geração e a demanda de energia. O excedente de energia gerado (“surplus”) pode ser transformado em hidrogênio verde através do processo de eletrólise. Quando a demanda superar a produção, a energia estocada pode ser reconvertida em energia elétrica.</p>
<p>Power-to-Gas</p> <p>Hidrogênio verde para produção de gases como o metano sintético, a partir da combinação de H₂ e CO₂, ou ainda injeção diretamente na rede de gás natural.</p>	<p>Redução das emissões de CO₂. Metano sintético: utilização do CO₂ para a reação. Injeção de H₂ verde na rede de gás natural (atualmente limitado a 20%): redução da utilização do gás natural de fonte fóssil.</p>
<p>Power-to-Mobility</p> <p>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.</p>	<p>Pelo escapamento é eliminado apenas vapor de água, não havendo emissões de CO₂. Ampla sinergia de sistemas e componentes para os veículos elétricos a hidrogênio e os totalmente elétricos, relevante para promover a redução de custos na produção em escala desses componentes.</p>
<p>Power-to-Fuel</p> <p>Hidrogênio verde para a produção de combustíveis líquidos sintéticos (e-fuel). O hidrogênio em conjunto de CO₂ 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).</p>	<p>A biomassa pode servir tanto como fonte de geração de hidrogênio como também como fonte de carbono substituindo dessa forma o CO₂, podendo ser denominada Bio-to-Fuel.</p>
<p>Power-to-Ammonia</p> <p>Hidrogênio verde para a geração química de amônia (NH₃).</p>	<p>Substituição do gás natural, nafta ou carvão por hidrogênio verde que por sua vez será sintetizado com o nitrogênio para a obtenção de E-amônia, sem a emissão de CO₂.</p>

FONTE: Adaptado de GBEP (2021).

2.6.5.1 Células de Combustível

De acordo com Li et al. (2012) as células de combustível (FCs¹⁴) são uma das principais tecnologias facilitadoras do desenvolvimento da futura economia do H₂. As FCs são dispositivos eletroquímicos projetados principalmente para utilizar H₂ como combustível, embora em algumas ocasiões também sejam empregados outros combustíveis, como metanol, etanol e outros hidrocarbonetos. Esses dispositivos convertem a energia química armazenada no combustível em energia elétrica, por meio de reações químicas internas.

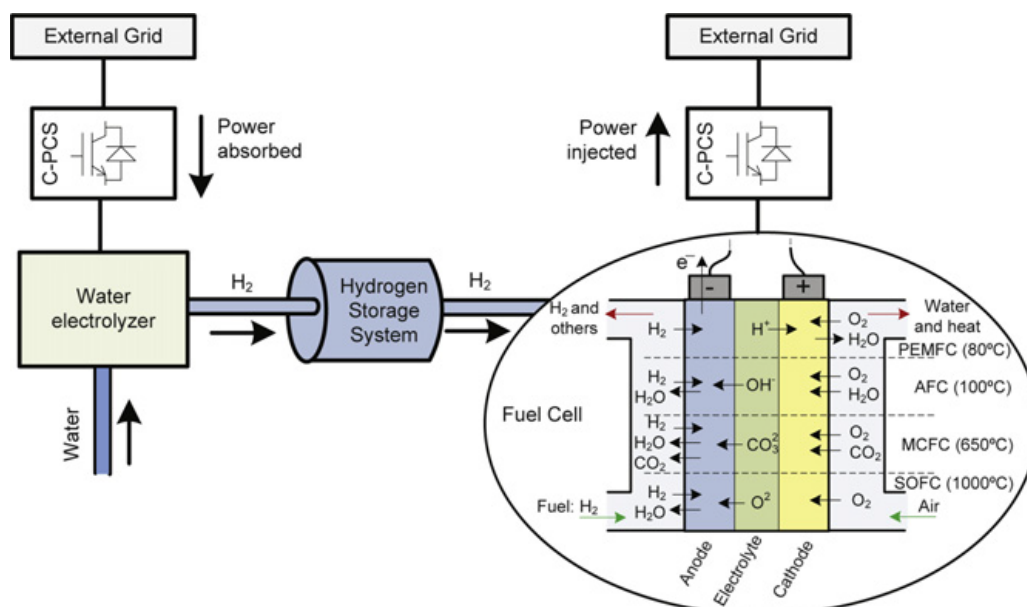
Se o H₂ for armazenado para garantir o fornecimento contínuo, então a configuração é conhecida como célula de combustível regenerativa (RFC¹⁵) conforme ilustrado na FIGURA 20. Com esse arranjo, o sistema se comporta em fenômenos semelhantes

¹⁴ FC: Sigla para “Fuel Cells” e significa “Células de Combustível”.

¹⁵ RFC: Sigla para “Regenerative Fuel Cells” e significa “Células de Combustível Regenerativas”.

ao funcionamento de um sistema de bateria, pois o H₂ armazenado pode ser liberado para produzir eletricidade quando necessário (SUBERU; MUSTAFA; BASHIR, 2014).

FIGURA 20 – TOPOLOGIA DA CÉLULA DE COMBUSTÍVEL REGENERATIVA



FONTE: Diaz-González et al. (2012).

Na célula de combustível, a água, o calor e a eletricidade são produzidos a partir de uma reação eletroquímica predominante entre os reagentes. A sequência química é tal que os reagentes entram e os produtos da reação saem, enquanto o eletrólito permanece na célula (MCDOWALL, 2006; DURSUN; ALBOYACI, 2010; BRETT; AGUIAR; BRANDON, 2006; SUDWORTH, 1994).

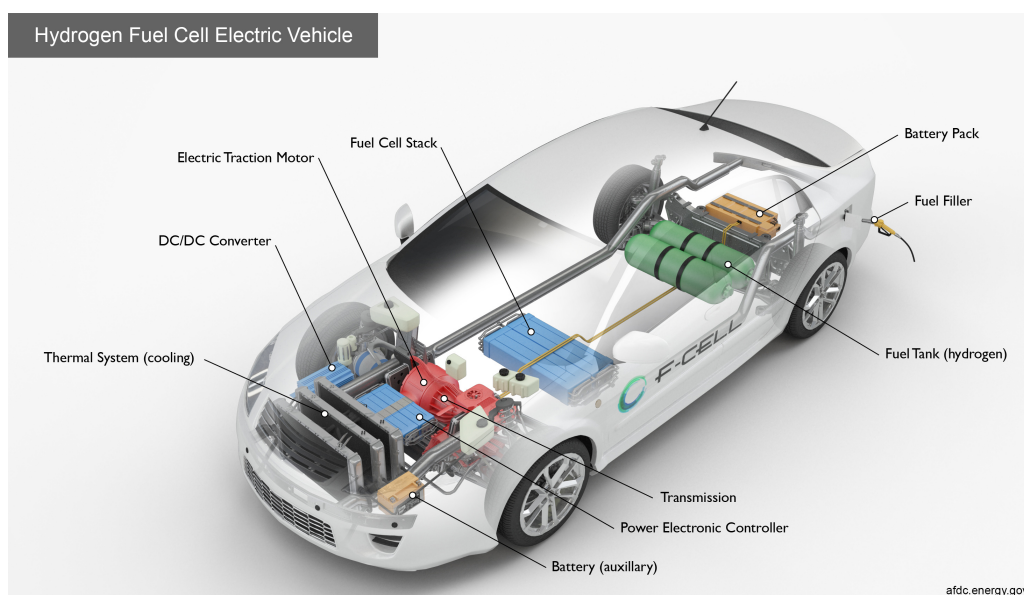
Variedades de células de combustível (FCs) foram usadas nas últimas duas décadas para diferentes aplicações, principalmente para substituir motores de combustão interna, fornecendo energia em sistemas estacionários e consumos de energia portáteis (LI et al., 2012), bem como em tecnologias automotivas para fornecimento de energia auxiliar. Existem muitos tipos de FCs que são classificados de acordo com as variedades de critérios, como o mecanismo de troca de íons e os tipos de reação que utilizam diferentes reagentes e eletrólitos (SUBERU; MUSTAFA; BASHIR, 2014).

A eficiência energética de saída da FC está na faixa de 40% a 65% e tende a aumentar, desde que o calor gerado durante as operações possa ser capturado para aplicação posterior. Apesar do custo elevado da FC ser uma desvantagem para sua aplicação generalizada (CHAN, 2007), há potencial de redução desse custo, direcionando a pesquisa para o uso de materiais mais econômicos e o desenvolvimento da tecnologia (SUBERU; MUSTAFA; BASHIR, 2014).

As FCs têm inúmeras áreas potenciais de aplicação para desenvolvimentos tecnológicos, como a substituição da gasolina em um sistema automotivo, conforme a

FIGURA 21.

FIGURA 21 – CARRO A CÉLULA DE COMBUSTÍVEL



FONTE: U.S. Department of Energy (s.d.).

Os veículos com célula de combustível de H₂ (HFCVs¹⁶), surgiram recentemente como uma alternativa de emissão zero de escapamento para o veículo elétrico a bateria (BEV¹⁷) (MARTIN et al., 2009).

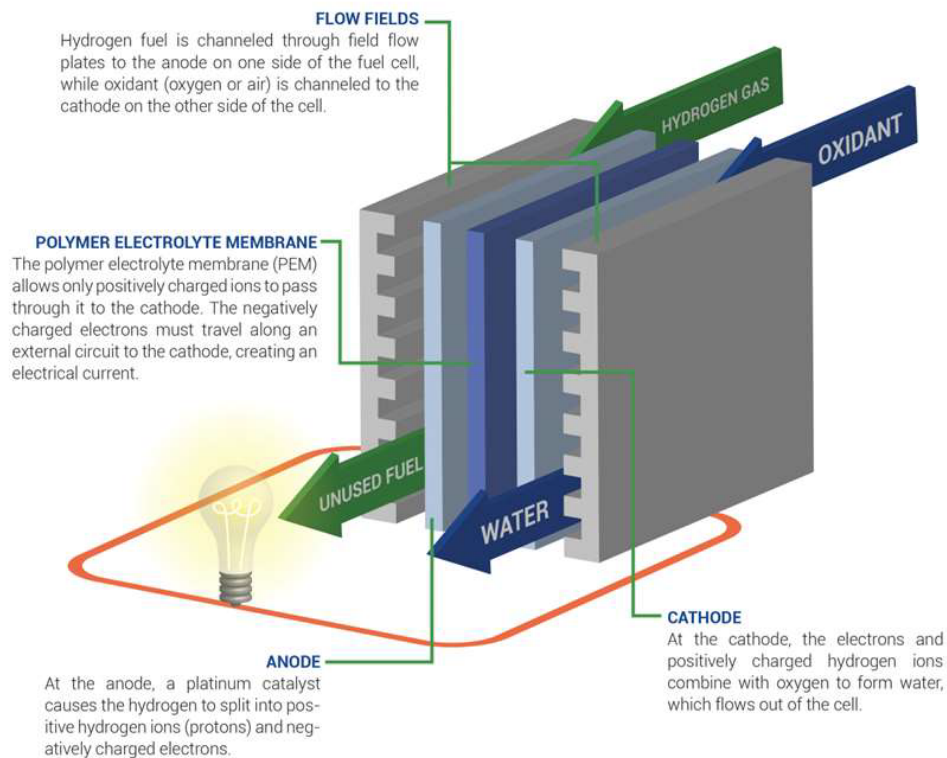
Uma célula de combustível precisa de três componentes principais para criar a reação química: um ânodo, um cátodo e um eletrólito. Primeiro, o combustível de H₂ é canalizado para o ânodo por meio de campos de fluxo. Os átomos de H₂ são ionizados (desprovidos de elétrons) e agora carregam apenas uma carga positiva. Em seguida, o O₂ entra na célula de combustível no cátodo, onde se combina com os elétrons que retornam do circuito elétrico e com os átomos de H₂ ionizados. Em seguida, depois que o átomo de O₂ pega os elétrons, ele viaja pelo eletrólito para se combinar com o íon de H₂. A combinação de O₂ e H₂ ionizado serve como base para a reação química (SETRA, 2017).

¹⁶ HFCVs: Sigla para “*Hydrogen Fuel Cell Vehicles*” e significa “Veículos com Célula de Combustível de Hidrogênio”.

¹⁷ BEV: Sigla para “*Battery Electric Vehicle*” e significa “Veículo Elétrico a Bateria”.

FIGURA 22 – FUNCIONAMENTO DE UMA CÉLULA DE COMBUSTÍVEL A HIDROGÊNIO

HOW DO HYDROGEN FUEL CELLS WORK?



©Setra Systems, Inc.

www.setra.com

FONTE: SETRA (2017).

De acordo com Singla, Nijhawan e Oberoi (2021) a reação química do ânodo, do cátodo e a reação química geral dessa FC são apresentadas nas equações 2.1, 2.2 e 2.3, respectivamente.



Uma membrana de eletrólito de polímero (PEM¹⁸) permite que os íons apropriados passem entre o ânodo e o cátodo. Se o eletrólito permitisse que todos os elétrons ou íons passassem livremente, isso interromperia a reação química. No final do processo, os átomos de H₂ carregados positivamente reagem com o O₂ para formar

¹⁸ PEM: Sigla para “Proton Exchange Membrane” e significa “Membrana de Eletrólito de Polímero”.

água e calor, criando uma carga elétrica (SETRA, 2017). Ressalta-se que existem diferentes tipos de membranas para FCs. A Membrana de Eletrólito de Polímero (PEM) é mencionada aqui com o propósito de exemplificação.

No mercado de combustíveis, há muitas aplicações diferentes com diferentes requisitos de energia. Para fornecer a energia adequada, as células de combustível individuais podem ser montadas juntas, formando uma pilha. Uma pilha de células de combustível pode ser dimensionada para fornecer a quantidade certa de energia para a aplicação (SETRA, 2017).

2.7 BRASIL

O Brasil, localizado na América do Sul, apresenta dimensões continentais. Sua extensão ao longo do eixo norte-sul resulta em uma variedade de climas, vegetações e biodiversidade distintas (IBGE, 2023e).

O Brasil se destaca pela sua notável riqueza em recursos naturais, como a luz solar, o vento e a água, tornando-se uma notável referência em energia renovável, especialmente em determinadas regiões do país. A vasta extensão de suas terras destinadas à agricultura e à pecuária (IBGE, 2023a) desempenha um papel fundamental na produção de commodities e biomassa.

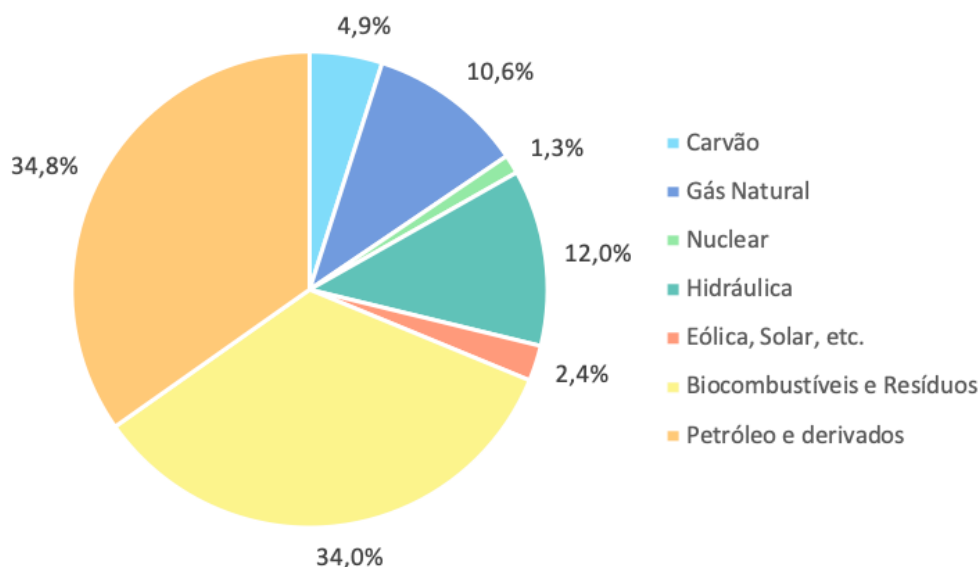
Com um litoral estendendo-se por 10,9 mil quilômetros (IBGE, 2021) banhados pelas águas do Oceano Atlântico, o Brasil é dotado de uma ampla gama de portos estratégicos.

2.7.1 Matriz Energética

A matriz energética brasileira se destaca por ter uma maior proporção de energia renovável em comparação com a matriz energética mundial. Em 2020, a parcela de energia renovável na matriz mundial era de aproximadamente 36,5%, enquanto no Brasil, ela representava cerca de 48,4% do total de energia produzida (IEA, 2022d).

A FIGURA 23 apresenta a composição da matriz energética brasileira em 2020, evidenciando a relevante participação das fontes renováveis, especialmente a energia hidrelétrica e os biocombustíveis.

FIGURA 23 – MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA - 2020



FONTE: Adaptado de IEA (2022d).

Essa diferença na composição das matrizes energéticas entre os dois contextos reflete as políticas adotadas e os recursos disponíveis em cada país. Enquanto o Brasil aproveita de forma expressiva suas fontes renováveis, a matriz energética mundial ainda é predominantemente impulsionada por combustíveis fósseis, como petróleo e carvão.

A matriz energética brasileira é considerada mais sustentável, pois possui uma participação significativa de fontes renováveis e uma menor dependência de carvão. No entanto, destaca-se que sempre há espaço para ampliar o uso de fontes de energia limpas e reduzir a participação de combustíveis fósseis, como o petróleo, visando alcançar uma matriz energética ainda mais sustentável no futuro.

Dentre as fontes renováveis do Brasil, a cana-de-açúcar desempenha um papel fundamental na matriz energética, principalmente na produção de etanol, um biocombustível. O Brasil é o segundo maior produtor de etanol no mundo (RFA, 2022). Além disso, a cana-de-açúcar também é utilizada na geração de energia elétrica a partir do bagaço (EMBRAPA, 2022), contribuindo ainda mais para a participação de fontes renováveis na matriz energética do país. Ressalta-se que o cultivo da cana-de-açúcar deve ser realizado de forma sustentável, garantindo a preservação do meio ambiente e considerando o bem-estar social das comunidades envolvidas.

2.7.2 Transição Energética

Para impulsionar a transição energética no Brasil, é necessário realizar uma diversificação da matriz energética, buscando diminuir a atual dependência das hidrelé-

tricas e, simultaneamente, ampliar significativamente a participação das fontes solares e eólicas. Nesse contexto, aprimorar a eficiência energética e fomentar o uso racional dos recursos se apresentam como alicerces fundamentais (NHS, 2023).

Além disso, para efetivar essa transformação, é crucial modernizar a infraestrutura energética, direcionando investimentos substanciais para o desenvolvimento de redes inteligentes e sistemas de armazenamento avançados. Essas ações não apenas possibilitarão uma gestão mais eficaz da energia, mas também viabilizarão uma transição mais suave e contínua para um cenário energético mais sustentável e resiliente (NHS, 2023).

Conforme indicado pelo Programa de Transição Energética (CEBRI, 2023), o Brasil enfrenta uma série de desafios em sua jornada rumo à neutralidade de carbono até 2050. Estes desafios abrangem áreas como o crescimento contínuo na demanda energética, a erradicação do desmatamento ilegal, a revisão e atualização das regulamentações vigentes, bem como o desenvolvimento tecnológico necessário para impulsionar a transição. Diante desse cenário, torna-se evidente que ações coordenadas e investimentos estratégicos desempenham um papel de extrema importância na construção de uma matriz energética sustentável.

Em resposta à necessidade de conduzir uma transição energética eficaz, o governo brasileiro tem direcionado esforços para a discussão e implementação de programas voltados a esse objetivo.

Dentro desse contexto, por meio do Decreto nº 11.492/2023 que aprova a Estrutura Regimental e o Quadro Demonstrativo dos Cargos em Comissão e das Funções de Confiança do Ministério de Minas e Energia e remaneja e transforma cargos em comissão e funções de confiança, foi criada a Secretaria Nacional de Transição Energética e Planejamento (PLANALTO, 2023).

Estabeleceu-se um marco significativo em julho de 2023, quando o Ministério de Minas e Energia (MME) se envolveu nas deliberações em torno do Programa Combustível do Futuro. Concebeu-se essa iniciativa para fomentar a mobilidade sustentável de baixa emissão de carbono no Brasil. Este programa engloba diversas medidas estratégicas, tais como a promoção dos biocombustíveis por meio do RenovaBio e o estímulo à inovação na indústria automobilística por meio do Rota 2030. Além disso, introduz a adoção de práticas inovadoras, como o uso de combustível sustentável de aviação (SAF¹⁹), diesel verde e a incorporação de 30% de etanol na gasolina (E30). Ainda mais importante, o programa estabelece um marco jurídico fundamental para a tecnologia de Captura e Estocagem Geológica de Carbono (CCS), que desempenha um papel crucial na mitigação das emissões de carbono. Essa abordagem abrangente demonstra

¹⁹ SAF: Sigla para “Sustainable Aviation Fuel” e significa “combustível sustentável de aviação”.

o comprometimento do Brasil em direção a um futuro mais limpo e sustentável (MME, 2023a).

No contexto do novo Programa de Aceleração do Crescimento (PAC), a Transição e Segurança Energética emergem como um dos pilares primordiais do Ministério de Minas e Energia (MME). Com um substancial aporte de investimentos, essa abordagem é subdividida em sete subeixos, abrangendo áreas como geração de energia, luz para todos, transmissão de energia, eficiência energética, petróleo e gás, pesquisa mineral e combustíveis de baixo carbono. Adicionalmente, o programa também impulsionará a expansão dos biocombustíveis, contribuindo para a diversificação e a sustentabilidade crescente da matriz energética nacional (MME, 2023b).

2.7.3 Políticas Públicas - Hidrogênio

Em 1975, o Brasil deu início às suas políticas públicas voltadas para o desenvolvimento do H2V, visando oferecer alternativas aos combustíveis derivados do petróleo, culminando na criação do Laboratório do Hidrogênio (LH2) (LAMEIRAS, 2019). Posteriormente, em 1998, o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) estabeleceu o Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio (CENEH) (MME, 2021).

Em 2002, surgiu o Programa Brasileiro de Sistemas Célula a Combustível (PROCaC), o qual passou por uma reformulação e foi renomeado como Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio (ProH2) em 2005 (MME, 2021); nesse mesmo ano, o Ministério de Minas e Energia (MME) desenvolveu o Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil (CGEE, 2010). A partir desse marco, desenvolveram-se uma série de projetos e iniciativas relacionadas ao H2V.

No cenário mais recente, a Resolução nº 6 de 23 de junho de 2022, que estabeleceu o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2) e criou o Comitê Gestor correspondente, marca um avanço significativo nas políticas relacionadas ao hidrogênio verde no Brasil (DOU, 2022). Além disso, a abertura da Consulta Pública nº147/2022 para o Plano Trienal do PNH2 reflete o compromisso contínuo do governo em envolver ativamente a sociedade e os agentes do mercado na definição das diretrizes estratégicas para esse setor em crescimento, priorizando a clareza e a participação de todas as partes interessadas, o que solidifica a posição do Brasil na transição para uma economia de energia mais sustentável (GESEL, 2023b).

Ademais, a iniciativa da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) de preparar a abertura do mercado livre de energia, com critérios e metodologias que incluem a certificação da energia renovável, incluindo o hidrogênio verde, representa um passo importante na promoção da transição energética no Brasil (GESEL, 2023b). Isso incentivará a produção e o consumo de energias limpas e renováveis,

contribuindo para a redução das emissões de carbono e para a construção de um futuro energético mais sustentável.

2.7.3.1 Plano Nacional do Hidrogênio

Em agosto de 2023, o Ministério de Minas e Energia (MME) divulgou o Plano de Trabalho Trienal (2023-2025) do PNH2. As atividades e ações delineadas neste plano têm como objetivo principal orientar o crescimento da economia do hidrogênio em todo o país nos próximos anos e contribuir para a definição de uma estratégia que promova o desenvolvimento sustentável, centrado na competitividade dessa nova indústria e no aumento da participação do hidrogênio na matriz energética brasileira (GESEL, 2023a).

O PNH2 e os esforços do Brasil estarão concentrados no "hidrogênio de baixa emissão", que inclui hidrogênio produzido a partir de diversos processos, tecnologias e fontes de energia com baixas emissões de GEE ao longo de seu ciclo de vida, bem como a adoção de tecnologias de remoção de carbono (CCS), incluindo aquelas com emissões negativas de carbono (hidrogênio renovável de origem biológica com CCS) (GESEL, 2023a).

No Plano, destacam-se oportunidades para a redução das emissões de GEE em setores industriais como metalurgia e cimento, que atualmente representam 52% das emissões de GEE na indústria brasileira. No contexto das refinarias, observa-se que 11 das 19 refinarias existentes no país possuem unidades de geração de hidrogênio cinza, operando todas abaixo de sua capacidade máxima, o que abre perspectivas para a produção de hidrogênio com baixas emissões. Além disso, o uso de derivados do hidrogênio, como amônia, metanol e outros hidrocarbonetos líquidos sintéticos, é enfatizado no Plano como veículos para a utilização do hidrogênio com baixo teor de carbono, oferecendo alternativas para setores como aviação, navegação e produção de fertilizantes (GESEL, 2023a).

Ressalta-se que o Plano Trienal do PNH2 reúne representantes do governo, acadêmicos e do setor privado e é estruturado em torno de seis pilares principais, conforme enumerado abaixo:

- I) Reforço das Bases Tecnológicas;
- II) Capacitação de Recursos Humanos;
- III) Planejamento Energético;
- IV) Estrutura Legal e Regulatória;
- V) Promoção da Indústria, Mercado e Competitividade;

VI) Cooperação Internacional.

As ações englobam aspectos como os atores envolvidos, responsáveis, prazos, entregáveis/resultados e indicadores de progresso. As prioridades estabelecidas para o período de 2023 a 2025, com base nas contribuições recebidas por meio de uma consulta pública conduzida pelo MME, incluem a definição de um marco legal-regulatório nacional, o aumento dos investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I), com foco na redução de custos e na ampliação do acesso a financiamentos. Atualmente, no Brasil, a maturidade da indústria do H2 pode ser categorizada como em estágio de planta piloto/P&D ou por meio de acordos de memorando de entendimento (MoU²⁰) (GESEL, 2023a). Portanto, o Plano Trienal estabelece três marcos temporais até 2035 para o desenvolvimento da cadeia produtiva do hidrogênio com baixas emissões no país:

- I) Até 2025, disseminação de plantas piloto de hidrogênio com baixas emissões em todas as regiões do Brasil;
- II) Até 2030, consolidação do Brasil como um dos países mais competitivos na produção de hidrogênio com baixas emissões;
- III) Até 2035, consolidação de *hubs*²¹ de produção de hidrogênio com baixas emissões no país.

O GESEL (2023a) resume que, o Brasil está gradualmente comprometendo-se com uma agenda voltada para o desenvolvimento da economia do H2 com baixas emissões, reconhecendo-a como uma estratégia fundamental para alcançar os objetivos: cumprir as metas de redução das emissões de carbono; contribuir para a transição global de energia; e servir como um impulsionador para a reindustrialização. Nesse sentido, o Plano Trienal, no âmbito do PNH2, estabelece diretrizes e ações para o desenvolvimento da cadeia produtiva do H2, refletindo o compromisso do país em desempenhar um papel significativo na redução das emissões de setores-chave da economia.

2.7.4 Paraná

O Estado do Paraná tem se destacado na busca por soluções e políticas públicas relacionadas ao H2V, uma matriz energética renovável que está ganhando cada vez mais atenção.

²⁰ MoU: Sigla para “*Memorandum of Understanding*” e significa “Memorando de Entendimento”.

²¹ Hubs de H2 consistem em centros geográficos que envolvem uma cadeia de atividades de produção, transporte, entrega e uso final de H2 em aplicações em diferentes setores produtivos.

Durante uma reunião em março de 2023, promovida pelo governo estadual, discutiram-se importantes resoluções relacionadas à produção de H₂V, com a participação de diversas entidades e empresas regionais. O objetivo é criar políticas públicas que impulsionem a produção sustentável de energia, com foco na descarbonização e na redução das emissões de carbono (SECRETARIA DO PLANEJAMENTO, 2023).

Além disso, o Laboratório de Materiais e Energias Renováveis (Labmater) da Universidade Federal do Paraná (UFPR) foi selecionado para um programa de inovação em hidrogênio verde, em parceria com a Alemanha, visando a produção descentralizada deste recurso a partir do biogás. A produção descentralizada de hidrogênio é fundamental para reduzir custos e popularizar seu uso, atendendo às necessidades atuais e criando novos mercados. O biogás é uma matéria-prima promissora para a produção de hidrogênio, pois pode ser obtido a partir de diversas biomassas residuais disponíveis em todo o país. Isso representa um passo importante na direção de tornar o hidrogênio verde mais acessível e competitivo no Brasil (FOLHA, 2023).

A Fundação Parque Tecnológico Itaipu, sediada em Foz do Iguaçu, no estado do Paraná, desempenha um papel fundamental no fomento da pesquisa, desenvolvimento e inovação no campo da energia sustentável, com especial ênfase no H₂V. A fundação atua como uma incubadora de projetos e ideias voltados para a produção de H₂ por eletrólise alcalina da água, contribuindo para o avanço das tecnologias relacionadas a essa matriz energética limpa. Além disso, oferece consultoria e cursos especializados no tema, desempenhando um papel crucial na consolidação do conhecimento e na criação de um ambiente propício para o crescimento dessa indústria promissora não apenas no Brasil, mas também na América Latina (PORTALH₂V, 2023).

O Paraná está firmando sua posição como um potencial *hub* de H₂V, com um foco voltado para a modernização e inovação na produção de energia sustentável, visando à descarbonização e à redução das emissões de carbono. Por meio de reuniões estratégicas e colaborações entre órgãos governamentais, empresas como a Copel e a Sanepar, bem como a participação ativa do Parque Tecnológico de Itaipu, o estado está pavimentando o caminho para a implementação de políticas públicas sólidas que promovam o desenvolvimento dessa indústria. Com a diversificação da matriz energética e um compromisso crescente com a sustentabilidade, o Paraná busca liderar a transição rumo a uma economia de energia mais limpa, criando oportunidades de inovação, emprego e crescimento econômico por meio do hidrogênio renovável (AGÊNCIA ESTADUAL DE NOTÍCIAS, 2023).

2.8 ALEMANHA

A Alemanha está localizada na Europa Central, faz fronteira com o Mar Báltico e o Mar do Norte, entre a Holanda e a Polônia, ao sul da Dinamarca (THE WORLD

FACTBOOK, 2023). Com uma história de excelência em engenharia e tecnologia, é líder global em setores como automobilismo e pesquisa. Geograficamente diversificada, a Alemanha abrange desde as Montanhas dos Alpes até vastas planícies e florestas.

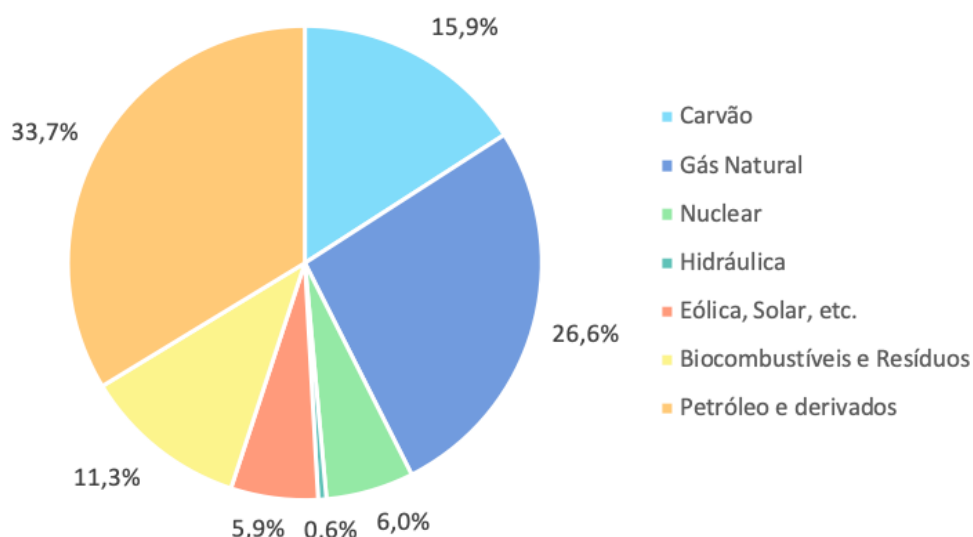
O país também é pioneiro em sustentabilidade, com um compromisso notável com energias renováveis, como a solar e eólica (THE WORLD FACTBOOK, 2023). Suas políticas ambientais rigorosas refletem seu comprometimento com a preservação do meio ambiente.

2.8.1 Matriz Energética

A matriz energética da Alemanha é caracterizada por uma abordagem ambiciosa de transição para fontes de energia limpas e renováveis, conhecida como "*Energiewende*²²". O país tem investido fortemente em energias renováveis, como energia eólica e solar, além de buscar a eficiência energética e o fim gradual do uso de energia nuclear e carvão. A Alemanha busca descentralizar seu sistema energético e enfrenta desafios como o armazenamento de energia intermitente. Essa transição tem como objetivo reduzir as emissões de carbono, promover a sustentabilidade ambiental e alcançar maior segurança energética (BMWK, s.d.).

A FIGURA 24 apresenta a composição da matriz energética alemã em 2020, evidenciando o uso predominante do petróleo, seguido pelo gás natural e carvão.

FIGURA 24 – MATRIZ ENERGÉTICA ALEMÃ - 2020



FONTE: Adaptado de IEA (2022d).

Comparada à matriz energética mundial, a abordagem alemã demonstra uma

²² Energiewende significa transição energética.

maior ênfase na diversificação e na redução das emissões de carbono, exemplificando um compromisso notável com a liderança em um futuro energético mais limpo e resiliente (IEA, 2022d).

Observa-se que o gás natural desempenha um papel significativamente mais proeminente na matriz energética da Alemanha do que na do Brasil. Ele é utilizado para uma variedade de finalidades, incluindo geração de eletricidade, aquecimento, processos industriais e como combustível veicular. Vale ressaltar que o gás natural, embora seja uma opção mais limpa entre os combustíveis fósseis, é uma fonte não renovável, sublinhando a importância contínua de explorar opções mais sustentáveis no futuro.

A Alemanha se destaca por sua transição pró-ativa para fontes renováveis, com foco em energia eólica e solar. Enquanto isso, o Brasil enfatiza fontes renováveis tradicionais, como hidrelétrica e biomassa, incluindo o uso da cana-de-açúcar para produção de etanol. Ambos os países enfrentam desafios únicos, mas oferecem oportunidades para contribuir com a transição global para um futuro energético mais sustentável.

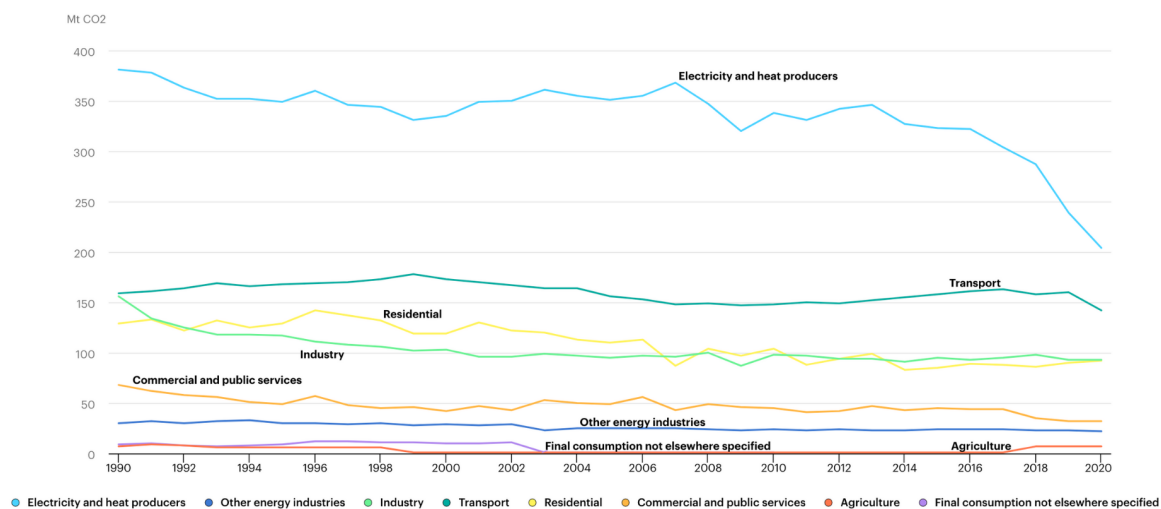
2.8.2 Transição Energética

A origem da transição energética na Alemanha está relacionada ao movimento ambientalista e anti-nuclear da década de 1970. O termo "transição energética" foi concebido pelo *Öko-Institut* (Instituto de Ecologia) em 1980, através do livro "*Energiewende - Wachstum und Wohlstand ohne Erdöl und Uran*" (Transição energética - crescimento e prosperidade sem a dependência de petróleo e urânio), que apresentou cenários para um futuro baseado em fontes alternativas de energia (ÖKO-INSTITUT, s.d.).

Com o compromisso de atingir a neutralidade climática²³ até 2045, a Alemanha está trabalhando para reduzir suas emissões de GEE. A FIGURA 25 apresenta as emissões de CO₂ por setor na Alemanha no período de 1990 a 2022. As emissões são contabilizadas exclusivamente a partir da combustão de combustíveis, calculadas através dos balanços de energia da IEA e das Diretrizes do IPCC de 2006 para estimar as emissões de CO₂.

²³ Neutralidade climática refere-se ao conceito de atingir emissões líquidas nulas de GEE, equilibrando as emissões de modo que sejam iguais (ou menores) às emissões que são removidas por meio da absorção natural do planeta (UNITED NATIONS, 2021).

FIGURA 25 – EMISSÕES DE CO2 POR SETOR NA ALEMANHA, 1990-2020

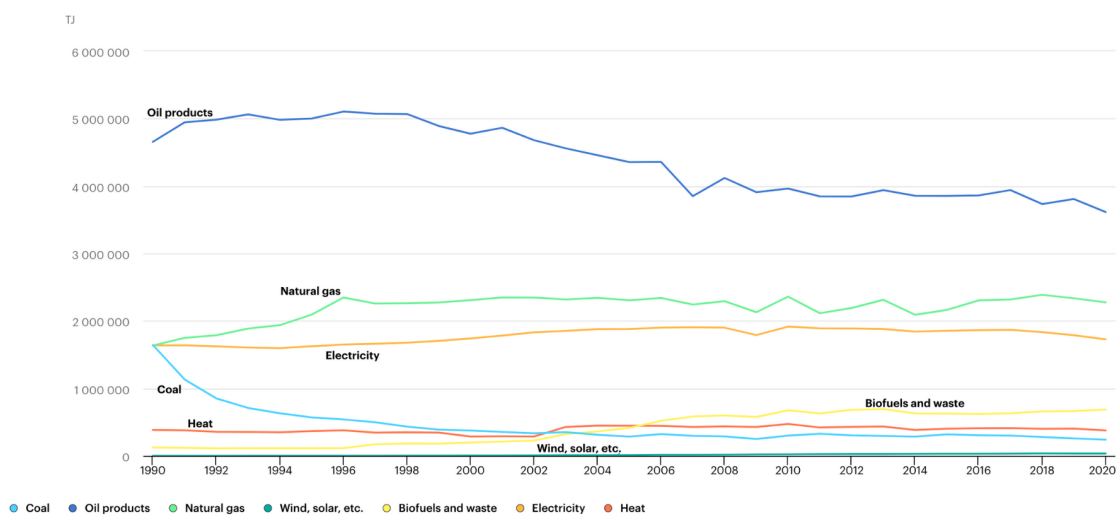


FONTE: IEA (2023a).

É notável que a maior parte das emissões seja proveniente dos produtores de eletricidade e calor, entretanto, observa-se que essa quantidade tem diminuído ao longo dos anos. Os setores de transporte, indústria e residências também desempenham um papel significativo nas emissões. Portanto, esses setores representam os maiores desafios em termos de descarbonização.

Agora, para uma visão mais abrangente da situação energética da Alemanha, a FIGURA 26 apresenta o consumo final de energia total por fonte ao longo do mesmo período.

FIGURA 26 – CONSUMO FINAL DE ENERGIA TOTAL POR FONTE NA ALEMANHA, 1990-2020



FONTE: IEA (2023a).

É evidente que os produtos derivados do petróleo representam a fonte predominante, de forma notavelmente discrepante, no consumo final de energia, porém, é relevante observar que esse consumo está gradualmente diminuindo. O gás natural e a eletricidade ocupam a segunda e terceira posições, mantendo-se relativamente constantes até 2020. Vale ressaltar que após esse ano, ocorreram várias alterações nesse padrão de consumo.

O conflito na Ucrânia, que teve início em 2022, representou um marco crucial para o avanço das energias renováveis na Europa. Governos e empresas da região se empenharam de forma diligente na substituição ágil do gás russo por alternativas viáveis (IEA, 2022e). Como resultado desse esforço, o abastecimento de energia na Alemanha tornou-se mais favorável ao clima, seguro e independente, marcando um avanço significativo na direção da sustentabilidade energética (DIE BUNDESREGIERUNG, 2023b)²⁴.

Apesar da expansão das energias renováveis, o fornecimento de gás continua a desempenhar um papel importante para o setor industrial e para as residências. Como resultado da guerra de agressão russa contra a Ucrânia, o governo alemão conseguiu acabar com sua dependência energética da Rússia - não apenas em relação ao gás, mas também ao carvão e ao petróleo. Desde setembro de 2022, o gás natural russo deixou de ser fornecido diretamente à Alemanha por meio de gasodutos. Em vez disso, passaram a ser recebidos mais suprimentos de gás natural da Noruega e da Holanda, juntamente com importações adicionais de gás natural liquefeito (DIE BUNDESREGIERUNG, 2023b).

O governo alemão está investindo fortemente em medidas de mitigação e adaptação às mudanças climáticas através do "Fundo para o Clima e a Transformação" (KTF), principal instrumento de financiamento para a transição energética, disponibilizando cerca de 177,5 bilhões de euros entre 2023 e 2026. Nessa transição, a segurança do fornecimento e a acessibilidade econômica são prioridades, garantindo que os preços da energia permaneçam acessíveis para todos na Alemanha. Para promover a igualdade social e aliviar cidadãos e empresas dos crescentes custos de energia, o Governo Federal também lançou pacotes de ajuda totalizando quase 300 bilhões de euros, visando assegurar que a energia seja segura, limpa e acessível (DIE BUNDESREGIERUNG, 2023a).

2.8.3 Metas Climáticas

A trajetória rumo à neutralidade climática da Alemanha foi delineada na Lei de Proteção Climática. Com a última revisão desta lei em 2021, o governo federal fortaleceu

²⁴ Os conteúdos de "DIE BUNDESREGIERUNG, 2023" têm como foco a disseminação de informações políticas, sem necessariamente serem técnicos.

seus compromissos ambientais, estabelecendo a meta de atingir a neutralidade de GEE até 2045. De acordo com essa legislação, as emissões devem ser reduzidas em 65% até 2030 em relação a 1990. Além disso, as metas de redução de CO₂ para os setores de energia, indústria, transporte, edifícios e agricultura até 2030 também foram intensificadas (DIE BUNDESREGIERUNG, 2021).

A meta de redução de emissões de GEE de pelo menos 88% é estabelecida para o ano de 2040. No caminho até esse marco, a lei estipula metas anuais específicas de redução durante a década de 2030. Até 2045, a Alemanha deve alcançar a neutralidade de gases de efeito estufa, o que implica equilibrar as emissões com suas reduções. Após 2050, o governo alemão visa atingir emissões negativas, ou seja, capturar mais gases de efeito estufa do que emitir (DIE BUNDESREGIERUNG, 2021).

A transição energética é um projeto de longo prazo para o governo alemão. A meta é que até 2030, 80% da oferta de energia seja proveniente de fontes renováveis, como energia eólica e solar. O não gradual investimento em carvão, inicialmente programado para 2038, agora é almejado para ser realizado nesta década, visto que a produção de energia a partir do carvão é uma das principais fontes de emissões prejudiciais de CO₂ ao clima (TATSACHEN ÜBER DEUTSCHLAND, s.d.). Além disso, a Alemanha decidiu encerrar gradualmente a produção de energia nuclear em 2011, com as últimas usinas nucleares sendo desconectadas da rede em maio de 2023 (DW, 2023b).

A transição energética também é uma prioridade em termos de segurança e economia, levando o Governo Federal a buscar acelerar o planejamento e aprovação de projetos de energia, como usinas eólicas e solares (TATSACHEN ÜBER DEUTSCHLAND, s.d.).

Entretanto, em junho de 2023, o governo alemão concordou em abandonar as metas setoriais em favor de concentrar-se exclusivamente na meta mais ampla de 2030. Esse ajuste levanta preocupações entre os cientistas, que temem que a flexibilização da pressão sobre setores individuais - permitindo que o progresso em algumas áreas compense deficiências em outras - possa atrasar as correções necessárias e tornar mais difícil o alcance da meta de 2030 (DW, 2023a).

2.8.4 Políticas Públicas

Com a finalidade de proporcionar o suporte mais abrangente aos diversos intervenientes do setor de hidrogênio, o governo federal alemão lançou um site central dedicado ao hidrogênio, disponível em www.nationale-wasserstoffstrategie.de, que atua como um ponto de acesso único (BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND KLIMASCHUTZ, 2023b).

No site, é possível constatar que o governo apoia projetos em âmbito nacional, europeu e internacional, respaldando a tecnologia do hidrogênio em todas as etapas da cadeia de valor, abrangendo desde a produção, o transporte, a infraestrutura e o armazenamento até a sua aplicação prática (BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND KLIMASCHUTZ, 2023a).

Dentre os projetos, destacam-se iniciativas como a descarbonização na indústria, que promove projetos de pesquisa, desenvolvimento e investimento visando atingir a neutralidade dos gases de efeito estufa no setor industrial. Além disso, o conceito de financiamento "*Real-world laboratories for the energy transition*" faz parte do 7º Programa de Pesquisa Energética, fortalecendo a busca por soluções inovadoras na transição energética. O anúncio de financiamento para pesquisa aplicada não nuclear no mesmo programa, denominado "Inovações para a Transição Energética", também se destaca. Por fim, o Programa Nacional de Inovação Tecnologia de Hidrogênio e Células a Combustível (NIP) Fase II 2016 - 2026 promove pesquisas, desenvolvimento e inovação nesse campo crucial para o futuro sustentável (BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND KLIMASCHUTZ, 2023a).

Adicionalmente, o site apresenta o Plano Nacional de H2 atualizado.

2.8.4.1 Plano Nacional do Hidrogênio

A revisão da estratégia de hidrogênio em julho de 2023 intensifica os objetivos para a transição para a economia do hidrogênio e define detalhadamente sua execução. Com esse propósito, a atualização delinea quatro áreas prioritárias: a disponibilidade suficiente de hidrogênio, a infraestrutura de H2, o estabelecimento de aplicações de H2 e boas condições estruturais (BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG, 2023).

O governo alemão pretende construir 10 gigawatts de capacidade de eletrólise de hidrogênio até 2030, abrangendo de 30% a 50% das necessidades nacionais de hidrogênio. Isso é apoiado por projetos como o H2Giga e H2Mare, financiados pelo Ministério Federal de Educação e Pesquisa, que visam aumentar a produção de eletrolisadores e desenvolver tecnologias para produção de hidrogênio no mar. Além disso, a Alemanha planeja importar hidrogênio e está elaborando uma estratégia de importação para isso, que será divulgada em 2023. Parcerias estão sendo estabelecidas para garantir o futuro abastecimento de energia do país (BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG, 2023).

A expansão da economia do hidrogênio depende de uma infraestrutura robusta. Até 2032, está previsto criar uma rede principal de hidrogênio com mais de 11.000 km, conectando alimentadores e consumidores essenciais. Além disso, a rede de estações de reabastecimento de hidrogênio será ampliada, e o projeto *TransHyde*

está desenvolvendo tecnologias de transporte de hidrogênio e avaliando sua eficiência em diferentes situações (BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG, 2023).

O hidrogênio de origem renovável tem o potencial de significativamente reduzir a pegada de carbono nas indústrias e no transporte, mas exige uma reorganização fundamental em setores como a siderurgia, a química e o transporte. Tanto a União Europeia quanto o governo federal estão fornecendo apoio abrangente para essa transformação. No setor de aço, projetos como o *Carbon2Chem* e *BeWiSe* visam usar hidrogênio na extração de produtos químicos dos gases de escape e na conversão de siderúrgicas em operação para o uso de hidrogênio. Na indústria química, projetos como o *Kopernikus P2X* e *CatLab* buscam produzir produtos químicos e plásticos a partir de eletricidade e CO₂, além de desenvolver catalisadores essenciais. No campo de transportes, iniciativas como *H2Mare* e *P2X* trabalham na produção de *eFuels* a partir do ar e eletricidade, e também são apoiados esforços de pesquisa de células de combustível em colaborações internacionais, incluindo o Canadá (BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG, 2023).

Para estabelecer uma economia de hidrogênio eficaz, é essencial ter legislação adequada. A atualização da Estratégia Nacional de Hidrogênio destaca a aceleração dos procedimentos de planejamento e autorização. Além disso, o projeto *Ariadne* da *Kopernikus* está constantemente analisando opções legislativas e seus impactos para garantir que a legislação possa acompanhar o desenvolvimento da economia do hidrogênio. O projeto também realiza análises detalhadas sobre a quantidade de hidrogênio necessária em diversos setores, como indústria, transporte, eletricidade e aquecimento, com base nas decisões tomadas pela Alemanha em direção à neutralidade climática (BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG, 2023).

2.8.5 Roteiro do Hidrogênio na Europa

Este item abordará o roteiro do hidrogênio europeu, a partir do relatório *Hydrogen Roadmap Europe* (UNDERTAKING, 2019), que sustenta a importância da adoção do H₂ em larga escala para concretizar a transição energética na União Europeia (UE).

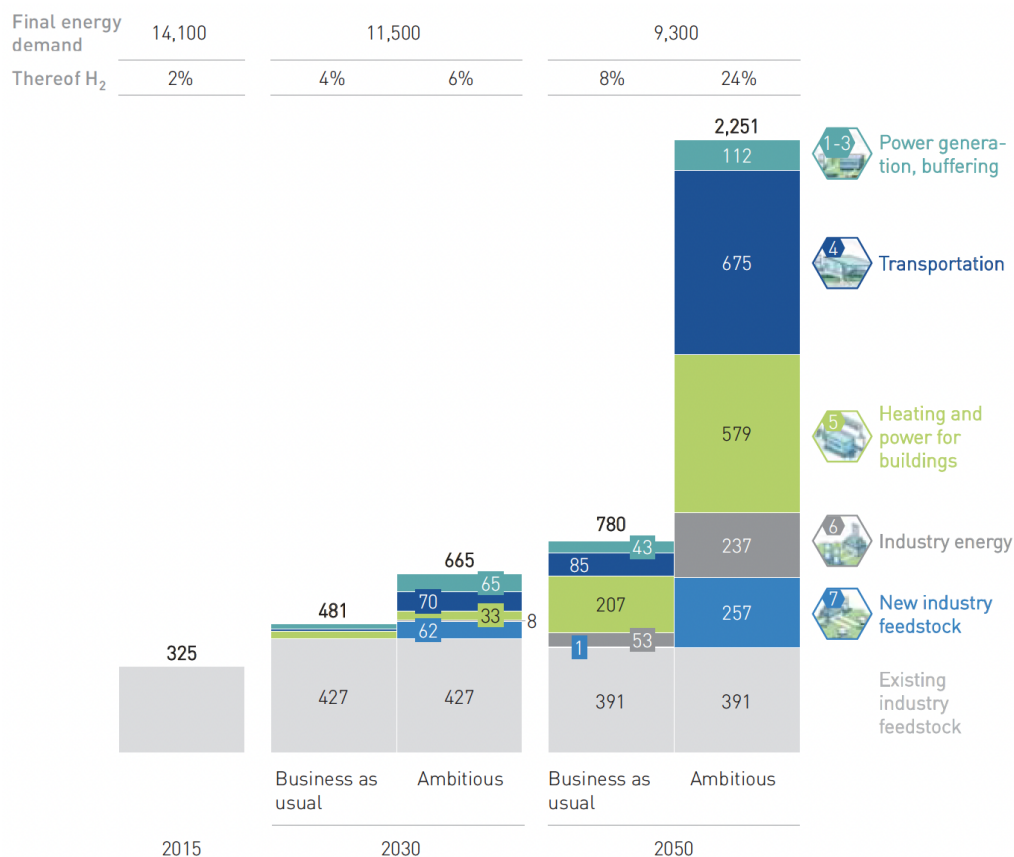
A transição da Europa para um sistema energético descarbonizado está em andamento. Os 28²⁵ Estados membros da UE assinaram e ratificaram o acordo da Conferência das Partes (COP21) de Paris. Essa transição transformará radicalmente a forma como a UE gera, distribui, armazena e consome energia. Ela exigirá uma geração de energia praticamente livre de carbono, maior eficiência energética e uma profunda descarbonização do transporte, dos edifícios e da indústria (UNDERTAKING,

²⁵ O *Hydrogen Roadmap Europe*, escrito em 2019, abrangeu os 28 Estados membros da União Europeia, uma vez que o Reino Unido ainda fazia parte da UE naquele ano.

2019).

Segundo Undertaking (2019) contemplando todos os setores, observa-se o potencial de geração de aproximadamente 2.250 terawatts-hora (TWh) de H₂ na Europa em 2050, o que representa cerca de um quarto da demanda total de energia da UE, conforme FIGURA 27.

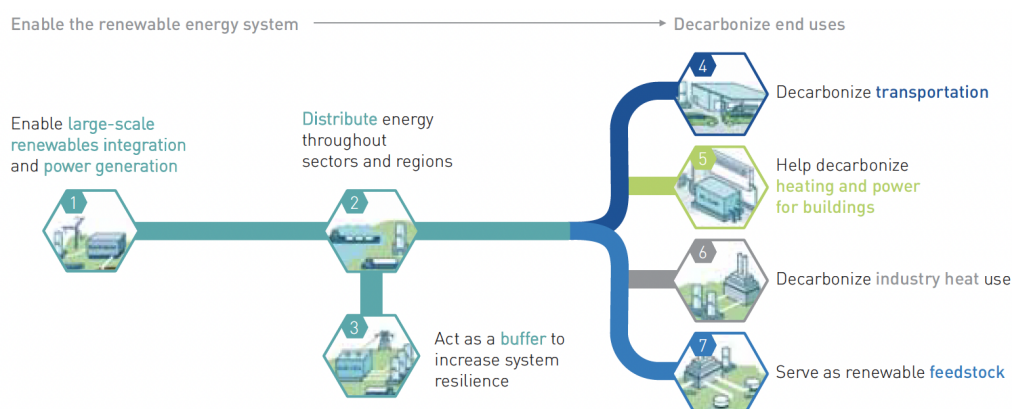
FIGURA 27 – POTENCIAL ENERGÉTICO DO HIDROGÊNIO ATÉ 2050



FONTE: Undertaking (2019).

A FIGURA 28 ilustra os diferentes aspectos nos quais o H₂ pode desempenhar um papel facilitador durante a transição energética europeia.

FIGURA 28 – O HIDROGÊNIO COMO FACILITADOR DA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA NA EUROPA



FONTE: Undertaking (2019).

Conforme mencionado por Undertaking (2019), esses aspectos facilitadores são:

O H2 possibilita a integração em larga escala de energias renováveis, pois permite que os agentes de energia convertam e armazenem energia como um gás renovável.

O H2 é a única tecnologia em escala para o "acoplamento setorial", permitindo converter a energia gerada em uma forma utilizável, armazená-la e canalizá-la para os setores de uso final para atender à demanda. Além disso, o H2 proporciona uma ligação entre as regiões com energias renováveis de baixo custo e aquelas que são centros de demanda - por exemplo, conectando regiões com abundante energia geotérmica e eólica no norte da Europa ao continente principal, ou como meio de importar energia renovável do norte da África. O H2 permite o transporte de energia a longa distância em dutos, navios ou caminhões, seja gasosa, liquefeita ou armazenada em outras formas, o que custa muito menos do que as linhas de transmissão de energia.

Devido à variação na oferta e demanda de energia ao longo do ano, é essencial buscar um maior equilíbrio e implementar sistemas de armazenamento de energia sazonal. Embora as baterias e as medidas do lado da demanda possam proporcionar flexibilidade a curto prazo, o H2 é a única tecnologia em escala disponível para armazenamento de energia a longo prazo. Ele pode usar as redes de gás existentes, as cavernas salinas e os campos de gás esgotados para armazenar energia por períodos mais longos a baixo custo.

No transporte, o H2 é a opção de descarbonização mais promissora para caminhões, ônibus, navios, trens, carros grandes e veículos comerciais, em que a menor densidade de energia (portanto, menor alcance), os altos custos iniciais e o lento desempenho de recarga das baterias são as principais desvantagens. As células

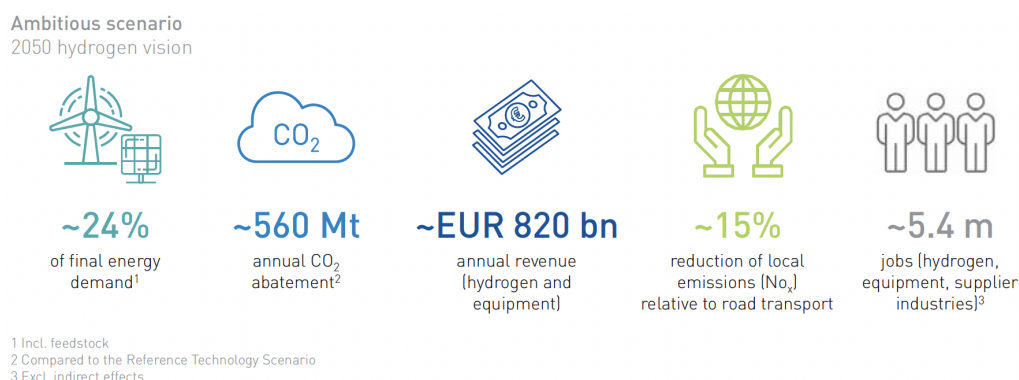
de combustível também exigem muito menos matérias-primas em comparação com as baterias e os motores de combustão. Como o segmento de transporte é responsável por cerca de um terço de todas as emissões de CO₂ na UE, sua descarbonização representa um elemento fundamental para a realização da transição energética. Além disso, a infraestrutura de reabastecimento de hidrogênio tem vantagens significativas: requer apenas um décimo do espaço nas cidades e ao longo das rodovias, em comparação com o carregamento rápido. Na aviação, o H₂ e os combustíveis sintéticos baseados em H₂ são a única opção em escala para a descarbonização direta.

A descarbonização da rede de gás que conecta a indústria da Europa e fornece mais de 40% do aquecimento das residências da UE e 15% da geração de energia da UE requer H₂. A eletrificação com bombas de calor pode substituir o gás natural para aquecer novos edifícios, mas exige reformas caras ou até mesmo impossíveis em edifícios antigos, que respondem por 90% das emissões de CO₂ dos edifícios. A eletrificação direta total também levaria a grandes desequilíbrios sazonais na demanda de energia que, por sua vez, exigiriam um mecanismo de armazenamento de energia em grande escala. O H₂ não sofre com essas deficiências e pode atuar como complemento das bombas de calor.

A indústria pode queimar H₂ para produzir calor de alta qualidade e usar o combustível em vários processos como matéria-prima, diretamente ou em conjunto com CO₂ como combustível/eletrocombustível. Na produção de aço, por exemplo, o H₂ pode funcionar como redutor, substituindo os altos-fornos à base de carvão. Quando usado como matéria-prima para a produção de amônia e hidrotreatamento em refinarias, ele poderá ser produzido a partir de fontes de baixo carbono.

Considerando os benefícios do H₂ para a UE, é possível identificar uma série de vantagens, conforme a FIGURA 29. Entre elas, destaca-se o potencial de geração de aproximadamente 2.250 terawatts-hora (TWh) de H₂ na Europa até 2050, representando cerca de um quarto da demanda total de energia da UE. Além disso, ao alcançar esse objetivo, a UE estaria no caminho para reduzir aproximadamente 560 Mt de emissões de CO₂ até 2050, uma redução significativa considerando que as emissões de CO₂ precisam ser reduzidas de 3.500 Mt para 770 Mt no mesmo período (UNDERTAKING, 2019).

FIGURA 29 – BENEFÍCIOS DO HIDROGÊNIO PARA A UNIÃO EUROPEIA



FONTE: Undertaking (2019).

Outro aspecto importante da implantação do H2 é a eliminação das emissões locais. Por exemplo, no setor de transporte, as emissões de NOX poderiam ser reduzidas em 0,5 milhões de toneladas por ano em 2050. Isso não só teria um impacto positivo, contribuindo para a redução da poluição em ambientes aquáticos e espaços esportivos. Além disso, indústrias como usinas siderúrgicas evitariam a geração de poeira e alcatrão, enquanto o ruído de trens e caminhões a diesel diminuiria significativamente (UNDERTAKING, 2019).

A projeção de implantação do H2 resultaria na criação de um setor avaliado em aproximadamente 130 bilhões de euros para o combustível e os equipamentos relacionados para empresas da UE até o ano de 2030. Esse valor aumentaria significativamente, chegando a atingir cerca de 820 bilhões de euros até o ano de 2050. Isso criaria um mercado local para a indústria da UE usar como "trampolim" para competir globalmente na nova economia do hidrogênio. O potencial de exportação em 2030 deve chegar a um valor estimado de 70 bilhões de euros, com exportações líquidas de 50 bilhões de euros. No total, o setor de hidrogênio da UE poderia gerar empregos para cerca de 1,0 milhão de trabalhadores altamente qualificados até 2030, chegando a 5,4 milhões até 2050 (UNDERTAKING, 2019).

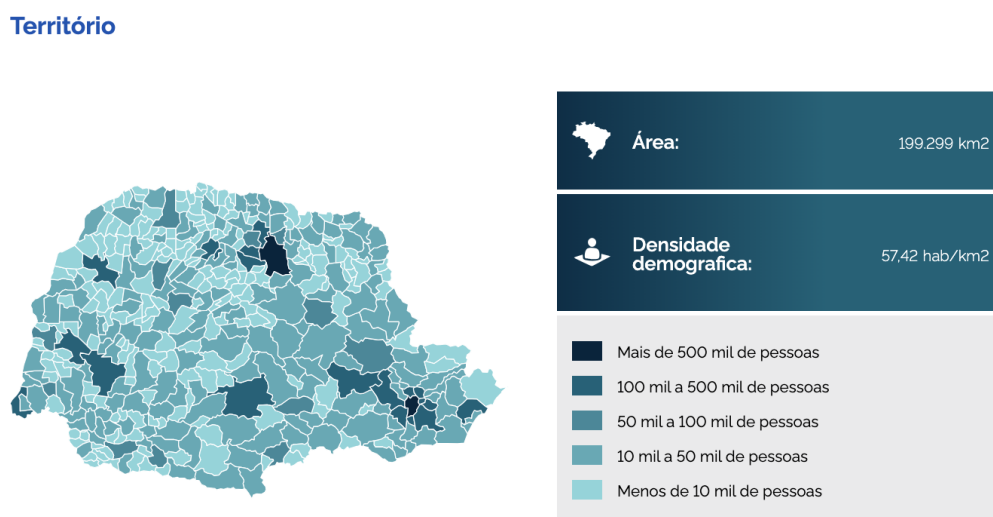
3 METODOLOGIA

Com o intuito de atender aos objetivos estabelecidos neste trabalho, optou-se por selecionar uma metodologia qualitativa. Essa metodologia compreende os seguintes elementos: área de estudo, revisão bibliográfica, estudo de caso sobre a Alemanha, inquérito de especialistas por meio de entrevista e questionário, visando identificar oportunidades futuras e possíveis desafios no contexto brasileiro. Além disso, com base nos resultados obtidos, são desenvolvidas estratégias e recomendações apropriadas.

3.1 ÁREA DE ESTUDO

O foco deste estudo é o estado do Paraná, localizado no Brasil, tendo como capital a cidade de Curitiba e possui 399 municípios. De acordo com os primeiros resultados do Censo de 2022, a população do Paraná é estimada em 11.443.208 *hab.* Com uma área total de 199.299 *km*², a densidade demográfica é calculada em 57,42 *hab/km*² (IBGE, 2023c), conforme ilustrado na FIGURA 30. Além disso, é relevante destacar que o estado do Paraná apresenta um Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) de 0,749, de acordo com dados de 2010 (IBGE, 2023b).

FIGURA 30 – ESTADO DO PARANÁ



FONTE: IBGE (2023c).

De acordo com a SEDEST (2021) o Paraná apresenta um significativo potencial para a geração de energias renováveis, abrangendo diversas fontes, tais como hidroelétrica, energia fotovoltaica, biomassa, biogás e energia eólica.

Conforme indicado pelo IBGE (2023d), em 2020, o Paraná ocupava a quarta posição no ranking do Produto Interno Bruto (PIB) nacional. O Paraná destaca-se pelo seu setor econômico primário, que é impulsionado por uma significativa produção de artigos agrícolas, pecuários (MATEUS CAMPOS, s.d.) e pela indústria de extração de madeira (MICHELE DE FREITAS, s.d.).

A fertilidade do solo na região cria um ambiente propício para o desenvolvimento da atividade agrícola, com o estado figurando como um importante produtor de diversas culturas, incluindo trigo, milho, soja, algodão e café (EDUARDO DE FREITAS, s.d.). O Paraná também se destaca na produção de cana de açúcar, mandioca, tabaco e batata (MICHELE DE FREITAS, s.d.). No setor pecuário, a criação de bovinos é proeminente, com um rebanho numeroso, e o estado também se destaca na produção de suínos, bem como na produção de leite, ovos, bicho-da-seda, entre outros (EDUARDO DE FREITAS, s.d.). A indústria de extração de madeira é notável, especialmente no contexto do reflorestamento de pinus e eucalipto, que abastece principalmente a indústria de produção de papel (MICHELE DE FREITAS, s.d.).

A indústria paranaense se destaca pelo seu alto nível de desenvolvimento e diversificação. Setores notáveis incluem a indústria automobilística, eletrônica, de produtos eletroportáteis, alimentícia e de celulose (MATEUS CAMPOS, s.d.).

O setor terciário também prospera no Paraná, impulsionado pelas atividades comerciais que se beneficiam da extensa infraestrutura logística do estado, composta por portos, ferrovias e rodovias bem desenvolvidas. Vale ressaltar que o Paraná é reconhecido como um importante centro turístico na Região Sul do Brasil, destacando-se especialmente a região de fronteira, onde as Cataratas do Iguaçu estão localizadas (MATEUS CAMPOS, s.d.).

Em síntese, a caracterização do estado do Paraná revela sua importância significativa no contexto brasileiro. Com uma população considerável, uma diversidade econômica que abrange setores primários, secundários e terciários, e um rico solo que impulsiona a produção agrícola, o Paraná se destaca como um estado multifacetado. Além disso, a ênfase no potencial para a geração de energias renováveis destaca a busca por soluções sustentáveis em um mundo em rápida transformação.

3.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica deste estudo consiste em revisar informações sobre um tema específico por meio de uma análise de diversas fontes de dados, tanto nacionais quanto internacionais. O intuito dessa revisão é estabelecer um referencial teórico sobre o tema e identificar os aspectos em que há concordância ou controvérsia no cenário atual da literatura.

A fim de alcançar esse objetivo, realizou-se pesquisas nas bases de dado Web of Science, Scopus, Science Direct e Google Scholar. Ademais, buscou-se informações nas organizações intergovernamentais IPCC e *International Renewable Energy Agency* (IRENA), na agência autônoma *Internacional Energy Agency* (IEA), na parceria estratégica *German Brazilian Energy Partnership* (GBEP) e em bancos de dados regionais do Paraná.

Durante a pesquisa, empregou-se as seguintes palavras-chave: mudanças climáticas, matriz energética, transição energética, descarbonização, NZE, energias renováveis, H2, H2V, rotas de produção, transporte, armazenamento e aplicação do H2V, tecnologias *Power-to-X*, políticas públicas, metas climáticas, Brasil e Alemanha, além de seus termos correlatos em inglês e alemão.

Os documentos encontrados foram submetidos a uma primeira leitura, para que houvesse uma compreensão global sobre o tema dos estudos e para sua validação quanto a qualidade e sua relação com o tema abordado. Após a triagem inicial, dividiu-se os documentos entre os de referencial teórico e o estado da arte ou da tecnologia atual dos temas abordados, conforme apresentado no Capítulo 2.

3.3 ESTUDO DE CASO - ALEMANHA

Estabeleceu-se critérios de seleção para determinar o país do estudo de caso, como:

- Países membros do G7;
- Possuir uma área significativa, estabelecida em pelo menos 350.000 km²;
- Estar entre os 15 primeiros países do ranking *Environmental Performance Index*¹ 2022 (EPI);
- Desempenhar ações e políticas relacionadas ao meio ambiente e a transição energética;
- Investir em tecnologia de H2V.

O G7 é o agrupamento dos países com as maiores economias do planeta de acordo com o Fundo Monetário Internacional (FMI). O grupo representa os países mais desenvolvidos industrial e economicamente e é composto por: Estados Unidos, Japão, Alemanha, Reino Unido, França, Itália e Canadá. Ao restringir a seleção a esses países,

¹ "*Environmental Performance Index 2022*" significa em português "Índice de Desempenho Ambiental 2022" - Tradução própria do autor.

a pesquisa direciona sua atenção para economias desenvolvidas e influentes que desempenham um papel significativo na política internacional e em questões globais.

A escolha do limite mínimo de área tem o objetivo de garantir a inclusão de países que possuam dimensões territoriais consideráveis para análise aprofundada.

O EPI de 2022, M. J. Wolf et al. (2022), oferece um resumo, baseado em dados, da situação da sustentabilidade em todo o mundo; e classifica 180 países quanto ao seu progresso na melhoria da saúde ambiental, na proteção da vitalidade do ecossistema e na mitigação das mudanças climáticas. Portanto, o EPI é um índice alinhado com o estudo de caso em questão, pois permite avaliar e comparar o desempenho ambiental dos países em relação às preocupações climáticas, transição energética e outros aspectos relacionados.

O critério de desempenhar ações e políticas relacionadas ao meio ambiente e à transição energética permite uma análise abrangente, contextualizada e relevante das ações e políticas de um país em relação à sustentabilidade ambiental e à transição para uma economia de baixo carbono.

Ao selecionar um país que demonstre um compromisso sólido com o desenvolvimento e implementação da tecnologia de H2V, é possível avaliar os investimentos em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias de produção e armazenamento desse tipo de H2. Além disso, é possível analisar iniciativas aplicáveis ao Brasil para promover a utilização do H2V nos setores de transporte, energia e indústria.

O país selecionado para o estudo de caso, com base nos critérios estabelecidos, é a Alemanha. A Alemanha atende aos critérios de seleção, sendo membro do G7, possuindo uma área significativa de aproximadamente 358.000 km², ocupando uma posição de destaque no ranking do EPI de 2022 e demonstrando compromisso com ações e políticas relacionadas ao meio ambiente e à transição energética. Além disso, a Alemanha tem investido em tecnologia de H2V, o que a torna um caso relevante para análise e aprendizado no contexto do estudo.

Com base na análise de caso da Alemanha, esta pesquisa comparativa entre Brasil e Alemanha explora aspectos como pontos de alinhamento, desafios a serem mitigados, aprendizados relevantes e tendências emergentes. O objetivo é fornecer uma compreensão abrangente das dinâmicas existentes entre os dois países, visando identificar oportunidades de aprimoramento para o contexto brasileiro.

3.4 INQUÉRITO DE ESPECIALISTAS

O inquérito se configura como uma técnica e/ou estratégia de coleta de dados (COUTINHO, 2014). Com o propósito de obter informações complementares à revisão bibliográfica, realizou-se um inquérito de especialistas por meio de entrevista e

questionário, com foco na utilização do H2V na transição energética brasileira.

Essa abordagem visa coletar perspectivas de especialistas atuantes em áreas relacionadas ao H2V. As perguntas da entrevista e do questionário são estruturadas de modo a explorar aspectos relevantes, incluindo o uso atual do H2 na matriz energética do Paraná, compreendendo suas aplicações, benefícios e desafios em setores como transporte, indústria e geração de energia. Além disso, identifica a viabilidade e desafios relacionados à produção, armazenamento, distribuição e aplicação do H2V no Brasil, considerando tecnologias, fontes de energia renovável e aspectos regulatórios e logísticos. O intuito é obter percepções que enriqueçam a pesquisa em questão e que identifique lacunas nas premissas adotadas no trabalho.

A seguir, serão expostos os elementos essenciais para a elaboração adequada tanto de uma entrevista quanto de um questionário.

3.4.1 Abordagem

A abordagem de entrevista a ser empregada é a semi-estruturada. De acordo com Boni e Quaresma (2005) nesse tipo de entrevista, são combinadas perguntas abertas e fechadas, permitindo que o entrevistado tenha espaço para se expressar sobre o tópico em questão. O pesquisador segue um conjunto pré-definido de questões, mas conduz a entrevista em um ambiente bastante similar a uma conversa informal. O entrevistador deve estar atento para guiar a discussão de forma adequada, inserindo perguntas adicionais quando julgar apropriado para esclarecer aspectos não compreendidos ou para ajudar a contextualizar a entrevista, caso o entrevistado tenha se desviado do tema ou encontre dificuldades em abordá-lo. Esse tipo de entrevista é amplamente utilizado quando se busca limitar o volume de informações e direcionar o foco para o tema em questão, intervindo de modo a atingir os objetivos estabelecidos.

A abordagem do questionário é mista, contempla perguntas de resposta aberta e fechada. Portanto, há perguntas cujas respostas são escritas pelo próprio respondente e perguntas nas quais o respondente tem que escolher entre um conjunto de opções de resposta alternativas fornecidas pelo autor do questionário (SANTOS; HENRIQUES, 2021).

3.4.2 Estrutura

Para a planificação de um inquérito por questionário, assim como a entrevista, é necessário que previamente se defina o problema, o(s) objetivo(s), a(s) hipótese(s) de estudo (quando necessário), o método, a população em estudo e a amostra (BRITO, 2008; COUTINHO, 2014; GONÇALVES, 2004; HILL, 2014).

O objetivo principal do estudo e a(s) questão(ões) de partida vão “permitir

identificar a população alvo, as variáveis principais do estudo e o tipo de investigação a desenvolver” (HILL, 2014). Nesta dimensão, o estabelecimento da revisão da literatura sobre a problemática em estudo apresenta um papel de elementar importância para uma melhor “identificação das principais características do contexto onde pretende aplicar a pesquisa e quais as variáveis que se pretende analisar” (MORGADO, 2012).

O questionário e a pesquisa estruturam-se em quatro seções distintas:

- I) Introdução;
- II) Dados do especialista;
- III) Pesquisa;
- IV) Encerramento e Agradecimento.

Na seção de Introdução, conforme Morgado (2012), faz-se a apresentação do investigador, do tema, do(s) objetivo(s) e da problemática, de forma clara e simples, mostrando o valor acrescentado que o inquirido pode trazer à investigação com as respostas do entrevistado. Nesta seção, informa-se também o nome da instituição; condições necessárias para o preenchimento do questionário; e é estabelecida uma declaração formal de confidencialidade das respostas e garantia do anonimato.

A seção do Especialista, de acordo com Batista et al. (2021), aborda questões como dados pessoais e profissionais do especialista. Os dados descritivos possuem importância elementar quanto a caracterização sociodemográfica da amostra (profissão, idade, etc. . .). Esta parte do questionário é constituída por “questões simples que pretendem obter as características dos inquiridos, quebrar o gelo e estabelecer uma relação com o inquirido” (HILL, 2014; DIAS, 1994; SOUSA; BAPTISTA, 2011).

A seção da Pesquisa é formada por um conjunto de perguntas “com tema homogêneo” para recolher opiniões, percepções, atitudes e/ou expectativas dos inquiridos em relação ao problema a investigar (HILL, 2014). Durante a entrevista, além das perguntas pré-estabelecidas, são feitas questões adicionais, conforme a necessidade surgir.

Batista et al. (2021) ressalta que as perguntas deverem ser claras (linguagem simples), unívocas, curtas, não ambíguas, neutras e relevantes em relação à experiência do inquirido. Carmo e Ferreira (2008) enfatizam a necessidade de incluir “perguntas de descanso e/ou de preparação para introduzir perguntas que ofereçam maior dificuldade ou inibam o respondente pela sua natureza melindrosa”, bem como o estabelecimento de “perguntas de controlo para verificar a veracidade de outras perguntas inseridas numa outra parte do questionário”.

A seção de Encerramento e Agradecimento tem como objetivo concluir o inquérito e expressar gratidão pela colaboração do especialista na pesquisa.

3.4.3 Coleta de Dados

Empregaram-se métodos de coleta de informações através de entrevistas e questionários eletrônicos, os quais serão administrados por meio da internet. A modalidade presencial das entrevistas será considerada de acordo com a disponibilidade geográfica dos especialistas. Destaca-se que, dentre os especialistas escolhidos, alguns receberam o questionário, enquanto outros foram selecionados para entrevistas. É possível que um mesmo especialista tenha sido contemplado tanto com o questionário quanto com a entrevista.

Oliveira et al. (2016) realizou uma análise dos prós e contras associados ao método de coleta de informações por meio de entrevista, conforme a Tabela 31. Carmo e Ferreira (2008), Sousa e Baptista (2011) e Hill (2014) compilaram uma análise semelhante para à aplicação de instrumento de questionário, conforme apresentado na Tabela 32.

FIGURA 31 – ENTREVISTA - PRÓS E CONTRAS

Prós	Contras
Há maior flexibilidade, podendo o entrevistador repetir ou esclarecer perguntas	Dificuldade de expressão e comunicação de ambas as partes
Oportunidade da obtenção de informações que não estão disponíveis em fontes documentais	Possibilidade do entrevistado ser influenciado, consciente ou inconscientemente, pelo questionador
Há possibilidade de conseguir informações mais precisas, podendo ser comprovadas, de imediato, as discordâncias	Ocupa muito tempo e é difícil de ser realizada

FONTE: Adaptado de (OLIVEIRA et al., 2016).

FIGURA 32 – QUESTIONÁRIO ELETRÔNICO - PRÓS E CONTRAS

Prós	Contras
Fácil administração	Alguma necessidade literacia digital necessária
Rápido	É preciso ter acesso à internet
Pode atingir a globalidade	Exige motivação em responder
Mais incluso: o respondente responde quando lhe convier	

FONTE: Adaptado de (BATISTA et al., 2021).

Devido à notável versatilidade de ambas as abordagens, elas se mostram altamente relevantes para o presente estudo, pois têm o potencial de alcançar especialistas em diferentes regiões geográficas.

3.4.4 Perfil do especialista

De acordo com Carmo e Ferreira (2008) e Dias (1994) é necessário definir a população a estudar e/ou inquirir, que apresente uma determinada característica em

comum e que constitui o objeto de estudo.

Ao definir o perfil dos especialistas, é recomendável buscar uma diversidade de perspectivas e conhecimentos, equilibrando a representatividade de diferentes campos de atuação, setores, experiências e localizações geográficas. Isso ajuda a obter uma visão abrangente e enriquecedora para o estudo. Os critérios de seleção dos especialistas incluem:

- Campo de atuação: os especialistas selecionados devem possuir experiência e conhecimento em áreas relacionadas à energia, como produção, armazenamento, utilização, aplicação, fabricação de H2V, planejamento energético, P&D;
- Setor de atuação: serão selecionados especialistas provenientes de diferentes setores, como iniciativa privada, iniciativa pública, órgãos reguladores, institutos de P&D e instituições de pesquisa e ensino. A inclusão de representantes de diversos setores garantirá a obtenção de perspectivas diversas e abrangentes;
- Tempo de atuação na área e experiência: será dada preferência a especialistas com uma sólida experiência na área de atuação relevante. O tempo de atuação pode ser um indicador da expertise acumulada, e especialistas com experiência significativa são capazes de oferecer *insights* valiosos com base em suas vivências;
- Localização geográfica: serão selecionados especialistas de diferentes países, regiões ou estados, a fim de capturar visões e experiências variadas. A diversidade geográfica contribuirá para a compreensão das perspectivas específicas relacionadas à transição energética em diferentes contextos.;

Esses critérios de seleção garantem uma abordagem abrangente e inclusiva, permitindo a obtenção de informações relevantes e enriquecedoras por meio do questionário aplicado aos especialistas.

3.4.5 Meio de contato

Para estabelecer contato com os especialistas a serem entrevistados, desenvolveu-se uma mensagem padrão de convite para o LinkedIn. Além disso, elaborou-se um convite formal em formato PDF. Os modelos estão disponíveis nos APÊNDICES A.1 e A.2, respectivamente.

Quanto ao questionário, foram criadas mensagens personalizadas para o LinkedIn e e-mail, disponíveis nos APÊNDICES B.1 e B.2, respectivamente. Além disso, enviou-se os convites formais em formato PDF junto com essas mensagens, conforme apresentado no APÊNDICE B.3.

3.4.6 Definição da amostra

Para estabelecer a quantidade mínima de respostas aceitáveis, adotou-se um critério de 11 respostas como número mínimo desejável para o questionário eletrônico. Para a entrevista, estabeleceu-se um valor de 3 respostas, visando englobar perfis distintos de especialistas, tais como um pesquisador da área de estudo, um agente privado interessado nessa área e um agente do governo ligado ao setor de energia. Selecionou-se esta quantidade para possibilitar uma análise preliminar dos dados coletados e permitir uma avaliação inicial da visão dos especialistas sobre o tema.

Tanto para a entrevista quanto para o questionário, realizou-se a seleção da amostra através da identificação de especialistas. Indivíduos foram designados como especialistas quando demonstravam possuir formação ou especialização na área de energias renováveis ou na tecnologia do H₂, quando estavam ativamente envolvidos nesse campo, ou quando tinham participado de algum evento ou congresso relacionado ao H₂, como, por exemplo, o 3º Congresso Brasileiro do Hidrogênio. Com base nesse critério de seleção, identificou-se 80 especialistas qualificados. Em seguida, procurou-se estabelecer contato com esses especialistas por meio de e-mail ou LinkedIn, o que resultou em 65 especialistas dos quais obteve-se informações de contato.

3.4.7 Informações a coletar

Determinou-se um mínimo de 5 perguntas para a entrevista e de 10 perguntas para o questionário. As perguntas, tanto da entrevista quanto do questionário, foram formuladas com base nos resultados esperados deste estudo, que incluem:

- Resultado esperado I: Obter uma visão clara do cenário atual do H₂V no Brasil: pretende-se analisar e fornecer um panorama abrangente sobre a situação atual do H₂V no país. Isso inclui identificar as iniciativas em andamento, as políticas governamentais relacionadas, os projetos de pesquisa e desenvolvimento em curso, bem como as empresas e instituições envolvidas nesse contexto;
- Resultado esperado II: Analisar o uso atual do H₂ na matriz energética do Paraná: será realizada uma análise do emprego atual do H₂ na matriz energética do estado do Paraná, considerando suas aplicações, benefícios e desafios específicos. Serão examinados setores como transporte, indústria e geração de energia, com o intuito de compreender o papel do H₂ nesse contexto e suas perspectivas futuras;
- Resultado esperado III: Identificar a viabilidade e os desafios relacionados à produção, armazenamento, distribuição e aplicação do H₂V no Brasil: serão analisadas as diferentes tecnologias de produção, as fontes de energia renovável

disponíveis, os requisitos de armazenamento e os sistemas de distribuição necessários para uma implementação eficiente. Além disso, serão identificados os principais desafios, como a infraestrutura requerida, a regulação e os aspectos logísticos;

- Resultado esperado IV: Análise do processo de inserção do H2V na matriz energética da Alemanha: será realizada uma análise comparativa da experiência alemã na incorporação do H2V em sua matriz energética. Serão investigadas as políticas adotadas, os modelos de negócio implementados, as tecnologias utilizadas e os resultados alcançados. Essa análise visa fornecer *insights* relevantes para o contexto brasileiro, considerando as lições aprendidas e as boas práticas que podem ser aplicadas na transição energética nacional;

Por meio desses resultados, esperou-se contribuir para um melhor entendimento do potencial do H2V na transição energética brasileira, auxiliando na identificação de oportunidades, desafios e estratégias para sua implementação efetiva e sustentável.

A seguir, serão apresentadas as perguntas e informações que serão abordadas neste inquérito.

3.4.7.1 Introdução

Tanto na entrevista quanto no questionário eletrônico, na fase inicial, foram feitas perguntas para obter informações sobre o perfil do entrevistado. Reforça-se que todas as informações coletadas foram tratadas de forma confidencial. Abaixo, apresentamos alguns exemplos de perguntas:

- I) Nome;
- II) Telefone de contato (opcional);
- III) E-mail;
- IV) Nível de escolaridade;
- V) Profissão/ocupação;
- VI) Experiência específica relacionadas ao H2V.

3.4.7.2 Entrevista

Considerando que realizou-se a entrevista com diferentes perfis de especialistas, foram elaboradas perguntas específicas para cada um deles. Buscou-se abordar um pesquisador da área de energia, com preferência por especialização em energia

renovável; um agente privado interessado nessa área e com possibilidade de contribuir em aspectos relacionados à produção, armazenamento, transporte ou distribuição do H2V; e um agente governamental vinculado ao setor de energias do estado do Paraná. A seguir, serão expostas as questões da entrevista acompanhadas de seus objetivos correspondentes.

Entrevista com pesquisador da área de energia:

- Pergunta I: Com base em sua experiência na área de energias (renováveis), como você avalia o atual estágio de desenvolvimento do H2V no Brasil?

Objetivo: Coletar a percepção do especialista sobre o grau de desenvolvimento do hidrogênio verde no país, identificando possíveis avanços, desafios e lacunas que ainda precisam ser abordados.

- Pergunta II: Quais tecnologias de produção de H2V você considera mais promissoras para o contexto brasileiro?

Objetivo: Identificar as tecnologias de produção de hidrogênio verde que têm maior potencial para serem aplicadas no Brasil, a partir da visão especializada do pesquisador.

- Pergunta III: Quais são os principais desafios que o país enfrenta em relação à produção, armazenamento, distribuição e aplicação do H2V?

Objetivo: Identificar os principais obstáculos e entraves enfrentados pelo Brasil no que diz respeito à produção, armazenamento, distribuição e utilização do hidrogênio verde, com vistas a entender os gargalos do desenvolvimento dessa tecnologia no país.

- Pergunta IV: Na sua opinião, quais são as principais políticas públicas necessárias para impulsionar o desenvolvimento do H2V no Brasil?

Objetivo: Compreender a percepção do pesquisador sobre as políticas públicas que poderiam impulsionar o uso do hidrogênio verde no Brasil, com foco na atuação governamental como fator catalisador do desenvolvimento dessa fonte de energia.

- Pergunta V: Considerando o panorama internacional, quais aprendizados podem ser aplicados à realidade brasileira na transição para uma matriz energética baseada em H2V?

Objetivo: Investigar as experiências internacionais relacionadas à incorporação do hidrogênio verde em matrizes energéticas, buscando lições aprendidas e boas práticas que possam ser aplicadas no contexto brasileiro.

- Pergunta VI: Em sua visão, quais são as perspectivas futuras para a adoção em larga escala do H2V no país?

Objetivo: Com base na experiência e conhecimento do pesquisador, obter uma visão prospectiva sobre o futuro do hidrogênio verde no Brasil, abordando seu potencial de adoção em grande escala e possíveis impactos na matriz energética nacional.

Entrevista com um agente do setor privado interessado em contribuir com o H2V:

- Pergunta VII: Como você enxerga o potencial do H2V como uma oportunidade de negócio no setor privado?

Objetivo: Entender a percepção do empresário em relação às oportunidades de negócio oferecidas pelo hidrogênio verde, buscando identificar o interesse e o potencial de investimento nesse setor.

- Pergunta VIII: Você poderia apontar demandas específicas ou nichos de mercado que podem ser atendidos pela aplicação do H2V?

Objetivo: Investigar se o empresário enxerga necessidades específicas ou nichos de mercado que podem ser atendidos pelo uso do hidrogênio verde, visando identificar possíveis oportunidades de atuação.

- Pergunta IX: Quais são as principais razões que o levaram a considerar investir nesse setor?

Objetivo: Entender quais motivações e justificativas do empresário para considerar investir no setor do hidrogênio verde, buscando identificar os fatores impulsionadores dessa decisão.

- Pergunta X: Em relação a parcerias e cooperações, você acredita que existem sinergias possíveis com outras empresas ou setores para impulsionar o desenvolvimento do H2V?

Objetivo: Investigar a visão do empresário sobre possíveis sinergias com outras empresas ou setores para impulsionar o desenvolvimento do hidrogênio verde.

- Pergunta XI: Quais políticas governamentais ou incentivos você considera importantes para tornar o setor do H2V mais atrativo para empresas privadas?

Objetivo: Identificar as políticas públicas e incentivos que o empresário considera fundamentais para tornar o setor do hidrogênio verde mais atrativo para o setor privado.

Entrevista com agente governamental do setor de energia do Paraná:

- Pergunta XII: Como o governo tem acompanhado a evolução do H2V como parte da transição energética no país?

Objetivo: Entender como o governo tem monitorado o desenvolvimento do hidrogênio verde como parte de sua estratégia de transição energética.

- Pergunta XIII: Quais ações e projetos o governo tem implementado para fomentar o uso do H2V na matriz energética brasileira?

Objetivo: Identificar as ações e projetos específicos que o governo tem empreendido para promover o uso do hidrogênio verde em sua matriz energética.

- Pergunta XIV: Quais são os principais desafios regulatórios ou estruturais enfrentados pelo governo na integração do H2V na matriz energética brasileira?

Objetivo: Entender os principais desafios regulatórios e estruturais que o governo enfrenta para integrar o H2V em sua matriz energética.

- Pergunta XV: Como o governo tem trabalhado em parceria com o setor privado para incentivar o desenvolvimento do H2V no país?

Objetivo: Investigar como o governo tem promovido parcerias com o setor privado para impulsionar o desenvolvimento do H2V no Brasil.

- Pergunta XVI: Quais setores da economia são vistos como mais promissores para a aplicação do H2V e por quê?

Objetivo: Identificar os setores da economia considerados mais promissores para a aplicação do H2V e as razões por trás dessa avaliação.

- Pergunta XVII: O governo possui metas ou planos específicos relacionados ao uso do H2V na descarbonização de setores-chave da economia?

Objetivo: Verificar se o governo possui metas ou planos específicos para o uso do H2V na descarbonização de setores estratégicos da economia.

- Pergunta XVIII: Em sua opinião, quais são os principais benefícios que a adoção do H2V pode trazer para a economia e o meio ambiente do Brasil?

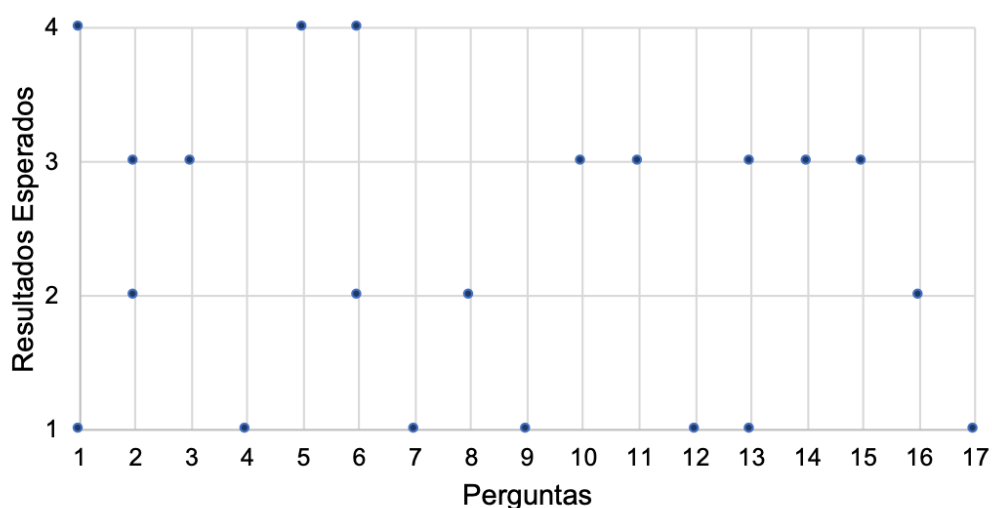
Objetivo: Compreender a visão do agente governamental sobre os benefícios potenciais da adoção do H2V para a economia e o meio ambiente do país.

Após cada entrevista, é dada a oportunidade a todos os entrevistados para compartilharem quaisquer considerações adicionais que desejem fazer.

Relação entre as perguntas da entrevista e os resultados esperados:

Com o propósito de fundamentar a escolha das perguntas, representou-se a relação entre as questões da entrevista e os resultados esperados na FIGURA 33. Essas conexões servem como base para uma análise mais minuciosa, permitindo a confirmação ou questionamento dos resultados previamente estabelecidos.

FIGURA 33 – RELAÇÃO ENTRE AS PERGUNTAS DA ENTREVISTA E OS RESULTADOS ESPERADOS



FONTE: O autor (2023).

Observa-se que uma mesma pergunta pode estar relacionada a um ou mais resultados esperados. Essa abordagem flexível possibilita uma avaliação completa das percepções e opiniões dos especialistas sobre vários aspectos do H2V no Brasil, enriquecendo a análise e contribuindo para uma compreensão mais precisa e significativa dos resultados do estudo.

3.4.7.3 Questionário eletrônico

Agora, em relação ao questionário eletrônico, ele é composto por perguntas de respostas objetivas na escala Likert com 5 níveis, como "muito ruim", "ruim", "intermediário", "bom" e "muito bom", além de perguntas de respostas discursivas. Na sequência, serão apresentadas as perguntas do questionário, acompanhadas das opções de resposta na escala Likert e seus objetivos correspondentes. Além disso, descreve-se a relação entre cada pergunta e os resultados esperados desta pesquisa.

Perguntas objetivas:

- Pergunta I: Como você avalia a relevância do hidrogênio verde na transição energética no Brasil?

Respostas: Nada relevante; Pouco relevante; Neutro; Relevante; Muito relevante.
Objetivo: Medir a percepção dos especialistas sobre a importância do hidrogênio verde na transição energética do Brasil.

- Pergunta II: Quão bem informado você se considera sobre as tecnologias na cadeia de produção, distribuição e armazenamento do hidrogênio verde?

Respostas: Nada informado; Pouco informado; Moderadamente informado; Bem informado; Muito bem informado.

Objetivo: Avaliar o nível de conhecimento dos especialistas em relação às tecnologias e aplicações do hidrogênio verde.

- Pergunta III: Como você classifica o estágio atual de desenvolvimento do hidrogênio verde no Brasil?

Respostas: Estágio inicial; Estágio de desenvolvimento intermediário; Estágio avançado de desenvolvimento; Estágio de implantação comercial; Estágio maduro e consolidado.

Objetivo: Obter a avaliação dos especialistas sobre o atual estágio de desenvolvimento do hidrogênio verde no país.

- Pergunta IV: O quanto você acredita que o hidrogênio verde pode contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa no país?

Respostas: Nenhuma contribuição; Contribuição baixa; Contribuição moderada; Contribuição significativa; Contribuição muito significativa.

Objetivo: Medir o grau de crença dos especialistas na capacidade do hidrogênio verde em reduzir as emissões de gases de efeito estufa no Brasil.

- Pergunta V: Em sua opinião, quão promissoras são as tecnologias de produção de hidrogênio verde no contexto brasileiro?

Respostas: Nada promissora; Pouco promissora; Promissora; Muito promissora; Não sei opinar.

Objetivo: Coletar a opinião dos especialistas sobre o potencial das tecnologias de produção de hidrogênio verde no cenário brasileiro.

- Pergunta VI: Como você avalia a oportunidade de negócio do hidrogênio verde no setor privado?

Respostas: Nenhuma oportunidade; Oportunidade limitada; Alguma oportunidade; Oportunidade significativa; Oportunidade muito promissora.

Objetivo: Coletar a avaliação dos especialistas sobre a viabilidade de negócios relacionados ao hidrogênio verde para empresas privadas.

- Pergunta VII: O quanto você percebe que o setor privado está preparado para investir no setor de hidrogênio verde?

Respostas: Nenhum preparo; Preparo limitado; Preparo moderado; Preparo adequado; Preparo muito alto.

Objetivo: Avaliar a percepção dos especialistas quanto à prontidão do setor privado para investir no segmento do hidrogênio verde.

- Pergunta VIII: Caso você conheça as ações ou políticas públicas atuais no Brasil concernentes ao hidrogênio verde, como você avaliaria a sua eficácia?

Respostas: Pouquíssimo eficazes; Pouco eficazes; Moderadamente eficazes; Altamente eficazes; Não estou ciente de nenhuma ação/política pública.

Objetivo: Coletar a opinião dos especialistas sobre a efetividade das políticas públicas atuais no impulso ao desenvolvimento do hidrogênio verde no país.

- Pergunta IX: Quão efetivas têm sido as ações e projetos implementados pelo governo estadual para fomentar o uso do hidrogênio verde na matriz energética do Paraná?

Respostas: Inefetivas; Pouco efetivas; Moderadamente efetivas; Eficazes; Altamente efetivas.

Objetivo: Avaliar a efetividade das ações e projetos do governo do Paraná no incentivo ao uso do hidrogênio verde em sua matriz energética.

- Pergunta X: Em sua opinião, quão desafiadores são os aspectos regulatórios ou estruturais relacionados à integração do hidrogênio verde na matriz energética estadual?

Respostas: Muito desafiadores; Moderadamente desafiadores; Relativamente desafiadores; Pouco desafiadores; Minimamente desafiadores.

Objetivo: Identificar a percepção dos especialistas sobre os desafios regulatórios ou estruturais para a integração do hidrogênio verde na matriz energética do Paraná.

- Pergunta XI: O quão bem-sucedida tem sido a parceria do governo estadual com o setor privado para incentivar o desenvolvimento do hidrogênio verde no Paraná?

Respostas: Sem sucesso; Pouco sucedida; Bem-sucedida; Muito bem-sucedida; Não estou ciente.

Objetivo: Avaliar a eficácia das parcerias entre o governo e o setor privado no estímulo ao desenvolvimento do hidrogênio verde no estado do Paraná.

- Pergunta XII: Dentre as políticas públicas listadas abaixo, quais você identifica como as duas de maior prioridade para efetivamente promover a transição para uma economia baseada em hidrogênio verde?

Respostas: Fomento à Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) em tecnologias de hidrogênio verde; Incentivos fiscais e subsídios para produção de hidrogênio verde; Desenvolvimento de infraestrutura para produção e distribuição de hidrogênio verde; Regulamentação e normatização para uso do hidrogênio verde; Capacitação e treinamento de profissionais especializados.

Objetivo: Avaliar a percepção dos especialistas sobre a priorização das políticas públicas em relação ao hidrogênio verde, visando identificar as duas medidas consideradas mais cruciais para impulsionar efetivamente a transição para uma economia baseada nessa fonte energética no Brasil, contribuindo para uma compreensão direcionada das ações prioritárias a serem tomadas no cenário da transição energética.

Perguntas discursivas:

- Pergunta XIII: Quais são os principais benefícios que você enxerga na adoção do hidrogênio verde em comparação com outras fontes de energia?

Objetivo: Permitir que o especialista expresse, de forma mais ampla, os benefícios percebidos do hidrogênio verde em comparação com outras fontes de energia, possibilitando uma análise mais detalhada de seus potenciais impactos.

- Pergunta XIV: Na sua opinião, quais são os principais desafios que precisam ser superados para uma adoção mais ampla do hidrogênio verde no Brasil?

Objetivo: Abrir espaço para o especialista apontar, de maneira mais aberta, os principais desafios e obstáculos que o Brasil enfrenta para uma maior adoção do hidrogênio verde, possibilitando uma análise mais aprofundada dos aspectos críticos a serem abordados.

- Pergunta XV: Caso saiba de alguma ação pública bem-sucedida relacionada ao hidrogênio verde, que possa ser aplicada no Paraná, por favor, cite-a.

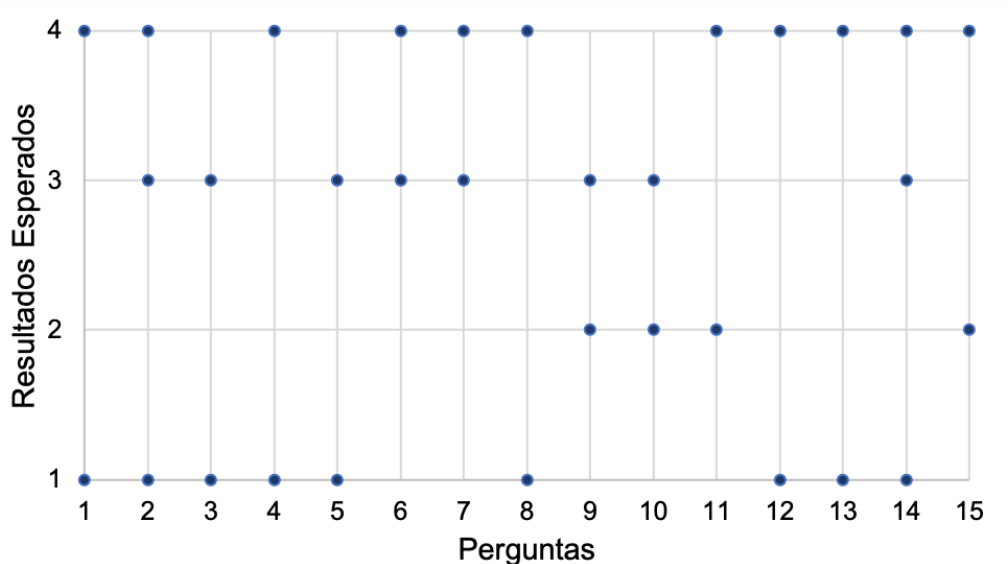
Objetivo: Identificar ações públicas bem-sucedidas de promoção do hidrogênio verde em outras localidades para "inspirar" estratégias aplicáveis ao Paraná, visando impulsionar sua transição energética.

Relação entre as perguntas do questionário e os resultados esperados:

Com o intuito de embasar as seleções das perguntas, ilustrou-se na FIGURA 34 a conexão entre as questões do questionário e os resultados esperados. Essas

associações servem como fundamento para uma análise mais detalhada, possibilitando a validação ou contestação dos resultados previstos.

FIGURA 34 – RELAÇÃO ENTRE AS PERGUNTAS DO QUESTIONÁRIO E OS RESULTADOS ESPERADOS



FONTE: O autor (2023).

Da mesma forma que na entrevista, é relevante notar que uma única pergunta pode estar associada a um ou vários resultados esperados. Essa abordagem adaptável permite uma avaliação abrangente das visões e opiniões dos especialistas em relação a diversos aspectos do H2V no Brasil, enriquecendo a análise e acrescentando à compreensão mais precisa e significativa dos resultados do estudo.

3.4.8 Análise de Dados

3.4.8.1 Entrevista

A análise das entrevistas é conduzida em duas etapas.

Na primeira etapa, todas as respostas e observações dos entrevistados são submetidas a uma análise de frequência de palavras (*word frequency counter*), considerando todas as entrevistas em conjunto para identificar as palavras mais frequentes entre os entrevistados. Utilizou-se um software gratuito disponível na internet e empregou-se múltiplas ferramentas para assegurar a precisão da contagem e comparar os resultados. Após essa etapa, procedeu-se à seleção das palavras que não são conectores, artigos, etc., ou seja, aquelas que tenham relevância para o estudo.

Os softwares apresentaram as palavras e sua contagem de ocorrências. Selecionaram-se as palavras relevantes, conforme mencionado anteriormente, considerando aquelas que apareceram pelo menos nove vezes nas entrevistas. No caso

de palavras com versões tanto no singular quanto no plural, optou-se por agrupá-las, utilizando a versão no plural.

Posteriormente, listaram-se as palavras novamente, acompanhadas de sua frequência nas entrevistas. Ressalta-se que as palavras agrupadas (singular e plural) tiveram suas frequências somadas. Após a determinação das palavras e de suas frequências, gerou-se uma nuvem de palavras (*word cloud*) na qual o tamanho de cada palavra reflete a sua frequência no texto; em outras palavras, palavras maiores na nuvem são aquelas que ocorreram com maior frequência no texto.

A nuvem de palavras desempenha um papel fundamental nessa abordagem, pois seu propósito reside em fornecer um resumo conciso e uma representação visual das palavras-chave mais relevantes identificadas no estudo. Ela não apenas simplifica a compreensão do contexto, mas também possibilita a detecção de tendências iniciais. Assim, ela serve como ponto de partida na exploração e análise mais aprofundada dos dados coletados.

A segunda etapa do processo consiste na revisão minuciosa das transcrições das entrevistas, a fim de identificar padrões de opiniões e perspectivas expressas pelos entrevistados. Após a identificação desses padrões, elaboraram-se frases que refletiram esses padrões comuns entre os entrevistados.

Para direcionar essa análise, concentrou-se a atenção nas frases que fazem referência às palavras mais frequentes, previamente identificadas na primeira parte da análise. A importância dessa segunda etapa se torna evidente, uma vez que a nuvem de palavras destaca as palavras mais comuns, porém, nem sempre reflete as opiniões mais recorrentes. Portanto, essa etapa aprofundada é fundamental para uma análise completa e precisa dos dados obtidos durante as entrevistas, proporcionando uma compreensão mais abrangente das tendências e *insights* relevantes. Ressalta-se que a abordagem busca identificar um padrão, embora sua interpretação possa variar de acordo com a perspectiva de quem a conduz.

Por fim, procede-se à inferência a partir da análise dessas frases, buscando extrair conclusões a partir da junção das informações obtidas.

3.4.8.2 Questionário

A metodologia de análise das respostas obtidas no questionário é conduzida em duas etapas distintas, com o objetivo de extrair informações relevantes sobre o tema do H2V no contexto brasileiro.

Na primeira etapa, realizou-se uma análise direta das respostas. Nas questões de resposta objetiva, os resultados são avaliados com base na porcentagem de respostas na escala Likert, proporcionando uma visão quantitativa dos resultados.

Em relação às respostas discursivas, analisa-se as respostas mais recorrentes, bem como os aspectos únicos e interessantes que se destacam. Isso permite-se obter uma compreensão abrangente das tendências e opiniões predominantes entre os respondentes.

A segunda etapa compreende a análise minuciosa das respostas do questionário. Inicialmente, os participantes são divididos em dois grupos com base em sua atual profissão/ocupação, denominados "setor privado" e "setor público". Em seguida, utilizando a funcionalidade de filtragem de colunas no Microsoft Excel, examinou-se as concordâncias e discordâncias em cada grupo. Por fim, procedeu-se à inferência com base nas respostas coletadas.

Essa metodologia estruturada e abrangente assegura que as informações coletadas sejam interpretadas de maneira criteriosa, resultando em conclusões que proporcionam uma compreensão aprofundada do tópico em análise.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, serão apresentados os resultados e suas respectivas discussões sobre o estudo de caso da Alemanha, as entrevistas e o questionário aplicado aos especialistas. Além disso, será apresentada uma síntese dos resultados obtidos, juntamente com as limitações identificadas na pesquisa.

4.1 ESTUDO DE CASO - ALEMANHA

O estudo de caso sobre a Alemanha revela *insights* valiosos sobre a inserção do H2V na matriz energética, servindo como uma referência crucial para o Brasil. A Alemanha, reconhecida por seu compromisso com a transição energética, destaca-se pelos seguintes aspectos:

- Compromisso com a transição energética: a Alemanha demonstra um compromisso notável com a transição energética, refletido em sua legislação e metas climáticas ambiciosas. A decisão de encerrar gradualmente a produção de energia nuclear e reduzir o uso de carvão destaca a busca por fontes mais sustentáveis.
- Matriz energética diversificada e ênfase em renováveis: a Alemanha busca uma matriz energética diversificada com uma ênfase particular em renováveis, principalmente eólica e solar.
- Segurança e independência energética: especialmente após o início da guerra entre a Rússia e a Ucrânia, as estratégias alemãs para garantir a segurança e a independência energética sugerem a importância da diversificação de fontes.
- Objetivos do H2: o Plano Nacional do Hidrogênio na Alemanha estabelece metas ambiciosas para a capacidade de eletrólise.
- Desafios na descarbonização: apesar dos avanços, a Alemanha enfrenta desafios na descarbonização, especialmente nos setores de transporte e indústria.
- Impacto econômico e geração de empregos: o setor de H2 na Alemanha apresenta um potencial significativo de impacto econômico e geração de empregos.

- Inovação e colaboração internacional: projetos e parcerias internacionais destacam a importância da inovação e colaboração global.

Considerando esses pontos, o Brasil, com sua abundância de recursos renováveis, pode seguir uma abordagem semelhante para inserir com sucesso o H2V em sua matriz energética:

- Abundância de recursos renováveis: o Brasil, com sua vasta disponibilidade de recursos renováveis, tem uma oportunidade única de liderar a transição para o H2V, utilizando fontes como energia eólica, solar, biomassa e hidroelétrica.
- Diversificação e segurança energética: inspirado na abordagem alemã, o Brasil pode considerar a diversificação de fontes de energia para garantir a segurança e a estabilidade do sistema energético.
- Metas ambiciosas e marco regulatório: estabelecer metas claras para a produção de H2V e desenvolver um marco regulatório robusto são essenciais para orientar o processo de transição.
- Enfrentamento de desafios setoriais: ao planejar a descarbonização, o Brasil deve abordar especificamente desafios nos setores de difícil descarbonização, adaptando estratégias à sua realidade.
- Incentivos econômicos e empregos: o Brasil pode explorar o potencial de impacto econômico e geração de empregos ao investir no desenvolvimento do setor de H2V.
- Colaboração internacional: estratégias de colaboração internacional, como parcerias de pesquisa e intercâmbio de melhores práticas, podem acelerar a implementação eficaz do H2V no Brasil. Em particular, a colaboração internacional entre Brasil e Alemanha.

Com base na experiência da Alemanha com o H2V, sugere-se que o Brasil não apenas adote o H2V, mas também realize um salto significativo, conhecido como "leapfrogging". Essa estratégia busca evitar os desafios enfrentados pela Alemanha, permitindo que o Brasil avance diretamente para soluções já testadas e comprovadas. O objetivo é acelerar o processo de integração do H2V na matriz energética brasileira, adaptando-as de maneira eficaz às suas próprias condições e desafios específicos.

Portanto, é possível identificar diversas áreas nas quais o Brasil poderia impulsionar seu progresso ao se inspirar na experiência alemã, tais como: aproveitar a abundância de recursos renováveis disponíveis, diversificar a matriz energética para garantir segurança energética, inspirar-se nas metas e estratégias da Alemanha para a

introdução do H2V no Brasil, concentrar esforços em setores de difícil descarbonização, incentivar o crescimento da indústria de H2V para impulsionar o desenvolvimento econômico, além de buscar ativamente colaboração internacional para auxiliar no avanço dessa tecnologia.

4.2 ENTREVISTA

Nesta seção, serão apresentados os resultados e discussão das entrevistas com especialistas.

Um total de 6 especialistas foram convidados, e 5 deles aceitaram o convite.

Na entrevista houve a apresentação do entrevistador e a explicação do propósito da entrevista, além de enfatizar a confidencialidade das informações compartilhadas na conversa.

Posteriormente, convidou-se o entrevistado a compartilhar informações sobre si, sua área de estudo e trabalho, quando e como teve seu primeiro contato com o tema H2, e quanto tempo ele se dedicou a esse assunto até então. Isso permitiu uma melhor caracterização dos entrevistados em relação à categoria das perguntas (pesquisador, setor privado ou agente governamental).

Em seguida, apresentaram-se as perguntas predefinidas e, após a conclusão das perguntas, ofereceu-se a oportunidade ao entrevistado para realizar considerações adicionais. Finalmente, encerrou-se a entrevista com agradecimentos ao entrevistado por sua valiosa contribuição para a pesquisa acadêmica.

Observou-se que em cada entrevista, seguiu-se o roteiro descrito na metodologia com eventuais adaptações para manter a fluidez da conversa, e as perguntas foram flexibilizadas de acordo com as demandas individuais de cada entrevistado.

As transcrições das entrevistas estão disponíveis no APÊNDICE A.3. Cabe lembrar que essas transcrições podem não refletir literalmente as frases expressas pelos especialistas, mas buscam capturar a essência das informações na melhor maneira possível.

Conforme mencionado na metodologia, inicialmente aplicou-se um *word frequency counter*, que identificou as palavras mais frequentes nas respostas dos entrevistados. Aquelas que apareceram no mínimo 9 vezes são: "H2", "produção", "Brasil", "setor", "energia", "renovável", "H2V", "descarbonização", "mercado", "desenvolvimento", "países", "indústria", "emissões", "país", "carbono", "energética", "setores", "fontes", "geração", "uso", "amônia", "governo", "projetos", "gás", "veículos", "Paraná", "renováveis", "investimentos", "empresas", "eólica", "natural", "estado", "potencial", "produzir", "capacidade", "combustível", "biomassa", "cadeia", "transporte", "tecnologias", "solar",

Portanto, as 10 palavras que mais se destacaram foram: H2, setores, produção, renováveis, Brasil, energias, países, H2V, descarbonização e indústrias.

Levando em consideração as palavras-chave, seguiu-se para a segunda etapa, que consistiu na minuciosa análise das transcrições das entrevistas. Durante este estágio, identificou-se um conjunto de 30 frases ou tendências de relevância entre os especialistas. Essas frases representam as ocorrências mais frequentes, embora não tenha havido concordância absoluta entre todos os especialistas em todos os aspectos. As frases envolvem assuntos como potencial do H2 no Brasil, fontes renováveis e tecnologias de produção de H2, desafios, oportunidades, diversificação e segurança energética, âmbito internacional e descarbonização, sendo elas:

- Potencial do H2 no Brasil

O H2V tem um grande potencial no Brasil.

Nos últimos anos, o uso de H2 no Brasil cresceu exponencialmente.

O Brasil oferece inúmeras oportunidades na adoção do H2, inclusive no setor privado.

- Fontes Renováveis e Tecnologias de Produção de H2

No início, o H2 era visto apenas como um combustível alternativo, limitando os investimentos em tecnologias do setor de transporte, como células de combustível.

A eletrólise é uma tecnologia promissora, com uma demanda crescente e significativa.

As energias renováveis no Brasil mais frequentemente vinculadas ao H2 de origem renovável incluem a energia eólica, a energia solar, a biomassa e a hidrelétrica.

PCHs que não contam com sistemas de armazenamento muitas vezes possuem capacidade ociosa que pode ser aproveitada na produção de H2.

No Paraná, um estado renomado pela produção de biocombustíveis e dotado de um setor agropecuário extenso, apresenta vastas oportunidades para a produção de H2 a partir da biomassa, também conhecido como H2 musgo. A produção de H2 a partir da biomassa agropecuária permite a fabricação de amônia, que, por sua vez, pode ser utilizada na produção de fertilizantes "verdes", fechando assim um ciclo.

O Nordeste é reconhecido como uma região de produção de H2V a partir de energia solar e eólica.

- Desafios

O desafio crucial é a normalização e a necessidade de estabelecer regulamentações claras para a integração do H2 na matriz energética.

Outro desafio é a viabilidade econômica.

A logística envolvendo o H2 também apresenta desafios significativos.

Estabelecer a conexão entre os dois elos da cadeia do H2, o produtor e o consumidor, também é um desafio. É essencial estabelecer essa definição antes de aplicar incentivos à produção.

- Oportunidades

O setor logístico, que opera com rotas previamente estabelecidas, apresenta um grande potencial para iniciar a adoção do H2.

O setor do H2 apresenta uma oportunidade para atrair empresas e investimentos, impulsionando o crescimento econômico em áreas carentes de infraestrutura. Isso não apenas contribui para o desenvolvimento econômico regional e a expansão de regiões, mas também promove a capacitação da população e a geração de empregos.

É extremamente importante, não apenas exportar a molécula de H2, mas também comercializar produtos derivados dessa molécula, ou seja, produtos que apresentem alto valor agregado. Por exemplo, pode-se mencionar a amônia verde, o fertilizante verde, o aço verde e o cimento verde.

O mercado de gases industriais, como o biogás e o biometano, já está bem estabelecido e oferece oportunidades para expandir-se na produção de H2.

No Brasil, é essencial promover, por meio de políticas públicas, a atração de indústrias para vários estados, incentivando a introdução de novas tecnologias.

- Diversificação e Segurança Energética

É crucial explorar todas as vias de produção de H2 de origem renovável, evitando limitar os investimentos a uma única rota de descarbonização.

Não é recomendável classificar o H2 com base em cores, mas sim com base em sua origem renovável ou na quantidade de emissões de carbono, contribuindo assim para uma regulamentação mais favorável ao desenvolvimento do setor.

É crucial investir na indústria brasileira e aumentar o nível de capacitação dos profissionais.

A inclusão do H2 de origem renovável na matriz energética brasileira requer políticas públicas.

A produção H2 no Brasil reduziria a dependência de importação de amônia.

Um ponto fundamental para a integração bem-sucedida do H2 de origem renovável na matriz energética brasileira é a promoção da segurança energética, alcançada por meio da diversificação das fontes, garantindo assim autonomia na produção de energia e independência energética.

- **Âmbito Internacional**

A Alemanha é mencionada como um exemplo a ser seguido ou como um país com o qual o Brasil pode estabelecer cooperação.

Vários países têm elaborado suas estratégias nacionais para o H2.

As exportações desempenham um papel significativo na abertura inicial do mercado e no impulso do setor, uma vez que o mercado internacional demonstra disposição para investir em larga escala na cadeia de produção de H2 no Brasil. Simultaneamente, também é importante o desenvolvimento do mercado nacional para sustentar a produção a longo prazo.

- **Descarbonização**

A palavra-chave para o H2 de origem renovável é "descarbonização", pois é um vetor energético fundamental nesse processo.

O H2 de origem renovável desempenha um papel de extrema relevância na descarbonização de setores desafiadores, que englobam a indústria pesada, incluindo a siderurgia (aço verde), a fabricação de cimento e a indústria química (envolvendo a produção de amônia verde e fertilizante), bem como os setores de transporte aéreo e marítimo, juntamente com o transporte de veículos de grande porte, além da geração de eletricidade e calor.

O H2 é reconhecido como um combustível sustentável para a aviação.

Com base nas análises que capturam as tendências e perspectivas de especialistas, observa-se que:

- O Brasil apresenta um considerável potencial para a produção de H2, evidenciado pelo crescimento exponencial de seu uso nos últimos anos. O país oferece diversas oportunidades para a adoção do H2, especialmente no setor privado.
- O Brasil, principalmente o Nordeste, destaca-se como um dos países com

maior potencial de geração de energia solar e eólica em todo o mundo. Além disso, possui recursos abundantes de biomassa e hidreletricidade, o que o coloca em uma posição vantajosa para a produção de H2 renovável.

- O Paraná, reconhecido por sua produção de biocombustíveis e extenso setor agropecuário, oferece oportunidades significativas para a produção de H2 a partir da biomassa, conhecido como H2 musgo. Esse processo permite a fabricação de amônia para uso em fertilizantes "verdes", fechando um ciclo sustentável.
- A integração bem-sucedida do H2 na matriz energética demanda superar desafios cruciais, como a normalização regulatória, viabilidade econômica, desafios logísticos e a necessidade de estabelecer uma conexão eficiente entre produtores e consumidores, antes da implementação de incentivos à produção.
- O setor logístico, operando em rotas estabelecidas, destaca-se como uma grande oportunidade para a adoção do H2. A expansão do setor de hidrogênio não só atrai investimentos, impulsionando o crescimento econômico em áreas carentes de infraestrutura, mas também contribui para o desenvolvimento regional, capacitação da população e geração de empregos. Além disso, a comercialização de produtos derivados do H2, como amônia verde, fertilizante verde, aço verde e cimento verde, oferece oportunidades de alto valor agregado. O mercado de gases industriais, como biogás e biometano, já estabelecido, abre espaço para a expansão na produção de H2. No Brasil, políticas públicas que promovam a atração de indústrias e a adoção de novas tecnologias são essenciais para impulsionar o setor.
- A diversificação e segurança energética são fundamentais para o desenvolvimento sustentável e a autonomia do setor energético. Ao explorar todas as vias de produção de H2 de origem renovável, evitando depender exclusivamente de uma única rota de descarbonização, é possível construir uma matriz mais resiliente. A classificação do H2 com base em sua origem renovável ou nas emissões de carbono, em vez de cores, facilita uma regulamentação mais alinhada ao crescimento do setor. O investimento na indústria nacional e na capacitação profissional é crucial para fortalecer a infraestrutura e impulsionar a economia. A inclusão do H2 renovável na matriz energética brasileira requer políticas públicas eficazes. A produção nacional de H2 reduziria a dependência de importações de amônia, promovendo a segurança energética. Além

disso, a diversificação de fontes energéticas garante autonomia na produção de energia, contribuindo para a independência energética do Brasil.

- No âmbito internacional, a Alemanha é destacada como um modelo a ser seguido e um potencial parceiro de cooperação para o Brasil. Diversos países têm formulado estratégias nacionais para o H2, evidenciando um interesse global nesse setor. As exportações desempenham um papel crucial na abertura inicial do mercado brasileiro de H2, sendo observada uma disposição internacional para investir em larga escala na cadeia de produção. Paralelamente, o desenvolvimento do mercado nacional é considerado essencial para sustentar a produção a longo prazo.
- O H2 de origem renovável desempenha um papel central na descarbonização de setores desafiadores, incluindo indústria pesada, transporte aéreo e marítimo, produção de amônia e fertilizantes, bem como na geração de eletricidade. Reconhecido como um combustível sustentável para a aviação, o H2 é fundamental no processo global de descarbonização.

O uso de "hidrogênio de baixa emissão" é cada vez mais importante devido a mudanças na compreensão das emissões ligadas à produção desse elemento, como indicado pelo relatório da IEA (2023c). É crucial considerar essa abordagem mais ampla, que avalia todas as formas de hidrogênio com base na pegada de carbono, em vez de se restringir a categorias convencionais.

Além disso, adotar o conceito de "hidrogênio de baixa emissão" pode impactar regulamentações, certificações e investimentos no mercado de H2. O relatório da IEA (2023c) destaca a importância de estabelecer uma estrutura global para contabilizar emissões, evitando confusões causadas por terminologias de cores ou outros termos menos práticos. Isso pode facilitar a interoperabilidade e evitar a fragmentação do mercado, fortalecendo as cadeias internacionais de abastecimento de H2.

Ao considerar esses pontos fundamentais, torna-se claro que o Brasil está diante de uma transformação energética significativa, evidenciando um potencial notável para liderar a produção mundial de H2 renovável. No entanto, para concretizar essa visão, é crucial superar desafios, promover a diversificação e garantir a segurança energética, além de estabelecer parcerias internacionais. Esses passos não apenas consolidariam o país como protagonista na transição para uma matriz mais sustentável, mas também impulsionariam seu desenvolvimento econômico. Ao aliar essas estratégias à exploração de recursos e ao aproveitamento das oportunidades mencionadas anteriormente, o Brasil contribuiria significativamente para um futuro mais verde e resiliente.

4.3 QUESTIONÁRIO

Nesta seção, apresentam-se os resultados obtidos a partir do questionário aplicado aos especialistas, assim como sua discussão. A análise dos resultados é conduzida em duas etapas: uma análise direta e uma análise mais detalhada.

No total, contatou-se 60 especialistas, dos quais 24 responderam, representando uma taxa de resposta de 40%. Dentre esses, 23 especialistas forneceram suas respostas, o que corresponde a uma taxa de resposta de 38,3% em relação ao total de especialistas contatados. O único respondente que alegou não poder responder era um representante do setor privado que não podia expressar opinião pessoal sobre o assunto.

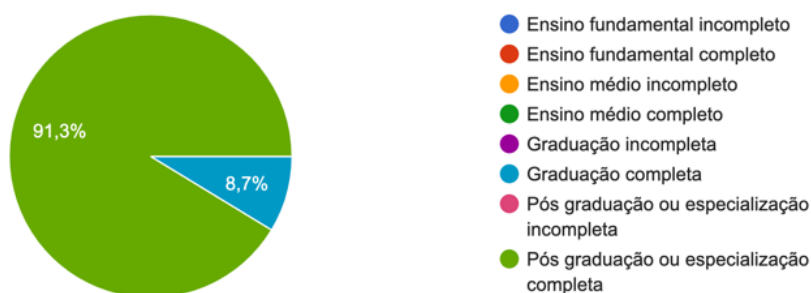
O questionário iniciou com uma série de perguntas destinadas a caracterizar o perfil dos respondentes, com o intuito de verificar a sua expertise e localização geográfica. As perguntas abordaram informações como escolaridade, região de atuação, profissão ou ocupação atual, interesse no tema H2V, e o tempo de seu envolvimento com o H2V, conforme representado nas FIGURAS 36 a 40.

Através da análise do nível de escolaridade dos participantes na FIGURA 36, constata-se que todos demonstram uma qualificação elevada, sendo notável que 91,3% deles possuem pós-graduação ou especialização completa, enquanto os 8,7% restantes têm graduação completa. Esses números evidenciam uma amostra qualificada.

FIGURA 36 – RESULTADO PERGUNTA DE CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA 1

Qual seu nível de escolaridade?

23 respostas

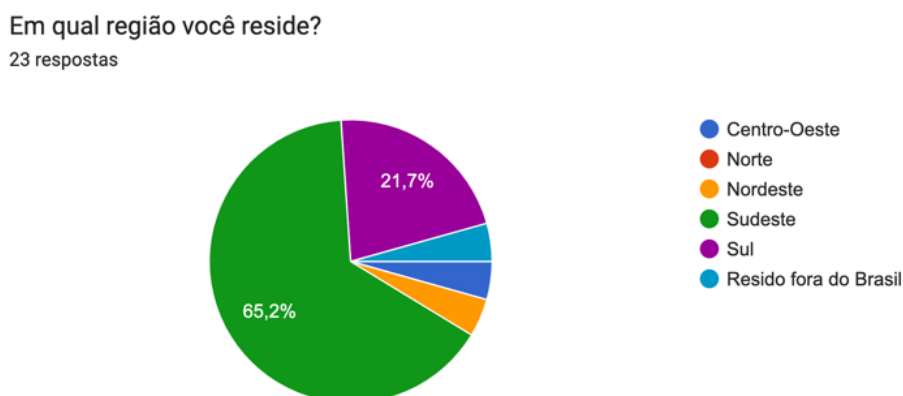


FONTE: O autor (2023).

Com o propósito de delinear a localização geográfica dos especialistas, questionou-se a região de residência no Brasil ou no exterior. Conforme indicado na FIGURA 37, a maioria da amostra reside na região Sudeste, seguida pela região Sul, o que pode potencialmente introduzir um viés na pesquisa. Especificamente, a distribuição geográfica

se desdobra da seguinte forma: 65,2% na região Sudeste, 21,7% na região Sul, com o Centro-Oeste, Nordeste e residentes fora do Brasil representando 4,3% cada, ou seja, um indivíduo em cada uma dessas três últimas categorias.

FIGURA 37 – RESULTADO PERGUNTA DE CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA 2



FONTE: O autor (2023).

Com o intuito de traçar um perfil profissional/ocupacional dos participantes, questionou-se sobre a sua profissão ou ocupação atual. Nesta pergunta, os participantes tiveram a liberdade de indicar sua própria ocupação caso esta não estivesse entre as opções pré-listadas.

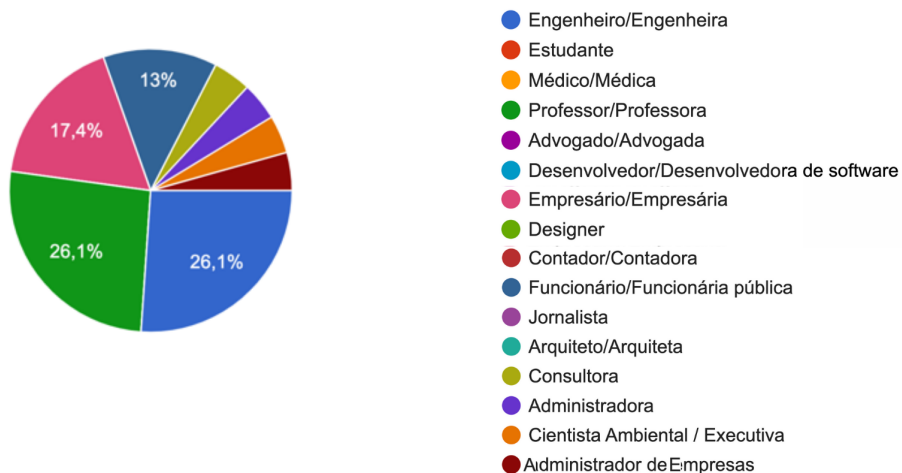
De acordo com a FIGURA 38, observa-se que um pouco mais de um quarto dos participantes são engenheiros ou engenheiras, enquanto outra parcela igual atua como professores ou professoras, seguidos de empresários/empresárias e funcionários/funcionárias públicas. Com base na diversidade de profissões e ocupações dos participantes, a amostra se destaca por sua ampla representatividade em termos de experiência e conhecimento, refletindo um grupo diversificado de especialistas em diferentes áreas.

Especificamente, as ocupações dos participantes se distribuem da seguinte forma: 26,1% engenheiro/engenheira, 26,1% professor/professora, 17,4% empresário/empresária, 13% funcionário/funcionária pública, e, por último, consultor/consultora, administrador/administradora, cientista ambiental/executivo e administrador de empresas, cada um representando 4,3%.

FIGURA 38 – RESULTADO PERGUNTA DE CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA 3

Qual é a sua profissão ou ocupação atual?

23 respostas



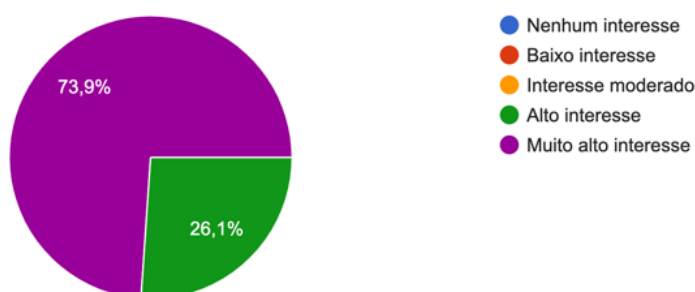
FONTE: O autor (2023).

Formulou-se uma questão com o intuito de que os participantes pudessem avaliar o seu nível de interesse no tópico H2V. Os resultados na FIGURA 39 revelam que todos os respondentes demonstram um nível de interesse muito alto, com 73,9%, ou alto, com 26,1%. Esses resultados estão em conformidade com as expectativas, uma vez que a amostra que optou por responder ao questionário o fez movida pelo seu interesse significativo no assunto. Isso reforça a relevância da pesquisa junto a um público genuinamente engajado com o tema.

FIGURA 39 – RESULTADO PERGUNTA DE CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA 4

Qual seu grau de interesse relacionado ao hidrogênio verde?

23 respostas



FONTE: O autor (2023).

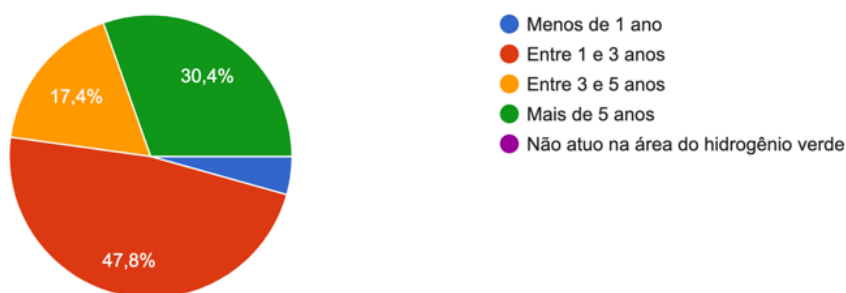
Para concluir a caracterização da amostra, questionou-se o tempo de envolvimento direto ou indireto do especialista com o H2V, conforme a FIGURA 40. Os

resultados revelam que quase metade dos participantes (47,8%) está envolvida com o tema há um período que varia entre 1 e 3 anos. Em seguida, aproximadamente um terço (30,4%) respondeu que está envolvido há mais de cinco anos, indicando uma experiência significativa no assunto. Além disso, 17,4% dos participantes relataram um envolvimento entre 3 e 5 anos, enquanto 4,3% estão envolvidos há menos de um ano.

Esses resultados ilustram que a amostra se divide, com um pouco mais da metade possuindo uma experiência relativamente recente com o tema, enquanto um pouco menos da metade demonstra um conhecimento mais avançado e duradouro. Isso sugere um espectro de conhecimento diversificado dentro do grupo de participantes, o que pode contribuir para uma análise rica e abrangente das respostas ao questionário.

FIGURA 40 – RESULTADO PERGUNTA DE CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA 5

A quanto tempo você está envolvido direta ou indiretamente na área do hidrogênio verde?
23 respostas



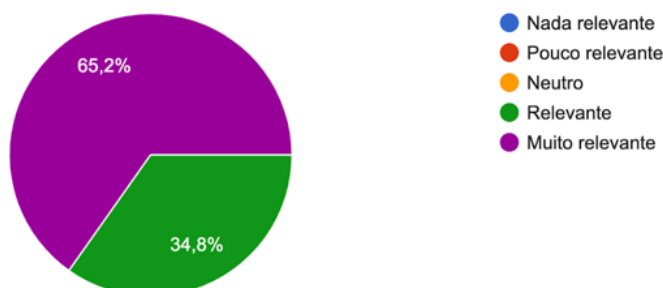
FONTE: O autor (2023).

Após a completa caracterização da amostra, prosseguiu-se com as perguntas específicas relacionadas ao tema, conforme apresentado nas FIGURAS 41 a 49.

A primeira pergunta aborda a importância do H2V na transição energética brasileira. Os resultados, FIGURA 41, revelam que 65,2% dos participantes consideram essa transição como "muito relevante", enquanto 34,8% a veem como "relevante". Esses resultados indicam um consenso notável entre os respondentes quanto à significativa influência do H2V na transição energética do Brasil, o que reforça o seu papel fundamental nesse contexto.

FIGURA 41 – RESULTADO PERGUNTA 1

Como você avalia a relevância do hidrogênio verde na transição energética no Brasil?
23 respostas

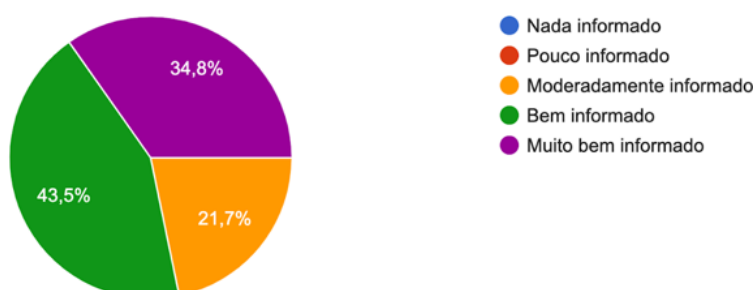


FONTE: O autor (2023).

Com o propósito de permitir que os respondentes avaliem seu grau de conhecimento acerca das tecnologias envolvidas na cadeia de produção, distribuição e armazenamento de H₂V, os resultados apresentados na FIGURA 42 são os seguintes: 43,5% consideram-se bem informados, 34,8% afirmam estar muito bem informados e 21,7% se classificam como moderadamente informados. Isso evidencia que a maioria dos respondentes possui um conhecimento substancial, o que os qualifica para fornecer respostas significativas neste questionário.

FIGURA 42 – RESULTADO PERGUNTA 2

Quão bem informado você se considera sobre as tecnologias na cadeia de produção, distribuição e armazenamento do hidrogênio verde?
23 respostas



FONTE: O autor (2023).

A fim de avaliar o estágio atual de desenvolvimento do H₂V no Brasil, direcionou-se essa questão aos especialistas, conforme apresentado na FIGURA 43. Mais da metade dos respondentes (56,5%) classifica o estágio de desenvolvimento do H₂V

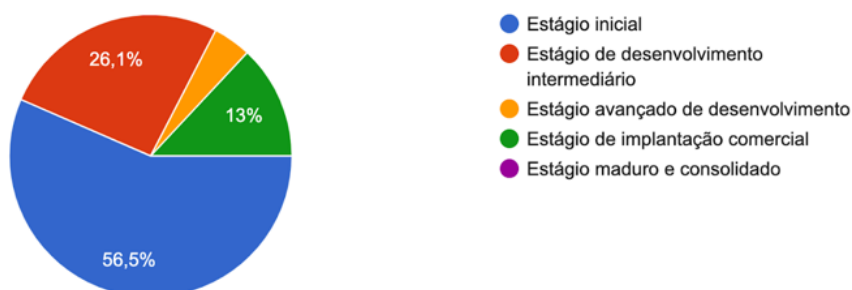
no Brasil como "inicial". Em seguida, 26,1% o consideram em um estágio "intermediário", 13% alegam que está na fase de "implantação inicial", e 4,3% observam que o desenvolvimento está em um estágio "avançado".

Esses resultados sugerem que a maioria dos especialistas reconhece que ainda há um longo caminho a percorrer para que o estágio de desenvolvimento do H2V no Brasil se torne maduro e consolidado. Isso enfatiza a necessidade de esforços contínuos no desenvolvimento dessa tecnologia no país.

FIGURA 43 – RESULTADO PERGUNTA 3

Como você classifica o estágio atual de desenvolvimento do hidrogênio verde no Brasil?

23 respostas



FONTE: O autor (2023).

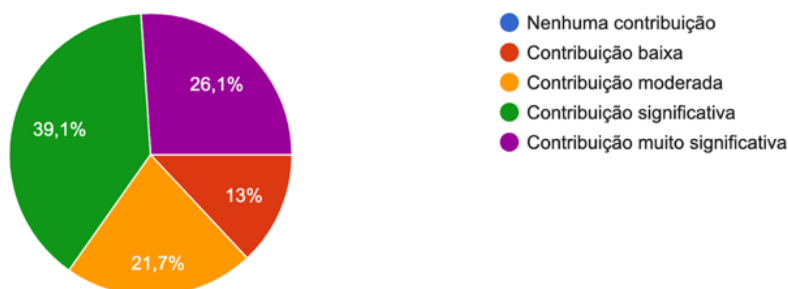
Indagou-se os especialistas sobre a sua percepção em relação à capacidade do H2V de contribuir para a redução das emissões de GEE no país. A FIGURA 44 apresenta os resultados: 39,1% acreditam que essa contribuição é significativa, seguidos por 26,1% que consideram a contribuição como muito significativa. Além disso, 21,7% enxergam a contribuição como moderada, e 13% a veem como baixa.

Ressalta-se que todos os respondentes concordam que o H2V terá alguma influência positiva na redução das emissões de GEE. A maioria deles acredita que essa contribuição será relevante. Isso demonstra um otimismo generalizado entre os especialistas em relação ao potencial do H2V para mitigar as emissões de GEE no país.

FIGURA 44 – RESULTADO PERGUNTA 4

O quanto você acredita que o hidrogênio verde pode contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa no país?

23 respostas



FONTE: O autor (2023).

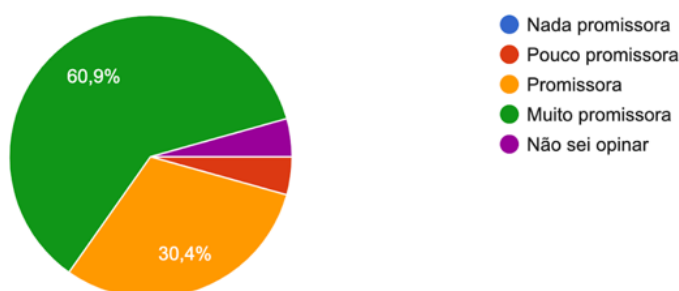
A FIGURA 45 apresenta os resultados da avaliação dos especialistas quanto à promissora perspectiva das tecnologias de produção de H₂V no contexto brasileiro. Três quintos dos especialistas (60,9%) a consideram "muito promissora", enquanto um terço (30,4%) a classificam como "promissora". Apenas 4,3% responderam "pouco promissora" ou "não sei opinar", e nenhum dos participantes a avaliou como "nada promissora".

Portanto, esses resultados demonstram um alto grau de otimismo e confiança dos especialistas nas tecnologias de produção de H₂V no cenário brasileiro, refletindo um amplo consenso sobre o seu potencial promissor.

FIGURA 45 – RESULTADO PERGUNTA 5

Em sua opinião, quão promissoras são as tecnologias de produção de hidrogênio verde no contexto brasileiro?

23 respostas



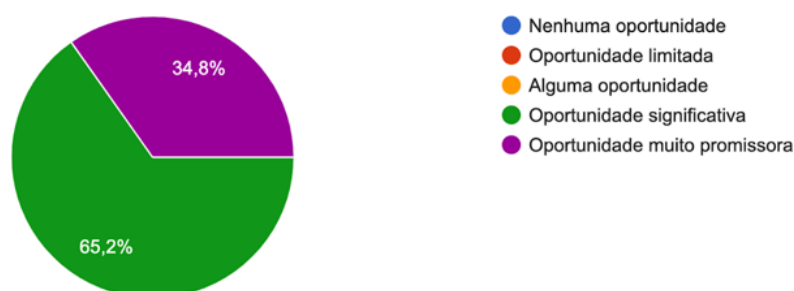
FONTE: O autor (2023).

Com o intuito de avaliar o potencial de crescimento do setor privado com a introdução do H2V no Brasil, questionou-se os especialistas sobre a avaliação das oportunidades de negócios relacionadas ao H2V no setor privado, conforme demonstrado na FIGURA 46. Nota-se um amplo consenso entre os respondentes em relação à considerável oportunidade de negócio. Precisamente, 65,2% responderam que veem uma "oportunidade significativa", enquanto 34,8% a classificaram como "oportunidade muito promissora".

Destaca-se que nenhum dos participantes avaliou a oportunidade como "alguma", "limitada" ou "nenhuma oportunidade". Isso destaca a forte confiança dos especialistas na viabilidade de negócios relacionados ao H2V no setor privado, sugerindo um consenso geral sobre as oportunidades substanciais que essa tecnologia pode trazer para o mercado.

FIGURA 46 – RESULTADO PERGUNTA 6

Como você avalia a oportunidade de negócio do hidrogênio verde no setor privado?
23 respostas



FONTE: O autor (2023).

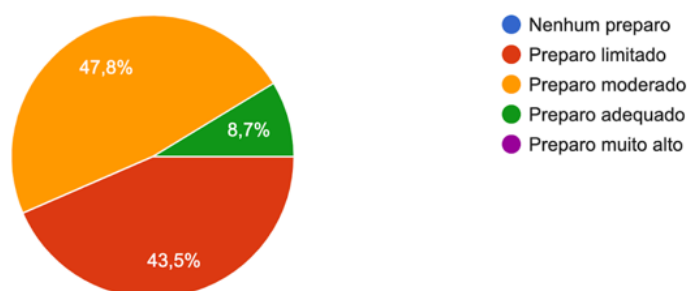
Continuando a análise em relação ao setor privado, a questão se voltou para avaliar o grau de preparo do setor privado para investir no campo do H2V. Cerca de metade dos respondentes (47,8%) indicou que o setor privado possui um "preparo moderado", conforme a FIGURA 47. Além disso, 43,5% consideraram que o setor privado tem um "preparo limitado", e 8,7% responderam que o preparo é "adequado". Nota-se que nenhum dos participantes assinalou "nenhum preparo" ou "preparo muito alto".

Isso sugere um consenso entre os especialistas de que existe algum grau de preparo no setor privado para investir em H2V, embora esse nível de preparo não seja considerado muito alto. Portanto, há espaço para o setor privado expandir seus investimentos neste campo e aproveitar o potencial de crescimento associado a esse negócio.

FIGURA 47 – RESULTADO PERGUNTA 7

O quanto você percebe que o setor privado está preparado para investir no setor de hidrogênio verde?

23 respostas



FONTE: O autor (2023).

Consultaram-se os especialistas quanto à sua avaliação da eficácia das ações ou políticas públicas atualmente em vigor no Brasil relacionadas ao H2V, na hipótese de estarem cientes delas. Observa-se na FIGURA 48 que 43,5% classificaram essas ações como "moderadamente eficazes" ou "pouco eficazes". Adicionalmente, 8,7% as avaliaram como "pouquíssimo eficazes", e 4,3% afirmaram que não têm conhecimento de nenhuma ação ou política pública relacionada ao H2V.

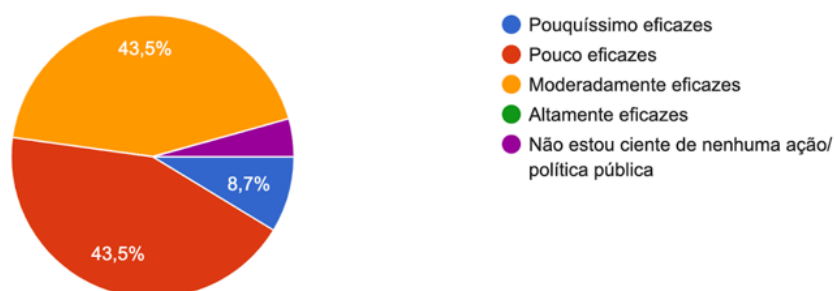
É notável que nenhum dos respondentes considerou essas políticas públicas como "altamente eficazes". Isso sugere uma percepção geral entre os especialistas de que há espaço para melhorias e aprimoramentos nas políticas públicas em relação ao H2V no Brasil, a fim de torná-las mais eficazes e eficientes.

As discrepâncias entre as respostas na FIGURA 45, mostrando otimismo em relação às tecnologias de produção de H2V, e na FIGURA 48, refletindo uma visão crítica das políticas públicas, podem estar ligadas à percepção temporal. Enquanto as expectativas futuras geram entusiasmo, a avaliação das políticas atuais destaca sua eficácia imediata, evidenciando uma lacuna entre potencial percebido e implementação governamental presente.

FIGURA 48 – RESULTADO PERGUNTA 8

Caso você conheça as ações ou políticas públicas atuais no Brasil concernentes ao hidrogênio verde, como você avaliaria a sua eficácia?

23 respostas



FONTE: O autor (2023).

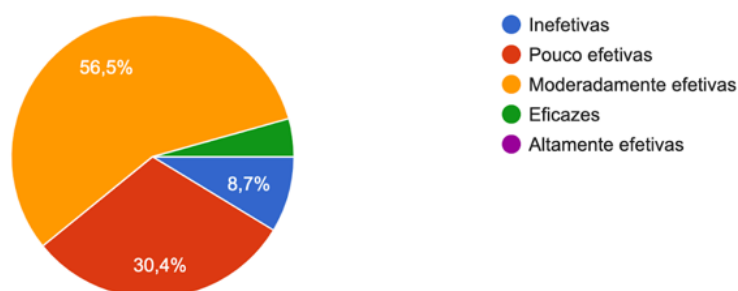
A questão apresentada na FIGURA 49 tinha como objetivo avaliar a efetividade das ações e projetos implementados pelo governo estadual para promover o uso do H2V na matriz energética do Paraná. Entretanto, observou-se uma lacuna nas opções de resposta, uma vez que aqueles que não estavam cientes destas ações no Paraná não tinham uma opção adequada para indicar seu desconhecimento. Presume-se que as pessoas não informadas sobre o assunto tenham optado por "moderadamente efetivas", a resposta intermediária.

Os resultados revelam o seguinte panorama: 56,5% consideraram as ações "moderadamente efetivas", 30,4% as classificaram como "pouco efetivas", 8,7% as perceberam como "inefetivas", e 4,3% as avaliaram como "efetivas". No entanto, destaca-se que, devido ao viés nas respostas causado pela lacuna nas opções, a pergunta pode ser considerada ineficaz para análise. Apesar disso, mesmo considerando que pelo menos 17% dos especialistas são do Paraná, é evidente que nenhum deles considerou as ações como "altamente efetivas".

FIGURA 49 – RESULTADO PERGUNTA 9

Quão efetivas têm sido as ações e projetos implementados pelo governo estadual para fomentar o uso do hidrogênio verde na matriz energética do Paraná?

23 respostas



FONTE: O autor (2023).

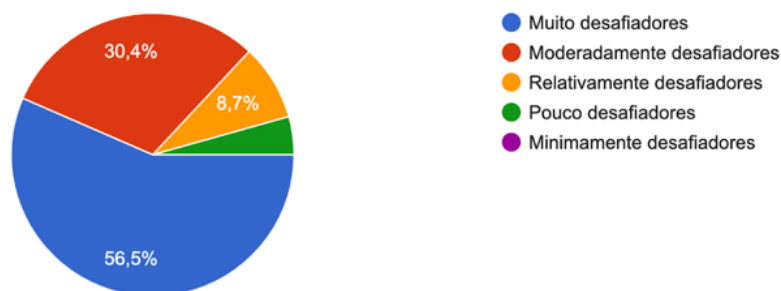
Com o objetivo de avaliar os desafios associados aos aspectos regulatórios e estruturais relacionados à integração do H2V na matriz energética do estado do Paraná, direcionou-se essa questão aos especialistas, como demonstrado na FIGURA 50. No entanto, assim como a pergunta anterior, esta também apresenta uma lacuna nas opções de resposta, uma vez que aqueles que não têm conhecimento do assunto não têm uma alternativa apropriada e precisam selecionar uma das opções disponíveis.

As respostas obtidas são as seguintes: 56,5% consideraram a integração "muito desafiadora", 30,4% a avaliaram como "moderadamente desafiadora", 8,7% a perceberam como "relativamente desafiadora", e 4,3% a classificaram como "pouco desafiadora". Destaca-se que, apesar do viés nas respostas causado pela falta de opção para aqueles que não têm conhecimento, é evidente que ninguém considera a integração "minimamente desafiadora".

FIGURA 50 – RESULTADO PERGUNTA 10

Em sua opinião, quão desafiadores são os aspectos regulatórios ou estruturais relacionados à integração do hidrogênio verde na matriz energética estadual?

23 respostas



FONTE: O autor (2023).

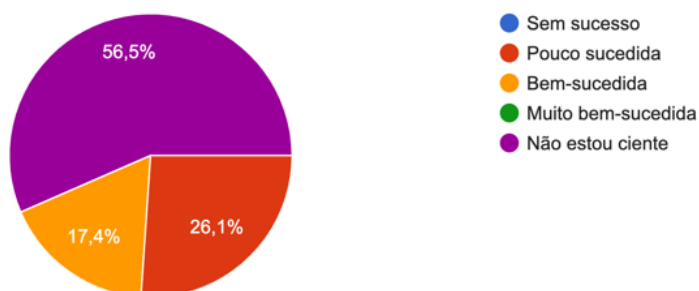
Com o intuito de compreender a dinâmica no estado do Paraná, questionou-se sobre o grau de sucesso da parceria entre o governo estadual e o setor privado na promoção do desenvolvimento do H2V, como evidenciado na FIGURA 51. As respostas revelaram um cenário no qual 56,5% dos especialistas afirmaram que não estão cientes do andamento dessa parceria. Dos que estavam cientes, 26,1% a classificaram como "pouco sucedida", e 17,4% a consideraram "bem-sucedida".

Ao analisar as respostas dos especialistas informados sobre o assunto, fica claro que há um consenso de que o sucesso dessa parceria está em desenvolvimento, uma vez que nenhuma resposta indicou que a parceria é "sem sucesso" ou "muito bem-sucedida". Esses resultados sugerem que melhorias e aprimoramentos na colaboração entre o governo estadual e o setor privado são necessários para impulsionar o desenvolvimento do H2V no Paraná.

FIGURA 51 – RESULTADO PERGUNTA 11

O quão bem-sucedida tem sido a parceria do governo estadual com o setor privado para incentivar o desenvolvimento do hidrogênio verde no Paraná?

23 respostas



FONTE: O autor (2023).

Com o propósito de entender quais políticas públicas são consideradas prioritárias para efetivamente impulsionar a transição para uma economia baseada em H2V, foram apresentadas as seguintes opções: fomento à pesquisa e desenvolvimento (P&D) em tecnologias de H2V; incentivos fiscais e subsídios para a produção de H2V; desenvolvimento de infraestrutura para a produção e distribuição de H2V; regulamentação e normatização do uso do H2V; e a capacitação e treinamento de profissionais especializados. Solicitou-se aos respondentes a selecionar as duas políticas públicas que consideravam prioritárias.

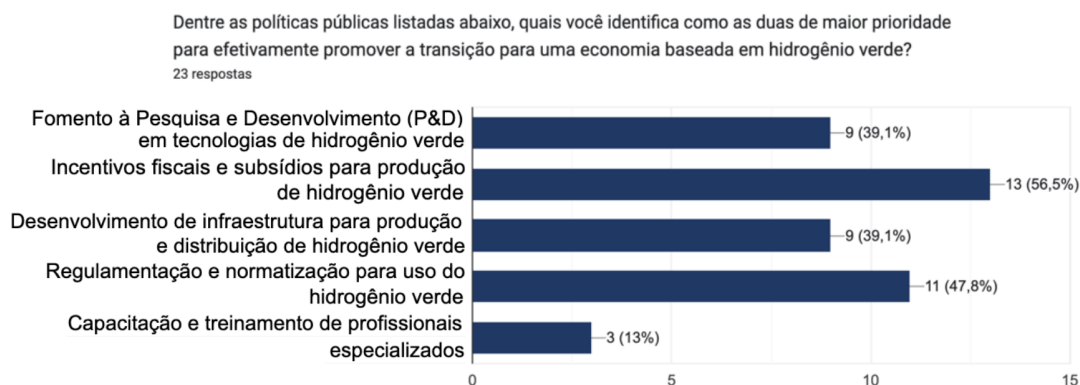
Ao analisar as respostas, FIGURA 52, notou-se que a maioria dos respondentes selecionou duas opções, embora alguns tenham escolhido apenas uma ou até três opções. Portanto, observa-se que as métricas de análise podem variar de acordo com o número de seleções feitas por cada respondente.

Os resultados mostram a seguinte distribuição de escolhas: 13 respostas para incentivos fiscais e subsídios para a produção de H2V, 11 respostas para regulamentação e normatização do uso do H2V, 9 respostas para fomento à pesquisa e desenvolvimento (P&D) em tecnologias de H2V, 9 respostas para desenvolvimento de infraestrutura para produção e distribuição de H2V, e 3 respostas para capacitação e treinamento de profissionais especializados.

Embora haja uma diferença no número de respostas para cada opção, é possível identificar que, entre as políticas públicas listadas, a capacitação e treinamento de profissionais especializados é considerada a menos prioritária pelos respondentes no momento. No entanto, as demais políticas públicas, como incentivos fiscais, regulamentação, fomento à pesquisa e desenvolvimento, e desenvolvimento de infraestrutura, receberam uma quantidade significativa de votos, indicando que são áreas de maior

interesse e prioridade na promoção da transição para uma economia baseada em H2V.

FIGURA 52 – RESULTADO PERGUNTA 12



FONTE: O autor (2023).

Em síntese, os resultados das perguntas de caracterização da amostra e as questões específicas sobre o H2V são os seguintes:

- Qualificação: elevado nível de escolaridade - a maioria possui pós-graduação ou especialização completa.
- Distribuição geográfica: concentração de especialistas da região Sudeste.
- Perfil profissional: participação diversificada em termos de profissões e ocupações, refletindo um grupo de especialistas com experiências variadas.
- Interesse no H2V: em sua maioria possuem muito alto interesse no tema.
- Tempo de experiência com o H2V: entre 1 a 3 anos ou superior a 5 anos.
- Relevância na transição energética: consenso entre os especialistas sobre a importância do H2V na transição energética brasileira.
- Nível de informação dos especialistas sobre as tecnologias relacionadas ao H2V: a maioria se considera bem ou muito bem informada.
- Estágio de desenvolvimento do H2V no Brasil: a percepção majoritária é de que o estágio ainda é inicial.
- Contribuição na redução das emissões de GEE: todos concordam com a contribuição positiva, a maioria considera a contribuição significativa.

- Perspectiva e oportunidades das tecnologias de produção de H2V: a maioria considera como muito promissora.
- Oportunidades de negócios no setor privado associada ao H2V: consenso sobre a considerável oportunidade de negócio.
- Preparo do setor privado para investir: percepção mista, com um nível moderado e limitado de preparo, há espaço para mais investimentos.
- Efetividade das políticas públicas: opiniões divididas entre políticas moderadamente eficazes ou pouco eficazes, indicando espaço para melhorias.
- Avaliação da efetividade das atuais políticas públicas do Paraná sobre H2V: a maioria avalia como moderadamente efetivas, seguido de pouco efetivas, indicando a necessidade de aprimoramento.
- Desafios dos aspectos regulatórios com a integração do H2V no Paraná: há um consenso entre os especialistas de que existem desafios.
- Sucesso da parceria governo-setor privado no Paraná: falta de conhecimento sobre a parceria em desenvolvimento, mas dos informados, a maioria considera pouco sucedida ou bem-sucedida.
- Prioridades para impulsionar a transição para economia baseada em H2V: incentivos fiscais e subsídios para produção de H2V e regulamentação e normatização do uso do H2V são as principais prioridades indicadas pelos especialistas.

Os resultados revelam uma amostra altamente qualificada e um consenso sobre a relevância do H2V na transição energética, além de apontem desafios e necessidade de aprimoramento das políticas existentes.

Em seguida, apresentaram-se três perguntas abertas aos especialistas, com o intuito de permitir a expressão de diversas perspectivas e evitar a limitação a ideias preestabelecidas. A participação nessas perguntas era opcional. As respostas estão disponíveis no APÊNDICE B.4 e não foram editadas em relação ao seu conteúdo.

A primeira indagação da seção de perguntas abertas era: "Quais são os principais benefícios que você enxerga na adoção do hidrogênio verde em comparação com outras fontes de energia?" Obtiveram-se 23 respostas.

As respostas apresentadas pelos especialistas destacam diversos benefícios associados à adoção do H2V em comparação com outras fontes de energia. Observou-se que o H2V é percebido como uma alternativa promissora para abordar desafios ambientais e econômicos. Alguns pontos notáveis incluem:

- **Versatilidade e Aplicabilidade em Setores Desafiadores:** muitos respondentes enfatizam a versatilidade do H2V e seu potencial para ser aplicado em setores "*hard-to-abate*", ou seja, setores industriais de difícil descarbonização, como siderurgia e navegação. Essa versatilidade o torna atraente para a descarbonização de setores que não podem ser eletrificados de forma eficaz.
- **Descarbonização e Baixas Emissões de Carbono:** o H2V é percebido como uma fonte de energia com baixas ou nulas emissões de CO2 quando usado. Isso é essencial para a descarbonização de setores que contribuem significativamente para as emissões de GEE.
- **Alta Densidade Energética:** a alta densidade energética do H2V o torna uma fonte eficiente de energia, adequada para várias aplicações, incluindo armazenamento de energia.
- **Potencial de Geração de Empregos e Desenvolvimento Econômico:** muitos especialistas destacam o potencial de criação de empregos e oportunidades econômicas relacionadas à produção, distribuição e uso do H2V. Isso pode ser particularmente significativo para regiões carentes de desenvolvimento econômico.
- **Contribuição para a Descarbonização Global:** o H2V é visto como uma parte crucial da transição para uma economia de baixo carbono e desempenha um papel importante na redução das emissões de CO2 em setores-chave, como petroquímica, siderurgia e cimento.
- **Armazenamento de Energia:** o H2V também é apontado como uma solução para o armazenamento de energia proveniente de fontes intermitentes, como energia eólica e solar, ajudando a garantir um fornecimento contínuo de energia.
- **Potencial de Despoluição Urbana:** a implementação do H2V pode contribuir para a despoluição de grandes centros urbanos, reduzindo a emissão de poluentes atmosféricos.
- **Possibilidades de Exportação:** alguns especialistas mencionam a capacidade de exportação do H2V como uma oportunidade econômica, visto que o Brasil possui condições favoráveis para a produção em larga escala.

No entanto, também nota-se que um dos especialistas apontou a preferência pelo termo "hidrogênio de baixa emissão de carbono" em vez de "hidrogênio verde", destacando a importância de uma comunicação clara e coerente em nível internacional.

As respostas refletem um amplo consenso sobre os benefícios do H2V, incluindo sua capacidade de atender a desafios de descarbonização, diversificação da matriz energética e desenvolvimento socioeconômico. Essas perspectivas positivas sugerem o potencial do H2V como uma solução valiosa na transição para uma economia mais sustentável e com menores emissões de carbono.

Na segunda questão, indagou-se: "Quais, na sua opinião, representam os principais obstáculos que devem ser superados para promover uma adoção mais ampla do hidrogênio verde no Brasil?" Obtiveram-se 23 respostas.

As respostas obtidas na pergunta refletem uma série de desafios cruciais. Entre as principais observações estão:

- **Visão Compartilhada:** muitos especialistas destacam a necessidade de desenvolver uma visão clara dos benefícios a curto, médio e longo prazo do H2V compartilhada pela indústria e pela sociedade. Essa visão clara é vista como chave para identificar os desafios de políticas públicas, regulatórios e econômicos que precisam ser superados;
- **Definição de Subsídios e Incentivos:** a definição de subsídios e incentivos fiscais e financeiros é uma questão relevante para viabilizar a adoção do H2V. A falta de incentivos como aqueles disponíveis nos EUA e Europa é apontada como um desafio;
- **Regulamentação e Normatização:** avanços na regulamentação são fundamentais, e a necessidade de aprovar um marco regulatório que garanta segurança jurídica para os processos da cadeia do H2 é destacada;
- **Infraestrutura:** a infraestrutura para produção, transporte e distribuição de H2 é vista como essencial, juntamente com o desenvolvimento de polos energéticos para estimular todas as demais cadeias envolvidas.
- **Custo de Produção e Comercialização:** a redução do custo de produção e comercialização do H2V é fundamental para torná-lo competitivo, permitindo seu uso em todos os fins;
- **Matriz Energética Renovável:** a transição para uma matriz energética renovável é apontada como crucial, garantindo um excedente de energia renovável que possa ser utilizado para a produção de H2V;
- **Pesquisa e Desenvolvimento:** Investimentos em P&D são necessários para desenvolver a indústria nacional na produção de equipamentos de H2, novas tecnologias e soluções;

- Educação e Divulgação: a divulgação de informações sobre o H2V, desde o básico até aspectos mais avançados, para a população é vista como relevante.

Essas respostas destacam a complexidade da adoção do H2V no Brasil, que requer uma abordagem abrangente envolvendo políticas públicas, regulamentação, investimento em infraestrutura e pesquisa, além de esforços de conscientização e educação. A superação desses obstáculos é crucial para o desenvolvimento sustentável dessa energia no país.

A terceira pergunta, direcionada ao estado do Paraná, questionou: "Caso saiba de alguma ação pública bem-sucedida relacionada ao hidrogênio verde, que possa ser aplicada no Paraná, por favor, cite-a". Obtiveram-se 14 respostas. Os pontos principais são comentados a seguir.

Observa-se que embora a pergunta se refira ao H2V, alguns respondentes também mencionaram perspectivas alinhadas com os recursos do Paraná, incluindo a biomassa. Essa inclusão pode refletir um entendimento mais amplo das oportunidades de produção de H2 renovável, neste caso o H2 musgo.

Além disso, enfatizou-se a importância de incentivos fiscais, como a isenção de ICMS na energia para a produção de H2V e o diferimento de ICMS na compra de energia elétrica renovável. Essas medidas podem criar um ambiente mais favorável para o desenvolvimento da indústria de H2 renovável no Paraná.

A criação de zonas de processamento de exportação (ZPEs) e a definição de políticas de fomento para o desenvolvimento de "hubs" e "valleys" de H2 foram mencionadas como estratégias para atrair investimentos e impulsionar a produção de H2V no estado.

Destaca-se também a importância da regulamentação e do planejamento estratégico, como o desenvolvimento do Plano Nacional do Hidrogênio (PNH2) e a regulamentação da Lei nº 21.454 em nível estadual. Mencionou-se a cooperação entre o governo, a academia e o setor privado como um fator crucial para o sucesso na promoção do H2V.

Além disso, a referência à matriz energética do Paraná, com sua produção de energia hidrelétrica e biomassa, destaca o potencial do estado para se destacar na produção de hidrogênio renovável.

Por fim, a resposta que menciona o edital de P&D em hidrogênio verde de biomassa pela COPEL ressalta a diversidade de abordagens possíveis, com um especialista expressando a preferência por estratégias que se concentrem na produção de hidrogênio a partir de fontes renováveis intermitentes, como energia eólica e solar,

para apoiar o setor elétrico.

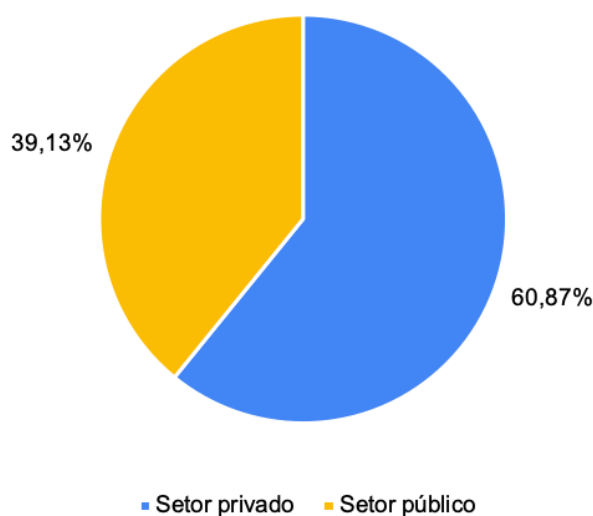
Essas respostas oferecem uma visão ampla das oportunidades e desafios relacionados ao H2 renovável no Paraná e fornecem *insights* valiosos para o desenvolvimento de políticas e estratégias futuras no estado.

A segunda etapa da análise envolveu uma investigação mais aprofundada das respostas.

Nessa etapa as respostas às perguntas "Quão efetivas têm sido as ações e projetos implementados pelo governo estadual para fomentar o uso do hidrogênio verde na matriz energética do Paraná?" e "Em sua opinião, quão desafiadores são os aspectos regulatórios ou estruturais relacionados à integração do hidrogênio verde na matriz energética estadual?" não foram consideradas. Isso se deve ao fato de que, como mencionado anteriormente, observou-se uma lacuna nas opções de resposta. Nesse cenário, não havia uma alternativa adequada para aqueles que não possuíam conhecimento sobre o assunto, o que resultou em respostas imprecisas e tornou essas perguntas ineficazes.

Primeiro, segmentou-se os entrevistados em dois grupos, denominados "setor privado" e "setor público", com base na atual profissão/ocupação do respondente. Classificaram-se como "setor privado" aqueles que indicaram ocupações como empresário/empresária, consultor/consultora, administrador/administradora, cientista ambiental/executivo(a), engenheiro/engenheira, ou administrador(a) de empresas. Por outro lado, aqueles que se identificaram como funcionário/funcionária pública ou professor/professora foram categorizados como pertencentes ao "setor público". Ressalta-se que todos os respondentes que se identificaram como professores/professoras, conforme verificado, desempenham suas funções em universidades federais do país e, portanto, categorizados como funcionários públicos. Nesse contexto, obteve-se 60,9% respondentes do setor privado e 39,1% do setor público, conforme a FIGURA 53.

FIGURA 53 – CATEGORIZAÇÃO DA AMOSTRA



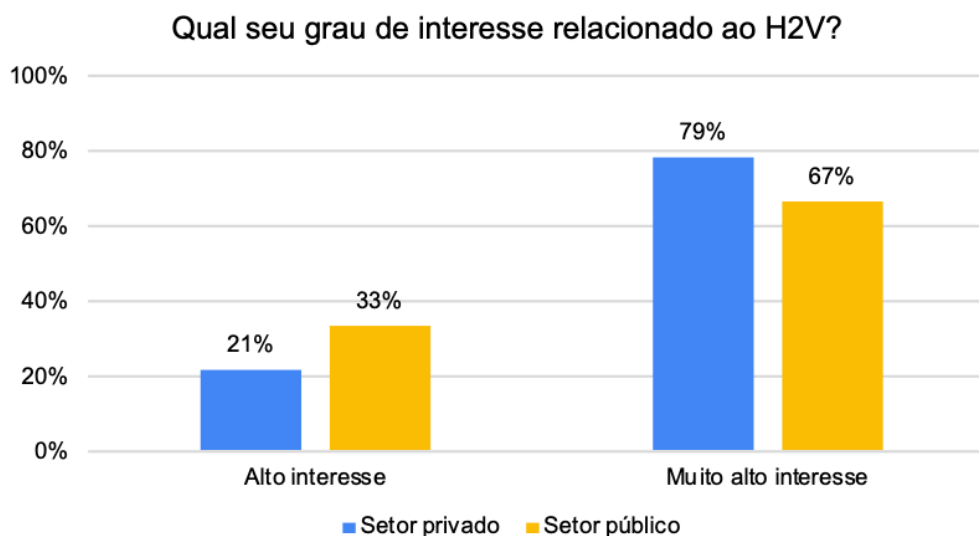
FONTE: O autor (2023).

Posteriormente, realizou-se a filtragem das colunas na planilha contendo as respostas, o que permitiu a obtenção de perspectivas mais específicas de cada uma das categorias. No entanto, ressalta-se que essas conclusões são baseadas em dados obtidos em uma amostra limitada e podem não refletir completamente a opinião geral.

Para comparar as perspectivas dos especialistas de cada setor, público e privado, as FIGURAS 54 a 64 apresentam gráficos com porcentagens calculadas em relação ao número de respondentes de cada setor.

Conforme a FIGURA 54, o H2V é uma tecnologia com grande interesse, tanto no setor privado quanto no público. No setor privado, 79% dos entrevistados têm interesse muito alto, enquanto no setor público, 67% têm interesse muito alto. Isso ocorre porque o H2V tem potencial de negócio e pode contribuir para a transição energética.

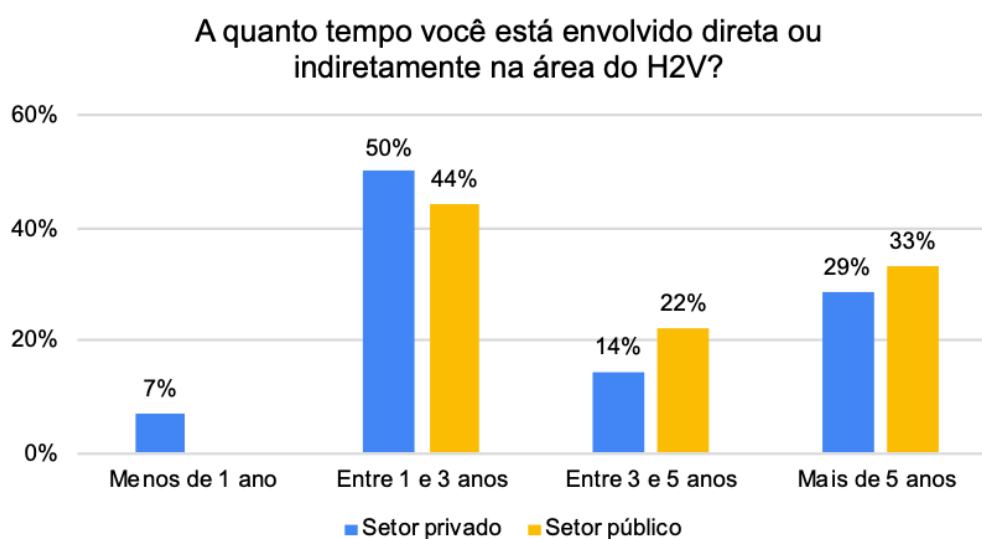
FIGURA 54 – ANÁLISE PERGUNTA 4 DE CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA



FONTE: O autor (2023).

A FIGURA 55 analisa o período de envolvimento de especialistas com a área do H2V. A faixa temporal mais comum é "Entre 1 e 3 anos", sugerindo um recente aumento no interesse e engajamento de organizações e indivíduos nesse domínio. Além disso, a categoria "Mais de 5 anos" denota a presença de experiência de longo prazo, tanto no setor privado quanto no setor público. Estes dados destacam oportunidades para colaboração entre setores e sublinham o crescimento constante e o potencial de desenvolvimento no âmbito do H2V.

FIGURA 55 – ANÁLISE PERGUNTA 5 DE CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA

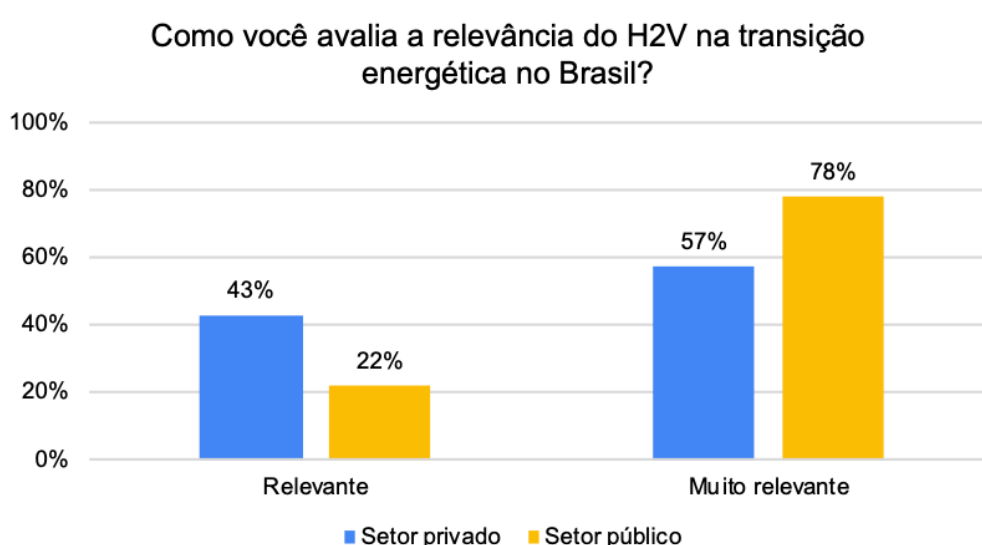


FONTE: O autor (2023).

A FIGURA 56 evidencia que o setor privado e o setor público têm avaliações

bastante diferentes sobre a relevância do H2V na transição energética no Brasil. O setor privado considera o hidrogênio verde como relevante, mas não como muito relevante. Já o setor público considera o hidrogênio verde como muito relevante. O setor privado está mais focado nos aspectos econômicos da transição energética. O hidrogênio verde ainda é uma tecnologia relativamente nova e cara, o que pode dificultar seu desenvolvimento no setor privado; o setor público está mais focado nos aspectos ambientais da transição energética. O hidrogênio verde é uma fonte de energia limpa e renovável, o que o torna uma opção atraente para o setor público.

FIGURA 56 – ANÁLISE PERGUNTA 1

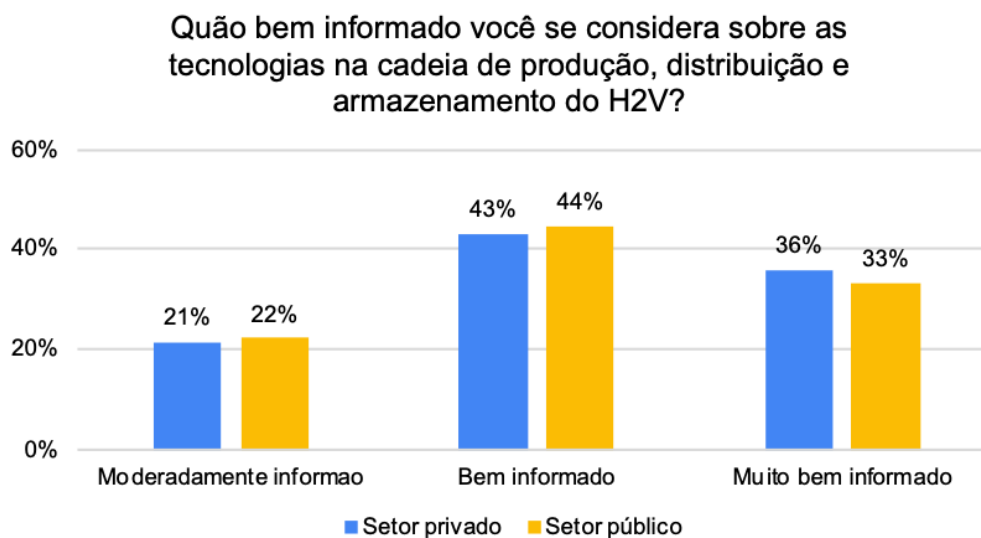


FONTE: O autor (2023).

O conhecimento acerca das tecnologias na cadeia de produção, distribuição e armazenamento do H2V é relativamente alto, tanto no setor privado quanto no público, conforme a FIGURA 57. No setor privado, 79% das pessoas se consideram bem informadas ou muito bem informadas, enquanto no setor público, esse percentual é de 77%.

A proximidade dos valores entre os setores privado e público sugere uma disseminação equitativa da informação sobre o H2V, apontando para um cenário promissor para essa tecnologia.

FIGURA 57 – ANÁLISE PERGUNTA 2

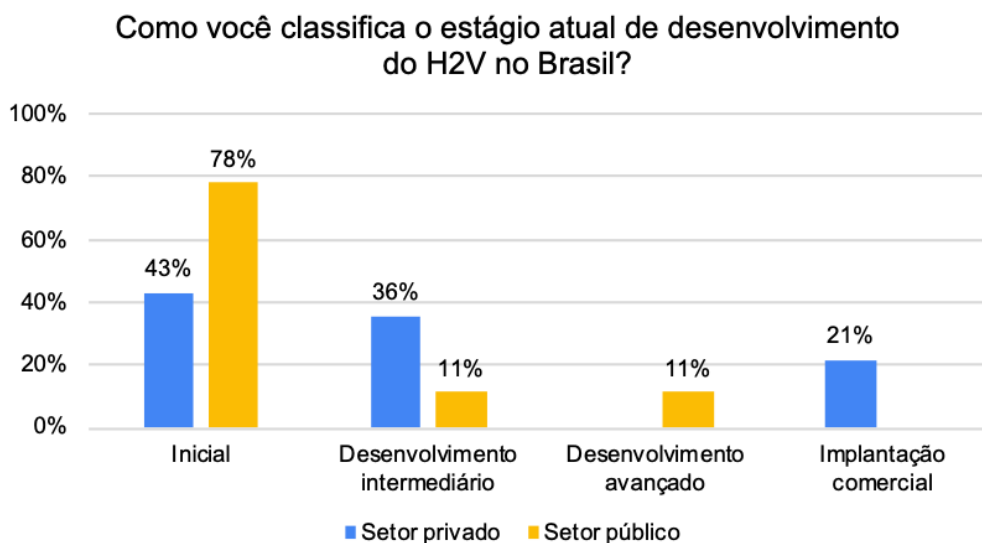


FONTE: O autor (2023).

A análise da FIGURA 58 revela que o estágio atual de desenvolvimento do H2V no Brasil, tanto na visão do setor privado quanto na do público, está em uma fase inicial. Esse cenário está associado a diversos fatores, tais como o elevado custo e investimento na produção de H2V, ainda superior ao do H2 derivado de combustíveis fósseis; a necessidade de investimentos em infraestrutura, incluindo redes de distribuição e estações de reabastecimento; e a ausência de uma regulamentação específica para o setor.

No entanto, é válido ressaltar que já estão em andamento iniciativas voltadas para a implementação comercial, indicando um progresso significativo nesse panorama.

FIGURA 58 – ANÁLISE PERGUNTA 3

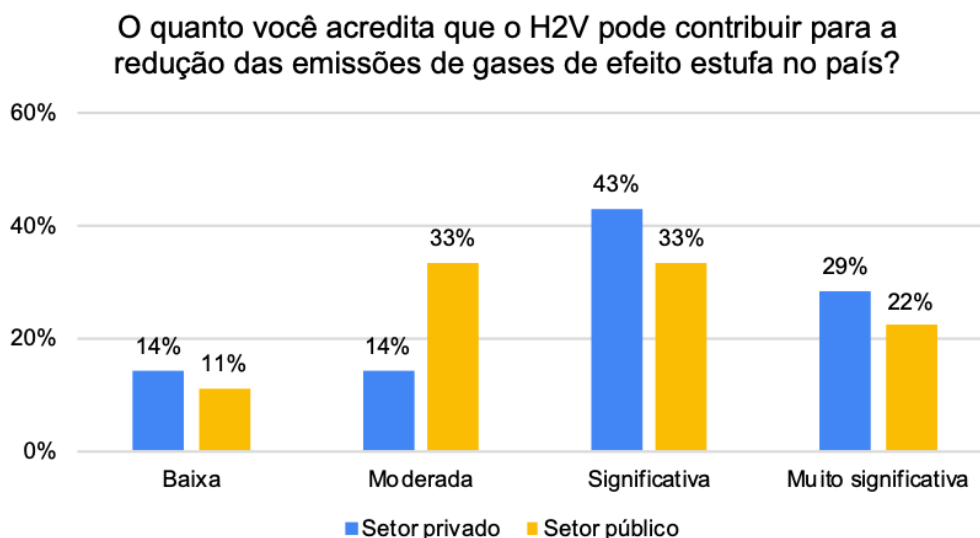


FONTE: O autor (2023).

A maioria dos entrevistados acredita que o H2V pode contribuir de forma significativa ou muito significativa para a redução das emissões de gases de efeito estufa no país, conforme a FIGURA 59. No setor privado, 43% dos entrevistados acreditam que a contribuição será significativa e 29% acreditam que será muito significativa. No setor público, os números são um pouco menores, com 33% acreditando em uma contribuição significativa e 22% acreditando em uma contribuição muito significativa.

É promissor notar que a maioria dos entrevistados reconhece o potencial do H2V como uma solução eficaz na redução das emissões. Essa percepção positiva indica não apenas uma demanda consolidada por essa tecnologia, mas também destaca sua importância como uma ferramenta fundamental na transição energética nacional.

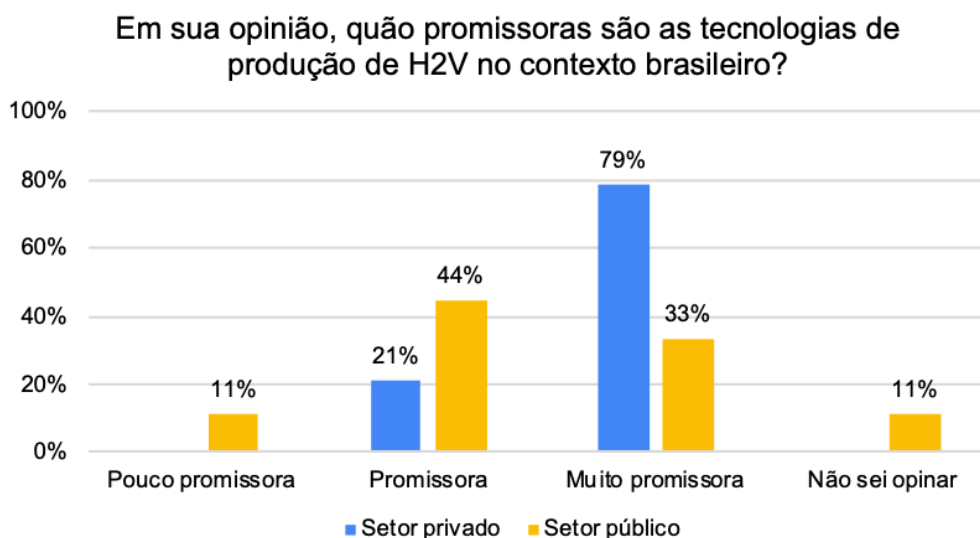
FIGURA 59 – ANÁLISE PERGUNTA 4



FONTE: O autor (2023).

O gráfico apresentado na FIGURA 60 indica que as tecnologias de produção de H2V têm grande potencial no cenário brasileiro, tanto no âmbito privado quanto no público. No setor privado, notavelmente, 79% dos respondentes consideram essas tecnologias altamente promissoras, enquanto apenas 21% as classificam como promissoras. Já no setor público, com 44% consideraram promissora e 33% como muito promissoras. Estes resultados refletem um consenso generalizado sobre o potencial das tecnologias de produção de H2V no país.

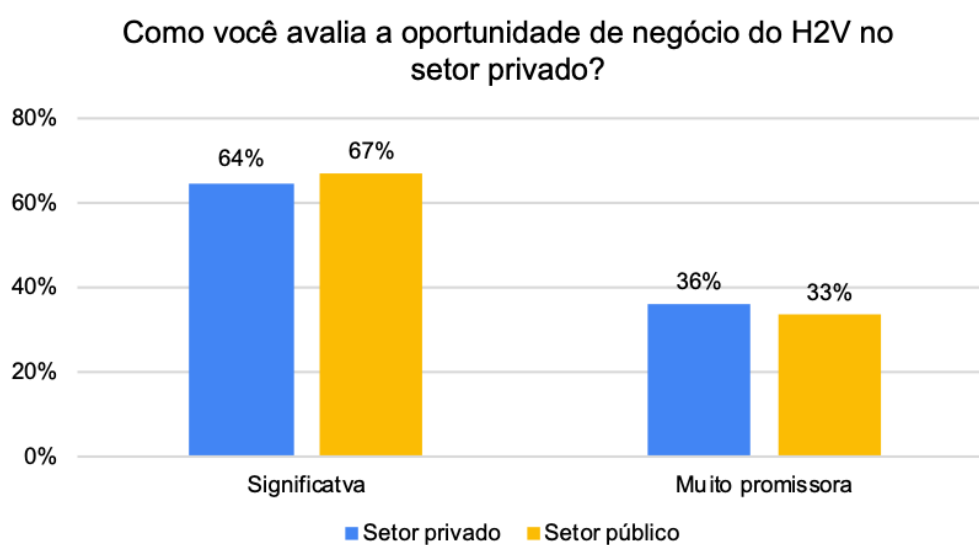
FIGURA 60 – ANÁLISE PERGUNTA 5



FONTE: O autor (2023).

Por meio do gráfico representado na FIGURA 61, observa-se que tanto o setor privado quanto o setor público percebem de maneira positiva a oportunidade de negócios associada ao H2V. No âmbito privado, 64% dos participantes consideram a oportunidade como significativa, enquanto 36% a veem como muito promissora. Paralelamente, no setor público, observa-se uma tendência semelhante, com 67% dos respondentes avaliando a oportunidade como significativa e 33% como muito promissora. A convergência de opiniões entre esses setores sugere um interesse crescente no desenvolvimento do H2V.

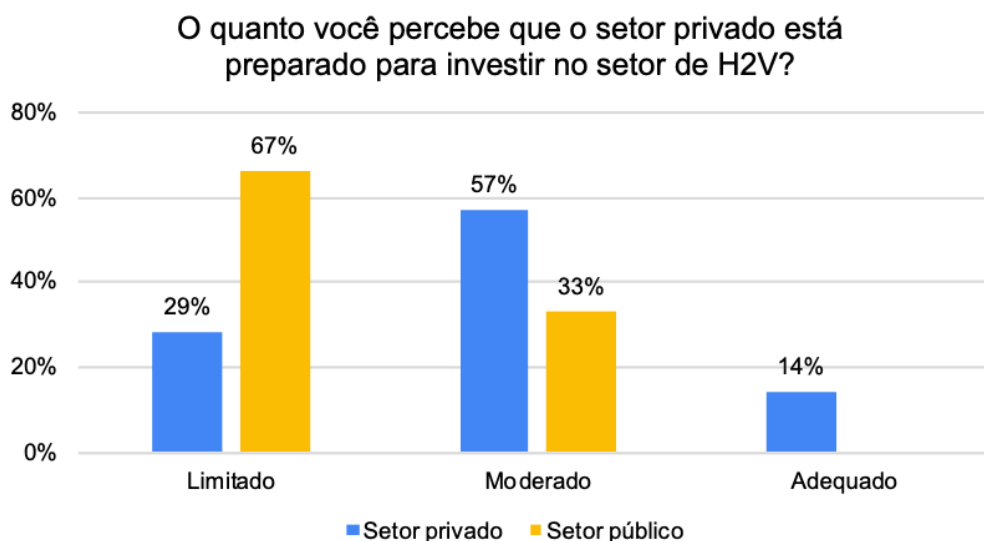
FIGURA 61 – ANÁLISE PERGUNTA 6



FONTE: O autor (2023).

O setor privado e o setor público têm percepções diferentes sobre o preparo do setor privado para investir no H2V, conforme a FIGURA 62. O setor privado considera que está moderadamente preparado, enquanto o setor público considera que o setor privado está limitado. Isso pode estar vinculado a diversos fatores como diferenças nas estratégias de investimento, prioridades de desenvolvimento, e avaliações de riscos. De qualquer forma, é evidente que o setor privado ainda enfrenta um considerável desafio ao se preparar para investir no setor de H2V.

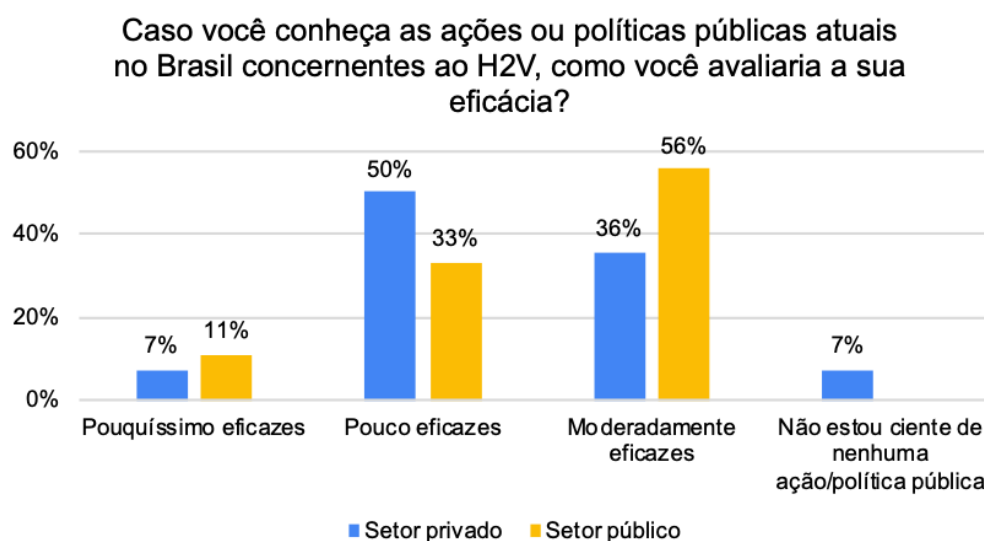
FIGURA 62 – ANÁLISE PERGUNTA 7



FONTE: O autor (2023).

A maioria dos entrevistados avaliou as ações como moderadamente eficazes, indicando a existência de oportunidades para aprimoramentos. A diferença nas avaliações entre os setores pode ser atribuída a diferentes expectativas. O setor privado busca direcionamento das ações públicas para a atração de investimentos, desenvolvimento tecnológico e infraestrutura, enquanto o setor público pode priorizar aspectos como P&D. Em geral, o setor privado tende a considerar as ações como pouco eficazes, enquanto o setor público as percebe como moderadamente eficazes, conforme ilustrado na FIGURA 63.

FIGURA 63 – ANÁLISE PERGUNTA 8

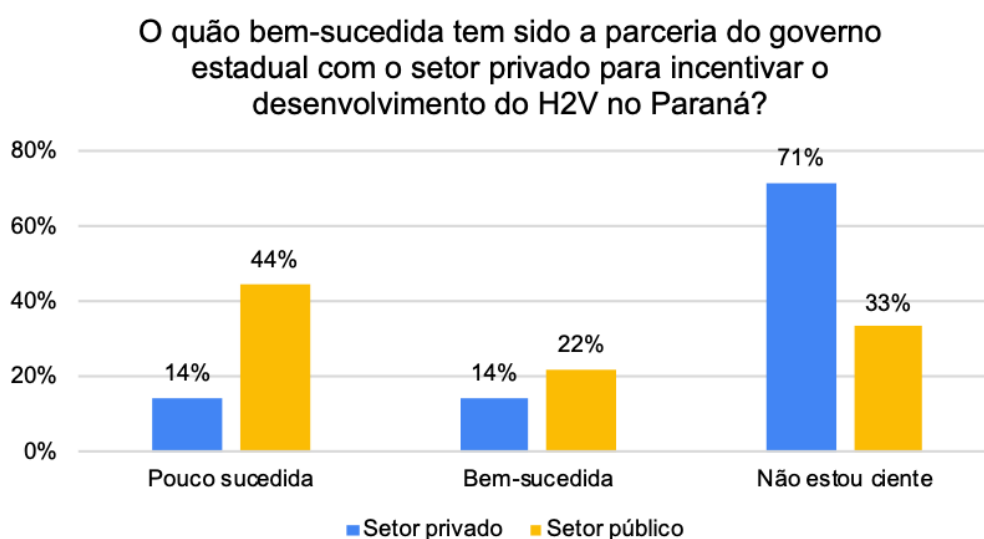


FONTE: O autor (2023).

A FIGURA 64 apresenta as percepções do setor privado e do setor público sobre a eficácia da parceria entre o governo estadual e as empresas privadas para impulsionar o desenvolvimento do H2V no Paraná. Observa-se que vários respondentes não estão cientes dessa colaboração, possivelmente devido à falta de contato específico com o contexto do estado do Paraná.

No entanto, entre os especialistas familiarizados com as parcerias entre o governo e o setor privado no Paraná, o setor privado apresenta uma divisão de opiniões entre considerar a parceria pouco sucedida e bem-sucedida. Por outro lado, a maioria do setor público acredita que a parceria é pouco bem-sucedida. Essas divergências podem ser atribuídas a diferentes perspectivas em relação aos objetivos, prioridades e resultados percebidos da parceria. Enquanto o setor privado pode avaliar o sucesso com base em indicadores financeiros, inovação e crescimento empresarial, o setor público pode priorizar critérios como benefícios sociais, sustentabilidade ambiental ou avanços tecnológicos que contribuam para o desenvolvimento de uma região.

FIGURA 64 – ANÁLISE PERGUNTA 11



FONTE: O autor (2023).

A análise minuciosa dos setores público e privado revela a complexa dinâmica envolvida no desenvolvimento do H2V no Brasil, conforme:

Portanto, o setor privado brasileiro tem um interesse elevado no H2V, tanto por seu potencial de negócio quanto por sua contribuição para a transição energética. No entanto, o setor ainda enfrenta desafios, como o elevado custo de produção e a necessidade de investimentos em infraestrutura.

Apesar desses desafios, o setor privado tem um papel fundamental a desempenhar

no desenvolvimento do H2V no Brasil. As empresas privadas são responsáveis pelo investimento e pela implementação de tecnologias, bem como pela criação de novos mercados e oportunidades de negócios.

O setor público brasileiro também tem um interesse elevado no H2V, principalmente por sua contribuição para a redução das emissões de gases de efeito estufa. O setor público tem um papel importante a desempenhar no apoio ao desenvolvimento do H2V, por meio de políticas públicas, investimentos e regulamentação.

As políticas públicas podem ajudar a criar um ambiente favorável ao desenvolvimento do H2V, por meio de incentivos fiscais, subsídios e apoio à pesquisa e desenvolvimento. Os investimentos públicos podem contribuir para a infraestrutura necessária para o desenvolvimento do H2V, como redes de distribuição e estações de reabastecimento. A regulamentação pode ajudar a garantir a segurança e a eficiência do uso do H2V.

Portanto, a colaboração entre os setores público e privado se mostra essencial para catalisar o potencial do H2V no país, estabelecendo bases sólidas para um futuro energético mais sustentável e próspero.

4.4 SÍNTESE DOS RESULTADOS

O H2V desempenha um papel importante na transição energética do Brasil, servindo como um vetor energético versátil e fundamental para descarbonizar setores de difícil descarbonização. Esse contexto é respaldado pela vasta disponibilidade de recursos renováveis no país, como energia eólica, solar, biomassa e hidroelétrica.

No contexto regional, o Paraná se destaca com abundantes recursos de biomassa, o que o coloca em posição estratégica para explorar o potencial do H2 musgo. No entanto, desafios significativos surgem na integração do H2 na matriz energética, como a necessidade de uma regulamentação sólida, viabilidade econômica, desafios logísticos e infraestruturais.

Para impulsionar o desenvolvimento do H2V, é crucial estabelecer regulamentações e marcos regulatórios que ofereçam segurança aos investidores. Isso pode ser alcançado por meio da definição de políticas públicas específicas, subsídios e isenções fiscais, visando redução de custos e desenvolvimento de *hubs* de produção de H2.

A colaboração internacional desempenha um papel fundamental, não apenas para a abertura do mercado brasileiro de H2, mas também para a exportação de produtos de maior valor agregado, como a amônia verde. Contudo, a sustentabilidade da produção a longo prazo depende do desenvolvimento do mercado nacional, além de incentivar indústrias relacionadas à tecnologia do H2 a se estabelecerem no Brasil.

O setor privado enxerga no H2 uma oportunidade de negócio significativa. Ao incentivá-lo e ao investir em infraestrutura, cria-se não apenas empregos, mas também se promove o desenvolvimento econômico regional. Portanto, uma indústria de H2 renovável depende da definição de políticas públicas, infraestrutura adequada, redução de custos e estabelecimento de *hubs* de produção.

4.5 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

As limitações deste estudo devem ser consideradas ao interpretar seus resultados. Primeiramente, os resultados e conclusões são baseados nos dados coletados e na metodologia adotada, o que pode restringir sua generalização para outros conjuntos de dados ou contextos. Além disso, a pesquisa foi realizada com especialistas na área, o que pode introduzir viés, já que suas perspectivas tendem a refletir crenças favoráveis sobre a importância e viabilidade do H2 na transição energética, podendo não representar completamente visões mais amplas ou diferentes sobre o assunto.

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Este estudo dedicou-se a explorar o potencial do H2V como vetor energético na transição energética brasileira, com foco no Paraná. Ao longo da pesquisa, foi possível identificar o H2V como uma alternativa promissora para a descarbonização de diversos setores que utilizam combustíveis fósseis, desempenhando um papel fundamental na segurança energética do país. Este trabalho contribuiu para uma compreensão mais aprofundada do papel do H2V na matriz energética brasileira.

Os objetivos delineados foram atingidos ao apresentar uma análise detalhada do cenário atual do H2V, analisar as condicionantes para sua inserção na matriz energética e destacar as oportunidades para sua produção e aplicação no Brasil. Os especialistas no tema revelaram um horizonte promissor para a produção e utilização do H2 oriundo das fontes de energia eólica, solar, hidrelétrica e biomassa, apontando para oportunidades significativas tanto para o setor privado quanto para o potencial de exportação de produtos sustentáveis de alto valor agregado, como a amônia verde. No entanto, ressaltou-se a presença de desafios consideráveis, incluindo questões regulatórias, viabilidade econômica e lacunas infraestruturais. O Paraná destacou-se pela capacidade de produção de H2 a partir da biomassa, conhecido como H2 musgo.

Assim, reforçou-se a relevância do H2V, mas também ficou evidente a necessidade de superação de desafios para sua efetiva incorporação na matriz energética brasileira. A hipótese inicial sobre o potencial e viabilidade do H2V foi confirmada ao longo do estudo, ainda que tenha ressaltado os entraves para sua plena integração. A resposta ao problema da pesquisa ressalta não apenas a importância do H2V, mas também os desafios prementes que devem ser enfrentados para sua consolidação como uma fonte energética significativa no contexto brasileiro. A metodologia adotada, fundamentada em revisão bibliográfica, estudo de caso da Alemanha e inquérito com especialistas, proporcionou uma análise abrangente.

Embora o foco principal deste estudo tenha sido o uso do **H2V** como vetor energético na transição energética brasileira e no Paraná, é importante destacar o potencial significativo do Paraná para o **H2 musgo**, derivado da biomassa. Portanto, para futuros estudos, recomenda-se ampliar a análise considerando o conceito de "hidrogênio de baixa emissão" conforme apontado pela IEA. Esta abordagem holística pode facilitar o desenvolvimento de cadeias internacionais de abastecimento de hidrogênio, evitando fragmentações e oferecendo uma visão mais sustentável e alinhada globalmente para o futuro desse mercado em constante evolução.

Ressalta-se que conclusões deste trabalho são baseadas nos dados e método

utilizados, sendo importante considerar essa limitação ao aplicar o estudo. Por fim, vale notar que, o emprego do H₂ como vetor energético na matriz brasileira não é novo, assim, aguarda-se agora sua efetiva implementação.

REFERÊNCIAS

(SLOCAT), Low Carbon Transport. Transport. and Climate Change: Global Status Report, 2018. Citado 2 vez na página 29.

AGÊNCIA ESTADUAL DE NOTÍCIAS. **Governo começa a desenhar caminho para tornar Paraná hub de hidrogênio verde**. [S.l.: s.n.], 2023. Disponível em: <https://www.aen.pr.gov.br/Noticia/Governo-comeca-desenhar-caminho-para-tornar-Parana-hub-de-hidrogenio-verde>. Acesso em: 20 de setembro de 2023. Citado 1 vez na página 59.

AJANOVIC, Amela; SAYER, M; HAAS, Reinhard. The economics and the environmental benignity of different colors of hydrogen. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, v. 47, n. 57, p. 24136–24154, 2022. Citado 3 vez na página 43.

ANDERSSON, Joakim; GRÖNKVIST, Stefan. Large-scale storage of hydrogen. **International journal of hydrogen energy**, Elsevier, v. 44, n. 23, p. 11901–11919, 2019. Citado 1 vez na página 46.

BAETA, Fernanda. O Brasil na transição energética para o hidrogênio verde. IE: Institute of Economics, 2021. Citado 1 vez na página 41.

BARBIN, N. **Inter-relação entre as mudanças climáticas a política e o direito**. [S.l.]: Campinas: UNICAMP, 2006. Citado 1 vez na página 18.

BATISTA, B et al. Técnicas de recolha de dados em investigação: Inquirir por questionário e/ou inquirir por entrevista. **Reflexões em torno de Metodologias de Investigação: recolha de dados**, v. 2, p. 13–36, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 76, 77.

BMWK. **Unsere Energiewende: sicher, sauber, bezahlbar**. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/energiewende.html>. Acesso em: 20 de agosto de 2023. Citado 1 vez na página 60.

BONI, Valdete; QUARESMA, Silvia Jurema. Aprendendo a entrevistar: como fazer entrevistas em Ciências Sociais. **Revista eletrônica dos pós-graduandos em sociologia política da UFSC**, Florianópolis, v. 2, n. 1, p. 3, 2005. Citado 1 vez na página 75.

BRETT, DJL; AGUIAR, P; BRANDON, NP. System modelling and integration of an intermediate temperature solid oxide fuel cell and ZEBRA battery for automotive applications. **Journal of power sources**, Elsevier, v. 163, n. 1, p. 514–522, 2006. Citado 1 vez na página 50.

BRITO, L de. Pequeno guia de inquérito por questionário. **Moçambique. Instituto de Estudos Sociais e Económicos**, 2008. Citado 1 vez na página 75.

BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG. **Update der Nationalen Wasserstoffstrategie: Turbo für die H2-Wirtschaft**. [S.l.: s.n.], 2023. Disponível em: https://www.bmbf.de/bmbf/de/forschung/energiewende-und-nachhaltiges-wirtschaften/nationale-wasserstoffstrategie/nationale-wasserstoffstrategie_node.html. Acesso em: 02 de novembro de 2023. Citado 5 vezes nas páginas 65, 66.

BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND KLIMASCHUTZ.

Fördermöglichkeiten. [S.l.: s.n.], 2023. Disponível em:

https://www.bmwk.de/Navigation/DE/Wasserstoff/Foerderung/foerderberatung.html?cl2Categories_Regionen=national. Acesso em: 02 de novembro de 2023. Citado 2 vez na página 65.

_____. **Wasserstoff: Schlüsselement für die Energiewende**. [S.l.: s.n.], 2023. Disponível em: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/wasserstoff.html>. Acesso em: 02 de novembro de 2023. Citado 1 vez na página 64.

CAO, Zhi et al. Elaborating the history of our cementing societies: an in-use stock perspective. **Environmental science & technology**, ACS Publications, v. 51, n. 19, p. 11468–11475, 2017. Citado 2 vez na página 26.

CARMO, Hermano; FERREIRA, Manuela. Metodologia da Investigação—Guia para Auto-aprendizagem (2ª edição). **Lisboa: Universidade Aberta**, v. 15, p. 16, 2008. Citado 3 vezes nas páginas 76, 77.

CEBRI. **Programa de transição energética**. [S.l.: s.n.], 2023. Disponível em: https://cebri.org/media/documentos/arquivos/Apresentacao_PTE.pdf. Acesso em: 12 de agosto de 2023. Citado 1 vez na página 55.

CGEE. **Hidrogênio Energético no Brasil**. [S.l.: s.n.], 2010. Disponível em: https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/Hidrogenio_energetico_completo_22102010_9561.pdf/367532ec-43ca-4b4f-8162-acf8e5ad25dc?version=1.5. Acesso em: 14 de agosto de 2023. Citado 1 vez na página 56.

CHAN, Ching Chuen. The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles. **Proceedings of the IEEE**, IEEE, v. 95, n. 4, p. 704–718, 2007. Citado 1 vez na página 50.

COUTINHO, Clara Pereira. **Metodologia de investigação em ciências sociais e humanas**. [S.l.]: Leya, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 74, 75.

CRIPPA, Monica; GUIZZARDI, Diego et al. GHG emissions of all world countries. **Publications Office of the European Union**. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC126363>, 2021. Citado 1 vez na página 29.

CRIPPA, Monica; OREGGIONI, Guizzardi et al. Fossil CO₂ and GHG emissions of all world countries. **Publication Office of the European Union: Luxemburg**, 2019.

Citado 1 vez na página 23.

DARGAY, Joyce; GATELY, Dermot; SOMMER, Martin. Vehicle ownership and income growth, worldwide: 1960-2030. **The energy journal**, International Association for Energy Economics, v. 28, n. 4, 2007. Citado 1 vez na página 29.

DASZKIEWICZ, Karolina. Policy and Regulation of Energy Transition. In: [s.l.: s.n.], 2020. Citado 1 vez na página 22.

DAVIS, Steven J et al. Net-zero emissions energy systems. **Science**, American Association for the Advancement of Science, v. 360, n. 6396, eaas9793, 2018. Citado 1 vez na página 23.

DHAKAL, S. et al. Emissions Trends and Drivers Supplementary Material. In: SHUKLA, P.R. et al. (Ed.). **Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, UK e New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2022. cap. 2. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_Chapter02_SM.pdf>. Citado 7 vezes nas páginas 15, 19, 22–25, 27–29.

DIAS, Isabel. O inquérito por questionário: problemas teóricos e metodológicos gerais, 1994. Citado 2 vezes nas páginas 76, 77.

DIE BUNDESREGIERUNG. **Anteil der Erneuerbaren Energien steigt weiter**. [S.l.: s.n.], 2023. Disponível em: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/klimaschutz/faq-energiewende-2067498>, Acesso em: 04 de novembro de 2023. Citado 1 vez na página 63.

_____. **Generationenvertrag für das Klima**. [S.l.: s.n.], 2021. Disponível em: www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672?view=renderNewsletterHtml#:~:text=Mit%20dem%20ge%20A4nderten%20Klimaschutzgesetz%20werden,gegen%20BCber%20dem%20Jahr%201990%20verringern. Acesso em: 28 de outubro de 2023. Citado 2 vez na página 64.

_____. **Klimafreundlich und krisensicher**. [S.l.: s.n.], 2023. Disponível em: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/klimaschutz/energieversorgung-sicherheit-2040098>, Acesso em: 04 de novembro de 2023. Citado 2 vez na página 63.

DIAZ-GONZÁLEZ, Francisco et al. A review of energy storage technologies for wind power applications. **Renewable and sustainable energy reviews**, Elsevier, v. 16, n. 4, p. 2154–2171, 2012. Citado 0 vez na página 50.

DOU. **DESPACHO DO PRESIDENTE DA REPÚBLICA**. [S.l.: s.n.], 2022. Disponível em: <https://in.gov.br/en/web/dou/-/despacho-do-presidente-da-republica-419972141>. Acesso em: 14 de agosto de 2023. Citado 1 vez na página 56.

DURSUN, Bahtiyar; ALBOYACI, Bora. The contribution of wind-hydro pumped storage systems in meeting Turkey's electric energy demand. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 14, n. 7, p. 1979–1988, 2010. Citado 1 vez na página 50.

DW. **Com que rapidez a Alemanha vem reduzindo suas emissões?** [S.l.: s.n.], 2023. Disponível em: <https://www.dw.com/pt-br/com-que-rapidez-a-alemanha-vem-reduzindo-suas-emiss%C3%B5es/a-66191328>. Acesso em: 28 de outubro de 2023. Citado 1 vez na página 64.

_____. **Fim de uma era: Alemanha fecha suas últimas usinas nucleares**. [S.l.: s.n.], 2023. Disponível em: <https://www.dw.com/pt-br/fim-de-uma-era-alemanha-fecha-suas-%C3%BAltimas-usinas-nucleares/a-65335770#:~:text=As%20usinas%20nucleares%20Isar%20,esteira%20do%20desastre%20nuclear%20de>. Acesso em: 28 de outubro de 2023. Citado 1 vez na página 64.

DYRSTAD, Jan Morten et al. Does economic growth eat up environmental improvements? Electricity production and fossil fuel emission in OECD countries 1980–2014. **Energy policy**, Elsevier, v. 125, p. 103–109, 2019. Citado 1 vez na página 25.

EDENHOFER, Ottmar et al. Reports of coal's terminal decline may be exaggerated. **Environmental Research Letters**, IOP Publishing, v. 13, n. 2, p. 024019, 2018. Citado 1 vez na página 26.

EDUARDO DE FREITAS. **Economia do Paraná**. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/brasil/economia-parana.htm>. Acesso em: 04 de outubro de 2023. Citado 2 vez na página 72.

EMBRAPA. **Geração de energia elétrica**. [S.l.: s.n.], 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana/pos-producao/processamento-da-cana-de-acucar/geracao-de-energia-eletrica>. Acesso em: 03 de agosto de 2023. Citado 1 vez na página 54.

ENERGY ASSETS DO BRASIL, GESEL/UFRJ E PUC-RIO. **A Economia do Hidrogênio Transição, descarbonização e oportunidades para o Brasil**. [S.l.: s.n.], 2023. Disponível em: https://gesel.ie.ufrj.br/wp-content/uploads/2023/04/livro_economia_do_h2.pdf. Acesso em: 20 de julho de 2023. Citado 1 vez na página 46.

EPE. Bases para a consolidação da estratégia brasileira do hidrogênio. **Nota Técnica No EPE-DEA-NT-003/2021**. Brasília: EPE, 2021. Citado 1 vez nas páginas 15, 43.

- EPE. **Matriz Energética e Elétrica**. [S.l.: s.n.], 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 18 de junho de 2023. Citado 1 vez na página 30.
- ESPERE CLIMATE ENCYCLOPAEDIA. **Upper Atmosphere**. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <https://courses.seas.harvard.edu/climate/eli/Courses/global-change-debates/Sources/Stratospheric-cooling/stratospheric-cooling-ESPERE-encyclopedia.pdf>. Acesso em: 10 de junho de 2023. Citado 1 vez na página 21.
- FENG, Kuishuang. Drivers of peak and decline. **Nature Climate Change**, Nature Publishing Group UK London, v. 9, n. 3, p. 188–189, 2019. Citado 1 vez na página 25.
- FIGUEROA MEZA, Maria J et al. Energy for transport. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 39, n. 1, 2014. Citado 1 vez na página 29.
- FOLHA. **Projeto da UFPR é selecionado para programa de inovação em hidrogênio verde, parceria entre Brasil e Alemanha**. [S.l.: s.n.], 2023. Disponível em: <https://folhadepalotina.com.br/destaque/projeto-da-ufpr-e-selecionado-para-programa-de-inovacao-em-hidrogenio-verde-parceria-entre-brasil-e-alemanha/>. Acesso em: 20 de setembro de 2023. Citado 1 vez na página 59.
- FRIEDLINGSTEIN, Pierre et al. Global carbon budget 2019. **Earth System Science Data**, Copernicus GmbH, v. 11, n. 4, p. 1783–1838, 2019. Citado 2 vez na página 25.
- GBEP. **Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro Panorama Atual e Potenciais para o Hidrogênio Verde**. [S.l.: s.n.], 2021. Disponível em: https://www.energypartnership.com.br/fileadmin/user_upload/brazil/media_elements/Mapeamento_H2_-_Diagramado_-_V2h.pdf. Acesso em: 18 de janeiro de 2023. Citado 9 vezes nas páginas 16, 40, 41, 44, 47–49.
- GESEL. **Análise do Plano de Trabalho Trienal do Programa Nacional do Hidrogênio**. [S.l.: s.n.], 2023. Disponível em: https://gesel.ie.ufrj.br/wp-content/uploads/2023/09/artigo_ahk_gesel_21.pdf. Acesso em: 20 de setembro de 2023. Citado 5 vezes nas páginas 57, 58.
- _____. **Observatório de Hidrogênio**. [S.l.: s.n.], 2023. Disponível em: <https://gesel.ie.ufrj.br/wp-content/uploads/2021/11/observatorio-H2-01.pdf>. Acesso em: 20 de setembro de 2023. Citado 2 vez na página 56.
- GONÇALVES, Albertino. Métodos e técnicas de investigação social I: programa, conteúdo e métodos de ensino teórico e prático. **Cidade: UMinho**, 2004. Citado 1 vez na página 75.
- GOTA, Sudhir et al. Decarbonising transport to achieve Paris Agreement targets. **Energy Efficiency**, Springer, v. 12, n. 2, p. 363–386, 2019. Citado 1 vez na página 29.
- GRÜBLER, Arnulf. **Technology and global change**. [S.l.]: Cambridge university press, 2003. Citado 1 vez na página 29.

GUCWA, Michael; SCHÄFER, Andreas. The impact of scale on energy intensity in freight transportation. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, Elsevier, v. 23, p. 41–49, 2013. Citado 1 vez na página 29.

GUTOWSKI, Timothy G et al. A global assessment of manufacturing: economic development, energy use, carbon emissions, and the potential for energy efficiency and materials recycling. **Annual Review of Environment and Resources**, Annual Reviews, v. 38, p. 81–106, 2013. Citado 1 vez na página 27.

HABERL, Helmut et al. A systematic review of the evidence on decoupling of GDP, resource use and GHG emissions, part II: synthesizing the insights. **Environmental research letters**, IOP Publishing, v. 15, n. 6, p. 065003, 2020. Citado 1 vez na página 26.

HANSEN, Arve; NIELSEN, Kenneth Bo. **Cars, automobility and development in Asia: wheels of change**. [S.l.]: Taylor & Francis, 2016. Citado 1 vez na página 29.

HERNANDEZ, Ana Gonzalez et al. Leveraging material efficiency as an energy and climate instrument for heavy industries in the EU. **Energy Policy**, Elsevier, v. 120, p. 533–549, 2018. Citado 1 vez na página 27.

HERTWICH, Edgar G et al. Material efficiency strategies to reducing greenhouse gas emissions associated with buildings, vehicles, and electronics—a review. **Environmental Research Letters**, IOP Publishing, v. 14, n. 4, p. 043004, 2019. Citado 1 vez na página 27.

HILL, Manuela Magalhães. Desenho de questionário e análise dos dados-alguns contributos. **Metodologia de investigação em ciências sociais da educação**, p. 133–164, 2014. Citado 5 vezes nas páginas 75–77.

HOSSFELDER, SABINE. **I Misunderstood the Greenhouse Effect. Here's How It Works**. [S.l.: s.n.], 2023. Disponível em:

<https://www.youtube.com/watch?v=oqu5Djz0BF8>. Acesso em: 13 de maio de 2023. Citado 3 vezes nas páginas 15, 20, 21.

IBERDROLA. **Hidrogênio Verde**. [S.l.: s.n.]. Disponível em:

<https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/hidrogenio-verde>. Acesso em: 18 de junho de 2023. Citado 2 vez na página 45.

IBGE. **Agropecuária**. [S.l.: s.n.], 2023. Disponível em:

<https://brasilemsintese.ibge.gov.br/agropecuaria.html>. Acesso em: 12 de agosto de 2023. Citado 1 vez na página 53.

_____. **Cidades e Estados**. [S.l.: s.n.], 2023. Disponível em:

<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pr.html>. Acesso em: 09 de julho de 2023. Citado 1 vez na página 71.

IBGE. IBGE atualiza municípios de fronteira e defrontantes com o mar devido a mudanças de limites. [S.l.: s.n.], 2021. Disponível em:

[https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/31090-ibge-atualiza-municipios-de-fronteira-e-defrontantes-com-o-mar-devido-a-mudancas-de-limites#:~:text=0%20IBGE%20tamb%C3%A9m%20atualizou%20a,Lagoa%20dos%20Patos%20\(RS\)..](https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/31090-ibge-atualiza-municipios-de-fronteira-e-defrontantes-com-o-mar-devido-a-mudancas-de-limites#:~:text=0%20IBGE%20tamb%C3%A9m%20atualizou%20a,Lagoa%20dos%20Patos%20(RS)..)
Acesso em: 12 de agosto de 2023. Citado 1 vez na página 53.

_____. **PARANÁ.** [S.l.: s.n.], 2023. Disponível em:

<https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/>. Acesso em: 09 de julho de 2023.
Citado 1 vez na página 71.

_____. **Produto Interno Bruto - PIB.** [S.l.: s.n.], 2023. Disponível em:

<https://www.ibge.gov.br/explica/pib.php>. Acesso em: 04 de outubro de 2023.
Citado 1 vez na página 72.

_____. **Território.** [S.l.: s.n.], 2023. Disponível em:

<https://brasilemsintese.ibge.gov.br/territorio.html>. Acesso em: 12 de agosto de 2023. Citado 1 vez na página 53.

IEA. Bioenergy. [S.l.: s.n.], 2022. Disponível em:

<https://www.iea.org/reports/bioenergy>. Acesso em: 17 de junho de 2023. Citado 5 vezes nas páginas 38–40.

_____. _____. [S.l.: s.n.], 2022. Disponível em:

<https://www.iea.org/fuels-and-technologies/bioenergy>. Acesso em: 17 de junho de 2023. Citado 1 vez na página 38.

_____. **Bioenergy biofuels.** [S.l.: s.n.], 2022. Disponível em:

<https://www.iea.org/fuels-and-technologies/solar>. Acesso em: 17 de junho de 2023. Citado 3 vezes nas páginas 35, 36.

_____. **CONTRIBUTION OF RENEWABLES TO ENERGY SECURITY.** [S.l.: s.n.], 2007. Disponível em: https://iea.blob.core.windows.net/assets/682ee8e1-a423-4775-bcd1-38bf4c18717f/so_contribution.pdf. Acesso em: 07 de maio de 2023.
Citado 1 vez na página 22.

_____. **Energy Statistics Data Browser.** [S.l.: s.n.], 2022. Disponível em:

<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser?country=BRAZIL&fuel=Energy%20supply&indicator=TESbySource>.
Acesso em: 01 de agosto de 2023. Citado 2 vezes nas páginas 53, 54, 60, 61.

_____. **FUEL ECONOMY IN MAJOR CAR MARKETS: TECHNOLOGY AND POLICY DRIVERS 2005-2017.** [S.l.: s.n.], 2019. Disponível em:

<https://iea.blob.core.windows.net/assets/66965fb0-87c9-4bc7-990d->

a509a1646956/Fuel_Economy_in_Major_Car_Markets.pdf. Acesso em: 10 de junho de 2023. Citado 1 vez na página 29.

IEA. **Germany**. [S.l.: s.n.], 2023. Disponível em:

<https://www.iea.org/countries/germany>, Acesso em: 04 de novembro de 2023.

Citado 0 vez na página 62.

_____. **Hydrogen**. [S.l.: s.n.], 2021. Disponível em:

<https://www.iea.org/fuels-and-technologies/hydrogen>. License: [relevant CC license e.g. CC BY 4.0. Acesso em: 02 de maio de 2023. Citado 7 vezes nas páginas 16, 40–42.

_____. **Key World Energy Statistics 2020**. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em:

<https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2020>. Acesso em: 18 de junho de 2023. Citado 0 vezes nas páginas 30, 31.

_____. **Net Zero by 2050, IEA**. [S.l.: s.n.], 2021. Disponível em:

<https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>. Acesso em: 29 de maio de 2023. Citado 8 vezes nas páginas 33–35.

_____. **Renewable power's growth is being turbocharged as countries seek to strengthen energy security**. [S.l.: s.n.], 2022. Disponível em:

<https://www.iea.org/news/renewable-power-s-growth-is-being-turbocharged-as-countries-seek-to-strengthen-energy-security>, Acesso em: 04 de novembro de 2023. Citado 1 vez na página 63.

_____. **Renewables**. [S.l.: s.n.], 2022. Disponível em:

<https://www.iea.org/fuels-and-technologies/renewables>. Acesso em: 30 de maio de 2023. Citado 1 vez na página 35.

_____. **Supporting Infrastructure**. [S.l.: s.n.], 2023. Disponível em:

<https://www.iea.org/energy-system/low-emission-fuels/hydrogen>, Acesso em: 18 de novembro de 2023. Citado 3 vez na página 47.

_____. **The Future of Hydrogen**. [S.l.: s.n.], 2019. Disponível em:

<https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>. Acesso em: 18 de junho de 2023. Citado 3 vezes nas páginas 44, 45.

_____. **Towards hydrogen definitions based on their emissions intensity**.

[S.l.: s.n.], 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/towards-hydrogen-definitions-based-on-their-emissions-intensity>. Acesso em: 08 de outubro de 2023. Citado 2 vez na página 99.

_____. **World Energy Balances**. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-balances>.

Acesso em: 10 de junho de 2023. Citado 1 vez na página 28.

IPCC. Annex I: Glossary. In: GLOBAL Warming of 1.5 °C: IPCC Special Report on Impacts of Global Warming of 1.5 °C above Pre-industrial Levels in Context of Strengthening Response to Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty. [S.l.]: Cambridge University Press, 2022. P. 541–562. DOI: 10.1017/9781009157940.008. Citado 10 vezes nas páginas 15, 18, 20, 22, 32, 33, 38.

_____. **NEWSROOMPOST** Energy is at the heart of the solution to the climate challenge. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/2020/07/31/energy-climatechallenge/>. Acesso em: 11 de junho de 2023. Citado 1 vez na página 23.

IRENA. **Energy transition outlook**. [S.l.: s.n.], 2022. Disponível em: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Outlook>. Acesso em: 10 de junho de 2023. Citado 4 vezes nas páginas 15, 22, 23.

_____. **Solar energy**. [S.l.: s.n.], 2022. Disponível em: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Solar-energy>. Acesso em: 06 de junho de 2023. Citado 1 vez na página 35.

_____. **Wind energy**. [S.l.: s.n.], 2022. Disponível em: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Wind-energy>. Acesso em: 06 de junho de 2023. Citado 3 vezes nas páginas 36, 37.

IVANOVA, Diana et al. Mapping the carbon footprint of EU regions. **Environmental Research Letters**, IOP Publishing, v. 12, n. 5, p. 054013, 2017. Citado 1 vez na página 29.

JACKSON, RB et al. Persistent fossil fuel growth threatens the Paris Agreement and planetary health. **Environmental Research Letters**, IOP Publishing, v. 14, n. 12, p. 121001, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 23, 25.

KHANNA, Madhu; RAO, Narasimha D. Supply and demand of electricity in the developing world. **Annu. Rev. Resour. Econ.**, Annual Reviews, v. 1, n. 1, p. 567–596, 2009. Citado 1 vez na página 24.

KRAUSMANN, Fridolin; LAUK, Christian et al. From resource extraction to outflows of wastes and emissions: The socioeconomic metabolism of the global economy, 1900–2015. **Global environmental change**, Elsevier, v. 52, p. 131–140, 2018. Citado 2 vez na página 26.

KRAUSMANN, Fridolin; WIEDENHOFER, Dominik et al. Global socioeconomic material stocks rise 23-fold over the 20th century and require half of annual resource use. **Proceedings of the national academy of sciences**, National Acad Sciences, v. 114, n. 8, p. 1880–1885, 2017. Citado 2 vez na página 26.

LAMB, WF; WIEDMANN, T; PONGRATZ, J; ANDREW, R; CRIPPA, M; OLIVIER, JGJ; WIEDENHOFER, D; MATTIOLI, G; KHOURDAJIE, AA et al. de la Rue du Can, S.,... Minx, J.(2021). **A review of trends and drivers of greenhouse gas emissions by sector from**, 1990. Citado 1 vez na página 28.

LAMB, William F; GRUBB, Michael et al. Countries with sustained greenhouse gas emissions reductions: An analysis of trends and progress by sector. **Climate Policy**, Taylor & Francis, v. 22, n. 1, p. 1–17, 2022. Citado 3 vezes nas páginas 23, 24, 27.

LAMB, William F; WIEDMANN, Thomas; PONGRATZ, Julia; ANDREW, Robbie; CRIPPA, Monica; OLIVIER, Jos GJ; WIEDENHOFER, Dominik; MATTIOLI, Giulio; AL KHOURDAJIE, Alaa et al. A review of trends and drivers of greenhouse gas emissions by sector from 1990 to 2018. **Environmental research letters**, IOP Publishing, v. 16, n. 7, p. 073005, 2021. Citado 1 vez na página 26.

LAMEIRAS, Fortunato Lobo. O hidrogênio como vetor de energia. Rio de Janeiro, RJ: ESG, 2019. Citado 1 vez na página 56.

LAZARO, L.L.B. et al. Energy transition in Brazil: Is there a role for multilevel governance in a centralized energy regime? **Energy Research Social Science**, 2022. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214629621004916>>.

Citado 1 vez na página 22.

LE QUÉRÉ, Corinne et al. Drivers of declining CO2 emissions in 18 developed economies. **Nature Climate Change**, Nature Publishing Group UK London, v. 9, n. 3, p. 213–217, 2019. Citado 1 vez na página 25.

LEADBETTER, Jason; SWAN, Lukas. Battery storage system for residential electricity peak demand shaving. **Energy and buildings**, Elsevier, v. 55, p. 685–692, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 15, 37, 38.

LEE, David S et al. The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. **Atmospheric Environment**, Elsevier, v. 244, p. 117834, 2021. Citado 1 vez na página 29.

LI, Guosheng et al. Novel ternary molten salt electrolytes for intermediate-temperature sodium/nickel chloride batteries. **Journal of Power Sources**, Elsevier, v. 220, p. 193–198, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 49, 50.

M. J. WOLF ET AL. **Environmental Performance Index 2022**. [S.l.: s.n.], 2022.

Disponível em: <https://epi.yale.edu/downloads/epi2022report06062022.pdf>.

Acesso em: 19 de maio de 2023. Citado 1 vez na página 74.

MARTIN, Elliot et al. Behavioral response to hydrogen fuel cell vehicles and refueling: Results of California drive clinics. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, v. 34, n. 20, p. 8670–8680, 2009. Citado 1 vez na página 51.

MATEUS CAMPOS. **Paraná**. [S.l.: s.n.]. Disponível em:

<https://mundoeducacao.uol.com.br/geografia/parana.htm>. Acesso em: 07 de outubro de 2023. Citado 3 vez na página 72.

MATOS, Maiana Brito de; NEVES, Junior; PIMENTA, Newton. The Brazilian strategy for the hydrogen economy; A estratégia brasileira para economia do hidrogenio, 2008. Citado 1 vez na página 16.

MCDOWALL, Jim. Integrating energy storage with wind power in weak electricity grids. **Journal of Power sources**, Elsevier, v. 162, n. 2, p. 959–964, 2006. Citado 1 vez na página 50.

MCKINNON, Alan C. Freight transport deceleration: Its possible contribution to the decarbonisation of logistics. **Transport Reviews**, Taylor & Francis, v. 36, n. 4, p. 418–436, 2016. Citado 1 vez na página 29.

MICHELE DE FREITAS. **Economia do Paraná**. [S.l.: s.n.]. Disponível em:

<https://www.infoescola.com/parana/economia-do-parana/>. Acesso em: 07 de outubro de 2023. Citado 3 vez na página 72.

MINX, Jan C et al. A comprehensive and synthetic dataset for global, regional, and national greenhouse gas emissions by sector 1970–2018 with an extension to 2019. **Earth System Science Data**, Copernicus GmbH, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 19, 29.

MME. **MME defende empilhar incentivos para promover transição energética em debate sobre mercado de carbono no Senado**. [S.l.: s.n.], 2023. Disponível em:

<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-defende-empilhar-incentivos-para-promover-transicao-energetica-em-debate-sobre-mercado-de-carbono-no-senado>. Acesso em: 20 de agosto de 2023. Citado 1 vez na página 56.

_____. **Programa Nacional do Hidrogênio**. [S.l.: s.n.], 2021. Disponível em:

<https://www.epe.gov.br/sites-pt/sala-de-imprensa/noticias/PublishingImages/Paginas/MME-apresenta-ao-CNPE-proposta-de-diretrizes-para-o-Programa-Nacional-do-Hidrogenio-PNH2/HidrogenioRelatriodiretrizes.pdf>. Acesso em: 14 de agosto de 2023. Citado 2 vez na página 56.

_____. **Transição Energética é um dos principais eixos dentro do PAC**.

[S.l.: s.n.], 2023. Disponível em:

<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/transicao-energetica-e-um-dos-principais-eixos-dentro-do-pac>. Acesso em: 20 de agosto de 2023. Citado 1 vez na página 56.

- MOHLIN, Kristina et al. Turning the corner on US power sector CO₂ emissions—a 1990–2015 state level analysis. **Environmental Research Letters**, IOP Publishing, v. 14, n. 8, p. 084049, 2019. Citado 2 vez na página 25.
- MOREIRA, JOSE RS; GRIMONI, JOSE AB; ROCHA, MARCELO da S. Energia e panorama energético. LTC. Citado 1 vez na página 30.
- MORGADO, José Carlos. **O estudo de caso na investigação em educação**. [S.l.]: De Facto Editores, 2012. Citado 2 vez na página 76.
- NHS. **Transição energética: o que é e qual a situação no Brasil**. [S.l.: s.n.], 2023. Disponível em: <https://www.nhs.com.br/transicao-energetica-o-que-e-e-qual-a-situacao-no-brasil/#:~:text=0%20Brasil%20tem%20um%20grande,e%20incentivos%20para%20promov%C3%AA%2Dla..> Acesso em: 12 de agosto de 2023. Citado 2 vez na página 55.
- ÖKO-INSTITUT. **Energiewende in Deutschland: Definition, Ziele und Geschichte**. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <https://www.energiewende.de/urspruenge#>. Acesso em: 04 de novembro de 2023. Citado 1 vez na página 61.
- OLIVEIRA, José Clovis Pereira de et al. O questionário, o formulário e a entrevista como instrumentos de coleta de dados: vantagens e desvantagens do seu uso na pesquisa de campo em ciências humanas. In: III Congresso Nacional de Educação. [S.l.: s.n.], 2016. v. 83, p. 1–13. Citado 1 vez na página 77.
- OLIVEIRA, Rosana Cavalcante de. Panorama do hidrogênio no Brasil. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), 2022. Citado 1 vez na página 47.
- PANIĆ, Ivan; CUCULIĆ, Aleksandar; ĆELIĆ, Jasmin. Color-Coded Hydrogen: Production and Storage in Maritime Sector. **Journal of Marine Science and Engineering**, MDPI, v. 10, n. 12, p. 1995, 2022. Citado 1 vez na página 42.
- PAULIUK, Stefan; WANG, Tao; MÜLLER, Daniel B. Steel all over the world: Estimating in-use stocks of iron for 200 countries. **Resources, Conservation and Recycling**, Elsevier, v. 71, p. 22–30, 2013. Citado 1 vez na página 26.
- PEREIRA, Rafael Celso. Geopolítica e transição energética na Alemanha: potencialidades e desafios do hidrogênio verde, 2022. Citado 1 vez na página 32.
- PETERS, Glen P; LE QUÉRÉ, Corinne et al. Towards real-time verification of CO₂ emissions. **Nature Climate Change**, Nature Publishing Group UK London, v. 7, n. 12, p. 848–850, 2017. Citado 2 vez na página 25.
- PETERS, Glenn P; ANDREW, Robbie M et al. Carbon dioxide emissions continue to grow amidst slowly emerging climate policies. **Nature Climate Change**, Nature Publishing Group UK London, v. 10, n. 1, p. 3–6, 2020. Citado 4 vez na página 25.

PLANALTO. **DECRETO Nº 11.492, DE 17 DE ABRIL DE 2023**. [S.l.: s.n.], 2023.

Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2023-2026/2023/Decreto/D11492.htm#art5. Acesso em: 20 de agosto de 2023. Citado 1 vez na página 55.

PLANK, Barbara et al. International trade drives global resource use: a structural decomposition analysis of raw material consumption from 1990–2010. **Environmental Science & Technology**, ACS Publications, v. 52, n. 7, p. 4190–4198, 2018. Citado 1 vez na página 26.

POJANI, Dorina; STEAD, Dominic. **The urban transport crisis in emerging economies: An introduction**. [S.l.]: Springer, 2017. Citado 1 vez na página 29.

PORTALH2V. **Fundação Parque Tecnológico Itaipu**. [S.l.: s.n.], 2023. Disponível em: <https://www.h2verdebrasil.com.br/empresa/fundacao-parque-tecnologico-itaipu/>. Acesso em: 20 de setembro de 2023. Citado 1 vez na página 59.

RFA. **Annual Ethanol Production**. [S.l.: s.n.], 2022. Disponível em: <https://ethanolrfa.org/markets-and-statistics/annual-ethanol-production>. Acesso em: 03 de agosto de 2023. Citado 1 vez na página 54.

RITCHIE, Hannah; ROSER, Max; ROSADO, Pablo. Energy. **Our World in Data**, 2022. <https://ourworldindata.org/energy>. Citado 1 vez na página 32.

RODRIGUES, Joao FD et al. Drivers of CO2 emissions from electricity generation in the European Union 2000–2015. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 133, p. 110104, 2020. Citado 1 vez na página 25.

SANTOS, José Rui; HENRIQUES, Susana. **Inquérito por questionário: contributos de conceção e utilização em contextos educativos**. [S.l.]: Universidade Aberta, 2021. Citado 1 vez na página 75.

SCHAFER, Andreas et al. **Transportation in a climate-constrained world**. [S.l.]: MIT press, 2009. Citado 1 vez na página 29.

SCHULZE, Mike et al. Energy management in industry—a systematic review of previous findings and an integrative conceptual framework. **Journal of cleaner production**, Elsevier, v. 112, p. 3692–3708, 2016. Citado 1 vez na página 27.

SECRETARIA DO PLANEJAMENTO. **Paraná avança em projetos de hidrogênio verde e vira protagonista nacional na área**. [S.l.: s.n.], 2023. Disponível em: <https://www.planejamento.pr.gov.br/Noticia/Parana-avanca-em-projetos-de-hidrogenio-verde-e-vira-protagonista-nacional-na-area>. Acesso em: 20 de setembro de 2023. Citado 1 vez na página 59.

SEDEST. **Paraná Energia Sustentável**. [S.l.: s.n.], 2021. Disponível em: <https://www.sedest.pr.gov.br/Pagina/Parana-Energia-Sustentavel>. Acesso em: 09 de julho de 2023. Citado 1 vez na página 71.

- SETRA. **What is a Hydrogen Fuel Cell?** [S.l.: s.n.], 2017. Disponível em: <https://www.setra.com/blog/what-is-a-hydrogen-fuel-cell-and-how-does-it-work>. Acesso em: 09 de junho de 2023. Citado 3 vezes nas páginas 51–53.
- SHEARER, Christine et al. Committed emissions of the US power sector, 2000–2018. **AGU advances**, Wiley Online Library, v. 1, n. 3, e2020av000162, 2020. Citado 1 vez na página 25.
- SIEMENS. **Hydrogen – Bridging Sectors and Regions**. [S.l.: s.n.], 2019. Disponível em: https://www.eugcc-cleanergy.net/sites/default/files/6._session_2_manuel_kuehn_siemens_uae.pdf. Acesso em: 11 de junho de 2023. Citado 0 vez na página 48.
- SIMON CLARK. **Why the sun CANNOT be behind global warming**. [S.l.: s.n.], 2022. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=y35Lzgc9iJk>. Acesso em: 10 de junho de 2023. Citado 2 vez na página 21.
- SINGLA, Manish Kumar; NIJHAWAN, Parag; OBEROI, Amandeep Singh. Hydrogen fuel and fuel cell technology for cleaner future: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, Springer, v. 28, p. 15607–15626, 2021. Citado 1 vez na página 52.
- SOUSA, Maria Jose; BAPTISTA, Cristina Sales. Como fazer investigação, dissertações, tese e relatórios. **Lisboa: Pactor**, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 76, 77.
- SOVACOOOL, Benjamin K. et al. Sociotechnical agendas: Reviewing future directions for energy and climate research. **Energy Research Social Science**, 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214629620301924>>. Citado 1 vez na página 22.
- STECKEL, Jan Christoph et al. Coal and carbonization in sub-Saharan Africa. **Nature Climate Change**, Nature Publishing Group UK London, v. 10, n. 1, p. 83–88, 2020. Citado 1 vez na página 26.
- STERN, David I. The role of energy in economic growth. **Annals of the New York Academy of Sciences**, Wiley Online Library, v. 1219, n. 1, p. 26–51, 2011. Citado 1 vez na página 24.
- SUBERU, Mohammed Yekini; MUSTAFA, Mohd Wazir; BASHIR, Nouruddeen. Energy storage systems for renewable energy power sector integration and mitigation of intermittency. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 35, p. 499–514, 2014. Citado 3 vez na página 50.
- SUDWORTH, JL. Zebra batteries. **Journal of Power Sources**, Elsevier, v. 51, n. 1-2, p. 105–114, 1994. Citado 1 vez na página 50.

TALAEI, Alireza; AHIDUZZAMAN, Md; KUMAR, Amit. Assessment of long-term energy efficiency improvement and greenhouse gas emissions mitigation potentials in the chemical sector. **Energy**, Elsevier, v. 153, p. 231–247, 2018. Citado 1 vez na página 27.

TATSACHEN ÜBER DEUTSCHLAND. **Vorreiter in der Klimapolitik**. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <https://www.tatsachen-ueber-deutschland.de/pt-br/alemanha-sinopse/pioneira-na-politica-climatica#:~:text=Desde%20maio%20de%202021%2C%20objetivos,2030%2C%20em%20compara%C3%A7%C3%A3o%20com%201990..> Acesso em: 28 de outubro de 2023. Citado 2 vez na página 64.

THE WORLD FACTBOOK. **Germany**. [S.l.: s.n.], 2023. Disponível em: <https://www.cia.gov/the-world-factbook/countries/germany/>. Acesso em: 20 de setembro de 2023. Citado 2 vezes nas páginas 59, 60.

TÜV SÜD. **POWER-TO-X (PTX / P2X)**. [S.l.: s.n.], 2021. Disponível em: <https://www.tuvsud.com/de-de/indust-re/klima-und-energie-info/power-to-x>. Acesso em: 11 de junho de 2023. Citado 1 vez na página 48.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **How Do Fuel Cell Electric Vehicles Work Using Hydrogen?** [S.l.: s.n.]. Disponível em: <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-fuel-cell-electric-cars-work>. Acesso em: 09 de junho de 2023. Citado 0 vez na página 51.

UNDERTAKING, Hydrogen Joint. Hydrogen roadmap Europe: a sustainable pathway for the European energy transition. Hydrogen Knowledge Centre, 2019. Citado 7 vezes nas páginas 66–70.

UNEP. The emissions gap report 2017: A UN environment synthesis report. **United Nations Environ Programme (UNEP)**, 2017. Citado 1 vez na página 26.

UNITED NATIONS. **A Beginner's Guide to Climate Neutrality**. [S.l.: s.n.], 2021. Disponível em: https://unfccc.int/news/a-beginner-s-guide-to-climate-neutrality?gclid=Cj0KCQiAhc-sBhCEARIsAOVwHuRjGqDb4kn7PytHdfWMvel5_3ZRDXKEXaAnmBXWf8dPqNVfmxG6YOoaAmuhEALw_wcB, Acesso em: 02 de janeiro de 2024. Citado 1 vez na página 61.

_____. **Renewable energy – powering a safer future**. [S.l.: s.n.], s.d. Disponível em: <https://www.un.org/en/climatechange/raising-ambition/renewable-energy>. Acesso em: 07 de maio de 2023. Citado 1 vez na página 22.

WANG, Huan et al. Early transformation of the Chinese power sector to avoid additional coal lock-in. **Environmental Research Letters**, IOP Publishing, v. 15, n. 2, p. 024007, 2020. Citado 1 vez na página 25.

WANG, Juan et al. The evolution of Chinese industrial CO₂ emissions 2000–2050: a review and meta-analysis of historical drivers, projections and policy goals. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 116, p. 109433, 2019. Citado 1 vez na página 27.

WIEDENHOFER, Dominik et al. Maintenance and expansion: modeling material stocks and flows for residential buildings and transportation networks in the EU25. **Journal of Industrial Ecology**, Wiley Online Library, v. 19, n. 4, p. 538–551, 2015. Citado 1 vez na página 26.

WOOD MACKENZIE. **The future for green hydrogen**. [S.l.: s.n.], 2019. Disponível em: <https://www.woodmac.com/news/editorial/the-future-for-green-hydrogen/>. Acesso em: 18 de junho de 2023. Citado 0 vez na página 45.

ZINK, Trevor; GEYER, Roland. Circular economy rebound. **Journal of industrial ecology**, Wiley Online Library, v. 21, n. 3, p. 593–602, 2017. Citado 1 vez na página 26.

APÊNDICES

APÊNDICE A – ENTREVISTA

A.1 MENSAGEM LINKEDIN

Prezado(a) Sr./Sra. [Nome do Especialista],

Licença para entrar em contato sobre um convite para contribuir com meu projeto de TCC e um projeto de pesquisa da UFPR sobre tendências atuais do H2. Sua contribuição seria importante e através de uma conversa de 45 min. O convite formal segue anexo. Agradecemos antecipadamente e enviamos nossas cordiais saudações.

A.2 CONVITE ENTREVISTA - PESQUISA H2V



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
Setor de Tecnologia
Departamento de Engenharia Ambiental
Prof. Marcelo Risso Errera, Ph.D.

Convite para Participação na Pesquisa sobre Hidrogênio Verde

Prezado(a) Sr./Sra. [Nome do Especialista],

Eu sou Marcelo Errera, docente no departamento de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Paraná (UFPR). Junto com a acadêmica Lisa Fischer, estamos realizando uma pesquisa sobre as prospecções do hidrogênio verde na transição energética brasileira para o trabalho de Conclusão de Curso e o projeto do CNPq nº 406.948/2021-6.

Sua [expertise/experiência/interesse] na área [do Hidrogênio Verde/Energias Renováveis/Energia], como demonstrado por sua participação no [Nome do Evento/Conferência], nos indicou que sua contribuição seria importante para nossa pesquisa.

O potencial impacto da nossa pesquisa será maior com suas contribuições. Agradeceríamos se compartilhasse suas perspectivas em uma entrevista online, que terá duração de 45 minutos em um momento de sua melhor conveniência.

Agradecemos por considerar nosso convite e aguardamos seu retorno. Estamos à disposição para sanar quaisquer dúvidas sobre nossa pesquisa.

Com apreço,

[Assinatura]

Marcelo Risso Errera, PhD

Docente do Departamento de Engenharia Ambiental - UFPR

errera@ufpr.br

Lisa Isabella Fischer

Lisa Isabella Fischer

Graduanda de Engenharia Ambiental - UFPR

lisa.isabella@ufpr.br

A.3 TRANSCRIÇÃO DAS ENTREVISTAS

- Entrevista 1

Pergunta I: Com base em sua experiência na área de energias (renováveis), como você avalia o atual estágio de desenvolvimento do H2V no Brasil?

Resposta I: "Até o momento, existem apenas iniciativas e projetos independentes."

Pergunta II: Quais tecnologias de produção de H2V você considera mais promissoras para o contexto brasileiro?

Resposta II: "As tecnologias mais promissoras para o contexto brasileiro incluem a eletrólise associada à energia eólica, solar e Pequenas Centrais Hidroelétricas (PCHs) sem armazenamento. Além disso, a gaseificação do bagaço de cana pode ser uma opção interessante."

Pergunta III: Quais são os principais desafios que o país enfrenta em relação à produção, armazenamento, distribuição e aplicação do H2V?

Resposta III: "Os principais desafios incluem a normalização das práticas, a viabilidade econômica desses projetos e a necessidade de possuir tecnologias maduras. Além disso, questões logísticas também precisam ser abordadas."

Pergunta IV: Na sua opinião, quais são as principais políticas públicas necessárias para impulsionar o desenvolvimento do H2V no Brasil?

Resposta IV: "É crucial dar prioridade ao investimento em ciência e tecnologia. Além disso, é fundamental fomentar a venda do excedente de energia renovável gerado de forma descentralizada para o sistema, tomando como exemplo a abordagem adotada pela Alemanha. Para alcançar esse objetivo, torna-se essencial estabelecer regulamentações que assegurem o acesso facilitado às tecnologias pertinentes e, ao mesmo tempo, promovam o uso genuíno de energia renovável, evitando a comercialização de energia gerada de maneira não sustentável no sistema."

Pergunta V: Considerando o panorama internacional, quais aprendizados podem ser aplicados à realidade brasileira na transição para uma matriz energética baseada em H2V?

Resposta V: "Evitar a utilização de gás natural e metano para a conversão em H2."

Pergunta VI: Em sua visão, quais são as perspectivas futuras para a adoção em larga escala do H2V no país?

Resposta VI: "Não possuo uma perspectiva otimista quanto à adoção em larga escala do H2V no Brasil. É provável que leve algum tempo, possivelmente após 2030, para que essa tecnologia seja efetivamente adotada em grande escala no

país.”

- Entrevista 2

Pergunta I: Com base em sua experiência na área de energias (renováveis), como você avalia o atual estágio de desenvolvimento do H2V no Brasil?

Resposta I: "O desenvolvimento do setor de H2V no Brasil tem experimentado uma notável evolução nos últimos anos. Inicialmente, o cenário estava mais focado na área acadêmica e de pesquisa, e até o início de 2021, o Brasil parecia estar adormecido em relação a essa oportunidade. No entanto, o Estado do Ceará, conhecido por como "berço" das energias renováveis no Brasil, despertou para o potencial do H2V. O Estado já possuía um setor elétrico consolidado, com diversos atores e indústrias, o que representava uma vantagem significativa, já que as energias renováveis estavam estabelecidas no país há mais de duas décadas, com regulamentação, investimentos e indústrias maduras. O setor elétrico foi o primeiro a compreender a oportunidade do H2, em que poderiam continuar a gerar energia e produzir o H2 com a energia excedente, aumentando o valor agregado do setor.

O lançamento do projeto H2V no Porto do Pecém atraiu investimentos e visibilidade para o estado, pois foi o primeiro a estabelecer um *hub* de H2V em linha com outros países ao redor do mundo. Isso motivou outros estados brasileiros a também iniciarem seus próprios projetos no setor, com destaque para o Porto do Açu no Rio de Janeiro e o Porto Suape em Pernambuco. Hoje, praticamente todos os estados do Brasil possuem decretos, programas e projetos relacionados ao H2V em fase de planejamento ou execução.

No Ceará, como pioneiro, quatro empresas já realizaram estudos de viabilidade e anunciaram datas para a operação de suas plantas de produção de H2. Elas já possuem compradores para sua produção, que será usada na produção de amônia, aproveitando a infraestrutura logística existente. Além disso, a localização estratégica do Porto do Pecém, que pertence em 30% ao Porto de Roterdã, proporciona segurança aos investidores. A proximidade do complexo industrial com empresas que podem consumir esse H2 e a transformação (descarbonização) dos portos e frotas de veículos (empilhadeiras, porta contêineres e embarcações pequenas de dragagem) também são fatores importantes a serem considerados.

O engajamento dos estados brasileiros no desenvolvimento do H2V atraiu a atenção do governo federal, que reconheceu a oportunidade para o país. O governo federal começou a se envolver mais ativamente nesse setor, inclusive buscando cooperação com outros países, como a Alemanha, por meio do projeto H2 Brasil. Isso contribuiu para impulsionar o desenvolvimento do setor no âmbito governamental, com a

criação de comissões no Senado e na Câmara dos Deputados dedicadas ao tema do H2. O legislativo demonstrou interesse em regulamentar o setor, e as instituições envolvidas, como a ANEL, ANP e EPE, demonstraram estar bem preparadas em relação ao escopo do setor de H2.

Além disso, os órgãos de financiamento, como o BNDES, Itaú, Bradesco e Caixa Econômica Federal, demonstraram interesse em apoiar o desenvolvimento do setor. O setor de petróleo e gás, embora inicialmente relutante, começou a entender as oportunidades relacionadas ao H2 e já designou um responsável para esse segmento.

O cenário é favorável tanto na iniciativa privada quanto no governo, e é interessante notar que o Brasil começou a desenvolver o setor de H2V a partir da iniciativa privada, enquanto em outros países, o setor foi inicialmente impulsionado pelo governo. Isso reflete a capacidade do Brasil de fomentar novos mercados com base em sua experiência em energias renováveis e biocombustíveis.

A infraestrutura de transmissão de eletricidade interligada também desempenha um papel crucial no Brasil, distinguindo-o de países em desenvolvimento que precisam começar do zero em termos de eletricidade e água desmineralizada. O setor de H2V atrai investimentos que podem beneficiar regiões carentes de infraestrutura, proporcionando desenvolvimento e melhorias significativas para as comunidades locais.

Além disso, o Brasil possui recursos minerais valiosos, como o lítio, necessário para a produção de baterias de veículos elétricos e células de combustível. O país pode aproveitar esses recursos para atrair empresas de baterias e fomentar a economia local, criando empregos e melhorando a infraestrutura em áreas que historicamente carecem de investimentos.

No geral, o cenário do H2V no Brasil está evoluindo de forma promissora, com envolvimento tanto do setor privado quanto do governo, e o país está bem posicionado para se tornar um *player* significativo nesse mercado em crescimento.”

Pergunta II: Quais tecnologias de produção de H2V você considera mais promissoras para o contexto brasileiro?

Resposta II: ”No contexto brasileiro, as tecnologias de produção de H2V mais promissoras são, sem dúvida, os eletrolisadores. Isso se deve à crescente demanda global por H2, estimada em cerca de 200 gigawatts nos próximos anos.

Os eletrolisadores são compostos por diversos componentes, incluindo compressores, tanques de armazenamento, membranas e painéis eletrônicos. Ressalta-se que, setores que demandam uma grande potência, como veículos pesados (cami-

nhões e trens), estão buscando descarbonizar. Isso significa que a produção de H₂ e os componentes relacionados, como eletrolisadores de alta capacidade, terão um papel crucial nesse contexto. Portanto, a demanda por esses componentes específicos também é considerável, o que abre oportunidades para a indústria de fabricação e tecnologia no Brasil.”

Pergunta III: Quais são os principais desafios que o país enfrenta em relação à produção, armazenamento, distribuição e aplicação do H₂V?

Resposta III: “Um dos principais desafios está relacionado à urgência de agir e aproveitar a janela de oportunidade. Esta janela está diretamente ligada às metas de descarbonização global, que devem ser alcançadas até 2030, com a redução de 50% das emissões de gases de efeito estufa. No período de 2023 a 2030, o Brasil precisa tomar medidas decisivas para se posicionar estrategicamente no mercado de H₂.

Uma parte essencial desse desafio é a necessidade de reindustrialização, incentivando a produção local e a nacionalização de tecnologias para a fabricação de equipamentos, componentes e máquinas relacionados à produção de H₂ renovável. Além disso, o Brasil deve se posicionar como um produtor, consumidor e exportador não apenas da molécula de H₂, mas também de todos os produtos que utilizam H₂, como amônia, etanol, querosene, entre outros.

É fundamental explorar todas as rotas possíveis para a produção de H₂ renovável, aproveitando as quatro principais fontes renováveis disponíveis no Brasil: solar, eólica (*onshore* e *offshore*), resíduos de biomassa e energia hidrelétrica. Muitas pequenas hidrelétricas possuem capacidade ociosa, e o país pode tirar proveito disso para produzir H₂ renovável.

No cenário brasileiro, geralmente, quando não há vento, há sol e vice-versa. Portanto, deve-se utilizar o H₂ para evitar o uso de energia fóssil utilizado compensar as oscilações na geração de energia renovável. Em vez de recorrer a usinas termelétricas, o foco deve ser a instalação de mais capacidade de geração de energia solar e eólica. As energias renováveis são um verdadeiro tesouro do Brasil, que precisa ser valorizado e desenvolvido.

Para alcançar o sucesso nesse setor, o Brasil deve também investir na promoção de sua indústria e aumentar sua capacitação para competir no mercado global. A comunicação e divulgação de projetos em andamento são essenciais para atrair investimentos e parcerias internacionais. Outros países já estão buscando essas oportunidades, e o Brasil não pode perder essa janela de desenvolvimento.

Após 2030, o mercado de H₂V estará mais consolidado, com países produtores e

consumidores já estabelecidos. Portanto, o Brasil tem uma oportunidade única de se tornar um jogador-chave nesse setor nos próximos seis anos. Isso requer cooperação internacional e esforços para atender às certificações, como a Renewable Energy Directive (REDII^a) da UE, que impõem critérios rigorosos aos investidores.

Uma das maneiras de atender a esses critérios é dimensionar as plantas de H2 renovável no Brasil em pelo menos quatro vezes a capacidade de eletrólise. No entanto, existe uma exceção para países que geram mais de 90% de sua eletricidade a partir de fontes renováveis, uma condição que o Brasil atende. No entanto, é fundamental que o Brasil obtenha o reconhecimento internacional para essa condição, pois isso tornaria o país mais atraente para investidores que desejam uma planta de eletrólise única, reduzindo custos em até quatro vezes. Poucos países têm essa vantagem de cumprir esse critério de 90% de geração renovável.”

Pergunta IV: Na sua opinião, quais são as principais políticas públicas necessárias para impulsionar o desenvolvimento do H2V no Brasil?

Resposta IV: ”O desenvolvimento do H2 renovável no Brasil requer a implementação de políticas públicas abrangentes que considerem todas as etapas da cadeia produtiva. É importante identificar áreas em que já existem políticas públicas relacionadas às energias renováveis e adaptá-las para incluir o H2V.

Além disso, é fundamental criar políticas específicas para os elos da cadeia produtiva que ainda não dispõem de diretrizes adequadas. Por exemplo, o armazenamento de alta pressão, a liquefação de H2 e o armazenamento de amônia precisam de regulamentação e incentivos.

Em relação à importação de produtos, é importante evitar a isenção total de impostos de importação, uma vez que isso pode prejudicar a indústria nacional. A maioria das principais empresas globais envolvidas no desenvolvimento do H2V já possui subsidiárias no Brasil. Em vez de atrair novas empresas, o foco deve ser incentivar o estabelecimento de novas linhas de produção e a nacionalização de componentes.

É fundamental capacitar a indústria e a engenharia nacional para atrair investimentos em novas linhas de produção e tecnologias. Mesmo que o mercado interno não seja imediatamente grande, o mercado global para o H2 renovável é significativo. Se o Brasil não atrair essas linhas de produção, outros países o farão. Além disso, a indústria é um grande gerador de empregos.

Portanto, o principal foco no Brasil deve ser o incentivo para que as indústrias estabelecidas no país tragam novas tecnologias e linhas de produção. Em vez de isentar impostos de importação, o governo pode oferecer incentivos para a

nacionalização de plantas de produção, com a exigência de que, por exemplo, pelo menos 80% dos componentes sejam fabricados localmente. Isenções fiscais podem ser reservadas para projetos de pesquisa e inovação, incentivando a indústria nacional a desenvolver capacidades.

É importante priorizar produtos fabricados no Brasil e aproveitar a abundância de energias renováveis no país para produzir amônia e outros produtos relacionados ao H2 renovável. Valorizar o parque industrial brasileiro e promover a nacionalização da produção é essencial para o desenvolvimento sustentável do setor de H2 renovável no Brasil. Atualmente, o Brasil importa a maioria da amônia necessária para a produção de hidrogenados, quando, na realidade, possui recursos renováveis suficientes para produzi-la e até exportá-la para outros países que carecem dessas fontes de energia. Portanto, políticas públicas que valorizem e impulsionam a indústria nacional são cruciais para o futuro do H2V no Brasil.”

Pergunta V: Considerando o panorama internacional, quais aprendizados podem ser aplicados à realidade brasileira na transição para uma matriz energética baseada em H2V?

Resposta V: ”Um ponto crucial é a importância da independência energética. A dependência de suprimentos energéticos, como observado em situações de países que importam energia de outras nações, pode ser uma vulnerabilidade. Portanto, o Brasil deve buscar a segurança energética, diversificando suas fontes e garantindo autonomia na produção de energia.

Além disso, é essencial não limitar os investimentos a rotas específicas de descarbonização. Diversas rotas para a redução das emissões de GEE são vitais e devem ser incentivadas. O governo deve focar em estabelecer metas claras de redução de emissões em vez de favorecer tecnologias específicas. Por exemplo, estabelecer que a partir de 2030 todos os veículos devem ser de emissão zero ou ainda considerar o ciclo de vida completo do combustível, (*well to wheel*) desde a geração até o uso final. Dessa forma, o mercado pode escolher a rota e a tecnologia mais adequadas, desde que atendam aos padrões de baixas emissões.

O governo deve atuar como um agente neutro em relação às rotas específicas e, em vez disso, deve promover e incentivar a descarbonização em todos os setores, incluindo transporte, indústria e geração de eletricidade. A abordagem deve ser voltada para a redução das emissões em todo o país.

O Brasil está sob pressão para liderar a descarbonização, não apenas em relação à redução do desmatamento (a principal fonte de emissões), mas também em todos os setores. É fundamental que o país se posicione como um exemplo global na busca por uma economia de baixo carbono. Além disso, é importante lembrar que

a descarbonização não deve ocorrer apenas em alguns países, enquanto outros fornecem insumos sem considerar a redução de emissões. A cooperação internacional é fundamental para garantir que a transição para uma matriz energética baseada em H2 renovável seja global e eficaz na redução das emissões de gases de efeito estufa.”

Pergunta VI: Em sua visão, quais são as perspectivas futuras para a adoção em larga escala do H2V no país?

Resposta VI: "As perspectivas são promissoras. É evidente que existe um amplo interesse em todo o país em abraçar o potencial do H2 renovável como parte de sua matriz energética.

No entanto, é importante abordar a questão da terminologia. O Brasil se refere ao H2V/H2 renovável como "H2 de baixo carbono", o que pode levar a uma desvalorização da sua posição no mercado global. Ao utilizar esse termo, o Brasil se iguala a países que produzem H2 a partir de combustíveis fósseis com captura de carbono. O Brasil tem uma vantagem substancial, pois é capaz de produzir H2 verdadeiramente renovável, seja na forma de H2V ou H2 musgo (biomassa). É crucial que o Brasil se posicione de maneira mais assertiva e se destaque como um dos poucos países com capacidade para produzir H2 genuinamente renovável.

Um aspecto a ser considerado é o Índice de Hidrogênio para a América Latina e o Caribe (H2LAC - *Latin America & the Caribbean*). O Brasil ocupa o terceiro lugar nesse índice em 2022 e 2023. No entanto, o Chile e a Colômbia têm se destacado devido à divulgação dos seus setores de H2 (menor que o setor brasileiro). Os investidores frequentemente seguem esses índices, e, portanto, é imperativo que o Brasil intensifique seus esforços de divulgação e promoção do H2V, a fim de atrair mais investimentos e se estabelecer como um líder no cenário internacional.

Em resumo, o Brasil possui uma base sólida para a expansão do uso do H2 renovável, e as perspectivas são positivas. No entanto, é essencial que o país aprimore sua estratégia de comunicação e se destaque como um dos principais produtores de H2 genuinamente renovável no mercado global. Isso ajudará a impulsionar a adoção em larga escala dessa fonte de energia limpa em todo o país.”

Outras considerações: "Outras considerações: Inicialmente, o H2 era visto principalmente como um combustível alternativo, o que limitava os investimentos em tecnologias relacionadas ao H2 ao setor de transporte, como as células de combustível. No entanto, no final de 2017 e início de 2018, houve uma mudança de paradigma.

Nesse período, o H2 começou a ser reconhecido como um vetor energético fun-

damental para a descarbonização. Isso ocorreu como parte de um movimento global em que os países europeus, asiáticos e outros perceberam que as ações em andamento não seriam suficientes para alcançar as metas do Acordo de Paris. Era evidente que era necessário envolver todos os setores da economia no processo de descarbonização, e o H2 foi destacado como um dos pilares dessa estratégia. O H2 poderia ser empregado como insumo para substituir combustíveis fósseis, além de desempenhar um papel significativo na indústria e no transporte.

Um marco importante foi o estudo "*Scaling Up*", que detalhou quantitativamente a descarbonização por meio do H2 em diversos setores, incluindo a indústria, transporte, geração de eletricidade e produção de calor. Na UE, foi lançado o "*Hydrogen Valley*", um conceito que delinea as áreas onde há geração de energia renovável, produção de H2, armazenamento, distribuição e uso do H2 em vários setores da economia, como indústria, transporte e produção de combustíveis sintéticos.

A partir desse momento, diversos países lançaram suas estratégias nacionais de H2, alinhadas com metas de descarbonização. A meta comum é atingir até 2030 uma redução de 50% das emissões de CO2 e, em seguida, atingir o "*net zero*" após 2050. Isso resultou em um grande aumento nos investimentos e na participação da indústria no setor de H2. Todas as áreas da cadeia, desde a geração de energia renovável até a produção de gases industriais, a combinação entre o setor elétrico e o setor de gases industriais, e os setores consumidores, como produção de aço, fertilizantes e indústrias que necessitam de descarbonização, como cimento, papel, vidro e setor alimentício, foram envolvidas.

É importante ressaltar que o H2 não se limita apenas à molécula em si, mas engloba todos os produtos derivados dessa molécula, como amônia, metanol, querosene de aviação, diesel e gasolina verdes, aço e cimento verdes. As empresas que desejam exportar para a UE, que já possui regras rígidas de descarbonização, devem se adaptar a essas regras ou enfrentar tarifas baseadas na pegada de carbono de seus produtos. Essa pressão regulatória está forçando as empresas a adotarem processos de descarbonização.

Além disso, a segurança energética tornou-se uma preocupação crucial na UE, especialmente na Alemanha, que dependia fortemente do gás natural. A guerra entre Rússia e Ucrânia ameaçou a segurança energética, uma vez que a matriz energética alemã dependia em mais de 50% do gás natural. Como resultado, houve uma perda abrupta de 50% da matriz energética em um curto período de tempo, o que causou uma crise. Isso ressalta a necessidade de diversificar as fontes energéticas.

O H₂ foi eleito como uma das fontes para substituir o gás natural, e diversos gasodutos estão sendo adaptados para distribuir H₂ em vez de gás natural. No início, havia considerações sobre a mistura de gás natural e H₂ como uma estratégia para a descarbonização. No entanto, as indústrias, devido às diferenças significativas entre esses gases, optaram por usar exclusivamente 100% H₂ ou 100% gás natural. Isso resultou em um aumento significativo na demanda por H₂, que passou a ser usado não apenas como insumo, mas também para a geração de energia nas indústrias.

No entanto, a Alemanha enfrenta desafios na produção em grande escala de H₂, uma vez que suas fontes de energia renovável são limitadas, com geração eólica predominante no norte e geração solar no sul. Além disso, há uma deficiência na transmissão de energia entre as regiões do país, o que dificulta o compartilhamento eficiente de energia. Como resultado, a Alemanha planeja importar uma parte significativa de seu H₂, principalmente pelo porto de Roterdã, que está liderando a implementação da infraestrutura de H₂. O porto de Roterdã está se adaptando para acomodar diversos tipos de transportadores de H₂, incluindo amônia, metanol, querosene, H₂ líquido e outros. A maioria das empresas tende a preferir o H₂ e, conseqüentemente, planeja "crackear" esse H₂ para injeção em gasodutos que se estendem do porto de Roterdã até o sul da Europa.

Além do transporte marítimo, outras rotas de transporte estão sendo exploradas, como o transporte fluvial ao longo do rio Reno. Esse projeto, conhecido como *Rein*, conecta o porto de Roterdã à cidade de Gênova, na Itália. As embarcações que já transportam contêineres de grãos e combustíveis estão sendo adaptadas com sistemas de células de combustível para também transportar H₂. Ao longo do rio Reno, estações de abastecimento estão sendo instaladas, não apenas para as embarcações, mas também para caminhões e trens. Portanto, o H₂ renovável será transportado de forma a gerar zero emissões.

Todo esse desenvolvimento de infraestrutura está em andamento para conectar efetivamente os produtores de H₂ aos consumidores. Apesar da capacidade de geração de H₂ no norte da Alemanha, proveniente da energia eólica, ainda não é suficiente para atender à demanda industrial do país.

Globalmente, já foram anunciados projetos de capacidade de eletrólise de 200 gigawatts, dos quais 30% estão em estágio maduro, o que significa que a decisão final de investimento foi tomada ou está em fase de instalação ou já em operação, totalizando cerca de 60 gigawatts em todo o mundo. Um aspecto notável é o uso de equipamentos modulares, o que permite escalonar a capacidade à medida que o mercado cresce, proporcionando flexibilidade e eficiência. Novas plantas

anunciadas possuem capacidade de 100 a 150 megawatts, representando um compromisso substancial com a produção de H₂. Os projetos geralmente começam com anúncios para determinadas regiões, seguidos por estudos abrangentes de viabilidade técnica e econômica, que podem levar de 6 meses a 1 ano. Esses estudos avaliam todos os investimentos necessários e muitas vezes envolvem parcerias ao longo de toda a cadeia de valor do H₂.

Este é um mercado emergente que está crescendo rapidamente devido à motivação para descarbonização e à participação de diversos setores da economia.

No contexto do estado do Paraná, há uma oportunidade excepcional para se destacar no setor de H₂. O governo do estado pode desempenhar um papel mais ativo, uma vez que o Paraná possui uma abundância de recursos de energia renovável, incluindo hidrelétricas e um setor agropecuário consolidado. Um projeto notável seria a criação de uma produção centralizada de amônia verde em cooperativas agrícolas, aproveitando os resíduos de biomassa disponíveis. Além disso, a biomassa poderia ser usada para produzir eletricidade ou ser convertida em H₂ (musgo). Essa abordagem poderia levar à produção de amônia, que, por sua vez, poderia ser utilizada como fertilizante. É fundamental mapear as culturas que dependem de fertilizantes nitrogenados no estado e colaborar com as cooperativas agrícolas para aproveitar essa oportunidade. Produzir amônia localmente é uma alternativa mais vantajosa do que importá-la, promovendo a autossuficiência.

Em resumo, o estado do Paraná possui um sólido setor de produção de biogás, que pode ser ampliado para incluir a produção de H₂, aproveitando as fontes de energia renovável disponíveis. Além disso, os recursos agropecuários, como a casca de coco e o bagaço de cana-de-açúcar, representam valiosas oportunidades para a geração de eletricidade e a produção direta de H₂.”

^a REDII: Sigla para "REDII Renewable Energy Directive" e significa "Diretiva de Energia Renovável".

- Entrevista 3

Pergunta I: Com base em sua experiência na área de energias (renováveis), como você avalia o atual estágio de desenvolvimento do H₂V no Brasil?

Resposta I: "O desenvolvimento do H₂ no ambiente regulatório está avançando de maneira bastante estruturada, o que é crucial para a viabilização de projetos. No que diz respeito ao potencial, o Brasil apresenta vastas oportunidades, tanto em termos de produção quanto de consumo de H₂. Cada estado possui suas próprias características naturais que favorecem a produção de H₂. Por exemplo, o Nordeste é propício para a geração eólica e solar, o Paraná destaca-se na produção de biomassa, o Sudeste tem expertise em óleo e gás, e o país conta com fontes

naturais de H₂ em diversos locais.

No que se refere ao consumo de H₂ por meio de processos de descarbonização, há uma demanda considerável em setores de difícil redução de emissões, como a indústria de fertilizantes, o transporte pesado em longas distâncias, a siderurgia e a indústria de cimento. Além disso, o país tem potencial para exportar produtos descarbonizados com H₂, como o aço de baixo carbono (aço verde) e a amônia de baixo carbono (amônia verde), que agregam alto valor econômico e ambiental.”

Pergunta II: Quais tecnologias de produção de H₂V você considera mais promissoras para o contexto brasileiro?

Resposta II: ”No contexto brasileiro, diversas tecnologias de produção de H₂ mostram grande promessa. Em primeiro lugar, a biomassa se destaca devido às suas emissões negativas de carbono. Em um horizonte de tempo um pouco mais longo, a eletrólise com energia renovável também se apresenta como uma opção muito promissora. Além disso, o potencial do H₂ natural.

O Brasil já possui uma produção significativa de H₂, no entanto, essa produção frequentemente ocorre em proximidade dos locais de consumo. A Petrobras desempenha um papel de destaque como uma das principais produtoras e consumidoras de H₂ no país. No entanto, em muitos casos, o H₂ é gerado por meio do processo de reforma do metano. É importante destacar que a produção de H₂ através da reforma do metano não será completamente descontinuada a curto prazo. No entanto, espera-se que essa abordagem seja gradualmente substituída pelo uso da reforma do metano com captura de carbono.”

Pergunta IV: Na sua opinião, quais são as principais políticas públicas necessárias para impulsionar o desenvolvimento do H₂V no Brasil?

Resposta IV: ”Na perspectiva da pessoa entrevistada, a principal política pública essencial para impulsionar o desenvolvimento do H₂ renovável no Brasil é o Plano Nacional de Hidrogênio (PNH₂). Este plano representa a diretriz governamental fundamental para orientar a evolução de projetos e fornecer direcionamento ao setor de H₂. Além disso, vale a pena mencionar o projeto de lei conhecido como ”Combustíveis do Futuro”, que, embora não contenha disposições específicas sobre o H₂, aborda diversos derivados do H₂.”

Pergunta V: Considerando o panorama internacional, quais aprendizados podem ser aplicados à realidade brasileira na transição para uma matriz energética baseada em H₂V?

Resposta V: ”Um ponto crucial é que cada país deve concentrar seus esforços em fortalecer suas próprias bases energéticas. É fundamental desenvolver o mercado

interno antes de considerar prioritariamente as exportações. Embora as exportações sejam significativas para abrir o mercado e impulsionar o setor inicialmente, a sustentabilidade a longo prazo depende do desenvolvimento do mercado interno.”

Pergunta VI: Em sua visão, quais são as perspectivas futuras para a adoção em larga escala do H2V no país?

Resposta VI: ”Na perspectiva do entrevistado, é desafiador estabelecer um cronograma específico, uma vez que a adoção do H2 renovável no Brasil tem experimentado um crescimento exponencial nos dois últimos anos. Se esse ritmo de avanço persistir, podemos esperar uma adoção em larga escala até 2025 ou 2030. No entanto, é relevante considerar que a visão de longo prazo da IEA para alcançar a neutralidade de carbono é até 2050.”

Outras considerações: ”A ABH2 não apoia o uso da classificação por cores para o H2. Em vez disso, prefere-se utilizar a nomenclatura ”Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono” ou ”Hidrogênio de Baixa Emissão”. O H2 é a ferramenta para trazer o desenvolvimento econômico e descarbonizar a matriz energética dos países.

A sociedade tem vindo, ao longo do tempo, a realizar a substituição de combustíveis mais complexos, que contêm maior teor de carbono em suas moléculas, por combustíveis mais simples, como o H2. À medida que essa transição ocorre, não apenas a proporção de carbono em relação ao H2 diminui, mas também a eficiência energética (energia) da molécula aumenta.

Reconhecendo a importância central do H2, muitos países têm desenvolvido suas estratégias para sua utilização. O Brasil lançou sua primeira estratégia em 2005 e, em 2023, apresentou uma versão atualizada, o Plano Nacional de Hidrogênio (PNH2). A estrutura dessas estratégias abrange um comprometimento de longo prazo com a economia do H2, o desenvolvimento de cadeias locais de valor, bem como a ênfase na descarbonização como a palavra-chave para alcançar uma transição energética mais sustentável.

A ABH2 desempenha um papel fundamental na promoção da cadeia de valor do H2 por meio de seis pilares de atuação: o desenvolvimento da rede de H2, contribuição para a segurança, estabelecimento de códigos e padrões relacionados ao H2, defesa e regulamentação do mercado, investimento em pesquisa e treinamento profissional, organização de eventos industriais e científicos, e a produção e disseminação de informações.

Quanto à definição de códigos, normas e padrões, a ABH2 concentra-se principalmente na regulação e na advocacia de mercado do H2. Além disso, os associados da ABH2 desempenham um papel ativo na manutenção da Associação Brasileira de

Normas Técnicas (ABNT). A nível internacional, a ABH2 tem participado ativamente na ISO, auxiliando na criação de uma metodologia para avaliação das emissões de carbono ao longo da cadeia de valor do H2. Atualmente, estamos trabalhando para desenvolver essa metodologia nacionalmente, alinhando-a com os regulamentos internacionais.

É importante destacar que, desta vez, o mercado do H2 está em uma trajetória de crescimento sólido, ao contrário de tentativas anteriores que não alcançaram sucesso. No entanto, para que isso ocorra de maneira rápida e coordenada, reconhece-se que é fundamental estabelecer métricas quantitativas (*apple to apple*) que permitam comparações diretas e eficazes.

O Brasil se encontra em uma posição única no cenário global, uma vez que não se limita apenas a desempenhar o papel de produtor ou consumidor de H2, como a maioria dos países. O Brasil possui um imenso potencial para produzir H2 em larga escala, atendendo tanto às necessidades do mercado interno quanto do mercado externo, com foco na descarbonização. Esse potencial é derivado da rica diversidade de fontes energéticas disponíveis no país.

O Brasil dispõe de uma abundância de recursos de energia renovável, incluindo energia hidrelétrica, solar, eólica, das marés, geotérmica e biomassa. O estado do Paraná, em particular, se destaca na área de biomassa, englobando a produção de etanol, biomassa residual, biogás, biodiesel e toda a cadeia de poli gás, inclusive a produção de H2 natural. Considerando essa variedade de fontes e observando os regulamentos internacionais, a restrição à produção de H2 deveria se basear não na rota tecnológica (cores), mas sim na quantidade de carbono emitida.

O foco principal deve ser a descarbonização e a promoção da transição energética. A terminologia das cores, que pré-seleciona com base na tecnologia, acaba por dificultar a abertura do mercado. Em vez disso, é mais relevante discutir maneiras de produzir H2 com emissões cada vez menores. A rota da biomassa assume um papel crucial, especialmente no Paraná, onde os resíduos da agropecuária podem ser transformados em uma solução. Utilizar biomassa para gerar H2, convertê-lo em amônia para produzir fertilizantes e aplicar esses fertilizantes na agricultura - fechando o ciclo. Nesse ciclo de carbono, ao final da produção de H2, é possível capturar o carbono, resultando em uma emissão negativa de carbono - uma forma eficaz de mitigação das emissões atmosféricas de carbono.

Ressalta-se que estamos atravessando um período de transição, e é notável que outros países também estejam optando por adotar a nomenclatura "Hidrogênio de Baixa Emissão" em vez de utilizar categorizações baseadas em cores.

O H2 natural é uma descoberta relativamente recente, com grandes reservas iden-

tificadas no Brasil, e, sob a classificação convencional por cores, é rotulado como "Hidrogênio Branco". Nesse contexto, o H₂ é de origem renovável e pode ser extraído diretamente do solo (em alguns casos, composto apenas de H₂ ou misturado com metano ou hélio), resultando em nenhuma emissão direta, exceto aquelas provenientes das máquinas utilizadas na extração. Então, surge a pergunta: por que esse tipo de H₂ não é tão bem visto quanto o H₂V? O mesmo questionamento se aplica à biomassa, onde as emissões são, na verdade, negativas. Alguns já estão considerando a biomassa como uma categoria de H₂V, visto que o termo "verde" evoca a ideia de fontes de energia renovável.

Atualmente, cerca de 98% do H₂ é produzido por meio da reforma do metano, frequentemente extraído do gás natural, sem a captura de carbono. A introdução da captura de carbono nesse processo tem o potencial de reduzir significativamente, cerca de 90%, as emissões de carbono associadas. É mais relevante priorizar a descarbonização de 90% da produção total (que corresponde a 98%) de H₂ do que focar na descarbonização integral de uma parcela muito menor. A transição para uma matriz energética mais sustentável é um processo gradual que envolve uma série de etapas e melhorias progressivas.

O PNH₂ reconhece que o Brasil não deve se limitar a produzir apenas a molécula de H₂ para exportação, mas, em vez disso, deve exportar produtos descarbonizados com H₂, impulsionando o uso de H₂ em seu mercado interno. Isso envolve o desenvolvimento de toda a infraestrutura auxiliar, incluindo a expansão de regiões, empresas e capacitação de pessoas. O foco não está apenas na exportação do H₂ em si, mas na exportação de produtos com alto valor agregado.

Existe uma importante iniciativa envolvendo a colaboração entre a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e a *Association Française de Normalisation* (AFNOR) na ISO, visando à criação de um documento abordando o cálculo das emissões de GEE ao longo da cadeia de valor do H₂. Este documento da ISO é altamente aguardado em nível global, pois se tornará uma ferramenta fundamental para a quantificação efetiva das emissões de GEE associadas à produção de H₂. A elaboração deste padrão técnico está ocorrendo em consenso entre diversas nações, com a participação de vários países nas reuniões da ISO. Prevê-se que essa especificação técnica seja finalizada até o final do ano. Vale ressaltar que esse documento não faz distinção com base na tecnologia utilizada, sendo completamente neutro quanto à classificação por cores. Seu foco está unicamente no H₂ e no cálculo das emissões de GEE, alinhando-se com as estratégias do Plano Nacional de Hidrogênio (PNH₂).

Destaca-se ainda, o Projeto de Lei (PL) referente aos "Combustíveis do Futuro"

aborda questões relacionadas aos derivados do H₂. O PL aborda temas relativos a combustíveis sustentáveis para aviação, combustíveis sintéticos e tecnologias de captura de carbono. Esta última desempenha um papel crítico em diversas abordagens de produção de H₂, tornando-se um componente fundamental no panorama de transição para fontes de energia mais sustentáveis.

Por fim, ressalta-se que atualmente, um dos desafios mais significativos reside na conexão entre os dois elos essenciais da cadeia: os produtores e os consumidores de H₂.”

- Entrevista 4

Pergunta VII: Como você enxerga o potencial do H₂V como uma oportunidade de negócio no setor privado?

Resposta VII: ”Assim como a energia solar e eólica se estabeleceram como grandes oportunidades no setor privado em todo o mundo, a transição para uma matriz energética baseada em H₂ renovável oferece uma perspectiva semelhante. Esta mudança representa a geração de energia com um menor impacto ambiental, sendo o H₂ o elo que liga várias fontes de energias renováveis e é essencial para o processo de descarbonização.

No início, o desenvolvimento das células de combustível estava principalmente centrado no setor de mobilidade e transporte, o que gerou um desafio comparável ao famoso dilema do ”ovo e da galinha”: a necessidade de estabelecer postos de abastecimento de H₂ para atender veículos movidos a esse combustível, ao mesmo tempo em que se desenvolviam veículos compatíveis que pudessem ser abastecidos nesses postos. Enquanto as energias solar e eólica não se tornaram mais competitivas, o H₂ também não alcançou destaque, uma vez que sua forma ”cinza” (produzida a partir de gás natural) carecia de justificativa adequada. Embora o H₂ cinza seja menos poluente quando comparado aos combustíveis fósseis, é importante ressaltar que se trata de um recurso finito. Portanto, a produção de H₂ a partir de fontes renováveis se torna crucial para a descarbonização.

Mais recentemente, a ênfase se deslocou para a indústria, que já utiliza H₂ em diversos processos. Além de contribuir para a descarbonização, o H₂ desempenha um papel fundamental na redução das emissões em setores como siderurgia, cimenteiras e indústria química (na produção de fertilizantes, amônia e gordura hidrogenada, por exemplo). No contexto brasileiro, a oportunidade se estende à descarbonização e à segurança energética, especialmente no agronegócio, onde a importação de amônia e o gás natural russo podem representar riscos para a produtividade e os custos da alimentação, como evidenciado pela neutralidade do

Brasil na guerra entre Rússia e Ucrânia.

Resumidamente, a adoção do H2V oferece oportunidades significativas de descarbonização, valorização de produtos, redução do impacto ambiental e garantia de segurança energética. Destaca-se o estado do Paraná e as regiões Sudeste, Centro-Oeste e Sul do Brasil, onde o agronegócio pode se beneficiar da produção de fertilizantes verdes a partir de H2 renovável. No Nordeste, o potencial de exportação é notável devido à abundância de energia solar e eólica, tornando o H2V uma *commodity* atrativa para o mercado internacional, especialmente a Europa, disposta a investir na cadeia de produção em larga escala no Brasil.”

Pergunta VIII: Você poderia apontar demandas específicas ou nichos de mercado que podem ser atendidos pela aplicação do H2V?

Resposta VIII: ”O H2 renovável possui um vasto potencial para atender a demandas específicas e nichos de mercado em diferentes setores. Alguns exemplos notáveis incluem a indústria cimenteira, o agronegócio com foco em fertilizantes e amônia, a indústria siderúrgica, e a utilização em aeroportos para o transporte interno de veículos, abastecimento de aeronaves no pátio e até mesmo para aeronaves embarcadas. Além disso, a aplicação do H2V pode ser benéfica em aterros sanitários, onde o biogás pode ser convertido em H2 para alimentar caminhões movidos a H2 ou biometano.

Nos portos, principalmente em regiões de grande exportação de grãos, como o Paraná, o H2V pode ser aplicado de forma eficaz para aproveitar os resíduos orgânicos gerados durante as operações de transbordo. Isso possibilita a produção de biogás, que pode, por sua vez, ser utilizado para abastecer veículos pesados, como caminhões, por meio de células de combustível movidas a H2. É importante ressaltar que os caminhões movidos a H2 oferecem vantagens notáveis em comparação com os caminhões elétricos com baterias. Eles são mais leves, proporcionam maior espaço de carga e têm um tempo de recarga significativamente menor.

Além disso, em setores com uma logística bem estabelecida, como a indústria leiteira, a instalação estratégica de postos de H2 em cooperativas e outros pontos ao longo da cadeia de suprimento pode ser extremamente vantajosa.

Os Estados Unidos têm sido um exemplo notável de adoção de empilhadeiras movidas a H2, tornando o setor logístico mais eficiente e sustentável. Portanto, a substituição por H2 em aplicações logísticas bem definidas, onde os veículos seguem rotas fixas, pode ser uma escolha estratégica. O H2V demonstra um grande potencial para revolucionar diversos setores e atender às demandas de nichos de mercado que buscam soluções mais limpas e eficientes.”

Pergunta IX: Quais são as principais razões que o levaram a considerar investir nesse setor?

Resposta IX: "A principal motivação para considerar o investimento nesse setor reside no interesse pessoal e na identificação de uma oportunidade de negócio promissora."

Pergunta X: Em relação a parcerias e cooperações, você acredita que existem sinergias possíveis com outras empresas ou setores para impulsionar o desenvolvimento do H2V?

Resposta X: "Observa-se que setores como o da logística têm demonstrado um interesse crescente em entender e adotar medidas de descarbonização, dependendo da viabilidade econômica. Muitas vezes, as parcerias envolvem empresas detentoras da tecnologia, que pode não ser economicamente viável para o cliente final, tornando necessária a adaptação do modelo de negócios. Por exemplo, no caso de caminhões movidos a H2, que podem ser dispendiosos para aquisição direta, algumas empresas optam por oferecer aluguel de caminhões a H2 em vez de vendê-los aos clientes. Essa abordagem permite que os clientes desfrutem dos benefícios da descarbonização com custos semelhantes aos de caminhões a diesel, enquanto contribuem para a descarbonização e também oferecem oportunidades de marketing.

É importante ressaltar que essas parcerias não precisam necessariamente ocorrer diretamente entre a fábrica e o cliente final; frequentemente, empresas intermediárias adquirem os veículos e os disponibilizam para locação. A vantagem do H2, bem como da energia solar e eólica, é a capacidade de produção distribuída, ou seja, podem ser gerados onde for mais conveniente. Por exemplo, em Curitiba, o biogás proveniente do aterro da Caximba pode ser aproveitado para abastecer os veículos utilizados no aeroporto de São José dos Pinhais. Em projetos de H2 renovável, deve-se considerar quem produzirá e quem consumirá, o que ajudará a estabelecer parcerias eficazes e sustentáveis."

Pergunta XI: Quais políticas governamentais ou incentivos você considera importantes para tornar o setor do H2V mais atrativo para empresas privadas?

Resposta XI: "No contexto brasileiro, a isenção de impostos é uma medida significativa que pode estimular o investimento em H2 renovável.

Além disso, a capacitação de profissionais é essencial, visto que o setor demanda especialistas em escala suficiente para atender às necessidades da produção. Uma vantagem notável no Brasil é a presença de instituições como as federações das indústrias e o SENAI, que têm a capacidade de fornecer treinamento e capacitação

em grande volume e com alta qualidade.

Quanto à regulamentação, considerando que o H2 é um recurso com várias rotas de conversão, surgem desafios regulatórios. Portanto, é essencial estabelecer uma regulamentação clara que evite incertezas jurídicas para os investidores. Nesse contexto, a abordagem do "hidrogênio de baixo carbono" é mais adequada do que a classificação por cores, contribuindo para uma regulamentação mais favorável ao desenvolvimento do setor. Misturar H2 cinza e H2V pode ser uma estratégia eficaz para reduzir o custo inicial do H2, tornando-o mais competitivo. Posteriormente, a transição para porcentagens cada vez maiores de H2V pode ser incentivada.

O exemplo do Japão, com seu bem-sucedido uso de células de combustível residenciais, ilustra a importância de subsídios iniciais. A partir de 2012, o governo subsidiou a cadeia de produção de componentes de células de combustível, o que reduziu os custos para os consumidores finais. Esses subsídios iniciais foram fundamentais para criar a escala necessária, desenvolvendo componentes específicos de células de combustível que precisavam de maior produção para se tornarem economicamente viáveis. Ao longo do tempo, os subsídios foram reduzidos à medida que a indústria conseguiu produzir a custos mais baixos, alcançando preços competitivos no mercado. Portanto, essa assistência inicial desempenha um papel crucial na criação de escala e no desenvolvimento do setor do H2.

Atualmente, é importante destacar que a demanda por eletrolisadores está tão alta que existem filas de espera que se estendem por anos para sua produção. Isso reflete a falta de preparação da indústria para atender a essa crescente demanda. Como resultado, no setor privado, o mercado de eletrolisadores se apresenta como uma oportunidade significativa e promissora, dadas as perspectivas de crescimento e a importância crescente do H2V."

Pergunta XII: Como o governo do Paraná tem acompanhado a evolução do H2V como parte da transição energética no estado?

Resposta XII: "Embora o Paraná tenha ingressado um pouco mais tarde nesse cenário, sua entrada foi marcada por um comprometimento notável. A experiência do Ceará chamou a atenção e serviu como catalisador para outros estados, incluindo os do Sul, São Paulo e Nordeste, se envolverem mais ativamente no desenvolvimento do H2 renovável.

O Paraná já tomou medidas significativas, como a criação de regulamentações estaduais para o setor de H2 renovável. No entanto, o estado está aguardando regulamentações em nível federal para avançar ainda mais. O Paraná compreende que a corrida por investimentos no setor de H2 ainda não está perdida e acredita que há oportunidades a serem exploradas assim que as regulamentações sejam

definidas.

É importante observar que, embora o Paraná possa não ter a mesma competitividade do Ceará, devido a distâncias maiores com os compradores (por exemplo Europa) e recursos de energia solar e eólica relativamente menores, o estado pode atrair investimentos internos, como a instalação de fábricas de eletrolisadores, aproveitando a infraestrutura industrial já existente na região. Essa abordagem estratégica pode contribuir para o desenvolvimento do setor de H2V no Paraná, impulsionando a transição energética e a economia do estado.”

Outras considerações: ”Ao considerar os momentos em que as aeronaves estão estacionadas nos aeroportos, é importante notar que geralmente são necessários geradores a diesel para fornecer energia ao avião. Além disso, a aeronave embarcada utiliza querosene como combustível para o funcionamento de máquinas em seu interior, e dentro do aeroporto, diversos veículos, como empilhadeiras e máquinas responsáveis por movimentar as aeronaves pela pista, frequentemente funcionam com diesel ou gasolina. Substituir essas fontes de energia por H2 renovável representa uma oportunidade valiosa para reduzir as emissões de carbono em toda a cadeia de abastecimento da aviação. Outro ponto interessante a se considerar é o desenvolvimento de drones movidos a H2. Essa tecnologia inovadora tem o potencial de transformar várias indústrias, oferecendo uma opção mais limpa e eficiente para aplicações diversas, como entrega de mercadorias e monitoramento ambiental. Portanto, projetar drones movidos a H2 pode contribuir para a expansão do uso dessa fonte de energia limpa em diferentes setores.”

- Entrevista 5

Pergunta XII: Como o governo tem acompanhado a evolução do H2V como parte da transição energética no país?

Pergunta XIII: Quais ações e projetos o governo tem implementado para fomentar o uso do H2V na matriz energética brasileira?

Respostas XII e XIII: ”O Governo federal está atualmente empenhado na elaboração de projetos de lei que visam promover o uso do H2 renovável. Isso é feito por meio da realização de leilões para o H2, oferecendo incentivos fiscais e tributários, além de estimular o aumento do consumo desse recurso.

Paralelamente, os governos estaduais estão adotando medidas para atrair e fortalecer a indústria de H2 em seus territórios. Isso inclui a concessão de isenções tributárias para empresas que desejam se estabelecer em seus respectivos estados. Exemplos notáveis desses esforços podem ser observados em estados como o Ceará, Paraná e Minas Gerais. Essa estratégia de atração da indústria para seus

territórios não apenas promoverá o desenvolvimento local, mas também resultará em um aumento significativo dos recursos disponíveis.”

Pergunta XIV: Quais são os principais desafios regulatórios ou estruturais enfrentados pelo governo na integração do H2V na matriz energética brasileira?

Resposta XIV: ”Um dos principais desafios enfrentados pelo governo na integração do H2V na matriz energética brasileira reside na necessidade de desenvolver uma regulamentação adequada desde o início, juntamente com a busca por fontes de receita ou orçamento que possam financiar os custos associados a esse investimento nesse setor.”

Pergunta XV: Como o governo tem trabalhado em parceria com o setor privado para incentivar o desenvolvimento do H2V no país?

Resposta XV: ”O governo tem estabelecido grupos de trabalho em colaboração com o setor privado para impulsionar o desenvolvimento do H2V no país.”

Pergunta XVI: Quais setores da economia são vistos como mais promissores para a aplicação do H2V e por quê?

Resposta XVI: ”É crucial identificar os potenciais compradores de H2V para estimular a demanda. Inicialmente, os setores industriais que utilizam fertilizantes, metanol e os setores de aviação e marítimo para combustíveis apresentam maior promessa, pois já possuem a estrutura para fazer a transição para o H2. Por outro lado, a aplicação do H2V no setor de transporte ainda não está totalmente desenvolvida, devido à necessidade de tecnologia adequada nos veículos, o que pode acontecer, mas em um prazo mais longo.”

Pergunta XVII: O governo possui metas ou planos específicos relacionados ao uso do H2V na descarbonização de setores-chave da economia?

Resposta XVII: ”Embora não haja metas definidas, o governo está trabalhando em projetos voltados para setores específicos, com o propósito de compreender a demanda e, posteriormente, incentivá-la. A abordagem é garantir que haja um mercado consumidor definido antes de conceder incentivos à produção, reconhecendo a importância de identificar quem serão os consumidores desse mercado.”

Pergunta XVIII: Em sua opinião, quais são os principais benefícios que a adoção do H2V pode trazer para a economia e o meio ambiente do Brasil?

Respostas XVIII: ”O H2V é considerado uma alternativa importante para a descarbonização, mas mais especificamente para países que não possuem muitos recursos renováveis, o que não se aplica ao Brasil. O Brasil tem uma matriz elétrica bastante limpa, tornando a produção de H2V para geração de energia elétrica

pouco justificável. No entanto, no contexto brasileiro, o H2V pode ter um propósito mais significativo relacionado ao armazenamento de energia. Quando se trata da matriz energética, o Brasil apresenta mais espaço para a descarbonização, uma vez que essa matriz não é tão limpa. No entanto, o biogás e o biometano estão atualmente mais preparados para uso em comparação ao H2. O biometano já possui estruturas de produção para caminhões, ônibus e veículos pesados, permitindo uma descarbonização imediata. Além disso, a indústria que já consome gás pode fazer uso do biometano de maneira totalmente equivalente. As indústrias que usam outros combustíveis podem facilmente adotar o biometano para descarbonização. Portanto, o biogás está mais pronto para o uso do que o H2 no contexto brasileiro. No entanto, existirão casos em que o H2 poderá ser uma opção interessante, mas a demanda por ele ainda não está bem definida no Brasil. No Nordeste, a perspectiva é mais voltada para a exportação de H2, uma vez que os mercados externos estão dispostos a pagar preços mais elevados. No entanto, o governo brasileiro está trabalhando para criar um mercado consumidor interno, por exemplo, no setor de fertilizantes para o agronegócio, com o objetivo de reduzir a dependência do país das importações de fertilizantes.”

Pergunta V: Considerando o panorama internacional, quais aprendizados podem ser aplicados à realidade brasileira na transição para uma matriz energética baseada em H2V?

Resposta V: ”Não há um modelo concreto a ser seguido, já que o H2V é uma tecnologia emergente em todos os países. No entanto, vários países estão implementando incentivos para energias renováveis, como os Estados Unidos, que oferecem benefícios fiscais. O Brasil pode não ser capaz de competir diretamente com essas iniciativas, mas deve desenvolver políticas adequadas à nossa realidade, incluindo a implementação de incentivos específicos.”

Outras considerações: ”É preferível adotar o conceito de H2 renovável ao invés do sistema de cores.

Por que essas políticas públicas são necessárias? Elas são fundamentais, pois o H2 renovável ainda é mais caro do que o H2 de fonte fóssil. Para reduzir esse custo e tornar a produção economicamente viável, é necessário implementar políticas que promovam a descarbonização e tornem a energia renovável competitiva em relação ao mercado de energia fóssil, que já está bem estabelecido.

Antes de estabelecer as políticas públicas, é crucial identificar o mercado de H2 no país/estado, entender o que o H2 substituirá (seja energia elétrica ou H2 cinza utilizado em indústrias/refinarias de petróleo ou outro), determinar os incentivos necessários para promover a descarbonização e avaliar os custos associados a

essas medidas.

Qual órgão será responsável por fiscalizar esses projetos? ANP, ANEL ou outro? Ainda não há uma definição clara quanto a isso. No entanto, a presença de um órgão fiscalizador é essencial para garantir a viabilidade da produção de H2 renovável.”

APÊNDICE B – QUESTIONÁRIO

B.1 MENSAGEM LINKEDIN

Prezado(a) Sr./Sra. [Nome do especialista],

Licença para entrar em contato sobre um convite para contribuir com meu projeto de TCC e um projeto de pesquisa da UFPR sobre tendências atuais do H2. Sua contribuição seria importante e através de um breve questionário de 7 a 10 min. O convite formal segue anexo. Agradecemos antecipadamente e enviamos nossas cordiais saudações.

B.2 MENSAGEM E-MAIL

Prezado(a) Sr/Sra. [Nome do especialista],

Sou Lisa Fischer, acadêmica de Engenharia Ambiental na UFPR. Realizo pesquisa para meu Trabalho de Conclusão de Curso sob orientação do Prof. Marcelo Errera, PhD. Agradeceria se aceitasse nosso convite para contribuir com nossa pesquisa sobre tendências atuais do H2 respondendo um breve questionário (7 a 10 min). O convite formal segue anexo. Agradecemos antecipadamente e enviamos nossas cordiais saudações.

Atenciosamente, Lisa Fischer

B.3 CONVITE QUESTIONÁRIO - PESQUISA H2V



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
Setor de Tecnologia
Departamento de Engenharia Ambiental
Prof. Marcelo Risso Errera, Ph.D.

Convite para Participação na Pesquisa sobre Hidrogênio Verde

Prezado(a) Sr./Sra. [Nome do Especialista],

Eu sou Marcelo Errera, docente no departamento de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Paraná (UFPR). Junto com a acadêmica Lisa Fischer, estamos realizando uma pesquisa sobre as prospecções do hidrogênio verde na transição energética brasileira para o trabalho dela de Conclusão de Curso e o projeto do CNPq nº 406.948/2021-6.

Sua [expertise/experiência/interesse] na área [do Hidrogênio Verde/Energias Renováveis/Energia], como demonstrado por sua participação no [Nome do Evento/Conferência], nos indicou que sua contribuição seria importante para nossa pesquisa.

O potencial impacto da nossa pesquisa será maior com suas contribuições. Agradeceríamos se compartilhasse suas perspectivas preenchendo o questionário através do link: <https://forms.gle/8U3dZ9VTYV1bn3Pz6>. O questionário levará cerca de 7 a 10 minutos para ser concluído, e garantimos sua privacidade (termo anexo ao questionário).

Agradecemos por considerar nosso convite e aguardamos sua resposta até 30 de setembro de 2023. Estamos à disposição para sanar quaisquer dúvidas sobre nossa pesquisa e sobre o questionário.

Com apreço,

[Assinatura]

Marcelo Risso Errera, PhD

Docente do Departamento de Engenharia Ambiental - UFPR

errera@ufpr.br

Lisa Isabella Fischer

Lisa Isabella Fischer

Graduanda de Engenharia Ambiental - UFPR

lisa.isabella@ufpr.br

B.4 RESPOSTAS QUESTIONÁRIO - PERGUNTAS ABERTAS

A primeira indagação da seção de perguntas abertas foi: "Quais são os principais benefícios que você enxerga na adoção do hidrogênio verde em comparação com outras fontes de energia?" As respostas são apresentadas a seguir:

- "No curto prazo, o desenvolvimento e atualização técnica terão um custo relativamente alto e um benefício limitado, sendo o auto consumidor o principal beneficiado em projetos de pequeno porte que realize o reaproveitamento de resíduos, ao mesmo tempo que o exportador seria o principal beneficiado com grandes projetos de soluções *hard-to-abate* para portos e Combustível Sustentável de Aviação (SAF). Contudo, no longo prazo, há uma perspectiva de significativo benefícios ambientais e econômicos para uma grande gama de rotas e modelos de negócios, uma vez que haja maturidade e redução de custos para tecnologias de produção e consumo desse energético";
- "Versatilidade, aplicações em indústrias *hard to abate*, *commodity* possível de ser exportada";
- "Alta densidade energética e não emissão de CO₂ quando utilizado, sendo relevante para a descarbonização de setores *hard-to-abate*, que não podem ser eletrificados ou não possuem outra alternativa competitiva (ex.: siderurgia, navegação)";
- "Produção em baixo carbono, aproveitamento energético absolutamente renovável, sem vínculo geográfico quando aproveita a energia fotovoltaica";
- "A capacidade de descarbonizar o setor de transporte";
- "Descarbonização da matriz energética. Por se tratar de novas tecnologias, beneficia novos entrantes";
- "Descarbonização de vários setores industriais";
- "O Hidrogênio (H₂), além de ser ter alta densidade energética, versatilidade de uso, ser um combustível sem carbono (*carbon-free*) e a possibilidade de funcionar como vetor de armazenamento de energia, também atrai oportunidades de crescimento socioeconômico para o Brasil. Devido as suas condições geográficas e climáticas, o Brasil é um dos poucos países onde há reais condições para a geração de hidrogênio verde";
- "A transição energética, caracterizada especialmente pela descarbonização das matrizes energéticas em resposta à questão das mudanças climáticas,

pela descentralização dos recursos energéticos e pela maior digitalização na produção e uso da energia”;

- “No entanto, esta transição deve considerar também questões econômicas e sociais, para que seja realizada de maneira inclusiva e justa. O Nordeste do Brasil, historicamente carente no desenvolvimento econômico, pode se beneficiar muito deste movimento e o Brasil pode aproveitar esta transformação energética para fazer uma transformação industrial, contribuindo como não só um exportador de *comodities*, mas também como um país exportador de produtos com valor agregado. O governo que enxergar esta oportunidade, que se constrói no médio e longo prazo, irá encontrar na Alemanha um parceiro forte para esta transformação”;
- “Aumento da resiliência energética e possibilidade de abertura de mercados internacionais”;
- “Além do aspecto ambiental (descarbonização), o desenvolvimento social com a criação de um novo mercado de trabalho exigindo investimentos em produção, distribuição e formação profissional”;
- “Primeiramente, gostaria de sugerir a substituição do termo “hidrogênio verde”. Como sabemos o uso de cores para classificar a tipologia do hidrogênio está em desuso no âmbito internacional. Trata-se de uma estratégia comercial para a venda de equipamentos (eletrolisadores) no Brasil. O hidrogênio renovável e de baixo carbono é o que realmente importa, ou seja, o hidrogênio obtido a partir de fontes renováveis e que possui baixo teor de carbono emitido em sua produção, armazenamento e transporte. Este tipo de hidrogênio abrange não somente a rota da eletrólise da água, mas de outros tipos de rotas, como é o caso da biomassa (reforma ou gaseificação, sobretudo). Neste sentido, o maior benefício do hidrogênio renovável é não só contribuir para a descarbonização da economia global por permitir a obtenção de níveis de carbono próximo a zero ou zero, mas também, poder viabilizar a obtenção de níveis negativos de CO₂, quando o CO₂ é capturado em um processo que envolve a produção de H₂ a partir da biomassa (bio-CCS), por exemplo”;
- “O hidrogênio de baixa emissão de carbono, como virá a ser chamado mundialmente (já definido pela IEA), e não o hidrogênio verde, permitirá a produção de produtos com maior valor agregado, por reduzir a emissão de CO₂ em seu processo. O Brasil poderá se beneficiar disso com ações para reindustrialização com o uso do H₂. Possibilitará reduções significativas nos setores de maior emissão de CO₂, como o setor de fertilizantes, siderurgia, cimento e

petroquímico, colaborando significativamente para as metas de neutralidade de carbono”;

- ”Despoluição dos grandes centros urbanos, redução”;
- ”Potencial de descarbonizar setores de difícil descarbonização”;
- ”Pode ser armazenado por um tempo maior; Pode descarbonizar os setores *hard to abate*; Pode viabilizar a inserção das fontes renováveis na matriz energética”;
- ”Alta Densidade, zero emissões GEE, possibilidade de armazenamento”;
- ”O H2 verde pode permitir o uso de combustíveis sintéticos, visando substituição do petróleo sem grande investimento em infraestrutura. Como tecnologia de armazenamento de energia, o hidrogênio representa oportunidade para as fontes renováveis e intermitentes (PCHs, eólica e solar)”;
- ”Uso em setores de difícil descarbonização”;
- ”Possibilidade de descarbonizar setores de difícil descarbonização”;
- ”Além de ser uma fonte de energia que apresenta benefícios significativos no que toca à questão ambiental, pode vir a ser, dependendo do desenvolvimento tecnológico, um componente importante de uma matriz energética diversificada”;
- ”Trata-se de uma matriz energética limpa onde o país possui vastos recursos e caminhos para a sua produção em larga escala”;
- ”Desfossilização e desenvolvimento sócio econômico”;
- ”A descarbonização do planeta”.

Na segunda questão, indagou-se: ”Quais, na sua opinião, representam os principais obstáculos que devem ser superados para promover uma adoção mais ampla do hidrogênio verde no Brasil?” As respostas são expostas a seguir:

- ”Ainda não há uma visão clara benefícios de curto/médio/longo prazo compartilhada pela indústria e pela sociedade, essa visão, que pode ser manifestada com a proposta de verdadeiros *roadmaps* com *timeframe* diferentes deve ser a chave para identificar os desafios de política pública, regulatórios e econômicos que precisariam ser superados”;
- ”Definição dos subsídios e incentivos (fiscais, *off-taker* e financiamento)”;

- "Do lado da oferta, disponibilidade de energia renovável a custo competitivo, investimentos iniciais para estruturação da planta e compra do eletrolisador, custo de capital elevado no país, falta de incentivos como os disponíveis nos EUA e Europa. Do lado da demanda, o hidrogênio verde ainda apresenta hoje um custo mais elevado do que as fontes que estariam substituindo (seja o hidrogênio de origem fóssil ou outros combustíveis como diesel, carvão). Deste modo, sua adoção significa aumento de custos para os compradores, que devem buscar formas de repassar esse custo aos seus clientes finais por meio de "*green premium*", visto que não há no país mandatos para utilização e etc";
- "Política de apoio ao setor privado, absoluta divulgação do básico ao avançado para a população e estímulo ao mercado de insumos";
- "Diminuir risco de empreendimento criando subsídios e mercado";
- "Emissão de políticas públicas relevantes (está sendo tratado no nível federal como PNH₂)";
- "Investimento em P&D";
- "Apesar dos 100 anos de existência do hidrogênio gerado a partir da eletrólise, ainda existem muitos campos onde a inovação pode trazer muitos avanços ao longo de toda cadeia de produção, distribuição e uso deste vetor de energia. Uma das grandes dificuldades do hidrogênio verde é o seu transporte para lugares distantes. A tecnologia hoje consiste em vincular os átomos de Hidrogênio com as moléculas de Amônia e Metanol, por exemplo, o que facilita o transporte, apesar de reduzir a eficiência na cadeia de valor. Ademais, quanto mais barata for a energia usada para gerar o hidrogênio verde, mais viável será expandir a cadeia produtiva. Investimentos em aumento de escala e de eficiência na produção de energias eólica e solar estão sendo direcionados para as regiões do planeta com maior potencial";
- "Avanços na regulamentação, aumento dos recursos para P&D, desenvolvimento de rotas tecnológicas nacionais (redução da dependência tecnológica externa) e aumento dos recursos para investimento em infraestrutura";
- "Criar condições que justifiquem investir neste setor (regulatórias, jurídicas, econômicas)";
- "É necessário definir com urgência parâmetros para a regulação, normatização e incentivos";

- "Para o hidrogênio de baixa emissão de carbono são desafios: maior investimento em PD&I para desenvolvimento da indústria nacional na produção de equipamentos para a produção de H2 em todas as rotas tecnológicas, para uso de todas as fontes de matéria prima; aprovação de marco regulatório que dará segurança jurídica para os processos da cadeia do H2 (produção, transporte, armazenamento e usos finais); ampliação da formação profissional e tecnológica capazes de responder aos aspectos de segurança e capacidades para a cadeia do H2; definições quanto ao processo de certificação dos níveis de emissão da cadeia do H2, para processos comerciais e de contabilização de redução de emissões de GEE e possíveis créditos de carbono; desenvolvimento de polos energéticos para a cadeia do H2, capazes de estimular todas as demais cadeias envolvidas com os benefícios do H2; ações que busquem estabelecer um custo de produção e comercialização que permitam o seu uso para todos os fins";
- "O Brasil ainda produz energia elétrica utilizando fontes não renováveis (termoelétricas). A adoção mais ampla do H2 verde no Brasil só faria sentido caso o Brasil passasse a ter uma matriz energética renovável superavitária, utilizando-se desse excedente para a produção de H2 verde. Obviamente, todas as questões ligadas a infraestrutura e regulação deveriam andar em paralelo";
- "Definir o padrão que caracteriza o hidrogênio de baixo carbono";
- "Tecnologias para o Uso de hidrogênio; Armazenamento do H2; Eletrolisadores mais eficientes";
- "Avanço tecnológico, segurança, regulação, preço/ custo de produção, infraestrutura";
- "Sem investimento em P&D o Brasil dependerá de importação de tecnologia e produtos estrangeiros. A regulamentação desta alternativa é complexa, mas necessária";
- "Incentivos para iniciar o setor";
- "Política pública de incentivo ao consumo";
- "São necessários, pelo menos, mais incentivo à pesquisa e ao desenvolvimento tecnológico, uma maior preocupação com a implantação de uma

infra-estrutura de produção transporte e distribuição de hidrogênio e, evidentemente, um planejamento adequado para a adoção gradual desse tipo de combustível”;

- ”Regulação e políticas públicas capazes de proporcionar demanda e consequentemente criação de um mercado”;
- ”Desenvolvimento de *offtakers*. Transição na mobilidade”;
- ”Desenvolvimento de pesquisa e de um ambiente que propicie viabilidade financeira para projetos de hidrogênio verde”;

A terceira pergunta, direcionada ao estado do Paraná, questionou: ”Caso saiba de alguma ação pública bem-sucedida relacionada ao hidrogênio verde, que possa ser aplicada no Paraná, por favor, cite-a.” A seguir, encontram-se as respostas:

- ”A única experiência que eu tomei conhecimento foi o projeto da Sanepar para tratamento de lodo e produção de hidrogênio em caráter de pesquisa e desenvolvimento. Entendo que houve suporte governamental para viabilizar o projeto, e que a ”rota” encontrada parece muito promissora, não tratando-se de pirólise da biomassa, mas sua biodigestão e posterior reforma a vapor do biometano, que é uma etapa cuja maturidade tecnológica já aconteceu. Me parece brilhante do ponto de vista de estratégia e gestão de riscos do projeto”;
- ”Incentivos fiscais, definição de uma ZPE, política de fomento ao desenvolvimento de *hubs* e *valleys* de hidrogênio”;
- ”O governo do estado está elaborando seu plano de ação com itens primordiais para implantação bem sucedida. Mais umas semanas para ser divulgado”;
- ”Nos EUA tem incentivo para hidrogênio de acordo com a taxa de emissões da fonte, da do até 3 dólares por kg por 10 anos. Também tem a redução de impostos dos equipamentos”;
- ”Exemplo do que está sendo feito no Ceará com a união do governo com a academia e o setor privado
- Criar demanda de consumo local a partir de projetos público privados. Buscar as ações dos maiores *players* do H2V e aplicar a realidade local. Os países que estão desenvolvendo os maiores projetos de produção de hidrogênio verde são: Austrália, Alemanha, Holanda, China, Arábia Saudita e Chile”;

- "Investimentos realizados no *hub* do Pecém (CE), que tem progredido tanto nas questões de regulamentação quanto na assinatura de M.O.U's";
- "O Plano Nacional do Hidrogênio (PNH2) tem buscado concentrar as discussões e parametrização para as políticas envolvendo o hidrogênio no Brasil. Em nível estadual, a regulamentação da Lei nº 21.454 contribuirá para o avanço do tema";
- "O Paraná tem uma grande produção de energia hidrelétrica que lhe atribui uma matriz energética extremamente limpa e renovável, possibilitando a produção de H2 de baixa emissão de CO2, por meio do uso de eletrolisadores com essa energia hidrelétrica; possui uma das maiores disponibilidades e biomassa para produção do H2 por processos de fermentação, gaseificação ou pirólise, permitindo uma liderança nestes processos e que possibilitam o uso do H2 em larga escala e espacialmente melhor distribuída pelo Estado";
- "Uso de recursos de pesquisa do Ministério de Ciencia, Tecnologia e Inovação para estruturar pesquisas e laboratórios";
- "Política nacional de hidrogênio, P&D, planta piloto de produção";
- "A COPEL lançou recentemente edital de P&D em hidrogênio verde de biomassa. Na minha opinião, esta alternativa não é interessante, pois biocombustíveis já são uma alternativa para transporte e geração de energia. Hidrogênio de eletrólise é mais interessante quando associada à operação e planejamento do setor elétrico, por se tratar de alternativa para armazenamento de eletricidade de hidrelétricas sem reservatório (p. ex.: PCHs) e de fontes renováveis intermitentes (eólica e solar)";
- "Isenção de ICMS na energia para produção de hidrogênio verde, criação de ZPEs";
- "Diferimento de ICMS na compra de energia elétrica renovável pelo produtor de hidrogênio; licenciamento ambiental simplificado para produção de h2, amônia, metanol e combustíveis sustentáveis de aviação sempre que usem fontes renováveis de energia".